

# Was an der Physik geht jeden an?

## Ein Beitrag zur Didaktik der Physik

Von Gottfried Falk, Karlsruhe\*)

Vor einem Jahrzehnt noch war die Herbsttagung der DPG das *große* Jahrestreffen der deutschen Physiker; die den einzelnen Fachrichtungen der Physik dienenden Frühjahrstreffen bildeten die *kleinen* Tagungen. Inzwischen hat sich das Bild gewandelt: Die diesjährige Frühjahrstagung über Festkörperphysik zählte drei mal so viele Teilnehmer wie die sich nun ihrem Ende zuneigende Herbsttagung. In der Sprache des an die Zahl als Beweismittel gewohnten Physikers ist das nicht mehr ein kleiner quantitativer, sondern ein nahezu qualitativer Effekt. Auch für den Nicht-Physiker drückt sich hierin überzeugend aus, daß die in verschiedenen Zweigen der Physik arbeitenden Physiker sich anscheinend selbst nicht mehr als Diener einer einheitlichen Wissenschaft empfinden, jedenfalls nicht in dem Sinne, daß sie sich gegenseitig viel zu sagen hätten. Und warum soll es dann der Außenstehende tun, auch wenn ihm in der Schule beigebracht wurde, die Physik sei eine einheitliche große Wissenschaft?

Hat sich der Universalitäts- und Fundamentalitätsanspruch, mit dem die Physik einst antrat, nämlich die Grundlage unserer gesamten Naturwissenschaft zu sein, ja in gewissem Sinn unseres gan-

zen rationalen Weltbilds, als haltlos erwiesen? War alles nur eine Fiktion? Ist es vielleicht sinnvoller, die Physik nicht als Einheit zu begreifen, sondern als Summe spezialisierter Tätigkeiten, so wie wir es mit den technischen Fächern gewohnt sind zu tun? Vom Wissenschaftsbetrieb her gesehen, wäre dieses Bild heute sicher zweckmäßiger. Jeder von uns erlebt nur allzu häufig, daß Elementarteilchenphysiker und Festkörperphysiker einander kaum noch verstehen; sogar Halbleiter- und Metallphysiker haben in ihrer Verständigung mehr als nur sprachliche Schwierigkeiten. Da ist einmal die Einschätzung der Wichtigkeit neu gewonnener Erkenntnisse. Welchen Festkörperphysiker regt es noch auf, ja *kann* es überhaupt aufregen, wenn bei Hunderten von bekannten Elementarteilchen ein weiteres entdeckt wird. Und welcher Elementarteilchenphysiker wird angesichts der Fülle von Supraleitungssprungpunkten im Übergangsverhalten irgendwelcher besonderen Substanzen einen registrierenswerten Fortschritt sehen? Und was soll gar der Außenstehende mit beiden Fortschritten anfangen? Sofern er sich seinen gesunden Menschenverstand bewahrt hat und nicht dem Respekt vor dem Unverständlichen erliegt, wird er beides als für ihn selbst belanglos erachten.

Überdies aber macht jede Forschungsrichtung sich von dem von ihr behandelten physikalischen Gegenstand noch ihr eigenes Bild, ihr eigenes Modell. Für die Forschung selbst ist das offenbar nicht von Nachteil, denn sonst würde es nicht geschehen. Von Nachteil ist es aber für das gegenseitige Verstehen, für die geistige Anregung und vor allem für das Gefühl, nicht nur ein Teil einer zusammengewürfelten Summe zu sein, sondern ein Teil eines strukturierten Ganzen. Und wieder ist schwer einzusehen, daß alle diese Modelle und spezialisierten Vorstellungen für den Außenstehenden von Bedeutung sein sollen.

---

\* Prof. Dr. Gottfried Falk, Institut für Didaktik der Physik der Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, 7500 Karlsruhe 1.

## Einheit durch überkommene Ausbildung

Und dennoch: Fragt man Physiker der verschiedenen Fachrichtungen, ob sie sich noch als zusammengehörig, als Vertreter einer einzigen großen Wissenschaft empfinden, so wird man im allgemeinen der Beteuerung begegnen, die Physik bilde nach wie vor eine Einheit, und sie repräsentiere die allgemeinen Grundlagen der Naturwissenschaft. Was aber sind diese allgemeinen Grundlagen? Vordergründig ist es nicht viel mehr als die gemeinsame Ausbildung, die alle Physiker genossen haben, und die seit einem halben Jahrhundert oder gar länger dem uns allen wohlbekanntem Ablauf folgt: Mit Mechanik und Wärmelehre beginnt sie, dann folgen Elektrizitätslehre und Optik und schließlich die „neuen“ Gebiete wie Atomphysik, Kern- und Teilchenphysik sowie Festkörperphysik. Dieser Gang der Ausbildung ist so eingefahren, daß man fast den Eindruck erhält, er wäre zwangsläufig, die Natur wäre eben so gebaut. Die relative Einhelligkeit der Physiker über das, was „die Physik“ eigentlich ist, beruht jedenfalls zum großen Teil auf dieser Einheitlichkeit ihrer Ausbildung und damit ihres gemeinsamen Wissens. Tatsächlich gibt es auch bis heute keine nennenswerten Zweifel unter Physikern, ob ihre Ausbildung eigentlich noch zeitgemäß sei, d. h. die aktive Wirklichkeit ihrer Wissenschaft noch genügend gut widerspiegele. Wenn es eine ernsthaftere Diskussion gibt, so höchstens darüber, ob die Quantenmechanik in ihrer Rolle als Krönung der Physik mit einem einzigen Vorlesungskurs hinreichend gewürdigt ist oder nicht.

Diese Einhelligkeit in der Meinung darüber, was Physik im Grunde ist, führt natürlich zu dem Schluß, daß auch derjenige, der sich als Außenstehender für Physik interessiert, oder dem sie als Bildungsgut in der Schule vermittelt werden soll, den gleichen Weg durchlaufen muß wie der Berufphysiker in seiner

Ausbildung, nur sozusagen „im kleinen“. Wie genau dieser Schluß verwirklicht ist, zeigt ein Blick in unsere Schulbücher. Sie sind nichts als kleinere Ausgaben der Bücher, die der Berufphysiker in seiner Ausbildung braucht. Wenn es zutrifft, daß „die Physik“ identisch ist mit diesem Lehr- und Wissenskanon, dann ist in der Tat die Alternative unvermeidlich, daß sich die Physik entweder nur auf diese Weise präsentieren läßt oder gar nicht. Will man sie seinen Mitmenschen überhaupt anbieten, muß es auf die herkömmliche Weise geschehen. Allerdings ergibt sich dann auch für den Außenstehenden ein ähnliches Dilemma wie für den Physiker selbst: Die Physik von heute, die lebendige Wirklichkeit dieser Wissenschaft, hat mit dem, was er gelernt hat, nur ephemere zu tun; das Gelernte erlaubt ihm nicht, die neuen Entwicklungen zu verstehen und einzuordnen. Und wozu soll er sie auch verstehen, denn für sein eigenes Leben sind sie meist ohne spürbare Bedeutung!

## Atome als die tiefere Wirklichkeit?

Hat die Physik aber keine Einsichten über die Natur anzubieten, die auch für den interessierten Nicht-Physiker, ja vielleicht gar für jeden Menschen von Bedeutung sind? Die meisten Physiker würden diese Frage bejahen, denn es gibt in der Tat so viele physikalische Einsichten von Belang, daß es kaum möglich ist, daß nicht einige von ihnen auch für den Außenstehenden Bedeutung haben sollten. Das Problem ist nur, welche der Resultate der Physik diesen Anspruch erheben können. Da aber gehen die Meinungen der Physiker auseinander. Jeder hält die Einsichten, die in seiner eigenen Arbeit eine zentrale Rolle spielen, für besonders wichtig — wobei die Entscheidung zugunsten der eigenen Sache vielleicht gemildert wird durch die in der gemeinsamen Erziehung übernommenen Urteile und Vorurteile. Dennoch wird

man erwarten dürfen, daß die von den Physikern als wichtig erklärten Einsichten einen nicht leeren Durchschnitt haben. Vermutlich greife ich nicht fehl in der Annahme, daß die Atomistik zu diesem Durchschnitt gehört, also die Einsicht, daß die Materie aus Atomen besteht und alle Stoffe unserer Welt sich als Kombinationen dieser Atome verstehen lassen. Da auch unsere Wissenschaft von Autorität nicht frei ist, darf ich hier etwa *Feynman* anführen, der die Atomistik für die grundlegende physikalische Erkenntnis der letzten 100 Jahre hält. Im Bild von Myriaden und Abermyriaden kleiner Moleküle, deren Springen und Tanzen die brandende Meereshelle zu einem Schauspiel von zu Ordnung sich formender Unordnung machen, sieht seine Phantasie ein Phänomen von so überwältigender Schönheit, daß er es in lyrische Form gebracht sehen möchte. Doch ich fürchte, hierfür wird sich kein Lyriker finden, ebenso wenig wie sich ein Lyriker gefunden hat, der in einer Blume oder einem schönen Mädchen die erdrückende Mannigfaltigkeit von Myriaden und Abermyriaden kleiner in ständigem Stoffwechsel befindlicher Zellen sieht. Die Zerlegung der Materie in relativ wenige Arten von Atomen, wie auch die (gröbere) Zerlegung von Lebewesen in relativ wenige Arten von Zellen mag auf den Phantasiebegabten nicht nur eine geistige, sondern auch eine ästhetische Faszination ausüben; normalerweise aber ist es die vollendete Form, das strukturierte Gebilde, das uns ästhetisch wie auch geistig anzieht. Die Auflösung der Natur in die monotone Einförmigkeit mikroskopischer Bausteine hat vor allem eine rationale, eine philosophische Anziehungskraft.

Aber ist es nicht wert, das Bild von den Atomen zum allgemeinen Wissensgut zu machen — das Bild jener Atome, deren Anzahl so ungeheuer groß ist, die sich untereinander aber nur sehr wenig oder gar nicht unterscheiden, so daß es ihre

Kombinationen sind, die die unübersehbare Mannigfaltigkeit der Formen der Materie bewirken, die wir aus unserer Erfahrung kennen, ja sogar die Mannigfaltigkeit aller Formen von Materie darstellen, die es überhaupt geben kann? Hier wird vermutlich jeder zustimmen. Aber dann erhebt sich die Frage, in welchem weiteren Zusammenhang dieses Bild stehen soll. Auch die Vielfalt der Lebewesen läßt sich im Prinzip aus der Kombination von Zellen mit relativ geringfügigen Funktionsunterschieden erklären; aber was außer dem soeben ausgesprochenen Satz muß man noch über Lebewesen wissen, wenn man ein Bild von den tatsächlichen Formen des Lebens bekommen will? Die Atomistik löst die Welt auf in lauter kleine, sich im leeren Raum wie in einer großen leeren Kiste bewegende, miteinander wechselwirkende Kügelchen. Die Bewegungen der Kügelchen werden bestimmt durch die Gesetze der Mechanik und ihre gegenseitige Wechselwirkung, die sogenannten fundamentalen Gesetze, die es zu erforschen gilt. Geht dieses Bild nicht jeden an, einfach weil es die tiefere Wahrheit über die Welt darstellt?

Dennoch kommt die Antwort auf diese Frage von seiten der Physik zögernd und nicht ohne Einschränkungen. Zunächst weiß jeder Physiker, daß im obigen Bild die Mechanik genau genommen durch die Quantenmechanik ersetzt werden muß. Damit wird aber auch das einfache Bild vom kleinen Kügelchen fraglich. Nach Aussage der Quantenmechanik ist das Kügelchen-Sein eines Gegenstands nur möglich, wenn er hinreichend groß ist. Je kleiner er wird, umso mehr versagen die Bilder unserer gewohnten Anschauung. Die Frage, was ein Atom denn nun eigentlich sei, beantwortet *Heisenberg* so, daß es streng genommen durch Bilder unserer Anschauung überhaupt nicht wiedergegeben werden könne, sondern lediglich durch eine Reihe mathematischer Relationen zwi-

schen Symbolen, die physikalische Größen repräsentieren. So schöne Modelle vom Atom wie das Bohrsche Mikro-Planetensystem sind demnach nur Krücken, die in manchen Situationen helfen, in anderen aber zu falschen Schlüssen verleiten. Und das Dumme an der Sache ist, daß eine Menge physikalischer Erfahrung dazu gehört zu wissen, in welchen Fällen solch ein Modell hilfreich und gut ist und in welchen es eine Falle darstellt.

Die Hoffnung, über die Atomistik einen Teil der Physik zu finden, der jeden angehen könnte, ist somit auch nicht sehr groß. Es ginge nur, wenn man auf allgemeine und ausnahmslose Gültigkeit verzichtet. Für den, der Orientierung will, bedeutet das aber Unsicherheit, und wer glaubt schon gern an die generelle Wichtigkeit von Vorstellungen, die nicht „absolut wahr“, also immer und unter allen Umständen richtig sind, sondern von vornherein das Stigma des Unvollkommenen auf der Stirn tragen? Wenn solche Vorstellungen für den Außenstehenden trotzdem wichtig sein sollen, müßten sie für ihn eine besondere Brauchbarkeit haben, d. h. sie müßten ihm Antwort auf Fragen erlauben, die für ihn persönlich von Bedeutung sind und die anders nicht oder nur sehr schwer beantwortet werden können. Ob das die Atomistik kann, möchte ich bezweifeln.

### **Welche Einsichten gehen jeden an?**

Die letzten Bemerkungen zeigen bereits die Kriterien, die erfüllt sein müssen, wenn Einsichten jeden angehen sollen: Es müssen Einsichten sein, die nützlich sind, oder, wie man heute gern sagt, die „etwas bringen“. Nützlichkeit ist dabei nicht einfach nur im Sinne eines materiellen Vorteils zu verstehen, sondern auch als Befriedigung eines philosophischen oder transzendenten Bedürfnisses. Es muß sich also um physikalische Einsichten handeln, die erstens ausnahmslose

Gültigkeit beanspruchen und zweitens von praktischer Bedeutung für den einzelnen sind oder zumindest sein können. In diesen beiden Bedingungen begegnen uns übrigens zwei alte Wurzeln der Physik, nämlich das philosophische und das technische Bedürfnis des Menschen. Das erste dieser Bedürfnisse erhebt sich mit dem Bewußtwerden der Existenz des Menschen als eigenes, von der Umwelt scheinbar klar abgrenzbares Individuum. Es betrifft die Frage, wie die Welt, in der er zu leben hat, eigentlich aussieht. Das zweite Bedürfnis des Menschen ist das nach „Techniken“, die dazu dienen, seine Wünsche und Träume zu erfüllen. Unter dem Wort Techniken möchte ich auch subsumieren, was man erhabener gern den „schöpferischen Drang“ des Menschen nennt. Das nüchternere Wort Technik soll darauf hinweisen, daß dieser Drang sich nicht nur im Künstlerischen äußert (was übrigens stets die Beherrschung einer Technik voraussetzt, die vom Betrachter nur allzu leicht und gern übersehen wird), sondern in vielfältigem anderen Tun des Menschen, wie in den Werken der Technik, im Bauen, aber auch im Politischen bis hin zum Kriegsführen.

Wenn ich von Philosophie und Technik als zwei Hauptwurzeln der Physik spreche, so meine ich damit weder, daß es nicht noch weitere Wurzeln gibt, noch daß die Erkenntnisse und Probleme der heutigen Physik eindeutig einer dieser Wurzeln zuzuordnen wären. Das ist ebenso wenig möglich, wie einen einzelnen Zweig eines Baumes eindeutig einer bestimmten Wurzel zuzuordnen. Und wie bei einem Baum die Zuordnung von Zweigen und Wurzeln umso weniger möglich ist, je höher der Zweig ansetzt, je später er also gewachsen ist, so sind auch physikalische Einsichten und Resultate umso weniger einer dieser beiden Wurzeln zuzuordnen, je neueren Datums sie sind. Nur bei den frühen Erkenntnissen sind die Beweggründe, also die

Wurzeln noch relativ deutlich zu erkennen. So spielt in *Newtons* Mechanik die naturphilosophische Komponente eine unverkennbar dominierende Rolle. Diese Mechanik wurde mehr als zwei Jahrhunderte lang als die „eigentliche“ Physik angesehen. Ein physikalisches Problem wurde erst dann als gelöst betrachtet, wenn es auf Mechanik zurückgeführt war. Und das ist im gewissen Sinn bis auf den heutigen Tag so. Statt von Mechanik sprechen wir nun von Quantenmechanik (bemerkenswerterweise nicht von Quanten*physik*), und es ist auch heute noch so, daß ein Problem dann als gelöst gilt, wenn es auf Quantenmechanik reduziert ist. Die Lösung wird dabei als umso profunder betrachtet, je mehr mathematische Formeln und Tricks benutzt werden. Bis auf den heutigen Tag ist daher eine Höherbewertung der philosophischen Komponenten der Physik unverkennbar. Das ist besonders deshalb erstaunlich, weil die Erkenntnisse, die wir heute als die bestgesicherten der Physik ansehen — ich meine vor allem die Erhaltung der Energie sowie die Unmöglichkeit der Vernichtung von Entropie — sicher mehr der technischen Komponente zuzurechnen sind.

### **Die traditionelle Rangordnung der physikalischen Begriffe**

Hier sind wir, ohne daß es vielleicht bewußt geworden ist, bereits mitten im Thema. Wenn wir nämlich entscheiden wollen, was an der Physik jeden angehen kann, müssen wir sie in eine Form bringen, in der sie geordnet erscheint nach der Wichtigkeit, d. h. Tragfähigkeit und Brauchbarkeit ihrer Begriffe. Dabei wäre es erstaunlich, wenn diese Ordnung identisch wäre mit der der historischen Entwicklung. Es ist unvermeidlich, daß die Entwicklung Umwege gemacht hat und manchmal wohl gar in eine Sackgasse geraten ist. Man wird daher warten müssen, daß die begriffliche

Ordnung der Physik nach der Allgemeinheit und Tragfähigkeit ihrer Begriffe vermutlich anders aussieht als jene, die uns vertraut ist.

Beginnen wir also mit der Frage nach der Wichtigkeit, d. h. der wissenschaftlichen Tragfähigkeit der physikalischen Begriffe. Heute ist jedem Physiker klar, daß die Energie eine der fundamentalen physikalischen Größen ist. Schaut man aber in die Physikbücher, so erhält man einen durchaus anderen Eindruck. Sie beginnen mit der expliziten oder impliziten Versicherung, daß Raum und Zeit die fundamentalen Begriffe, ja sozusagen Voraussetzung jeder Naturerkenntnis überhaupt sind. Dann folgen Geschwindigkeit, Beschleunigung, Masse, Kraft. Aus diesen Größen wird zunächst der Begriff der Arbeit, dann erst der der Energie gebildet. Besonders klar ist das in *Pohls* Lehrbuch „Mechanik“ zu erkennen, wo ein Abschnitt überschrieben ist „Hilfsbegriffe, Arbeit, Energie, Impuls“. Ist das ein Versehen oder eine Unzulänglichkeit des Autors? Ich glaube nicht. Pohl spricht nur klar und unmißverständlich aus, welche Rangordnung die verschiedenen Begriffe in der Newtonschen Mechanik haben, und er tut es mit Worten, die jeder versteht. In dieser Theorie spielt die Energie in der Tat die Rolle eines Hilfsbegriffs. In den klassischen, vielbändigen Darstellungen der Mechanik war die Energie nichts als ein „erstes Integral“ der Bewegungsgleichungen. Und daran hat sich bis heute in der Sache nichts geändert; der mathematische Terminus des vorigen Jahrhunderts wird lediglich ersetzt durch ein anderes, modernes Wort, nämlich durch „Konstante oder Integral der Bewegung“. Sonst aber bleibt alles beim alten, in der Struktur wie in der Logik des Aufbaus.

Tatsächlich ist der zentrale Begriff der Newtonschen Mechanik nicht der einer physikalischen Größe, die erhalten bleibt, sondern der der *Bewegung* und zwar der Bewegung des als Individuum

aufgefaßten geometrischen Punkts, des Massenpunkts. Deshalb spielen auch die Masse als Eigenschaft des bewegten Individuums und die Kraft als Wirkung der Außenwelt auf das Individuum die Rolle der fundamentalen Größen, während die Energie nur als mathematisch „abgeleitete“ Größe erscheint. Man kann daher schwerlich sagen, die Newtonsche Mechanik ließe die physikalisch fundamentale Rolle der Energie klar erkennen. Ich gehe sogar noch einen Schritt weiter und behaupte, daß der allgemeine Energiebegriff ohne die Vorherrschaft der Newtonschen Mechanik möglicherweise viel früher erkannt worden wäre. Zur Begründung dieser Ansicht möchte ich folgende Argumente anführen:

1. Bereits im Altertum (wie auch im Mittelalter) war die „goldene Regel der Mechanik“ ein bekanntes, bei der Konstruktion von Maschinen benutztes Prinzip. Diese Regel aber ist nichts anderes als die Erhaltung einer Größe, deren Betrag sich im Einzelfall aus „Last (= Gewicht) mal Lastarm“ berechnen läßt.
2. Die ungezählten Vorschläge und Bemühungen zur Konstruktion von perdenen Mißerfolg ist physikalisch ein *petua mobilia* und der ihnen beschieweit zuverlässigerer und überzeugenderer „Beweis“ für die Erhaltung der Größe Energie, als es jede mathematische Deduktion sein kann.
3. *Galileis* Untersuchungen zum freien Fall enthalten nicht nur die Beziehungen zwischen Fallstrecke, Geschwindigkeit und Fallzeit, sondern auch die ganz andersartig geartete Relation  $v = \sqrt{2gh}$  zwischen der Fallhöhe  $h = z - z_0$  und dem Betrag der Geschwindigkeit  $v$ . Schreibt man diese Relation in der Form  $(v^2/2) - gz = -gz_0 = \text{const.}$ , so erkennt man nach Multiplikation mit der Masse  $m$  des fallenden Körpers den gewohnten Ausdruck der Energieerhaltung. Vor allem aber enthalten *Galileis* Unter-

suchungen die Erkenntnis, daß die letzte Relation, also die Energieerhaltung, nicht nur für den senkrechten freien Fall gilt, sondern für *jeden* Bewegungsvorgang im Schwerfeld der Erde, bei dem ein Körper irgendeine vorgeschriebene Bahn durchfällt.

Durch die *Newtonsche* Mechanik wurde diese Entwicklung in gewissem Sinn unterbrochen. Dadurch daß mit ihr der Begriff des bewegten individuellen Punktes in den Vordergrund tritt, erfahren auch in *Galileis* Untersuchungen jene Teile eine Betonung, in denen es um die Zeitabhängigkeit der geometrischen Lage des fallenden Körpers geht. Die weitergehende, von Galilei aus einfachen Beobachtungen erschlossene, der Energieerhaltung äquivalenten Erkenntnis ergibt sich in der Newtonschen Mechanik erst als Resultat einer ganzen Reihe mathematischer Schritte, die schließlich zu der jedem Physiker vertrauten Beziehung  $E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = \text{const.}$  führen. An neuen Einsichten über die Energie aber liefert die Newtonsche Mechanik nichts außer der, daß es den Anteil  $E_{\text{pot}}$  nicht nur im Schwerfeld der Erde gibt, sondern in jedem „Potentialfeld“.

### Die Entwicklung des Energiebegriffs außerhalb der Newtonschen Mechanik

Die Idee einer nicht an Geometrie und Bewegung gebundenen Größe mit allgemeiner Erhaltungseigenschaft gewann erst Gestalt im Zusammenhang mit dem Bau von Dampfmaschinen. *Sadi Carnot* tat den großen Schritt zum allgemeinen Konzept der mengenartigen Größe, einem Konzept, das in der heutigen Physik, wie noch klar werden wird, eine geradezu beherrschende Rolle spielt. Zum Verständnis dieses seiner Zeit weit vorausseilenden Schritts mag vielleicht die Bemerkung dienen, daß 'Carnots Vater, der General *Lazare Carnot*, der die Versorgung der französischen Revolutions-truppen leitete, sich mit dem Problem

der idealen Maschine beschäftigt hatte. Vermutlich ist dem Sohn dadurch die Idee gekommen, daß dieses Problem keine Frage der Mechanik ist, die der Vater allein in Betracht gezogen hatte, sondern daß es eine allgemeine Theorie geben müsse, die auch die seinerzeit neuen, mit Feuer betriebenen Maschinen einschließt. Der Wirkungsgrad einer Maschine, die auf ideale Weise „Wärme“ in „Arbeit“ umwandelt, sollte nach Auffassung Carnots nicht von konstruktiven Details der Maschine abhängen, sondern von den Werten bestimmter physikalischer Größen beim Betrieb der Maschine. Das Problem war natürlich, welche physikalischen Größen dafür in Betracht kommen. Carnot erkannte, daß die Temperatur dabei eine wichtige Rolle spielt. Seine Behauptung, daß der maximal mögliche Wirkungsgrad sogar allein von den Temperaturen am Eingang und Ausgang der Maschine abhängt, konnte bei seiner Mitwelt allerdings nicht viel mehr als ungläubige Skepsis hervorrufen, diskutierte man in Technikerkreisen zur selben Zeit doch Verbesserungen der Maschinen dadurch, daß man statt Wasser Betriebs-substanzen mit höherem Dampfdruck nehmen sollte. Selbst heute, da wir im Besitz einer vorzüglich funktionierenden Theorie sind, kostet es noch Mühe, einzusehen, daß bei gleichen Temperaturen ein höherer Dampfdruck, also ein höherer Betriebsdruck in einer Maschine nicht einen höheren Wirkungsgrad bedeutet.

Erst ein Jahrzehnt nach Carnots frühem Tod bemächtigte sich die wissenschaftliche Welt des Problems der Wärme. Die Entwicklung ist allgemein bekannt, so daß ich mich auf wenige Namen beschränken darf. *Mayer* und *Joule* konzipierten und propagierten den allgemeinen Begriff der Energie, *Thomson (Kelvin)* erkannte, daß Carnots Überlegungen einen von der Materie und ihren Erscheinungsformen unabhängigen Temperaturbegriff implizierten. *Clausius* schließlich führte den Begriff der Entropie

ein. Das Problem war damit gelöst: In der Wärme offenbarte sich nicht eine einzige, sondern *zwei* fundamentale mengenartige Größen, die Energie  $E$  und die Entropie  $S$ . Die eine dieser Größen befolgte einen allgemeinen Erhaltungssatz, die zweite ein ebenso allgemeines Ver-nichtungsverbot.

Rückblickend erkennt man deutlich, daß Newtons Mechanik in der Entdeckung des allgemeinen Begriffs der Energie keine entscheidende Rolle gespielt hat, und bei der Entropie konnte sie gar keine Rolle spielen, denn diese Größe gibt es in der Mechanik gar nicht. Aber auch die allgemeine Energieerhaltung ist mechanisch weder zu beweisen noch überhaupt einzusehen. Der Teil der Energie, der sich mit den für die Mechanik fundamentalen Größen, nämlich Lage, Geschwindigkeit, Masse allein fassen läßt, bleibt bei den mit Entropieerzeugung verknüpften Bewegungsvorgängen im allgemeinen ja gar nicht erhalten. Nur bei Beschränkung auf „ideale“ Bewegungen, die in der Natur nur näherungsweise realisiert sind, nämlich in der Näherung, in der die Entropieerzeugung vernachlässigt werden kann, gibt es einen mechanisch allein begründbaren Energie-satz. Die physikalische Energieerhaltung aber ist nicht an diese Näherung gebunden, sie gilt auch bei beliebiger Entropieerzeugung.

Mit hinreichendem Abstand betrachtet, zeigt die geschichtliche Entwicklung also selbst, daß zum Verständnis der fundamentalen Rolle der Energie die Mechanik der Punktbewegung weder nötig ist noch eine besonders gute Hilfe darstellt. Wenn es darum geht, die Energie in ihrer vollen physikalischen Bedeutung begrifflich zu machen, ist es didaktisch keineswegs vorteilhaft, die Mechanik so in den Vordergrund zu stellen, wie es traditionell geschieht. Und noch weniger gerechtfertigt ist, die traditionell als Fundament der Physik betrachteten Begriffe, wie den der Bewe-

gung, also Lage und Geschwindigkeit, sowie den der Kraft so in den Vordergrund zu stellen, wie es üblich ist.

Da die Mechanik dank ihrer großen Erfolge in der Himmelsmechanik historisch die Rolle des dominierenden wissenschaftlichen Vorbildes spielte und die Physiker in ihr gedrillt waren, ist es nicht verwunderlich, daß man die beiden fundamentalen Größen  $E$  und  $S$  mechanisch zu verstehen versuchte. Für die Energie  $E$  war das trivial, weil es sie auch in der Mechanik gab, wenn auch nur als „Hilfsbegriff“, der von nun ab jedoch eine Aufwertung erfuhr. Die Entropie mit der Mechanik in Verbindung zu bringen, war dagegen weitaus schwieriger. Mit diesem Versuch ist der Name *Boltzmanns* verknüpft. Aus Zeitgründen muß ich es mir hier leider versagen, auf diese Entwicklung näher einzugehen. Erinnerung sei nur daran, daß Boltzmann diesen Brückenschlag mit dem Begriff der Wahrscheinlichkeit versuchte, indem er die Entropie als Maß der Wahrscheinlichkeit eines Zustandes ansah. Wenn auch der Begriff der Wahrscheinlichkeit uns gefühlsmäßig vertrauter ist als die Entropie und unserem Bedürfnis nach Anschaulichkeit vielleicht entgegenkommt, verdeckt diese Art Anschauung doch die für die Handhabung der Größe  $S$  so wichtige Eigenschaft ihrer Mengenartigkeit. Die Wahrscheinlichkeit selbst ist nicht (additiv) mengenartig, sondern erst ihr Logarithmus, und davon wiederum haben wir keine Anschauung. Das erklärt vielleicht, warum trotz Boltzmanns Bemühungen die Entropie dem an der Mechanik geschulten Physiker niemals auch nur annähernd so vertraut geworden ist wie die Energie.

## Mengenartige Größen

Doch zurück zur ordnenden Übersicht über die Physik. Wenn man auch bereit ist, Energie und Entropie als besonders fundamentale Begriffe der Physik

anzuerkennen, so bilden sie ja sicher nicht allein die Grundlagen der Physik. Wie steht es z. B. mit den Grundlagen jener Teile der Physik, die wir herkömmlich nicht mit der Entropie in Verbindung bringen? Die Antwort lautet: Sie lassen sich ganz ähnlich charakterisieren wie die Wärme, nämlich unter Verwendung allgemeiner mengenartiger Größen. So wie sich die Phänomene der Wärme mit den beiden Größen Energie  $E$  und Entropie  $S$  beschreiben lassen, so lassen sich die der Mechanik zugeordneten Phänomene mit den Größen Energie  $E$  und Impuls  $\vec{P}$  sowie Drehimpuls  $\vec{L}$  beschreiben. Auch  $\vec{P}$  und  $\vec{L}$ , oder vielmehr ihre Komponenten, sind mengenartige Größen, deren fundamentale Rolle allein schon daraus folgt, daß jede Komponente für sich einen generellen Erhaltungssatz erfüllt. Wie wir Phänomene zur Wärmelehre rechnen, bei denen sich die Energie  $E$  und Entropie  $S$  eines Systems ändern, so sprechen wir von mechanischen Vorgängen an einem System, wenn sich seine Energie  $E$  und sein Impuls  $\vec{P}$  oder sein Drehimpuls  $\vec{L}$  ändern. Die Beschleunigung eines Wagens ist eine Übertragung von Energie und Impuls auf den Wagen. Und da die Energie wie auch der Impuls einem generellen Erhaltungssatz genügen, bedarf es zur Beschleunigung des Wagens stets mindestens eines weiteren Systems, das die Energie und den Impuls oder zumindest eine dieser beiden Größen liefert oder aufnimmt. Ich brauche hier nicht näher auf Einzelheiten einzugehen, denn diese sind jedem Physiker geläufig.

Auch die Elektrodynamik läßt sich in analoger Weise beschreiben, wobei die elektrische Ladung, wie unmittelbar einleuchtet, eine grundlegende mengenartige Größe ist, die wieder einen Erhaltungssatz befolgt. Eine weitere mengenartige elektromagnetische Größe ist das magnetische Moment. Es bildet übri-

gens ein Beispiel dafür, daß die Mengenartigkeit einer Größe nicht unbedingt mit einer Erhaltung gekoppelt sein muß. Daß diese Kopplung nicht notwendig besteht, wissen wir allerdings schon von der Entropie.

Das Bild, das hier von der Physik entworfen wird, mag ungewohnt erscheinen, und mancher wird sich fragen, ob die Physik sich wirklich so aufbauen läßt. Daß physikalische Größen, die einem Erhaltungssatz genügen, allgemein Größen, die bilanzierbar sind, mengenartigen Charakter haben, ist fast trivial. Man wird auch einräumen, daß derartige Größen besonders wichtig sind, besonders wenn sie generelle Regeln befolgen, wie eine Erhaltung oder ein allgemeines Verbot des Vernichtet- oder Erzeugtwerdens. Aber ob diese Größen eine vollständige Grundlage der Physik bilden, wird vermutlich Zweifeln begegnen. Erfahrungsgemäß sitzt die Meinung, daß Raum und Zeit und damit die Größen Ort, Geschwindigkeit, Masse und Kraft die eigentlichen Fundamente der Physik bilden, ja daß es fraglich ist, ob sich ohne sie die Physik überhaupt aufbauen läßt, so fest, daß sie leicht für mehr als eine Lehrmeinung, unter Umständen gar für die tiefere Wahrheit gehalten wird. Und doch behaupte ich, daß die Entwicklung der wissenschaftlichen Physik in den letzten hundert Jahren gezeigt hat, daß die Begriffe, die in der Newtonschen Mechanik als Grundbegriffe fungieren, nicht diejenigen sind, die sich in der Beschreibung der Naturvorgänge als die tragfähigsten erwiesen haben. Und wenn es überhaupt sinnvoll ist, eine Wissenschaft als eine begriffliche Hierarchie aufzufassen, so sollten nicht ausgerechnet Begriffe als Grundlagen fungieren, die sich nicht als generell tragfähig erwiesen haben.

Es ist unmöglich, diese Behauptung hier in allen Details zu erhärten und den Weg, den die Physik in den letzten hundert Jahren genommen hat,

Schritt für Schritt zu analysieren. Angesichts der unbestrittenen Vormachtsstellung, die die Quantenmechanik heute in der Physik genießt, ist das vielleicht aber auch gar nicht nötig, denn diese Theorie stellt geradezu einen lebendigen Beweis meiner Behauptung dar. Jedem Physiker ist es geläufig, daß die Quantenmechanik nicht mit den ihm zunächst als fundamental vorgestellten Größen Lage, Geschwindigkeit, Kraft operiert, sondern mit anderen Größen, allen voran mit der Energie. Zwar wird in der Einführung in die Quantenmechanik gern die Illusion aufrechterhalten, daß es auch in dieser Theorie um Mechanik ginge, was z. B. dadurch geschieht, daß die Newtonsche Mechanik in Hamiltonsche Form gebracht und dann „übersetzt“ wird. Jeder weiß jedoch, daß das keine Herleitung im Sinn einer logisch zwingenden Schlußkette ist, sondern nur ein Weg in die neue Theorie, bei dem ein bestimmter mathematischer Formalismus als heuristischer Wegweiser dient. Wenn es dann ans Quantisieren geht, sind es genau die durch unsere Betrachtungsweise schon in der klassischen Physik herausgehobenen mengenartigen Größen, nämlich Energie, Impuls, Drehimpuls, magnetisches Moment, . . ., die quantisiert, genauer sollte man sagen: scharf quantisiert werden, für die es also Quantenzahlen gibt, mit denen die Quantenzustände eines Systems festgelegt werden. Die altvertrauten Größen Lage, Geschwindigkeit, Kraft werden niemals quantisiert, und man lernt auch, daß sie nie scharfe Werte haben. Und in einer letzten Stufe der Abstraktion gibt es dann noch Dinge wie die „vollständigen Sets vertauschbarer Operatoren“ (*Dirac*), also untereinander verträglicher oder, wie man auch sagt, gleichzeitig meßbarer Größen. Physikalisch sind diese Sets aber nur dann von Bedeutung, wenn ihre Größen die mengenartigen Größen sind, die sich als die tragenden Fundamente der Physik erwiesen haben, nämlich Energie, Impuls,

Drehimpuls, Teilchenzahl. Niemals sind es dagegen die Größen, die die Mechanik zur Grundlage der Physik erklärt hat.

Die Teilchenphysik setzt dieses Beschreibungsverfahren unbeirrt fort. Sie liebt es zwar, den von ihr eingeführten neuen Größen oft Namen zu geben, die an menschliche Eigenschaften erinnern, wie Charme oder Farbe, aber sie hat auch neutralere Namen geschaffen, wie Baryonenzahl, Leptonenzahl, Hyperladung, Strangeness. All das sind jedoch nur Namen für mengenartige Größen. Daß die Werte dieser Größen nicht stetig veränderlich sind, sollte nicht irritieren. Die in der Natur vorkommenden scharfen Werte der elektrischen Ladung sind auch nicht stetig, aber niemand zweifelt deshalb an der Mengenartigkeit der Größe „elektrische Ladung“.

### Mengenartige Größen als Fundament der Physik

Ich will hier die Übersicht abbrechen und zu einem Fazit kommen. Zunächst zur Physik:

Ihre fundamentalen, nämlich einschränkungslosen Einsichten sind nicht, daß es irgendwelche kleinsten sich in Raum und Zeit bewegendem Individuen gibt, aus denen die Welt aufgebaut ist, sondern daß sich die Welt rational durch physikalische *Größen* erfassen läßt. Diese Größen sind keine Dinge, die man sieht oder fühlt, aber sie sind nicht weniger existent als alles, dem wir zweifelsfreie Existenz zuschreiben. Diese Größen zu entdecken ist schwierig und verwickelt. Es bedurfte der gemeinsamen wissenschaftlichen Anstrengung mehrerer Generationen, um die Größen zu entdecken, die der Physik heute ihre Zuverlässigkeit und Sicherheit geben, und es bedarf sicher weiterer Anstrengungen, um die Reihe dieser Größen fortzusetzen.

Was wir physikalische *Objekte* in der Welt nennen, sind keine geometrisch-

räumlichen Gebilde, sondern *Kombinationen dieser Größen*. Diese Beschreibung eines Objekts ist umso feiner und detaillierter, je mehr Größen wir zur Beschreibung verwenden. Dabei ist es gleichgültig, ob das Objekt ein Elementarteilchen, ein Atom, ein Stück eines Festkörpers, eine Pflanze, ein Tier, die Erde oder eine ganze Galaxie ist. Immer werden dieselben physikalischen Größen verwendet, und immer ist das Beschreibungsverfahren das gleiche; nur die Werte der Größen sind anders miteinander verknüpft.

Die Größen, die bis heute diese fundamentale Rolle errungen haben, sind die Energie, die Entropie, die Teilchenzahl, die elektrische Ladung, der Impuls, der Drehimpuls, ... Die Reihe ist nicht abgeschlossen, sie ist auch gar nicht abschließbar, denn die physikalische Forschung besteht im Grunde darin, diese Reihe fortzusetzen. Wir haben hier in der Aufzählung — die im übrigen eine Anordnung nach „Wichtigkeit“ ist — — noch eine Größe an prominenter Stelle eingefügt, nämlich die Teilchenzahl, über die wir bisher noch gar nicht gesprochen haben. Das sei mit Zeitgründen entschuldigt.

Die fundamentalen Größen sind mengenartig. Viele von ihnen genügen generellen Erhaltungssätzen oder anderen allgemeinen Regeln, wie dem „halben“ Erhaltungssatz, den die Entropie befolgt. Vorgänge in der Natur erscheinen demgemäß als Bilanzierungen dieser Größen. Manche der Größen haben die Besonderheit, daß sie nur bestimmte, diskrete Werte annehmen können. Wir nennen sie dann quantisiert.

Schließlich läßt sich für praktische Belange eine Wichtigkeitshierarchie unter den Größen festlegen nach der Häufigkeit, mit der sie in interessierenden Problembereichen auftreten. Die oben angegebene Reihenfolge stellt bereits eine solche Anordnung nach Wichtigkeit dar. Als praktische Belange sind dabei

die Probleme unserer gegenwärtigen zivilisatorischen Existenz zugrundegelegt worden.

### Physik und rationale Erkenntnis

Schließlich zu unserem Thema, nämlich zu der Frage, was von der Physik denn jeden angeht. In der Relation des Individuums zu dem, was es als Nicht-Ich empfindet, einer Relation, die nur zu leicht zum Gefühl der Verlassenheit in einer unermesslichen, fremden Welt wird, kann die Physik niemals Trost bieten. Im Gegenteil, sie war immer maßgeblich, ja oft sogar federführend beteiligt, wenn es darum ging, Vorstellungen des Menschen zu zerstören, die ihn heraushoben aus dem Wust des Unbegrenzten und zu etwas Besonderem machten und die deshalb neben aller unberechtigten Einbildung für ihn auch einen Trost, eine Sicherheit darstellten. Dazu gehörte die Vorstellung, daß seine Erde und damit er selbst das Zentrum der Welt sei, und als diese Vorstellung beseitigt war, der Trost, daß er das einzige vernunftbegabte Wesen in der Welt sei

und ihm deshalb eine Sonderrolle zufiele. Wir sind gerade wieder dabei, diese zweite Fluchtinsel zu zerstören. Trost muß der Mensch heute, wie eh und je, woanders suchen.

Was die Physik dem Menschen aber bieten kann, ist Hilfe, nämlich Hilfe zum rationalen Verstehen der Welt, vor allem zum Verstehen der Vorgänge, die auch seine eigene Existenz betreffen. Das Verfahren dieses Verstehens ist im Grunde von einfachster Art, es besteht aus additiven Bilanzierungen bestimmter Größen, allen voran der Energie und der Entropie. Natürlich muß das geübt werden, wie alle Fertigkeit geübt werden muß, die man beherrschen will. Man muß die Regeln „ins Gefühl“ bekommen, um sicher mit ihnen umgehen zu können. Aber es lohnt, denn es gibt dem Menschen neben seinen natürlichen Sinnesorganen einen weiteren Sinn, es gibt ihm ein Mittel in die Hand, mit dem er seine Relation zur Umwelt rational abtasten kann. Und vielleicht ist es gar ein Mittel, das zum Überleben ebenso wichtig werden kann wie jene Mittel, die ihm die Natur in der Entwicklungsgeschichte mitgegeben hat.