Die begriffliche Struktur der Physik

G. Falk, Institut für Didaktik der Physik, Universität Karlsruhe

1. Wissenschaft als begriffliche Fassung der Erfahrung

Wenn wir von der Physik als Wissenschaft sprechen, meinen wir einen Wissens- und Erfahrungsschatz über die Natur, den der Mensch im Lauf seiner Geschichte angesammelt und in den letzten 300 Jahren mit großem Erfolg systematisiert hat. Die "heutige Physik" ist nichts weiter als das, was sich da bis heute an Wissen angesammelt hat. Dieses Wissen liegt jedoch nicht einfach als Ansammlung einzelner Erfahrungen vor, sozusagen als willkürlich zusammengeschaufelter Haufen, der verwahrt und von Generation zu Generation weitergegeben wird, noch liegt es vor wie eine wohlgeordnete Bibliothek. Es wird vielmehr auf eine Weise verwahrt und weitergegeben, die viel kunstvoller ist als die beste Bibliothek, und die es außerdem erlaubt, es ständig präsent zu halten, es also davor zu bewahren, in den Bibliothekskeller abgeschoben und über kurz oder lang vergessen zu werden. Statt die Erfahrungen als Einzelfakten zu registrieren, werden ganze Bündel von Erfahrungen zusammengefaßt und durch ein kalkülartiges, begriffliches Verfahren festgehalten: Man erfindet Begriffe und verbindet diese nach Regeln so miteinander, daß sich in diesem Verbindungsschema all das niederschlägt, was man an den Erfahrungen für wesentlich, das heißt für unerwartet, bemerkenswert hält. Der Physiker nennt das eine *Theorie.*

Diese Art des Erfassens unseres Erfahrungsmaterials mit Hilfe von Begriffen und Operationsregeln für diese Begriffe, also durch eine Theorie, hat gegenüber auch dem ordentlichsten Stapeln entscheidende Vorteile:

– Große Bündel von Erfahrungen lassen sich in einfache, überschaubare Regeln komprimieren.

– Neue, das heißt bisher nicht gemachte Erfahrungen lassen sich aus den Regeln als Erwartungen deduzieren und in der Realität nachprüfen. Das ist gleichzeitig eine Zuverlässigkeitsprüfung der Theorie, nämlich ein ständiges Versichern, wie weit den aus ihr gefolgerten Erfahrungen zu trauen ist.

– Die Erfahrungen lassen sich auf diese Weise einfach weitergeben, und zwar dadurch, daß man ein formalisiertes System von Begriffen und Operationsregeln vermittelt.

– Schließlich lassen sich Erfahrungen auf diese Weise sogar quantitativ, das heißt mit einer Unterscheidungsschärfe fassen, die wir im täglichen Leben nicht gewöhnt sind.

Eine physikalische Theorie ist somit nichts anderes als eine Art Kurzschrift, in der das Buch unserer physikalischen Erfahrungen oder wenigstens Teile davon geschrieben sind. Dieses für die Wissenschaft typische Verfahren der Erfassung des Wissens der menschlichen Gemeinschaft ist übrigens, wie es scheint, nichts Einmaliges, sondern lediglich eine Art Fortentwicklung von Verfahren, mit denen der Mensch überhaupt Erfahrungen sich selbst bewußt und an seinesgleichen weitergebbar macht. Eine Erfahrung wird erst dadurch bewußt, daß sie als Entscheidung unter einer Auswahl von Möglichkeiten erscheint. Man begreift eine Erfahrung meist erst dadurch"richtig", daß sie eine Alternative zu einer anderen, sozusagen entgegengesetzten Erfahrung bildet. Das ist aber meist nur begrifflich möglich, denn die entgegengesetzte Erfahrung wird in der Realität ja gar nicht gemacht, sie wird nur als Möglichkeit gedacht, d.h. aus irgendwelchen Vorstellungen, also mehr oder weniger aus Begriffen abgeleitet. So wurde die Erhaltung der Energie erst zu einer bewußten Erfahrung und damit zu einem Gesetz, nachdem man ihr Gegenteil, nämlich die Konstruktion von perpetua mobilia, für denkbar hielt.

Wir wollen das Verfahren der begrifflichen Erfassung von Erfahrungen durch ein Beispiel verdeutlichen. Dieses Beispiel läßt sich als ein allerdings sehr vereinfachtes Modell einer physikalischen Theorienbildung ansehen. Wir denken uns dazu die Erfahrungen als eine Reihe von Zahlen gegeben, so daß jeder Erfahrung eine bestimmte ganze Zahl entspricht. Die Menge der Erfahrungen sei zum Beispiel die Zahlenmenge

$$1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, l0, 12, 16, 17, 20, 24, 32,... \qquad (1)$$

Das Problem der Theorienbildung, also der begrifflichen Fassung der Erfahrungen, entspricht nun der

Aufgabe, die Zahlen dieser Menge nicht wie in der Reihe (1) durch einzelnes Aufweisen zu bezeichnen, sondern durch eine Theorie. Das gelingt zum Beispiel recht einfach, wenn man sich auf die Teilmenge der ersten sechs Zahlen beschränkt. Eine kalkülmäßige Charakterisierung, also die Theorie, lautet dann: "Bilde von 1 ausgehend die ganzen Zahlen". Bis zur Erfahrung 6 geht diese Theorie gut. Ihre weitere Voraussage, daß auch 7 eine richtige Erfahrung ist, trifft indessen nicht zu. Die Theorie ist an die Grenze ihrer Brauchbarkeit gestoßen. Damit erhebt sich die Frage nach einer besseren Theorie. Diese muß überall dort, wo die erste Theorie zu richtigen Resultaten geführt hat, also von 1 bis 6, dasselbe leisten wie die erste Theorie. Außerdem muß sie aber zu richtigen Resultaten bei der Fortsetzung der Zahlenreihe führen.

Als neue Theorie bietet sich an: "Bilde von 1 ausgehend, die ganzen Zahlen bis 6, sowie deren Produkte mit Potenzen von 2". Wie man sieht, scheint diese Theorie zu stimmen, sie liefert alle hingeschriebenen Zahlen mit Ausnahme der Erfahrung 17. Eine simple Möglichkeit der Vervollständigung der Theorie bestünde nun darin, die 17 einfach zur Theorie hinzuzufügen. Ein solches Vorgehen würden wir indessen, anscheinend durch ein starkes begriffliches Bedürfnis gesteuert, als unbefriedigend empfinden und zweifellos eine Theorie vorziehen die auch die 17 als Resultat eines begrifflichen Schemas liefert, selbst wenn sie es um den Preis einer Verkomplizierung tut. Eine derartige Theorie wäre zum Beispiel: "Nimm die Primzahlen, die sich in der Form $2n + 1$ mit $n = 0, 1, 2,...$ darstellen lassen, sowie deren Produkte mit beliebigen Potenzen von 2".

Hier tritt offensichtlich ein neuer Begriff auf, nämlich der der Primzahl, der sicher eine Komplizierung darstellt. Immerhin liefert diese Theorie aber gerade die in (1) angegebenen Zahlen. Ob sie indessen auch die Zahlen der Reihe noch liefern würde, wenn die Reihe fortgesetzt wird, ist und bleibt ungewiß. Diese Frage läßt sich immer nur soweit entscheiden, wie die zu der Reihe (1) gehörigen Zahlen (Erfahrungen) wirklich vorliegen.

Nun lassen sich die Zahlen der Reihe (1) auch durch eine scheinbar ganz andere, d.h. mit anderen, nämlich geometrischen Begriffen arbeitende Theorie gewinnen. Diese Theorie lautet folgendermaßen: "Gewinne diejenigen Einteilungen eines Kreises in kongruente Stücke, die sich unter ausschließlicher Verwendung von Zirkel und Lineal konstruieren lassen". Die unter dieser Bedingung möglichen Kreisteilungen sind in Abb. 1 angegeben.

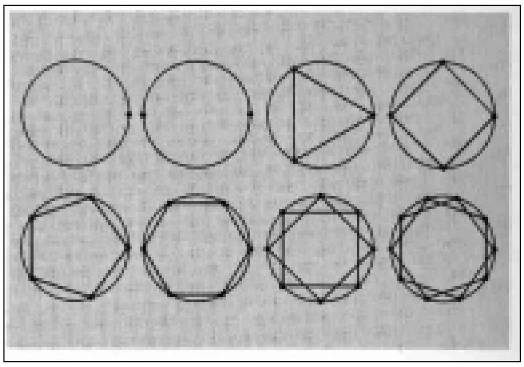

Abb. 1 Darstellung der Zahlenfolge (1) als Kreisteilungen mit Zirkel und Lineal

Der Mathematiker weiß, daß man so ebenfalls die Zahlen der Reihe (1) erhält und zwar in der Anzahl der Teilungspunkte des Kreisumfafangs. Für die Zahlen 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24,... ist das trivial, nicht jedoch für die 5 und damit für die daraus durch Verdopplung entstehende 10, und außerordentlich schwierig ist es zu zeigen, daß auch die 17 darunter vorkommt.

Das Beispiel zeigt, daß die Zahlen der Reihe (1) sich auf zwei begrifflich ganz verschiedene Weisen darstellen lassen. Soll man diese beiden Darstellungsweisen nun *verschiedene Theorien* nennen oder nur *begrifflich verschiedene Fassungen derselben Theorie?* Jeder Aussage der ersten begrifflichen Fassung läßt sich, wie eine genauere Analyse zeigt, eine Aussage der zweiten zuordnen und umgekehrt jeder der zweiten eine der ersten. Die beiden begrifflich verschiedenen Fassungen lassen sich somit umkehrbar-eindeutig aufeinander abbilden. Sie stehen zueinander in einem ganz ähnlichen Verhältnis wie jede von ihnen zu der Menge der "Erfahrungen" (1). Da die eine nicht nur ebenso gut ist wie die andere, sondern sogar dasselbe tut wie die andere, wollen wir sie nicht zwei verschiedene Theorien nennen, sondern zwei verschiedene Darstellungen *derselben* Theorie. Diese Festsetzung hat zur Folge, daß eine Theorie unterschieden werden muß von den begrifflichen Mitteln, mit denen sie dargestellt wird. Das bedeutet zwar eine Erschwerung des Verständnisses dessen, was eine Theorie ist, aber dieser Nachteil wird voll kompensiert durch die Vorteile, die diese Auffassung für ein tieferes Verständnis der historischen Entwicklung der Physik bietet.

2.Der Unterschied zwischen der inneren Struktur einer Theorie und ihrer begrifflichen Fassung

Das letzte Beispiel zeigt, daß die begriffliche Fassung einer Theorie von ihrer inneren Struktur zu unterscheiden ist. Wie wir gesehen haben, läßt sich dieselbe Theorie mittels ganz unterschiedlicher Begriffe formulieren, nämlich einmal mit Hilfe der Begriffe “Primzahl einer bestimmten Form” sowie “Produktbildung mit Potenzen von 2”, zum anderen mit den geometrischen Begriffen “Konstruktion mit Zirkel” und “Konstruktion mit Lineal”. Die Mathematik kennt viele derartige Beispiele. Das ist leicht einzusehen, ja sogar zu erwarten, wenn man eine Theorie von Seiten ihres axiomatischen Aufbaus betrachtet. Mathematisch gesehen ist eine Theorie nichts anderes als eine Menge von Sätzen, von Theoremen. Denkt man sich nun eine Teilmenge der Sätze einer Theorie so ausgewählt, daß alle Sätze der Theorie sich aus denen der Teilmenge mit den (als gegeben vorausgesetzten) Mitteln des logischen Schließens herleiten lassen, so nennt man diese Teilmenge ein Axiomensystem der Theorie.

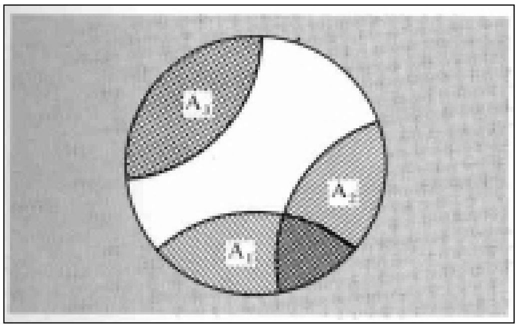

Abb. 2 Diagrammatische Darstellung einer Theorie als Punktmenge und ihrer Axiomensysteme bzw. ihrer Systeme von Fundamentalbegriffen durch Teilmengen

Abb. 2 veranschaulicht das diagrammatisch. Die Theorie sei durch die Menge der Punkte im Inneren eines Kreises dargestellt. Axiomensysteme der Theorie sind dann Teilmengen A_1, A_2, A_3, die in Abb. 2 durch unterschiedliche Schraffur gekennzeichnet sind. Das Diagramm zeigt sofort die hier auftretenden Möglichkeiten: Es ist damit zu rechnen, daß dieselbe Theorie mittels recht unterschiedlicher Axiomensysteme erzeugt werden kann. Bedenkt man, daß die Sätze verschiedener Axiomensysteme im allgemeinen von unterschiedlichen begrifflichen Dingen handeln, so entsprechen unterschiedliche Axiomensysteme begrifflich unterschiedlichen Aufbauweisen der Theorie.

In der Physik trat der Unterschied zwischen innerer Struktur einer Theorie und ihrer begrifflichen Fassung zum ersten Mal in Erscheinung bei der Entdeckung der Quantenmechanik. Nahezu gleichzeitig wurde diese Theorie als “Matrizenmechanik” (*Heisenberg, Born, Jordan*) und als “Wellenmechanik” (*Schrödinger*) gefunden. Die erste dieser Fassungen benutzt wesentlich den Begriff der “Matrix” und die aus der Mathematik bekannten algebraischen Rechenoperationen für Matrizen, in der zweiten spielt dagegen der Begriff der “Wellenfunktion” mit den vertrauten analytischen Operationen des Differenzierens und Integrierens eine grundlegende Rolle. Wegen der Verschiedenheit der Begriffe, in denen die Theorie formuliert war, glaubte man zunächst, verschiedene Theorien vor sich zu haben. Als sich jedoch herausstellte, daß beide Theorien in den seinerzeit entscheidenden Problemen dieselben Aussagen lieferten, verdichtete sich der Verdacht, daß es sich vielleicht um *dieselbe* Theorie handeln könne, nur in begrifflich unterschiedlichen Fassungen. Tatsächlich gelang es *Schrödinger* sehr bald, das zu beweisen. Seitdem spricht man nur noch von verschiedenen *Darstellungen* derselben Theorie “Quantenmechanik”, noch wichtiger aber: Seitdem weiß man, daß auch in der Physik zwischen einer Theorie, genauer der inneren Struktur einer Theorie und ihrer begrifflichen Fassung zu unterscheiden ist. Abb. 2 kann daher nicht nur dazu dienen, sich klarzumachen, was unterschiedliche Axiomensysteme einer mathematischen Theorie sind, sondern auch, was unterschiedliche begriffliche Aufbauweisen derselben Theorie in der Physik bedeuten.

3. Struktur-verwandte Theorien

Wenn man von der Physik einer bestimmten historischen Periode spricht, meint man stets den zeitgenössischen Stand der physikalisch-wissenschaftlichen Erfahrung, und zwar nicht einfach als Summe von Fakten, sondern in einer begrifflichen Fassung, als Theorie. Das gilt für die Physik des 18. Jahrhunderts ebenso wie für die des 19. Jahrhunderts oder die des 20., also die Physik unserer Zeit. In ihrer historischen Entwicklung besteht die Physik somit aus einer Aufeinanderfolge unterschiedlicher Theorien, d.h. unterschiedlicher Begriffssysteme, mit denen man jeweils die Erfahrungen über die Natur zu fassen suchte. Der Übergang von einer Theorie zur nächsten wurde und wird dabei meist als Einschnitt empfunden, als Bruch mit vergangenen Anschauungen, und so ist es kein Wunder, daß derartige Übergänge oft als wissenschaftliche Revolutionen, als Befreiung von Vorurteilen angesehen werden. Dennoch wird dabei leicht übersehen, daß die revolutionäre Seite des Übergangs gewöhnlich nur die begriffliche Fassung der Theorie betrifft, daß damit gleichzeitig jedoch eine erstaunliche Kontinuität der inneren Struktur der Theorie Hand in Hand geht. Da jede neue Theorie nämlich auch all jene Erfahrungen erfassen muß, die ihre Vorgängerin bereits richtig wiedergegeben hat, müssen neue und alte Theorie in einem inneren Verwandtschaftsverhältnis zueinander stehen, sie müssen gemeinsame innere Strukturzüge haben. Zwei historisch aufeinanderfolgende Theorien stehen deshalb in einem merkwürdigen Verhältnis zueinander: In ihrem begrifflichen Aufbau erscheint die neue Theorie leicht als Überwinderin, oft gar als Widersacherin der alten, ihrer inneren Struktur nach dagegen als ihre Tochter. Diese sich scheinbar widersprechenden Seiten des wissenschaftlichen Fortschreitens werden umso deutlicher, je besser die begriffliche wie auch die strukturelle Seite einer Theorie verstanden ist.

Als kalkülisierte Fassung eines Erfahrungsbestands präsentiert sich eine Theorie zunächst stets in irgendeiner begrifflichen Aufbauweise. Es ist daher im allgemeinen sehr schwierig, wenn nicht gar unmöglich, die innere Struktur einer Theorie sofort zu erkennen. Meist erfordert das eigehende Untersuchungen und relativ lange Entwicklungen; oft wird die Sachlage erst klar, wenn begrifflich andere Darstellungen derselben Theorie ans Tageslicht kommen. Dann wird im allgemeinen auch erst das faßbar, was wir die innere Struktur der Theorie nennen.

Von der inneren Struktur her gesehen besteht nun jede historische Weiterentwicklung, also jede Ersetzung der Theorie durch eine neue darin, daß gewisse Strukturzüge der alten weggelassen und dafür in logisch widerspruchsfreier Weise andere, neue Strukturzüge zugefügt werden. Das gilt für die stillen, stetigen Fortschritte ebenso wie für die spektakulären Schritte, die wissenschaftlichen Revolutionen. Von der inneren Struktur her gesehen sind diese zwei Arten des Fortschreitens deshalb kaum zu unterscheiden.

Anders sieht sich das dagegen von Seiten der begrifflichen Fassung der Theorie aus an. Da sind die beiden Arten des Fortschreitens deutlich unterschieden: Bleibt das Begriffssystem der Theorie im wesentlichen unangetastet und wird es nur ergänzt, so spricht man von einer stetigen Weiterentwicklung, wird es dagegen entscheidend abgeändert oder gar durch ein anderes ersetzt, so spricht man von einer wissenschaftlichen Revolution. Ob der Übergang von einer Theorie zu ihrer Nachfolgerin als Revolution empfunden wird oder als mehr oder weniger stetige Weiterentwicklung, hängt also von der begrifflichen Fassung der Theorie ab wie auch von der ihrer Nachfolgerin. Der Schritt wird als um so revolutionärer empfunden, je mehr man als Fundamentalbegriffe der älteren Theorie solche gewählt hatte, die durch die Strukturänderung betroffen werden. Umgekehrt wird derselbe Schritt umso stetiger erscheinen, je mehr beim Aufbau der älteren Theorie als Fundament bereits solche Begriffe gewählt worden sind, die von der Strukturänderung nicht oder nur wenig betroffen werden, die also auch in der neuen Theorie als Fundamentalbegriffe fungieren können. Man hat es daher im Prinzip in der Hand, denselben Entwicklungsschritt unserer physikalischen Erkenntnis durch Wahl der Fundamentalbegriffe mehr als Revolution oder mehr als stetiges Fortschreiten erscheinen zu lassen. Im zweiten Fall erscheint der Entwicklungsschritt dem Lernenden leichter begreifbar, da sozusagen nur minimales Umlernen erforderlich ist.

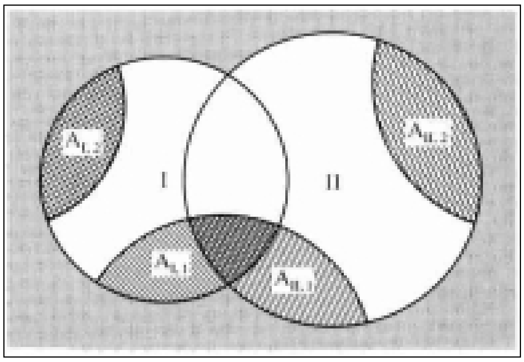

Abb. 3 Diagrammatische Darstellung zweier verwandter Theorien und ihrer unterschiedlichen Axiomensysteme bzw. Systeme von Fundamentalbegriffen

Auch die strukturelle Verwandtschaft zwischen Theorien läßt sich mit dem in Abb. 2 verwendeten diagrammatischen Verfahren beschreiben. Es leuchtet ein, daß zwei struktur-verwandte Theorien I und II durch Punktmengen mit nichtleerem Durchschnitt dargestellt werden (Abb. 3). Die Punkte des Durchschnitts von I und II repräsentieren dabei diejenigen Aussagen, die beiden Theorien gemeinsam sind. Je größer dieser Durchschnitt ist, umso größer ist die Verwandtschaft zwischen den beiden Theorien. Nun läßt sich jede der Theorien auf verschiedene Axiomensysteme gründen, das heißt in begrifflich unterschiedliche Fassungen bringen, so I etwa auf $A_{I,1}$ oder $A_{I,2}$, die Theorie II entsprechend auf $A_{II,1}$ oder $A_{II,2}$.

Hieraus folgt nun sofort, daß in den begrifflichen Fassungen $A_{I,2}$ und $A_{II,2}$ der Übergang von der Theorie I zur Theorie II wie ein Neuanfang, d.h. als “Revolution” erscheinen muß, die alle Fundamentalbegriffe umstürzt. Benutzt man als Basis der Theorie I dagegen $A_{I,1}$, so läßt sich der Übergang I→II durch relativ kleine Änderungen erzielen, da bei dem Übergang ein erheblicher Teil von $A_{II,1}$, also ein Teil der Axiome und damit auch der Fundamentalbegriffe der Theorie I erhalten bleibt. Um nämlich aus $A_{I,1}$ die Menge $A_{II,1}$, das begriffliche Fundament für den Aufbau der Theorie II, zu erhalten, brauchen nur einige der Axiome aus $A_{I,1}$ durch neue ersetzt zu werden, nämlich durch diejenigen, die zwar $A_{II,1}$, nicht gleichzeitig aber auch $A_{I,1}$ angehören.

Ein berühmtes Beispiel eines Theorienpaares, das in dem hier erklärten Sinn struktur-verwandt ist, bilden die euklidische und die nicht-euklidische Geometrie. Ein anderes uns hier mehr am Herzen liegendes Beispiel sind klassische Physik und Quantenphysik, die allerdings meist nur unter dem spezielleren Gesichtswinkel der Verwandtschaft von klassischer Mechanik und Quantenmechanik gesehen werden. Um diese beiden Theorien und ihr Verhältnis zueinander geht es in den nachfolgenden Betrachtungen.

4. Die gewohnte Vormachtstellung der Mechanik und ihre didaktische Konsequenz

Wenn wir von der heutigen Physik sprechen, meinen wir die gegenwärtige begriffliche Fassung unseres Erfahrungsschatzes, also das, was man gern mit den Schlagworten “Quantenmechanik” und “Relativitätstheorie” bezeichnet. Zusammengenommen dürften diese beiden Theorien wohl als die Repräsentanten des physikalischen Wissens unserer Zeit anzusehen sein. Daß sie zwei Theorien sind und nicht eine einzige, mag als nachteilig empfunden werden – es fehlt auch nicht an Bemühungen, diesem Mangel abzuhelfen – aber das ist im Augenblick von sekundärer Bedeutung. Wichtiger ist die Relation beider Theorien, insbesondere der Quantenmechanik zu dem, was wir “klassische Physik” nennen, nämlich der Physik des 19. Jahrhunderts. Die diese Periode der Physik kennzeichnende Theorie ist im wesentlichen die *Newtonsche* Mechanik in der Form, die ihr Newton sowie die Mathematiker des 18. und 19. Jahrhunderts gegeben haben. Ergänzt zu denken ist die Mechanik um die *Maxwellsche* Theorie, die die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen den als mechanische Massenpunkte gedachten Objekten beschreibt.

In den Jahrhunderten ihrer wissenschaftlichen Herrschaft war die Mechanik zu solch imponierender Größe entwickelt worden, daß man in ihr allerdings mehr sah als nur ein begriffliches Mittel, um die physikalische Erfahrung zu fassen. Nicht wenigen erschien sie und erscheint sie noch heute als die eigentliche Wirklichkeit, die tiefere Wahrheit über unsere Welt. Und als die Atomistik in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts ihren wissenschaftlichen Siegeszug antrat, tat sie es wie selbstverständlich im Gewand der Mechanik. Die Atome waren unveränderliche Massenpunkte im Sinn der Mechanik, die sich Kräfte aufeinander ausübend, im leeren Raum bewegen. Und als die Atome ihre Unzerstörbarkeit und damit die Unbegrenztheit ihres individuellen Lebens an elementarere Teilchen, wie Elektron und Proton, abtreten mußten, übernahmen diese “Elementarteilchen” die Rolle der unveränderlichen Massenpunkte, aus denen alles besteht. Die Vorherrschaft der Mechanik stand so sehr außer Frage, daß es schien, als gäbe es gar keine andere Möglichkeit, die Natur zu verstehen, als wäre die Welt in ihrem tiefsten Grund eben Mechanik. An dieser Überzeugung haben paradoxerweise auch Relativitätstheorie und Quantenmechanik nicht viel geändert. Die eine hat zwar die Überzeugung von der Absolutheit von Raum und Zeit erschüttert, aber die übrigen Begriffe der Mechanik und die sie stützenden Überzeugungen unangetastet gelassen; und die andere sagt schon durch ihren Namen, wie sie gesehen wird, nämlich als Mechanik, wenn auch als modifizierte,“quantisierte” Mechanik.

So gesehen scheint es fast, als wäre der Übergang von der Physik des 19. Jahrhunderts zur Quantenphysik des 20. gar keine wissenschaftliche Revolution gewesen. Äußert sich hier vielleicht die Kontinuität der inneren Struktur, wie die vorstehenden Überlegungen sie erwarten lassen? Wenn das der Fall wäre, so ist nicht zu verstehen, warum die Theorien unseres Jahrhunderts demjenigen, der in der Begriffswelt der klassischen Mechanik aufgewachsen ist, so viel Schwierigkeiten bereiten. Tatsächlich ist hier nicht die Kontinuität der inneren Struktur der klassischen Theorie und ihrer Nachfolger im Spiel, sondern die Hartnäckigkeit liebgewonnener philosophischer Überzeugungen, die in ihrer Naivität von Seiten der heutigen Physik indessen keine Stütze mehr finden.

Es besteht kein Zweifel, daß der Übergang von der klassischen Physik zur Quantenphysik von nunmehr drei Physikergenerationen als wissenschaftliche Revolution empfunden wird. Nach unseren Überlegungen muß das daran liegen, daß als Fundament der klassischen Physik vornehmlich Begriffe verwendet werden, die in der Quantenmechanik keine fundamentale Rolle mehr spielen, vielleicht gar nicht mehr vorkommen. Im Diagramm der Abb. 3 gesprochen, sind wir also gewohnt, die klassische Physik, das heißt die Theorie 1 mit Hilfe eines Begriffssystems zu fassen, das mehr der Teilmenge $A_{I,2}$ entspricht als der zweckmäßigeren Teilmenge $A_{I,1}$. Wenn es anders wäre, müßte der Übergang stetiger erscheinen als er es wirklich tut.

Für die Didaktik des Physikunterrichts hat das aber eine wichtige Konsequenz: Wird der gewohnte *Newtonsche* Aufbau der Mechanik als unabdingbar angesehen und ins Zentrum des Physikunterrichts gestellt, so errichtet der Unterricht selbst eine Hürde für ein einfaches Verständnis der Physik unseres Jahrhunderts. Die Bewältigung des Schritts von der klassischen zur heutigen Physik ist und bleibt dann mehr eine professionelle Aufgabe des einzelnen als die einer allgemeinen naturwissenschaftlichen Schulbildung. Unsere Überlegungen zeigen jedoch gleichzeitig einen Ausweg aus diesem Dilemma: Man sollte die Physik auf einem Begriffssystem aufbauen, das möglichst viele Begriffe enthält, die klassischer und heutiger Physik gemeinsam sind, im Diagramm der Abb. 3 also auf dem Durchschnitt der Mengen $A_{I,1}$ und $A_{II,1}$. Welches aber sind die Begriffe, die in diesem Durchschnitt liegen?

5. Begriffliche Fassungen der klassischen Physik

Jedem Physiker sind die Fundamentalbegriffe des Newtonschen Aufbaus der Mechanik so vertraut, daß sie hier einfach angeführt werden können. Die Mechanik beruht auf der Grundidee, daß Bewegung – als wäre es gar nicht anders denkbar – Bewegung individueller Körper ist. Bewegung wird als stetige Aufeinanderfolge räumlicher Lagen, der Orte desselben Körpers begriffen. Diese Auffassung von Bewegung setzt voraus, daß der Körper in seinen verschiedenen Lagen als derselbe Körper wiedererkennbar, daß er ein Individuum ist. Die Fundamentalbegriffe des Newtonschen Aufbau der Mechanik sind so gewählt, daß sie geradezu als begriffliche Fassung dieser Idee erscheinen:

(1) Der Raum als die Gesamtheit der möglichen Orte $\boldsymbol{r}$ des Körpers,

(2) Die Zeit t als Mittel zur Aufreihung der Orte des Körpers zu seiner Bahn,

(3) Die Masse m als charakteristische Konstante des Körpers,

(4) Die Kraft $\boldsymbol{F}$ als Ausdruck aller Möglichkeiten der Einwirkung der Außenwelt (d.h. all dessen was nicht zu dem betrachteten Körper selbst zählt) auf den Körper, genauer auf die Bewegung des Körpers.

Der Aufbau der Mechanik vollzieht sich so, daß jedem dieser Begriffe eine Variable im Sinn der Mathematik zugeordnet wird: Raum und Kraft werden je durch ein Kontinuum von Tripeln reeller Zahlen repräsentiert, Zeit und Masse je durch ein 1-dimensionales reelles Kontinuum. Mit diesen Variablen werden nun andere, von $\boldsymbol{r}$, t, m, $\boldsymbol{F}$ abhängige Variablen, d.h. andere physikalische Größen erklärt und typische Zusammenhänge zwischen diesen entweder aus ihrer mathematische Bildung hergeleitet oder, wenn die Freiheit besteht, gerade so postuliert, daß sie reale Erfahrungen richtig wiedergeben. Mathematisch läuft das auf die Konstruktion von Differentialgleichungen 2. Ordnung, der Bewegungsgleichungen, hinaus, deren Lösungen die Bahnen der Körper repräsentieren. Das Verfahren ist so bekannt, daß wir nicht näher darauf einzugehen brauchen.

Obwohl in der klassischen Physik der Unterschied zwischen innerer Struktur einer Theorie und ihrer begrifflichen Fassung nie klar bewußt wurde, war er doch keineswegs völlig unbekannt. So wußte man, daß sich die Mechanik als Variationsproblem formulieren läßt, also auf eine Weise, in der ganz andere Begriffe fundamental sind als im *Newtonschen* Aufbau. Noch heute ist es üblich, in den Vorlesungen über klassische Mechanik verschiedene Darstellungsweisen der Mechanik vorzustellen, so die nach *Lagrange* und *Hamilton* benannten theoretischen Fassungen. Allerdings geschieht das meist mehr unter dem Gesichtswinkel, angepaßte Lösungswege für bestimmte Problemtypen zu entwickeln als begrifflich unterschiedliche Aufbauweisen der Mechanik zu gewinnen. So sucht man vergeblich nach einer systematischen Behandlung der Frage, ob sich die gesamte Mechanik nicht direkt als *Hamiltonsche* Theorie, d.h. unter Verwendung der Begriffe *Ort, Impuls, Zeit* und *Energie* als Fundamentalbegriffe aufbauen läßt, anstatt erst den *Newtonschen* Aufbau zu vollziehen und dann unter Benutzung komplizierter mathematischer Methoden neue und in gewisser Weise allgemeinere Formen der Bewegungsgleichungen herzuleiten.

Zusammenfassend können wir also sagen: Wenn auch im Bewußtsein des Physikers die *Newtonsche* Aufbauweise der klassischen Mechanik so vorherrscht, daß sie geradezu mit der Mechanik identifiziert wird, gibt es doch deutlich unterschiedene Aufbauweisen der klassischen Mechanik, in denen jeweils andere Größen als Fundamentalbegriffe fungieren. Es wird sich zeigen, daß eine Aufbauweise den Vorzug verdient, die die Größen Energie und Impuls als Fundamentalbegriffe verwendet.

6. Begriffliche Fassungen der Quantenmechanik

Wie wir wissen, gibt es für die Quantenmechanik sozusagen von Geburt an verschiedene Aufbauweisen. Wie sehen die Fundamentalbegriffe dieser Aufbauweisen oder wenigstens der geläufigsten von ihnen, der "Wellenmechanik" aus? Leider genügt es zur Beantwortung dieser Frage nicht, einfach ein Lehrbuch aufzuschlagen. Gewöhnlich steht nämlich das mathematische Werkzeug so dominierend im Vordergrund, daß der Blick auf das, worum es hier geht, verstellt wird. Nicht selten wird das mathematische Werkzeug sogar selbst zum sprachlichen Verständigungsmittel, die Sprache zum Jargon. Noch irritierender aber ist, daß die sprachlichen Wendungen, soweit sie nicht das mathematische Werkzeug betreffen, meist den Eindruck erwecken, als würde an der Grundidee der klassischen Mechanik, nämlich alle Naturvorgänge als *Bewegung kleiner Körper* zu begreifen, nicht gerüttelt. Es ist von Teilchen die Rede, die Lage und Impuls haben, so als wären es Körper im Sinne der *Newtonschen* Mechanik. Zwar wird versichert, daß Lage und Impuls nun keine Variablen mehr seien, sondern "Operatoren", aber das bedeutet meist nicht viel mehr als wieder einen Hinweis auf das mathematische Werkzeug. Selbst beim Mehrkörperproblem, bei dem endgültig klar wird, daß die Quantenmechanik die Idee des bewegten Individuums, die für den Newtonschen Aufbau der Mechanik eine so wichtige Rolle spielt, grundsätzlich in Abrede stellt, wird meist so schnell wie möglich wieder die Flucht in den mathematischen Apparat angetreten, nämlich in die Symmetrien der Wellenfunktion gegenüber Permutationen "identischer Teilchen".

Jeder Physiker weiß jedoch, daß in keiner Darstellung der Quantenmechanik, gleichgültig wie klassisch ihr Vokabular sein mag, die in der klassischen Physik so zentrale Größe "Kraft" vorkommt und mit ihr auch nicht die Größen "elektrische Feldstärke" und "magnetische Feldstärke". Unbezweifelbar steht in allen Darstellungen die Energie im Vordergrund. Das Hauptziel der rechnerischen Bemühungen ist die Bestimmung ausgezeichneter, quantisierter Werte der Energie eines Atoms, Moleküls, Kristalls, allgemein eines physikalischen Systems. Stets geht es um die "Eigenwerte" der Energie des Systems. Daneben gelten die Bemühungen noch den Eigenwerten des Drehimpulses, manchmal noch denen des Impulses. Niemals aber geht es um Eigenwerte des Orts, der Geschwindigkeit, der Kraft, kurzum all jener Größen, die in der klassischen Physik die Rolle der Fundamentalbegriffe spielen.

Eine Sicht aus größerer Distanz, die den Wald auch trotz der vielen Bäume noch erkennen läßt, gewinnt man, wenn man die mathematischen Schritte als Behandlung von Aufgaben sieht, die aus einer der Theorie zugrundeliegenden Idee resultieren, so wie sich die mathematischen Schritte der klassischen Mechanik, nämlich die Aufstellung und Lösung von Differentialgleichungen 2. Ordnung, der Bewegungsgleichungen, aus der Idee des bewegten individuellen Körpers verstehen lassen. Die grundlegende Idee der Quantenmechanik ist die, alle Naturvorgänge als *Übergänge zwischen Zuständen* physikalischer Systeme zu verstehen. Der *Zustand* ist deshalb ein zentraler Begriff der Theorie. Er ist etwas Unveränderliches, etwas in jeder Hinsicht Festgelegtes. In einem Zustand hat jede physikalische Größe einen bestimmten, festen Wert. Es ist sinnlos, nach dem zeitlichen Verhalten oder dem Schicksal eines Zustands zu fragen. Der Zustand ist seiner Natur nach zeitlos oder, wenn man unbedingt die Zeit ins Spiel bringen will, zeitlich unbegrenzt; er spielt etwa die Rolle, die sonst gern dem zeitlich unveränderlichen, "ewigen" Elementarteilchen zugedacht wird. Ist ein System in einem Zustand, so passiert nichts an oder mit ihm. Jeder Vorgang, jedes Geschehen ist ein *Übergang* von einem Zustand in einen anderen. Bei einem Übergang ändern sich mit dem Zustand die Werte physikalischer Größen.

Wenn man die Vorgänge in der Welt als Übergänge zwischen Zuständen verstehen will, liegt das primäre Anliegen zwangsläufig erst einmal darin, die an irgendwelchen Vorgängen beteiligten Zustände in die Hand zu bekommen. Diesem Ziel dienen die mathematischen Bemühungen der Quantenmechanik in erster Linie. Die Eigenwertprobleme sind nichts anderes als das Aufsuchen von Zuständen die an einer ins Auge gefaßten Klasse von Vorgängen, etwa den optischen Emissions- oder Absorptionsvorgängen eines in der Gasphase oder in fester Form vorliegenden Stoffs, beteiligt sind. Das geschieht dadurch, daß man angibt, welche Werte bestimmte physikalische Größen in den fraglichen Zuständen haben. Das ist der Sinn der "Quantenzahlen". Die Größen, deren Werte mittels der Quantenzahlen angegeben werden, sind, wie schon gesagt: Energie immer, Drehimpuls meistens, Impuls manchmal, Ort, Geschwindigkeit, Kraft dagegen nie!

Irritierend mag in diesem Zusammenhang sein, daß in der bekanntesten Darstellung der Quantenmechanik Impuls und Ort mathematisch gleichberechtigt erscheinen. In ihr ist es jederzeit möglich, zwischen der sogenannten Orts- und der Impulsdarstellung hin- und herzuwechseln. Im elementaren Bereich äußert sich das darin, daß z.B. die Unschärferelation $\Delta x\, \Delta p_x \geq \hbar/2$ in x und p_x symmetrisch ist. Das wiederum verführt dazu, die Unschärferelation wie folgt zu lesen: Die Unschärfe der Impulskomponente p_x wie auch des Orts

x kann zwar beliebig klein gemacht werden, aber nicht gleichzeitig für beide Größen. Abgesehen davon, daß das Wort "gleichzeitig", das ja in der Relativitätstheorie eine wichtige Rolle spielt, in diesem Zusammenhang leicht physikalisch falsche Assoziationen provoziert, verschleiert diese Interpretation der Unschärferelation einen wichtigen physikalischen Unterschied zwischen Impuls und Ort, der vom mathematischen Werkzeug allein her nicht zu begreifen ist. Während es nämlich im allgemeinen möglich ist, den Impuls eines physikalischen Systems beliebig scharf zu machen, ohne dabei den besonderen Charakter des Systems zu zerstören, ist es nicht möglich, seinen Ort scharf festzulegen, ohne dabei das System bis zur Unkenntlichkeit zu verändern. Das liegt daran, daß mit einer Verkleinerung von Δx eine Vergrößerung von Δp_x und damit eine unaufhaltsame Vergrößerung der Energie des Systems verbunden ist. In Gegensatz zu beliebigem Verschärfen des Impulses bedeutet beliebige Verschärfung des Orts über alle Grenzen wachsende Energiezufuhr an das System, und das hat zur Folge, daß das System "aus den Nähten platzt". Unter Verwendung des Zustandsbegriffs ist das alles sehr klar und einfach zu formulieren: Es gibt zwar Zustände mit scharfen Werten des Impulses, aber keine Zustände mit scharfen Werten des Orts. Physikalisch sind Impuls und Ort eben keineswegs gleichberechtigt.

7. Die mengenartigen Größen als begriffliches Fundament der Physik

Die Betrachtungen der letzten beiden Abschnitte bestätigen noch einmal den am Ende des 4. Abschnitts gezogenen Schluß: Will man klassische und heutige Physik möglichst als begriffliche Einheit erscheinen lassen, so sind die Fundamentalbegriffe des *Newtonschen* Aufbaus dazu nicht geeignet. Besser wäre es, als Fundamentalbegriffe Größen zu wählen, die sowohl in der klassischen Physik als auch in der Quantenphysik unseres Jahrhunderts eine zentrale Rolle spielen. Die bisherigen Betrachtungen machen es plausibel, daß die Größen *Energie, Impuls* und *Drehimpuls* dazugehören. Aber sind das schon alle, oder gibt es noch andere, und läßt sich die Physik wirklich auf ihnen als Fundament aufbauen?

Schon bei der Entdeckung und Begründung der Quantenmechanik hatte es sich als vorteilhaft erwiesen, an die *Hamiltonsche* Fassung der klassischen Mechanik anzuknüpfen. In ihr spielen mit Energie und Impuls gerade Größen eine zentrale Rolle, die auch in der Quantenmechanik zu den Fundamentalgrößen gehören, und daher ist der Übergang von der *Hamiltonschen* Form der Mechanik zur Quantenmechanik einfacher zu vollziehen als von anderen Darstellungen der klassischen Mechanik. Berühmte wissenschaftliche Vorbilder wie *Diracs* "Principles of quantum mechanics" machen sich das in mehr oder weniger offensichtlicher Weise zunutze. Dennoch wollen wir diesen Weg nicht gehen, denn einmal führt er schnell in mathematische Details, zum zweiten aber – und das ist für uns wichtiger – nutzt er Vorstellungsgewohnheiten aus, die den Blick für das erschweren, was wir für die entscheidende Einsicht halten, nämlich: *Die mengenartigen, bilanzierbaren Größen sind es, die ein gemeinsames begriffliches Fundament von klassischer und moderner Physik abgeben.*

Hat man einmal erkannt, daß die zentrale Idee der Quantenphysik die ist, alle Naturvorgänge als Übergänge zwischen Zuständen zu begreifen, so liegt eigentlich nichts näher, als sich in der Geschichte der Physik nach analogen Beschreibungsweisen umzusehen. Man braucht nicht lange zu suchen, um zu erkennen, daß die *Thermodynamik* genau das Gewünschte tut. Auch sie beschreibt die Vorgänge in der Welt als Übergänge zwischen Zuständen, ja sie hat diese Beschreibungsweise überhaupt erfunden. Da das indessen zu einer Zeit geschah, als die Stetigkeit alles Naturgeschehens als selbstverständlich galt, wurden die in der Thermodynamik betrachteten Übergänge gewöhnlich in stetige Zustandsfolgen, in *Prozesse,* eingebettet. Für das gesamte Beschreibungsverfahren ist das jedoch unwichtig, es ist sogar eine unnötige Erschwerung. Entscheidend ist dagegen die Art und Weise, wie Zustand und Übergang in der Thermodynamik theoretisch gefaßt werden, nämlich: Der Zustand wird durch die Werte festgelegt, die bestimmte physikalische Standard-Größen in ihm haben, und der Übergang wird beschrieben durch die Differenzen der Werte der Standard-Größen in zwei Zuständen, im Endzustand und Anfangszustand des Übergangs. Diese Beschreibungsweise ist eine Art Buchführung, eine Bilanzierung physikalischer Größen, was wiederum nur dann sinnvoll ist, wenn diese physikalischen Größen *mengenartig* sind, wenn ein physikalisches System in jedem seiner Zustände also einen ganz bestimmten Betrag, eine bestimmte Menge jeder einzelnen dieser Größen enthält.

Es ist kein Zufall, daß diese Art Beschreibung der Natur gleichzeitig mit den beiden mengenartigen Größen Energie E und Entropie S Eingang in die Physik gefunden hat. Das Bilanzieren war dabei selbstverständlich, denn der 1. und 2. Hauptsatz sind ja nichts anderes als Aussagen über Bilanzen der Größen E und S bei beliebigen Vorgängen, d.h. bei *allen* Übergängen, die sich realisieren lassen. Von Anfang an empfand man deutlich, daß diese von der Thermodynamik entwickelte Art der Beschreibung eines Vorgangs eine besondere innere Stärke besitzt, daß sie gleichzeitig aber ganz anders war als die gewohnte, auf der Vorstellung der stetigen Bewegung individueller Körper beruhende mechanische Beschreibung der Welt. Zur Kennzeichnung dieses Unterschieds bürgerte sich das Wort "phänomenologisch" ein. Es sollte ausdrücken, daß es sich zwar um eine besonders sichere, schwer angreifbare Beschreibungsweise handelt, der aber das genauere Detail, nämlich die Kenntnis der mit jedem Vorgang nach Vorstellung der klassischen Mechanik verbundenen Bewegungsabläufe kleinster Teilchen, mangelt. Man hatte die Vorstellung, daß die phänomenologische Beschreibung nur den äußeren, allerdings sehr festgefügten Rahmen absteckt, der dann durch die "eigentliche", die mechanische Beschreibung der Details auszufüllen ist. Daß es sich dabei um nicht mehr als eine traditionelle philosophische Überzeugung handelt, brauchen wir nicht noch einmal zu betonen. Die Quantenmechanik zeigt zweifelsfrei, daß diese "phänomenologische" Beschreibung der Naturvorgänge alles andere ist als ein der Ausfüllung bedürftiger Rahmen: Sie hat sich als weit tragfähiger erwiesen als das, womit sie einst ausgefüllt werden sollte.

Das unmittelbare Resultat unserer Überlegungen ist einigermaßen überraschend: Von der inneren Struktur her gesehen ist die Quantenmechanik nicht so sehr die Nachfolgerin der Mechanik, als vielmehr der Thermodynamik. Beide Theorien, Thermodynamik wie Quantenmechanik, beruhen auf demselben Beschreibungsprinzip der Naturvorgänge, nämlich der Beschreibung mittels der Begriffe Zustand und Übergang. Wenn es also darum geht, die Quantenphysik als stetige Fortentwicklung der klassischen Physik erscheinen zu lassen, wäre das thermodynamische Beschreibungsverfahren der natürliche Ausgangspunkt. Entgegen der historischen Tendenz, die Thermodynamik als Teil der Mechanik erscheinen zu lassen, sie gar als "statistische Mechanik" zu begründen, wäre es vom Standpunkt einer begrifflich einheitlichen, kontinuierlichen Entwicklung der Physik daher konsequenter, umgekehrt die Mechanik in das thermodynamische Beschreibungsverfahren einzufügen, die Mechanik also als Spezialfall einer verallgemeinerten Thermodynamik, oder wie wir lieber sagen wollen, einer *allgemeinen Dynamik* erscheinen zu lassen. Kennzeichen dieser allgemeinen Dynamik ist es, Zustand und Übergang (= Zustandspaar), zum Zentrum der Beschreibung zu machen und Zustände wie Übergänge vollständig durch die Werte mengenartiger Größen und ihrer Bilanzen zu fassen. Mengenartig bedeutet dabei, wie wir noch sehen werden, daß die Größen im Raum verteilt sein und strömen können, nicht notwendig jedoch, daß sie einem allgemeinen Erhaltungssatz genügen. Daß es möglich ist, die Physik auf mengenartigen Größen aufzubauen, werden wir im folgenden deutlich machen. Daß es aber sogar auf eine sehr elementare und anschauliche Weise möglich ist, wird in den übrigen Aufsätzen dieses Heftes auseinandergesetzt.

8. Einige Regeln der allgemeinen Dynamik

Unsere Überlegungen machen verständlich, daß der Begriff der mengenartigen, bilanzierbaren Größe eine Basis für einen Aufbau der Physik abgibt, der sowohl die klassische Physik als auch die Physik unseres Jahrhunderts bis in ihre modernsten Entwicklungen hin einschließt. Damit bleibt natürlich die Aufgabe zu zeigen, wie das im einzelnen geschieht. Selbstverständlich kann das hier nur skizzenhaft geschehen. Bevor wir das tun, fassen wir die beiden Hauptregeln der allgemeinen Dynamik zusammen:

(i) Grundlage der dynamischen Beschreibung sind allgemein-physikalische, d.h. system-unabhängige mengenartige Standard-Größen. Zu diesen zählen: Energie $\boldsymbol{E}$, Entropie S, Menge (= Stoffmenge) n, Impuls $\boldsymbol{p}$, Drehimpuls $\boldsymbol{L} = (L_1, L_2, L_3)$, elektrische Ladung Q,...

(ii) Ein physikalisches System, ein "Objekt", wird nicht als gestaltlich-geometrisches Gebilde aufgefaßt, sondern als ein "Bündel" der Standard-Größen. Die Wertekombinationen dieser Größen, die ja die Zustände des Systems festlegen, sind für das System charakteristisch.

Diese beiden Regeln gelten unverändert in der klassischen wie in der Quantenphysik. Im Diagramm der Abb. 3 ausgedrückt, gehören sie also dem Durchschnitt von $A_{I,1}$ und $A_{II,1}$ an. Je nachdem, ob man nun die klassische Physik oder die Quantenphysik entwickeln will, sind die Regeln (i) und (ii) um weitere zu ergänzen. Die Regeln (i) und (ii) wie auch ihre Stellung in der Physik bilden zwar nicht den Gegenstand, wohl aber den wissenschaftlichen Hintergrund und damit das Rückgrat des in diesem Heft entwickelten und erläuterten didaktischen Konzepts eines zeitgemäßen Physikunterrichts.

Zunächst hat die Regel (ii) eine wichtige Konsequenz, nämlich:

(ii a) Bei jedem Übergang ändern mindestens *zwei* physikalische Größen ihren Wert; oder anders ausgedrückt: Es gibt keinen Übergang, bei dem nur eine einzige Größe ihren Wert ändert.

Diese Feststellung ist eine unmittelbare Folge der Art und Weise, wie nach (ii) ein physikalisches System allgemein-dynamisch charakterisiert wird. Ein System ist danach gekennzeichnet durch die Kombinationen, in denen die Werte der Standard-Größen in den Zuständen des System auftreten, oder anders gewendet: Es ist der *Zusammenhang der Größen,* der für das System charakteristisch ist. Anstatt zum Beispiel die Masse eines Körpers anzugeben, wird der Körper dynamisch dadurch beschrieben, wie Energie und Impuls bei ihm zusammenhängen, d.h. welche Werte des Impulses mit welchen Werten der Energie kombiniert erscheinen. Das aber ist gleichbedeutend damit, daß bei jeder Änderung des Impulses auch die Energie eine Änderung erfährt. Wir haben uns dabei der Einfachheit halber auf translative Bewegungen beschränkt; falls der Impuls seine Richtung ändert, kann zwar die Energie konstant bleiben, aber dafür ändern sich dann mehr als eine Komponente des Impulses, also wieder mehr als eine einzige Größe. Die Grundannahme der allgemeinen Dynamik, physikalische Systeme mittels mengenartiger Größen und deren Verknüpfung zu beschreiben, erzwingt sozusagen trivialerweise den in (iia) behaupteten Tatbestand. Für die allgemeine Dynamik ist deshalb die Folgerung (iia) ebenso unvermeidlich-trivial wie es für die Idee, alles in Bewegung von Körpern aufzulösen, trivial ist, daß von Null verschiedene Werte der Geschwindigkeit unvermeidlich mit Ortsänderungen verknüpft sind.

Der in (iia) ausgesprochene Tatbestand hat für die *klassische Physik* nun eine einfache, allgemeingültige mathematische Beziehung zwischen den Änderungen der mengenartigen Standard-Größen zur Folge, die als *Gibbssche Fundamentalform* bekannt ist. Bei der (hier allein betrachteten) Erweiterung von (i) und (ii) zur klassischen Physik tritt zu (i) und (ii) die Annahme hinzu, daß die mengenartigen Standard-Größen – und mit ihnen alle physikalischen Größen – stetige Variablen im gewohnten Sinn der Mathematik und ihre Abhängigkeiten differenzierbare Funktionen dieser Variablen sind. Hiermit läßt sich die in (iia) ausgesprochene Feststellung wie folgt formulieren. Zunächst werden alle Übergänge eines Systems aus infinitesimalen Übergängen zusammensetzbar. Die einfachsten infinitesimalen Übergänge wiederum sind solche, in denen sich eine Minimalzahl mengenartiger Größen ändert, also genau *zwei.* Von denen wählt man als eine stets die Energie E des Systems. Die zweite der Größen sei jeweils mit X_1, X_2, X_3,... bezeichnet. Für die einfachsten infinitesimalen Übergänge, bei denen sich von den Größen X_1, X_2,... nur eine, etwa X_j ändert, gilt gemäß (iia) dann $\mathrm{d}E = \xi_j \mathrm{d}X_j$, wobei ξ_j angibt, wie groß die mit $\mathrm{d}X_j$ verknüpfte Energieänderung ist. Da jeder infinitesimale Übergang aus den einfachsten zusammengesetzt werden kann, gilt allgemein

$$\mathrm{d}E = \xi_1 \mathrm{d}X_1 + \xi_2 \mathrm{d}X_2 + \xi_3 \mathrm{d}X_3 + ... \tag{2}$$

Da die Größen X_1, X_2,... mengenartige Variablen sind, nimmt (2) bei Verwendung der gewohnten mengenartigen Standard-Variablen Impuls $\boldsymbol{P}$, Drehimpuls $\boldsymbol{L}$, Entropie S, elektrische Ladung Q,... die Gestalt an

$$\mathrm{d}E = \boldsymbol{v}\mathrm{d}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{\omega}\mathrm{d}\boldsymbol{L} + T\mathrm{d}S + \varphi \mathrm{d}Q + ... \tag{3}$$

Skalarprodukte wie $\boldsymbol{v}\mathrm{d}\boldsymbol{P}$ und $\boldsymbol{\omega}\mathrm{d}\boldsymbol{L}$ sind dabei die gewohnten Abkürzungen, so zum Beispiel

$$\boldsymbol{v}d\boldsymbol{P} = v_1 dP_1 + v_2 dP_2 + v_3 dP_3. \tag{4}$$

Beim Übergang von (2) nach (3) haben wir für die ξ_i bereits die Bezeichnungen verwendet, die in der Physik herkömmlich verwendet werden. So ist, wenn $X_1 = P_1$ eine Komponente des Impulses ist, die Größe $\xi_1 = v_1$ die korrespondierende Geschwindigkeitskomponente. Die Geschwindigkeit ist hier also nicht “Strekke durch Zeit”, sondern der Faktor, der angibt, mit welcher Energieänderung eine infinitesimale Änderung $\mathrm{d}\boldsymbol{P}$ des Impulses $\boldsymbol{P}$ verknüpft ist. Analoges gilt für die übrigen “intensiven” Größen $\boldsymbol{\omega}$, T, φ,...

Es sei ausdrücklich angemerkt, daß die *Gibbssche Fundamentalform* (2) bzw. (3) keineswegs Ausdruck der Energieerhaltung ist. Sie hat, wie die Art ihrer Begründung zeigt, nichts damit zu tun daß die Größe E nicht erzeugt und vernichtet werden kann. Bei der Zerlegung der Übergänge in einfachste infinitesimale Übergänge, die einer paarweisen Zusammenfassung der mengenartigen Standard-Variablen entsprechen, hätte man statt der Energie E auch jede andere der mengenartigen Größen in dem Sinne auszeichnen können, daß sie ein allen Paaren gemeinsames Mitglied darstellt.

9. Ströme mengenartiger Größen

Die Erfahrung im Umgang mit Studenten der Physik, also Physikern zeigt, daß der Ausdruck “mengenartige Größe” zwar im großen und ganzen die beabsichtigten Assoziationen schafft, im Detail aber doch oft Ungewissheit, ja Zweifel hinterläßt. Mehrere Gründe sind dafür verantwortlich, in erster Linie natürlich Sprach- und Vorstellungsgewohnheiten. Zwar gilt die einfache Merkregel, daß echt mengenartige Größen daran erkennbar sind, daß bei ihnen das Verb “haben” durch das Verb “enthalten” ersetzt werden kann, aber leider hilft diese Merkregel nicht in allen Fällen. Manchmal hilft sie deshalb nicht, weil der Student zögert oder sich gar weigert, das Wort “haben” durch das vorstellungsmäßig schärfer fixierte Wort “enthalten” zu ersetzen, obwohl er es bedenkenlos tun könnte. So ist es eine gewohnte Erfahrung, daß beim Impuls diese Ersetzung schwerfällt. Der Impuls eines Körpers ist nach landläufiger Vorstellung und Sprechweise des Physikers dem Körper “zugeordnet”. Die Vorstellung, daß er im Körper “enthalten” sei, wird nur widerstrebend und ungläubig hingenommen. Andererseits wird das Volumen wie selbstverständlich in die Phalanx der mengenartigen Größen eingereiht, obwohl es, wie wir sehen werden, nicht dazu gehört.

Tatsächlich ist die Situation komplizierter, als daß sie sich durch eine einfache sprachliche Regel entscheiden ließ. Eine “echte” mengenartige Größe hat die Eigenschaft, daß sie im Raum verteilt sein und strömen kann, daß es zu ihr also eine *Dichte* und einen *Strom* (mathematisch genauer, eine Stromdichte) gibt. So gibt es eine Energiedichte und einen Energiestrom, eine Impulsdichte und einen Impulsstrom, eine Entropiedichte und einen Entropiestrom, eine Mengendichte und einen Mengenstrom usw. Aber es gibt keine Volumdichte und keinen Volumstrom. Das Volumen V ist keine “echte” mengenartige Größe. Daß es dennoch oft zweckmäßig ist, V als Größe eines Systems zu verwenden und unter die in der Gibbsschen Fundamentalform (2) auftretenden Variablen X einzureihen, steht auf einem anderen Blatt. Tut man es, so tritt in (4) der traditionell “Arbeit” genannte Term $-p\mathrm{d}V$ auf, in dem p den Druck bezeichnet. Wir kommen auf diese Frage zurück.

Vorerst ist einmal die *physikalische wie didaktische Wichtigkeit der Ströme* zu betonen. Wir sagten, daß es zu jeder echten mengenartigen Größe X_i einen Strom I_{X_i} gibt. Der Zusammenhang von mengenartiger Größe und ihrem Strom bildet die Basis einer für den praktischen Umgang mit den mengenartigen Größen unabdingbaren Anschauung: Eine mengenartige Größe X_i ist eine Art “Substanz”, die in einem physikalischen System, einem Objekt, enthalten ist und die von diesem Objekt auf andere Objekte überströmen oder umgekehrt von anderen Objekten als Strom I_{X_i} geliefert werden kann. Diese Anschauung kann gar nicht plastisch und gegenständlich genug geformt werden! Sie dem Anfänger von vornherein nahezubringen und sie in ihm zu festigen, stellt deshalb die didaktische Grundabsicht des ganzen vorliegenden Kurses dar.

Die Vorstellung der strömungsfähigen mengenartigen Größe erlaubt es auch, der Grundgleichung (2), der Gibbsschen Fundamentalform, eine sehr anschauliche Deutung zu geben, wenn alle in ihr auftretenden Variablen X_i echt mengenartig sind. Dividiert man nämlich Gl. (2) durch $\mathrm{d}t$, so erhält man

$$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t} = \sum_i \xi_i \frac{\mathrm{d}X_i}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

Denkt man sich nun die Änderungen $\mathrm{d}X_i$ der Größe X_i wie auch die Änderungen $\mathrm{d}E$ der Energie E durch Zustrom oder Wegstrom, kurzum durch den Strom bewirkt, so sind die zeitlichen Änderungen $\mathrm{d}X_i/\mathrm{d}t$ gleich dem Strom I_{X_i} und (5) lautet

$$I_E = \sum_i \xi_i I_{X_i} \tag{6}$$

In Worten heißt diese Beziehung: Der gesamte Energiestrom ist eine Summe von Energieströmen $\xi_i I_{X_i}$ von denen jeder von einem X_i-Strom begleitet, oder anschaulicher gesprochen, “getragen” wird. Die *Gibbssche Fundamentalform* läßt sich dann in die anschauliche Regel umformen:

> Strömende Energie läßt sich in Formen $\xi_i I_{X_i}$ einteilen, wobei jede Energieform gekennzeichnet ist durch den Strom I_{X_i} der die Energie begleitenden Größe X_i.

Diese einfache und wirkungsvolle Regel, wonach die Energie in Formen eingeteilt werden kann, gilt, wie betont sei, nur für *strömende* Energie, nicht dagegen für gespeicherte, also in einem System enthaltene Energie. Dieser Hinweis ist deshalb notwendig, weil es eine in der Literatur weitverbreitete Usance ist, auch gespeicherte Energie mit Gewalt in Formen einteilen zu wollen. Das Vorbild hierfür ist natürlich wieder die Newtonsche Mechanik mit ihrer Zerlegung der Energie in kinetische und potentielle Energie. Daß eine derartige Zerlegung in den meisten, vor allem den physikalisch wichtigsten Fällen jedoch nicht möglich ist, läßt sich von Seiten der Mechanik und ihrer Denkgewohnheiten her nicht begreifen.

10. Die Rolle der geometrischen Begriff in der allgemeinen Dynamik

Der für wissenschaftliche wie für didaktische Zwecke fundamentale Zusammenhang zwischen den echt mengenartigen Größen und ihren Strömen weist den sonst von uns gern bevorzugten geometrischen Größen eine ganz andere Rolle zu als wir gewohnt sind: Geometrische Größen sind keine physikalischen Größen, sondern Mittel zur Benennung, zur "Namensgebung" von physikalischen Systemen. Das wollen wir im folgenden auseinandersetzen. Treten, wie es geschehen kann und auch häufig geschieht, geometrische Größen in einer Gibbsschen Fundamentalform als Variablen auf, so spielen sie also streng genommen die Rolle von Provisoria. Das gilt wie wir sehen werden, sogar für das Volumen.

Zunächst gibt es zu geometrischen Größen wie Punkten, Kurven, Flächen offensichtlich weder Dichten noch Ströme. Der in manchen Darstellungen verwendete "Volumstrom" ist eine allzu formale Bildung. Er wäre ein Strom, der nie allein auftreten könnte, sondern wie ein Anhängsel an einem Mengenstrom (Stoffmengenstrom) haftet. Außerdem gibt es für das Volumen V offensichtlich keine Dichte. Die vertrauteste geometrische Größe, der Ort oder die *Lage* $\boldsymbol{r}$ eines Körpers, ist ebenfalls klarerweise keine mengenartige Größe. Dennoch wird $\boldsymbol{r}$ gern wie eine physikalische Größe benutzt, nämlich dann, wenn man Prozesse im Auge hat, bei denen ein als Individuum betrachtetes Objekt, ein Körper oder ein Teil eines Körpers, eine *Verschiebung* $\mathrm{d}\boldsymbol{r}$, also eine *Ortsänderung* erfährt. Kostet die Verschiebung Energie, so läßt diese sich bekanntlich schreiben $-\boldsymbol{F}\mathrm{d}\boldsymbol{r}$, wobei $\boldsymbol{F}$ gewohnheitsgemäß "die auf den Körper wirkende Kraft" und $\boldsymbol{F}\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ "die von der Kraft $\boldsymbol{F}$ am Körper geleistete oder verrichtete Arbeit" genannt werden. Da auch die mit der Verschiebung verknüpfte Energie die Gestalt $\xi \mathrm{d}X$ hat, paßt sie in die Fundamentalform und wird deshalb auch gern in diese aufgenommen. Gl. (4) lautet dann

$$\mathrm{d}E = \boldsymbol{v}\mathrm{d}\boldsymbol{P} - \boldsymbol{F}\mathrm{d}\boldsymbol{r} + \boldsymbol{\omega}\mathrm{d}\boldsymbol{L} + T\mathrm{d}S + \ldots \qquad (7)$$

In der Punktmechanik betrachtet man nur Prozesse, bei denen sich $\boldsymbol{P}$ und $\boldsymbol{r}$ ändern, die anderen Größen $\boldsymbol{L}$, S,... dagegen konstant bleiben, so daß $\mathrm{d}\boldsymbol{L} = \mathrm{d}S = \ldots = 0$ ist. Für punktmechanische Vorgänge reduziert sich (7) also auf die einfache Gleichung

$$\mathrm{d}E = \boldsymbol{v}\mathrm{d}\boldsymbol{p} - \boldsymbol{F}\mathrm{d}\boldsymbol{r}. \qquad (8)$$

Wie ist diese Gleichung aber zu lesen? $\boldsymbol{P}$ und $\boldsymbol{v}$ sind offenbar Impuls und Geschwindigkeit *des Körpers*, und $\boldsymbol{v}\mathrm{d}\boldsymbol{P}$ ist der mit dem Impulsbetrag $\mathrm{d}\boldsymbol{P}$ gleichzeitig auf den Körper übertragene Energiebetrag. Die Größe $\boldsymbol{r}$ ist der Ort *des Körpers,* $\mathrm{d}\mathbf{r}$ also die Änderung des Orts. Ist aber auch $\boldsymbol{F}$ eine Größe *des Körpers*? Wenn sie es wäre, so bestünde die ganze rechte Seite von (8) aus Größen des Körpers, und damit wäre E die Energie *des Körpers.* Nun ist aber F nach Aussage der Mechanik "die auf den Körper wirkende Kraft". Danach gibt $\boldsymbol{F}$ die Wirkung von etwas anderem, d.h. eines anderen physikalischen Systems A auf den Körper an, und daher kann $\boldsymbol{F}$ keine Größe des Körpers selbst sein.

Damit hängt die rechte Seite von (8) aber nicht nur von Größen des Körpers ab, sondern auch von Größen des Systems A. Dann kann aber auch die auf der linken Seite von (8) erscheinende Energie E nicht einfach die Energie des Körpers sein. Aber die Energie welches physikalischen Systems ist E dann? Die Antwort ist nach der vorangegangenen Argumentation nicht schwer zu erraten: E muß die Energie des Gesamtsystems sein, das aus dem Körper und dem System A besteht, das mittels $\boldsymbol{F}$ auf den Körper wirkt. Nach den Regeln der allgemeinen Dynamik äußert sich im Auftreten von F das Überströmen von Energie zusammen mit (mindestens) einer zweiten mengenartigen Größe vom System A auf den Körper oder umgekehrt vom Körper auf das System A. Diese zweite Größe muß der Impuls sein, denn wenn der Körper der Kraft $\boldsymbol{F}$ überlassen ist, ändert sich sein Impuls. Die Kraft $\boldsymbol{F}$ ist somit nichts anderes als Ausdruck eines Impulsstroms, der vom System A auf den Körper fließt oder umgekehrt vom Körper auf das System A. Ist $\boldsymbol{F}$ gegeben, so kennt man das System A zwar nicht völlig, man weiß aber, wie es mit dem Körper Impuls austauscht.

Als ein einfaches Beispiel betrachten wir einen Körper im Schwerefeld der Erde. Dann ist $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{g}$, wobei $\boldsymbol{g}$ den Vektor der Erdbeschleunigung bezeichnet. Das System A ist in diesem Fall die Erde mit ihrem Schwerefeld, und E ist die Energie des Systems "Körper + Erde mit Schwerefeld". Die Gl. (8) lautet dann

$$\mathrm{d}E = \boldsymbol{v}\mathrm{d}\boldsymbol{P} - m\boldsymbol{g}\mathrm{d}\boldsymbol{r} = \boldsymbol{v}\mathrm{d}\boldsymbol{P} + mg\mathrm{d}z; \qquad (9)$$

darin ist z die vertikal nach oben weisende Ortskoordinate. Gl. (9) ist so zu lesen: Wird dem Körper der Impuls $\mathrm{d}\boldsymbol{P}$ zugeführt, oder wird der Körper um $\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ verschoben, so ändert sich die Energie E des Systems "Körper + Erde mit Schwerefeld" um den durch (9) gegebenen Betrag.

Verschiebt man den Körper bei konstantem Impuls ($\mathrm{d}\boldsymbol{P} = 0$), etwa beim Wert $\boldsymbol{P} = 0$, also den ruhenden Körper, vom Ort $\boldsymbol{r}_1$ mit der Höhe z_1 zum Ort $\boldsymbol{r}_2$ mit der Höhe z_2, so muß dazu dem System der Energiebetrag

$$\Delta E = \int_{z_1}^{z_2} mg\mathrm{d}z = mg(z_2 - z_1) \qquad (10)$$

zugeführt werden. Diese Gleichung schreiben wir um in eine auf den ersten Blick etwas befremdlich wirkende Form, nämlich

$$\Delta E = (gz_2)m + (gz_1)\cdot(-m) = (gz_2)\int_0^m \mathrm{d}m_{\boldsymbol{r}_2} + (gz_1)\int_m^0 \mathrm{d}m_{\boldsymbol{r}_1}. \qquad (11)$$

Der Energiebetrag ΔE erscheint hier als die Energie, die notwendig ist, um am Ort $\boldsymbol{r}_1$ die Masse des Körpers vom Wert m auf den Wert Null abnehmen und am Ort $\boldsymbol{r}_2$ vom Wert Null auf den Wert m zunehmen zu lassen, in moderner Ausdrucksweise, um die Masse m am Ort $\boldsymbol{r}_1$ zu vernichten und am Ort $\boldsymbol{r}_2$ zu erzeugen. Es sei ausdrücklich darauf aufmerksam gemacht, daß nicht von der Erzeugung oder Vernichtung des Körpers die Rede ist, sondern von der Erzeugung und Vernichtung einer mengenartigen physikalischen Größe, nämlich der *Masse.* Die Masse erscheint hier nicht, wie in der Mechanik üblich als ein Charakteristikum, als eine Art Name des Körpers, sondern als eine Größe, die der Körper *enthält,* und die im Prinzip ihren Wert ändern kann. Man erkennt unschwer, daß diese Beschreibung verallgemeinerungsfähig und auf alle mengenartigen Größen ausdehnbar ist. Neben der Masse m ist das hier vor allem der Impuls $\boldsymbol{P}$; weitere mengenartige Größen lassen wir im Augenblick außer acht. Der Körper wird damit automatisch zu einem Bündel mengenartiger Größen. Was aber wichtiger ist: Seine Bewegung wird eine Folge von Vernichtungs- und Erzeugungsprozessen, von ständigem Vergehen und Werden. Alle mengenartigen Größen, die der Körper enthält, werden am *Ort* $\boldsymbol{r}$, an dem er sich befindet, vernichtet und am Nachbarort $\boldsymbol{r} + \mathrm{d}\boldsymbol{r}$ in gleichen oder anderen Beträgen wieder erzeugt.

Die Energieänderung, die das System "Körper + System, das auf ihn Kraft ausübt" bei diesen Erzeugungs- und Vernichtungsprozessen erfährt, berechnet sich gemäß der Gleichung

$$\mathrm{d}E = \sum_{\boldsymbol{r}} \boldsymbol{v}_{\boldsymbol{r}}\mathrm{d}\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{r}} + \sum_{\boldsymbol{r}} \Phi(\boldsymbol{r})\mathrm{d}m_{\boldsymbol{r}}. \qquad (12)$$

Zunächst fällt auf, daß in dieser Gleichung, wie in (11), der Ort $\boldsymbol{r}$ *nicht als physikalische Größe auftritt, sondern als Index zur Benennung aller Orte oder Volumelemente, die bei den fraglichen Prozessen mitspielen* können. Jedes solches Volumelement, dessen "Name" die Stelle $\boldsymbol{r}$ ist, repräsentiert ein System, das die mengenartigen Größen $\boldsymbol{P}_r$, m_r hat und dessen intensive Größen $\boldsymbol{v}_r$ und $\Phi(\boldsymbol{r})$ sind. Daß wir nicht auch n der Form $\Phi_{\boldsymbol{r}}$ schreiben, hat lediglich den Grund, daß diese Größe in der Physik ein wohlbekanntes Skalarfeld ist, nämlich das Gravitationspotential; im Fall des Erdfeldes ist

$$\Phi(\boldsymbol{r}) = -\boldsymbol{g}\cdot\boldsymbol{r}.$$

Man erkennt, daß (11) aus (12) hervorgeht für folgende Prozesse: Alle $\mathrm{d}\boldsymbol{P}_r = 0$, ebenso alle $\mathrm{d}m_r = 0$ außer an den Stellen $\boldsymbol{r}_1$ und $\boldsymbol{r}_2$. Für diese Prozesse lautet (12)

$$\mathrm{d}E = \Phi(\boldsymbol{r}_1)\mathrm{d}m_{\boldsymbol{r}_1} + \Phi(\boldsymbol{r}_2)\mathrm{d}m_{\boldsymbol{r}_2} \qquad (13)$$

Die Änderungen der Massenvariablen m_{r_1} und m_{r_2} erfolgen nun so, daß die Gesamtmasse erhalten bleibt, daß also

$$\mathrm{d}(m_{r_1} + m_{r_2}) = 0. \tag{14}$$

Das in (13) eingesetzt, liefert

$$\mathrm{d}E = [\Phi(\boldsymbol{r}_2) - \Phi(\boldsymbol{r}_1)] \cdot \mathrm{d}m_{r_2}. \tag{15}$$

Integriert man diese Gleichung von 0 bis *m,* so resultiert die Gl. (11).

Auf den ersten Blick bedeutet die dynamisch konsequente Fassung (12) der provisorischen Fundamentalform (8) eine erhebliche Komplikation: Nicht nur wird die “natürliche” Auffassung der Bewegung als stetiger geometrischer Konfigurationsablauf ersetzt durch eine “unanschauliche” Folge von Vernichtungs- und Erzeugungsvorgängen, von Vergehen und Werden, es treten auch sehr viel mehr, streng genommen sogar unendlich viele Variablen auf, wo die herkömmliche Beschreibung mit wenigen auskommt. Dennoch bedeutet diese Komplikation nicht eine Erschwerung in jeder Hinsicht.. Es gibt eine Reihe praktischer Probleme, bei denen die Energieform “Gravitationsenergie” $\Phi(\boldsymbol{r})\mathrm{d}m_{\boldsymbol{r}}$ viel einfacher und durchsichtiger zu handhaben ist als die gewohnte Beschreibung der Mechanik, etwa bei der Bewegung von Flüssigkeiten. Was uns aber wichtiger erscheint, ist die Einfachheit der begrifflichen Anschauung, die die dynamische Beschreibung mit sich bringt: Man gewöhnt sich schnell daran, in jedem Einzelfall die physikalischen Systeme zu suchen, die bei einem Vorgang mit im Spiel sind, und ebenso versucht man sich ein Bild davon zu machen, wie die mengenartigen Größen bei dem Vorgang zwischen den Systemen hin und her strömen. Außerdem hat man aber gar keine andere Wahl, wenn man die moderne Physik verstehen will. Denn was wir erläutert haben, ist die Beschreibung des Bewegungsvorgangs auf der Basis der allgemeinen Dynamik mit den Begriffe Zustand und Übergang. Diese Beschreibung hat ersichtlich den Vorteil, begrifflich den Beschreibungsverfahren sehr ähnlich zu sein, mit denen die Teilchenphysik unserer Tage ihre Vorgänge erfaßt. Das wird dem Leser vermutlich längst aufgefallen sein.

11. Die Größe “Volumen”

Die Übersetzung der provisorischen Fundamentalform (8) in die dynamisch konsequente Form (12) läßt außerdem verstehen, welche Rolle das Volumen in der allgemeinen Dynamik spielt. Die rechte Seite von Gl. (12) ist mathematisch eigentlich nicht definiert, denn es ist nicht erklärt, was eine Summe über einen kontinuierlichen Indizesbereich, hier das Kontinuum der Werte von $\boldsymbol{r}$, bedeutet. Intuitiv ist allerdings klar, was gemeint ist: Man denkt sich den Raum in lauter Zellen eingeteilt, wobei die Größe $\boldsymbol{r}$ zur Numerierung der Zellen dient. Der Wert von $\boldsymbol{r}$ ist, wie wir schon sagten, der “Name” der Zelle. Die Summen in (12) sind daher Summen über die Zellen wobei $\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{r}}$ und $m_{\boldsymbol{r}}$ den Impuls und die Masse des in der Zelle mit der Nummer $\boldsymbol{r}$ enthaltenen physikalischen Systems bezeichnet. Ist die Zelle $\boldsymbol{r}$ “leer”, so bedeutet das $\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{r}} = 0$, $m_{\boldsymbol{r}} = 0$. Die mathematische Fassung dieses Tatbestands folgt bekannten Wegen. Hat die Zelle $\boldsymbol{r}$ das Volumen $\Delta V_{\boldsymbol{r}}$, so ist die in $\Delta V_{\boldsymbol{r}}$ enthaltene Masse $m_{\boldsymbol{r}}$ gegeben durch $\hat{m}(\boldsymbol{r})\Delta V_{\boldsymbol{r}}$; dabei ist $\hat{m}(\boldsymbol{r})$ die Massendichte am Ort $\boldsymbol{r}$, genauer die mittlere Massendichte in der Zelle $\boldsymbol{r}$. Entsprechend ist $\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{r}} = \hat{\boldsymbol{P}}(\boldsymbol{r})\Delta V_{\boldsymbol{r}}$, worin $\hat{\boldsymbol{P}}(\boldsymbol{r})$ die *Impulsdichte* am Ort $\boldsymbol{r}$ bezeichnet. Die in (12) auftretenden Änderungen $\mathrm{d}m_{\boldsymbol{r}}$ der voneinander unabhängigen Massenvariablen $m_{\boldsymbol{r}}$ geschehen nicht etwa durch Änderung des Volumens $\Delta V_{\boldsymbol{r}}$, sondern allein durch Änderung der Massendichte $\hat{m}(\boldsymbol{r})$. Ebenso sind mit den Änderungen $\mathrm{d}\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{r}}$ der voneinander unabhängigen Impulsvariablen $\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{r}}$ nur die Änderungen gemeint, die durch Änderungen der Impulsdichte $\hat{\boldsymbol{P}}(\boldsymbol{r})$ zustandekommen. Gl. (12) ist mathematisch korrekter also zu schreiben

$$\mathrm{d}E = \sum_{\boldsymbol{r}} \left[\boldsymbol{v}_{\boldsymbol{r}}\mathrm{d}\hat{\boldsymbol{P}}(\boldsymbol{r}) + \Phi(\boldsymbol{r})\mathrm{d}\hat{m}(\boldsymbol{r})\right]\Delta V_{\boldsymbol{r}} \tag{16}$$

Wird die Zelleinteilung beliebig verfeinert, so geht die Summe in (16) gegen ein Integral. Für unsere Überlegungen ist das nicht von besonderem Interesse. Aus (16) ist auch so die Rolle des Volumens in der allgemeinen Dynamik abzulesen, nämlich daß das Volumen die Rolle der Systembenennung spielt, und daß die Anzahl der Volumina $\Delta V_{\boldsymbol{r}}$ etwas über die Anzahl der unabhängigen Variabeln des Gesamtsystems aussagt.

Um jedoch zu verstehen, wie das Volumen manchmal auch als physikalische Größe in die Gibbssche Fundamentalform eindringt und dort in der Energieform $-p\,\mathrm{d}V$ auftritt, betrachten wir nicht, wie in (16), Vorgänge, bei denen Änderungen der räumlichen Impuls- und Masseverteilung im Spiel sind, sondern wir untersuchen Vorgänge, bei denen sich die räumliche Verteilung der Entropie- und Mengendichte ändern, wie z.B. bei der Kompression eines Gases. Auch diese Vorgänge lassen sich durch eine Gleichung schreiben, die ebenso gebaut ist wie (16), nämlich

$$\mathrm{d}E = \sum_{\boldsymbol{r}} \left[T_{\boldsymbol{r}}\mathrm{d}S_{\boldsymbol{r}} + \mu_{\boldsymbol{r}}\mathrm{d}n_{\boldsymbol{r}}\right] = \sum_{\boldsymbol{r}} \left[T(\boldsymbol{r})\mathrm{d}\hat{s}(\boldsymbol{r}) + \mu(\boldsymbol{r})\mathrm{d}\hat{n}(\boldsymbol{r})\right]\Delta V_{\boldsymbol{r}}. \qquad (17)$$

Hierin bedeuten $\hat{s}(\boldsymbol{r})$ die *Entropiedichte* und $\hat{n}(\boldsymbol{r})$ die *Mengendichte* am Ort $\boldsymbol{r}$, das heißt in der Zelle $\boldsymbol{r}$. $S_{\boldsymbol{r}} = \hat{s}(\boldsymbol{r})\Delta V_{\boldsymbol{r}}$ und $n_{\boldsymbol{r}} = \hat{n}(\boldsymbol{r})\Delta V_{\boldsymbol{r}}$ sind also die in der Zelle $\boldsymbol{r}$ enthaltene Entropie und Menge. Die Summe

$$\sum_{\boldsymbol{r}} S_{\boldsymbol{r}} = S$$

ist die Gesamtentropie, entsprechend

$$\sum_{\boldsymbol{r}} n_{\boldsymbol{r}} = n$$

die Gesamtmenge des Systems. Die Summe aller Volumina $\Delta V_{\boldsymbol{r}}$, für die $\hat{n}(\boldsymbol{r}) \neq 0$ ist, heißt das *Gesamtvolumen* V des Systems. Wir nehmen an, daß das Gesamtvolumen endlich ist, daß $\hat{n}(\boldsymbol{r})$ – wie übrigens auch $\hat{s}(\boldsymbol{r})$ – in nur endlich vielen Zellen einen von Null verschiedenen Wert hat. Gl. (17) wenden wir nun an auf den Prozeß der Kompression eines Gases. Wir lassen dabei gleichzeitig zu, daß das Gas seine Entropie und seine Menge ändern kann. Abb. 4 zeigt diesen Prozeß einmal in gewohnter Beschreibung als Verkleinerung des Volumens V um den Betrag ΔV mittels eines bewegten Kolbens, zum anderen in der Beschreibung von Gl. (17). Das Gesamtvolumen V ist eine Summe der Volumina $\Delta V_{\boldsymbol{r}}$. Die Kompression um ΔV läuft darauf hinaus, daß in der Zelle 5 die Entropie vom Wert S_5 auf den Wert Null gebracht wird und ebenso die Menge vom Wert n_5 auf den Wert Null. Im Anfangszustand (a) haben die Entropiedichten wie auch die Mengendichten in allen Zellen denselben Wert, d.h. es ist $\hat{s}_1 = ... = \hat{s}_5 = \hat{s}$ und $\hat{n}_1 = ... = \hat{n}_5 = \hat{n}$, ebenso ist $T_1 = ... = T_5 = T$ und $\mu_1 = ... = \mu_5 = \mu$. Während des Prozesses mögen diese Gleichheiten weiterhin für die Zellen 1 bis 4 gelten. Außerdem mögen bei den Zustandsänderungen die Temperatur T und das chemische Potential μ konstant bleiben oder ihre Änderungen wenigstens so klein sein, daß sie als konstant betrachtet werden dürfen. Dann gilt für den Prozeß (a)→(b)

$$\begin{aligned}\Delta E &= E(b) - E(a)\\ &= T\int_a^b \sum_{i=1}^4 dS_i + \int_a^b T_5 dS_5 + \mu\int_a^b \sum_{i=1}^4 dn_i + \int_a^b \mu_5 dn_5\\ &= T\Delta S + \mu\Delta n + TS_5 + \mu n_5 + \int_a^b T_5 dS_5 + \int_a^b \mu_5 dn_5.\end{aligned}$$

Hierbei haben wir benutzt, daß

$$S = \sum_i S_i$$

und daher

$$\Delta S = \sum_1^4 \Delta S_i + \Delta S_5 = \sum_1^4 \Delta S_i - S_5,$$

denn beim Prozeß (a)→(b) wird die Entropie der Zelle 5 vom Wert S_5 auf den Wert Null geändert, so daß ΔS_5 gleich $-S_5$ ist. Entsprechend ist

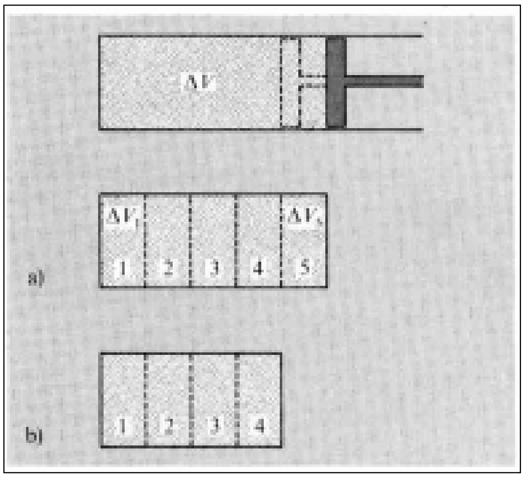

Abb. 4 Kompression eines Gases in konsequent dynamischer Darstellung: In der Zelle 5 werden alle mengenartigen Größen auf den Wert Null gebracht.

$$\Delta n = \sum_1^4 \Delta n_i - n_5.$$

Nun ist aber

$$\int_a^b \left[T_5 dS_5 + \mu_5 dn_5\right] = \int_a^b dE_5 = \int_{E_5}^0 dE_5 = -E_5.$$

Damit läßt sich (18) schreiben

$$\begin{aligned} \Delta E &= T\Delta S + \mu\Delta n - (E_5 - TS_5 - \mu n_5) \\ &= T\Delta S + \mu\Delta n - (\hat{e}_5 - T\hat{S}_5 - \mu\hat{n}_5)\Delta V_5 \\ &= T\Delta S + \mu\Delta n - (\hat{e}_5 - T\hat{S}_5 - \mu\hat{n}_5)\Delta V. \end{aligned} \tag{19}$$

Dabei haben wir ausgenutzt, daß im Anfangszustand die Werte der Dichten in allen Zellen gleich sind und außerdem $\Delta V = -V_5$ ist. Ist in Gl. (19) ΔV infinitesimal klein, so gilt

$$\mathrm{d}E = T\mathrm{d}S + \mu \mathrm{d}n - p\mathrm{d}v; \tag{20}$$

hierin ist p die Größe

$$p = -\hat{e} + T\hat{S} + \mu\hat{n}. \tag{21}$$

Das ist, wie wir hier nicht näher begründen wollen, tatsächlich der Druck des Systems.

Die Umformung der dynamisch konsequenten Fundamentalform (17) in die provisorische Fundamentalform (20) verläuft also im Prinzip ganz analog der Umformung von (12) in (8). Die relative Umständlichkeit dieser Umformung rührt daher, daß infinitesimale Prozesse in den Variablen der Form (20) nicht auch infinitesimale Prozesse in den Variablen der Form (17) sind; denn eine noch so kleine Änderung des Gesamtvolumens bedeutet stets, gewisse S_r und n_r von einem endlichen Wert auf den Wert Null oder umgekehrt vom Wert Null auf einen endlichen Wert zu bringen. Dynamisch gesehen ist die Änderung eines Volumens also nicht Ausdruck der Änderung des Wertes einer physikalischen Größe, sondern der Änderung der Anzahl von voneinander unabhängigen dynamischen Variablen des Systems. Obwohl die Verwendung des Volumens V als Variable und $-p\mathrm{d}V$ als Energieform oftmals sehr praktisch sind, sind sie vom Standpunkt der allgemeinen Dynamik als Provisorium anzusehen. Stellt man, wie es in dem nachfolgend erläuterten Physikkurs geschieht, die Ströme mengenartiger Größen in den Vordergrund, so tritt das Volumen als eigenständige physikalische Größe nicht auf.

12. Resümee und didaktische Schlußfolgerungen

Die logische Unterscheidung zwischen begrifflichem Aufbau und innerer Struktur der Physik und die Relation dieser beiden im Hinblick auf die historischen Entwicklungsstufen macht klar, wie die Voraussetzungen aussehen, von denen die Didaktik dieses Faches auszugehen hat. Im wesentlichen bietet sich eine einfache Alternative: Entweder folgt man im begrifflichen Aufbau der historischen Vorgehensweise mit der Konsequenz, daß beim Übergang von klassischer Physik zur Quantenphysik ein begrifflicher Bruch stattfindet, dessen Überwindung de facto auf das Erlernen eines zweiten, nämlich quantenphysikalischen Begriffssystems hinausläuft, oder man legt den Aufbau von vornherein so an, daß der Übergang von klassischer Physik zur Quantenphysik nicht als wissenschaftliche Revolution, sondern als Weiterentwicklung, in mancher Hinsicht sogar als Ergänzung des Begriffssystems erscheint.

Der Fachphysiker sollte möglichst beide Wege kennen, bzw. kennenlernen, weil er damit ein intimeres Verhältnis zu seiner Wissenschaft und seinem Beruf bekommt. Ein Physikunterricht jedoch, der sich vornehmlich an den Nicht-Physiker richtet, muß sich notgedrungen für einen der beiden Wege entscheiden. Da hat nun die zweite Alternative entscheidende Vorteile:

– Das Beschreibungsverfahren, nämlich Vorgänge durch Bilanzieren mengenartiger Größen zu fassen, ist ohne Wechsel in den Grundregeln einheitlich auf alle Gebiete der Physik anwendbar, es schließt sogar die Chemie ein.

– Die Mengenartigkeit einer Größe erlaubt eine einfache, konkrete Anschauung von der Größe als einer Art Substanz und bildet so einen gefühlsmäßigen, nicht nur mathematisch-formalen Zugang zu ihrer quantitativen Fassung.

– Das Bild fließender Ströme vermittelt ein intuitives Verständnis für das, was physikalische Wechselwirkung heißt. Überdies kräftigt es eine konkrete Anschauung von der Mengenartigkeit der dabei ausgetauschten Größen.

– Das dynamische Beschreibungsverfahren ist formal so einfach, daß keine Zugeständnisse an wissenschaftlicher und begrifflicher Strenge gemacht werden müssen.

– Das Beschreibungsverfahren ist unmittelbar und ohne wirklichkeitsfremde Idealisierungen auf die Vorgänge unseres täglichen Lebens und der es beherrschenden biologischen und technischen Prozesse anwendbar.

Das alles sind Vorzüge, die für den Lernenden stark ins Gewicht fallen. Hat er einmal an *einer* Größe, etwa der Energie, die Methode begriffen und ihre überraschende Wirksamkeit kennengelernt und hat er gemerkt, daß man mit einer einzigen Größe nicht auskommt, so bietet die Ausdehnung auf weitere Größen keine prinzipielle Schwierigkeit. Methodisch hat er ja nichts Neues zu lernen. Das Verfahren verlangt keine größere Abstraktionsfähigkeit als der herkömmliche Physikunterricht, im Gegenteil sogar weniger, denn es ist von einer Einfachheit, die unter Wahrung logischer Strenge kaum zu überbieten ist.

Nicht einfach ist es allerdings für denjenigen, der *umlernen* muß, der sich in den Begriffen und Vorstellungen der herkömmlichen klassischen Physik, nämlich der Mechanik und Elektrodynamik, eingerichtet hat. Das dynamische Verfahren wird ihm ähnliche, allerdings auch nicht mehr Schwierigkeiten machen, wie er sie von der Thermodynamik her gewöhnt ist. Es ist eine bekannte Tatsache, daß diese Theorie einem in mechanischen Bildern denkenden Physiker Schwierigkeiten macht. Das äußert sich z.B. darin, daß er bei jeder sich bietenden Gelegenheit auf die kinetische Theorie auszuweichen sucht und das sogar dort tut, wo es mit erheblichen Komplikationen verbunden ist. Diese Erfahrung läßt leider nicht viel Hoffnung: Die wissenschaftliche Stärkung und ständige Übung unserer ohnehin intuitiv begünstigten Tendenz, alle Vorgänge als Bewegung irgendwelcher Teilchen begreifen zu wollen, macht einen Wechsel zu der dynamischen Grundauffassung allem Anschein nach schwer. Allein schon der Begriff der mengenartigen Größe ist in der Newtonschen Physik mit so viel sachlichen und psychologischen Schwierigkeiten behaftet, daß er sich nur mit größter Mühe bilden läßt. Wer sieht z.B. in der Kraft immer und unter allen Umständen nichts als einen Strom von Impuls, so daß im Interesse einer plastischen Anschauung das Wort Kraft besser durch das Wort *Impulsstrom* ersetzt werden sollte? Ja, wer glaubt überhaupt, ernsthaft so sprechen und denken zu dürfen? Und doch würden große Teile der Newtonschen Mechanik einfacher und durchsichtiger, wenn man dem Impuls die Vorrangstellung einräumen würde, die ihm nach unserer heutigen Erkenntnis gebührt. Das wird im Aufsatz von ***F.** Herrmann* “Mechanik – Abriß einer Neudarstellung” gezeigt.

Sogar von der Energie läßt sich im Rahmen der *Newtonschen* Mechanik eine Anschauung greifbarer Mengenartigkeit nur mit Schwierigkeit und gegen den mathematischen Kalkül bilden. Wie soll denn ein Kurvenintegral $\int \boldsymbol{F} \mathrm{d}\boldsymbol{r}$, und sei es auch in seiner einfachsten Form $\boldsymbol{F}\Delta\boldsymbol{r}$ das dazu noch “die am Körper verrichtete Arbeit” genannt wird, zur Vorstellung führen, daß es sich dabei um eine mengenartige Größe handelt, die irgendwo steckt, irgendwo enthalten ist? Würde nicht jeder annehmen, daß, wenn sie schon irgendwo steckt, sie in dem Körper sein müßte, an dem die “Arbeit verrichtet” wurde. Tatsächlich ist das manchmal auch der Fall, nämlich dann, wenn die Arbeit zur Beschleunigung des Körpers führt. Führt sie jedoch nur zur Änderung der Lage, genauer der Höhe des Körpers über dem Erdboden, so steckt sie nicht im Körper, sondern im Gravitationsfeld. Stattdessen spricht man dann aber von der potentiellen Energie oder der Lageenergie *des Körpers.*

Wer würde, wenn er sich schon einmal zu der Anschauung von der Energie als einer mengen- oder substanzartigen Größe durchgerungen hat, die irgendwo zu suchen ist, diese “potentielle Energie des Körpers” dann nicht im Körper vermuten? Das aber ist de facto wieder falsch. Glaubt jemand im Ernst, daß sich ein festes Vertrauen in die einfache Vorstellung der Mengen- oder Substanzartigkeit der Energie einstellt, wenn diese Vorstellung in dem Begriffssystem, in dem man operiert, zu einer solchen Kette von Verwirrungen führt? Für die *Newtonsche* Mechanik war die Energie historisch keine mengenartige Größe, sondern eines der “ersten Integrale der Bewegungsgleichungen”, und das bleibt sie in dieser Theorie im Grunde, wie sehr man sich auch um ein anders klingendes Vokabular bemüht. Deutlicher als lange Erläuterungen es könnten, wird das demonstriert durch einen Blick auf die sprachlichen Jonglierübungen mit dem Wort “Arbeit” und die Arten ihres “Verrichtet-Werdens” in den verschiedenen Versuchen, den herkömmlichen Physikunterricht unter Betonung des Energiebegriffs elementar darzustellen.