Geschichte der Gesetze von der Erhaltung der Materie und Energie.

Einleitung.

Um eine Naturerscheinung zu begreifen, suchen wir zunächst die Bedingungen auf, unter welchen sie stattfindet. Indem wir alsdann eine Reihe ähnlicher Erscheinungen untereinander vergleichen, heben wir diejenigen Merkmale hervor, welche allen gemeinsam und für alle wesentlich sind. Am sichersten gelingt dies durch das Experiment, weil wir auf diesem Wege nach unserm Belieben die Bedingungen eintreten lassen und verändern können. Durch das Experiment erfahren wir, welche Bedingungen notwendig und hinreichend sind, um eine bestimmte Erscheinung hervorzurufen, und in welcher Weise letztere von den Bedingungen abhängig ist. Diese notwendige Abhängigkeit, das bei allem Wechsel der Einzelerscheinungen unveränderlich Bleibende, bringen wir zum Ausdruck durch ein Gesetz. Das Naturgesetz ist demnach nichts anderes, als ein durch Abstraktion erhaltener Begriff, welcher eine Reihe gleichartiger und durch die Beobachtung gegebener Erscheinungen zusammenfasst und dadurch die Übersicht über die mannigfachen Vorgänge in der Natur ermöglicht oder erleichtert. Es darf nicht ausser Acht gelassen werden, dass dieser Begriff seinen Inhalt lediglich aus der Erfahrung schöpft. Das Naturgesetz ist kein logischer Begriff, der unter dem Einfluss unseres Denkens steht, und den wir beliebig so und auch anders begrenzen dürfen. Vielmehr erscheint uns das Gesetz als eine von unserm Zuthun gänzlich unabhängige, hinter den Vorgängen stehende Ursache, welche stets bereit ist zu wirken, sobald die erforderlichen Bedingungen erfüllt sind.

Die Erklärung einer Naturerscheinung besteht nun in der Darlegung ihrer Ursachen, in der Zurückführung derselben auf die ihr zu Grunde liegenden Gesetze. So bilden die Gesetze die Grundlage für die Naturerklärung, ähnlich wie die Axiome für den Beweis eines Lehrsatzes der reinen Mathematik. Wie die mathematischen Axiome, so dulden auch die Naturgesetze keinerlei Ausnahmen, und während eine folgerechte Anwendung der ersteren uns zu neuen Lehrsätzen führt, können wir durch Anwendung der Naturgesetze auf einen noch unbekannten Fall den Eintritt einer künftigen Erscheinung vorherbestimmen. In beiden Fällen bereichern wir unser Wissen durch eine Denkarbeit, welche die Form und die Sicherheit logischer Schlüsse hat. Soweit verhalten sich die Axiome und Naturgesetze ganz analog. Allein, während die Axiome

eines Beweises weder bedürftig noch fähig sind, ist es für die Gültigkeit eines Naturgesetzes unerlässlich, seine Übereinstimmung mit den Thatsachen der Erfahrung allseitig nachzuweisen. Mit dieser Übereinstimmung steht und fällt das Gesetz Da ferner der ursächliche Zusammenhang, in welchem die Vorgänge in der Natur unter sich stehen, ganz unabhängig von unserm Denken ist, und überdies der Bereich unserer Erfahrung stets begrenzt bleibt, so sind wir niemals gewiss, ob nicht ein Gesetz durch eine neu beobachtete Thatsache zu Fall gebracht wird. Kein Naturgesetz kann als absolut wahr gelten; und wir können es von vornherein als ein vergebliches Bemühen betrachten, dasselbe aus einem a priori gültigen Satze auf deduktivem Wege logisch ableiten zu wollen. Nur durch die Erfahrung kann ein Naturgesetz bestätigt und als richtig erkannt werden. Daher liegt auch der Inhalt des Gesetzes, insofern es gültig sein soll, stets innerhalb des Bereiches, über welchen sich naturwissenschaftliche Untersuchungen erstrecken; jede Beobachtung innerhalb dieses Bereiches muss eine Bestätigung des Gesetzes enthalten; jede darüber hinausgehende neu entdeckte Thatsache bedingt eine Erweiterung seines Inhaltes.

Je grösser dieser Inhalt ist, je zahlreicher und mannigfaltiger die Vorgänge sind, welche das Gesetz umfasst, desto hervorragender ist seine Bedeutung für die Wissenschaft. Von diesem Gesichtspunkte aus verdienen diejenigen Gesetze unsere besondere Aufmerksamkeit, welche sich auf die allen Naturerscheinungen zu Grunde liegende Materie und deren Bewegungszustand ganz allgemein beziehen. Es sind dies die beiden obersten Gesetze chemischer und physikalischer Forschung, das Gesetz der Erhaltung der Quantität der Materie und das Gesetz der Erhaltung der Energie.

Über den Einfluss der Philosophie auf die Entwicklung der beiden Gesetze.

Die Naturphilosophen der alten Griechen haben sich ernstlich bemüht, die Welt der Erscheinungen auf ihre Ursachen zurückzuführen. Auch bekundeten sie eine scharfe und sinnige Beobachtungsgabe; ihre Sprache selbst liefert hierfür einen sicheren Beweis. Allein die Art und Weise, wie sie die Naturwahrheiten aufsuchten, der Weg, den sie zum Beweise derselben einschlugen, d. i. ihre Methode, entspricht nicht den jetzt geltenden Anforderungen der Naturwissenschaft. Es fehlte ihnen das Experiment. Statt ihre Vorstellungen in beständiger und gezwungener Verbindung mit den Thatsachen der Erfahrung zu halten und den sichern Weg einer mühevollen Induktion zu gehen, gefiel ihnen ein kühnerer Gedankenflug und, wenn man es cum grano salis verstehen will, das Spiel mit Begriffen. Das aprioristische Denkverfahren war ihnen nicht bloss geläufig, sondern auch allein massgebend Ihr reger Geist war unmittelbar auf das Allgemeine gerichtet und erging sich nur zu gerne in das freiere Feld der deduktiven Spekulation. Daher kann es uns nicht befremden, dass grade die umfassendsten obersten Naturgesetze zuerst ihre Beachtung fanden. Anaxagoras sagt: „Nichts tritt ins Sein oder wird zerstört, sondern Alles ist eine Zusammenstellung und Aussonderung von Dingen, die schon vorher existierten“ Empedocles: „Thoren denken, es könne zu sein beginnen was nie war, oder es könne was ist vergehen und gänzlich verschwinden.“

Demokrit, dessen Atomistik noch in den heutigen Anschauungen wiederzufinden ist, meint: „Aus Nichts wird Nichts, und nichts was ist kann vergehen.“ Epikur endlich begründet die Erhaltung der Materie sowohl als der Kraft mit dem Bemerken, dass es ausser dem Universum keinen Ort gebe, wohin ein Atom der Materie fliehen, oder von woher eine neue Kraft eindringen könne. Die beiden letztgenannten Philosophen suchten im Gegensatz zu ihren weisen Landsleuten die Natur durch unmittelbare Beobachtung zu ergründen. Es ist daher der Fall nicht von vornherein ausgeschlossen, dass sie ihre Behauptungen durch die Wage, die ihnen bekannt war, oder durch andere Instrumente erprobten. Wir können darüber nicht sicher entscheiden, weil ihre diesbezüglichen Schriften nur in Bruchstücken zu uns gelangt sind. Jedenfalls aber haben sie ihr Untersuchungsverfahren nicht zur Anerkennung gebracht, oder es ist in dem Strom metaphysischer Erörterungen schnell und spurlos untergegangen.

Von den neueren Philosophen, welche unsere Gesetze und insbesondere das Energiegesetz metaphysisch zu begründen versuchten, interessieren uns namentlich Leibniz und Cartesius, weil dieselben auch in sachlicher Weise die Entwicklung der Gesetze beeinflusst haben. Leibniz schreibt: „Die Körper des Universums können mit anderen Körpern, welche in dem Universum nicht enthalten sind, nicht kommunizieren. Das Universum ist also ein System von Körpern, welche mit anderen Körpern nicht kommunizieren, und daher erhält sich in ihnen immer dieselbe Kraft.“ *) Cartesius behauptete, dass die Summe der Bewegungsgrössen, die er als die Produkte aus den Massen und den Geschwindigkeiten definierte, im Universum konstant sei. Bewegungen sind nach ihm die Wirkungen, deren letzte Ursache Gott ist. Mit dieser Ursache bleibt die Wirkung unveränderlich. „Dieselbe Menge von Bewegung und Ruhe, welche Gott dem Stoffe einmal eingedrückt hat, erhält Gott auch durch seinen Beistand.“ Es liessen sich ohne Mühe noch andere Philosophen anführen, welche die Ideen unserer Gesetze als Ganzes fassen und zum Ausdruck bringen. Indessen kommt es hier auf eine erschöpfende Aufzählung und Deutung philosophischer Meinungen gar nicht an; denn selbst die korrekteste Aufstellung eines Gesetzes hat nicht eher und auch nur in so fern für den Naturforscher einen wissenschaftlichen Wert, als die Übereinstimmung desselben mit den Thatsachen der Natur durch die Erfahrung und das Experiment erwiesen ist. Von einem Nachweise solcher Übereinstimmung ist aber bei den Philosophen im allgemeinen nicht erhebliches zu finden, weil ihnen die nötigen Naturkenntnisse fehlten, um ihre Ansichten zu begründen. Damit soll jedoch nicht gesagt sein, dass die Philosophen gar keinen oder doch nur einen ungünstigen Einfluss auf die Entwicklung der Naturgesetze ausgeübt haben. Zwar steht fest, dass der Beweis für die Richtigkeit eines Naturgesetzes in der Erfahrung liegt; ob letztere aber allein ausreicht, um das Gesetz aufzufinden, ist eine andere Frage. Galilei soll ein Pendelgesetz durch eine einzelne zufällige Beobachtung im Dom zu Pisa entdeckt haben. Die Erzählung mag wahr oder falsch sein; jedenfalls giebt sie der Überzeugung Ausdruck, dass die Spekulation einen wesentlichen Anteil an der Ent-

*) Poggendorff, Ann. 157, pag. 343.

deckung hat. In der That ging die Auffindung vieler Gesetze von einzelnen Beobachtungen aus, aber frühzeitig fand die Konception derselben im Geiste des Entdeckers statt, welcher dann erst zur Prüfung zahlreiche Beobachtungen in der freien Natur und im Laboratorium anstellte. Wenn daher die Philosophen und insbesondere die alten griechischen Meister des abstrakten Denkens den Boden für die prinzipiellen Grundlagen der Naturwissenschaften bereitet haben, so ist es dadurch geschehen, dass sie den Empirikern die Aussicht auf bestimmte und erstrebenswerte Ziele eröffneten, dass sie dieselben anregten, nicht bei der Feststellung vereinzelter Thatsachen stehen zu bleiben, sondern durch induktive Spekulation zur Aufstellung umfassender Gesetze fortzuschreiten. Abgesehen von dem Wert der Erkenntnisse, welche die Philosophie ergeben hat, ist letztere immerhin eine tüchtige Schule des begrifflichen (d. i. des gesetzlichen) Denkens, welche den Forschern die Mittel in die Hand giebt, ihr gewonnenes Material in festen Grenzen zusammen zu halten und dadurch zu verhüten, dass die Naturwissenschaft im Bereiche der reinen Empirie versande. Insofern also die spekulative Denkthätigkeit zur Entdeckung und Ausbildung der Gesetze führte, ist zuzugeben, dass die Philosophie einen fördernden Einfluss auf die Entwickelung der Naturwissenschaft und ihrer Gesetze ausüben kann, wie sie leider auch eine geraume Zeit allen naturwissenschaftlichen Bestrebungen hemmend in den Weg getreten ist. Das Erbteil der Griechen wandelte sich während des Mittelalters in verschiedene philosophische Systeme um. Ein gemeinsamer charakteristischer Zug derselben war die Missachtung alles dessen, was die Erfahrung an Erkenntnismaterial darbot. Die Objekte, welche fast alles wissenschaftliche Interesse absorbierten, lagen in einer der unmittelbaren Beobachtung und dem Experiment unzugänglichen Sphäre. Ihnen war der Scharfsinn und Fleiss der Gelehrten geweiht; und dort, wo es nicht zu trivial erschien, sich um die Thatsachen der Natur zu kümmern, wurde im Anschluss an die teleologische Natur-Erklärung des Aristoteles die metaphysische Denkweise auf ein Gebiet übertragen, in welchem nur eine auf Sinneswahrnehmungen fussende Induktion erfolgreich hätte wirken können. So machte sich eine Methode Naturwissenschaft zu betreiben geltend, welche allen Fortschritt von vornherein unmöglich werden liess und sogar einer sachgemässeren Richtung sich feindlich gegenüberstellte. Die Philosophen teilten mit den griechischen Weisen das Bestreben, aus einem a priori geltenden Satze alle Wahrheiten logisch abzuleiten. Sie übersahen, was uns Kant zuerst gezeigt hat, dass ein aus aprioristischen Elementen konstruierter Satz immer nur ein Regulativ unseres Denkens sein kann, dessen realer Inhalt aus der sinnlichen Erfahrung genommen werden muss. Die Geschichte der Wissenschaften lehrt, dass zunächst der Weg der aprioristischen Spekulation mit einem grossen Aufwand von geistiger Arbeit beschritten wurde; vielleicht, weil dieser Weg am unmittelbarsten und tiefsten in das Wesen der Dinge einzuführen schien; und es kann uns nicht überraschen, dass man nur nach langem Widerstreben und zögernd von einem mehr oder weniger vergeblichen Unternehmen Abstand nahm. Nur allmählich und unter harten Kämpfen brach sich zu der Zeit, als Baco v. Verulam und Galilei lebten, die neuere antischolastische Richtung der Philosophie Bahn. In dieser Zeit liegen auch die Kernpunkte, aus denen sich die Grundlagen der heutigen Natur-

wissenschaften und insbesondere unsere Gesetze entwickelten. Man fing an, auf dem festen Boden der Beobachtung zu umfassenderen Gesetzen langsam voranzuschreiten und die Sicherheit jeden Schrittes durch zahlreiche Erfahrungsgründe zu unterstützen und durch Experimente zu erproben. Auf diese allerdings umständlichere Weise erlangte man einen immer tieferen Einblick in den ursächlichen Zusammenhang und die gegenseitige Abhängigkeit der Naturerscheinungen. Freilich waren schon den Alten manche Instrumente, welche wir noch jetzt in den Werkstätten der Naturforscher erblicken, insbesondere die Wage bekannt; doch sind dieselben zu naturwissenschaftlichen Untersuchungen in bemerkenswerten Fällen nicht benutzt worden.

Das erste der hier zu behandelnden Gesetze, dasjenige von der Erhaltung der Quantität der Materie, konnte nur durch die Wage entdeckt und begründet werden; seine Geschichte steht daher mit dem Gebrauch der Wage in der innigsten Beziehung. Übrigens ist dieses Gesetz heute derart mit unseren Anschauungen verwachsen, seine Wahrheit erscheint uns so unmittelbar einleuchtend, dass es befremden könnte, von einer Geschichte dieses Gesetzes zu reden. Indessen wird sich zeigen, dass abweichende, ja geradezu entgegenstehende Ansichten noch zu einer Zeit herrschend waren, als bereits die Wissenschaft, der wir dieses Gesetz verdanken, eine hohe Stufe der Entwicklung erreicht hatte, und es wird zur Befestigung und besseren Würdigung einer grossen wissenschaftlichen Idee nicht unnütz sein, auch den Irrgängen des menschlichen Geistes an der Hand der Geschichte nachzuspüren.

Die Geschichte des Energiegesetzes lässt sich nicht ebenso an den Gebrauch eines einzelnen Instrumentes knüpfen; sie greift im wesentlichen auf die Anfänge der Dynamik zurück, und letztere fallen wieder in jene Zeit, als man allgemein begann, naturwissenschaftliche Erkenntnisse lediglich auf die Erfahrung und das Experiment zu stützen.

Geschichte des Gesetzes der Erhaltung der Quantität der Materie.

Lange bevor die Chemie ihren wissenschaftlichen Charakter annahm, war die Wage im Gebrauch. Schon die Alten, insbesondere die Ägypter, schrieben für die Zusammensetzung ihrer Metalllegierungen und für die Zubereitung von Arzneien bestimmte Gewichtsverhältnisse vor. Aber erst viel später, als sich unsere Wissenschaft einen Einblick in die Gesetzlichkeit der Veränderungen, mit denen sie es zu thun hat, verschaffte, fing man an, die Gewichte der Zerlegungsprodukte chemischer Verbindungen zu bestimmen und den quantitativen Verhältnissen so viel Aufmerksamkeit zu schenken, dass man Behauptungen vermittels der Wage rechtfertigte und bestritt. Es wird uns dies weniger auffallend erscheinen, wenn wir bedenken, dass bei chemischen Vorgängen die qualitativen Eigentümlichkeiten immer zuerst in die Augen fallen, mit den einfachsten Hülfsmitteln fassbar sind und daher der menschlichen Erkenntnis zunächst liegen. Die Qualitäten geben den Substanzen das Gepräge, durch welches sie von einander am leichtesten unterschieden werden. Aus steinartigen oder erdigen Mineralien erhielten die Alchemisten glänzende Metalle. Der spröde Bleiglanz lieferte

ihnen das biegsame Blei; durch eine weitere Behandlung des Bleies gewannen sie Silber. Dem Augenscheine vertrauend hielten sie die Veränderungen, welche sich ihnen zeigten, für Umwandlungen; und da der scheinbar verwandelte Körper für materielle Zwecke brauchbarer war, so schien ihnen die Verwandlung zugleich eine Veredlung zu sein. Durch den Gebrauch der Wage hätten sie sich freilich belehren können, dass das Silber nur in geringer Menge dem Blei beigemischt, und das Blei ein Bestandteil des Bleiglanzes sei, nach dessen Ausscheiden eine weitere Veredlung nicht stattfinden könne. Weil sie aber nur die Qualitätsverhältnisse in Rücksicht zogen, hielten sie mit scheinbarem Rechte an der Veredlungsfähigkeit der Metalle fest. Es lag nahe zu schliessen, dass auch Silber einer weiteren Veredlung fähig sei, zumal sich nach fleissigem Mischen und Schmelzen in ihren Tiegeln bereits metallische Substanzen vorfanden, welche die prächtige Farbe des Goldes zeigten.

Nach der Zerstörung der alexandrinischen Büchersammlung (642) war die Goldmacherkunst auf eine von vornherein sagenhafte mündliche Überlieferung angewiesen. Durch die Araber in eine bilderreiche und mystische Sprache gekleidet, wanderte sie, ausgeschmückt mit den übertriebensten Berichten von angeblichen Erfolgen, im 9. Jahrhundert zu den christlichen Ländern und sandte seit dem 13. Jahrhundert, einer Wucherpflanze gleich, ihre Wurzeln in alle Schichten der gebildeten Völker. Unter der Gunst von Fürsten und gehegt von dem Fleiss der Gelehrten trieb die Alchemisterei Jahrhunderte hindurch ihre seltsamen Blüten, ohne jemals die erhofften Früchte zu zeitigen. Unter geheimnisvollen Zeichen suchte man den „Stein der Weisen“, von dessen wunderbaren Eigenschaften uns hier nur eine interessiert, seine gewichtvermehrende Kraft. Durch die gesuchte Substanz sollte ein Metall nicht bloss veredelt, sondern auch ohne entsprechenden Hinzutritt einer anderen vermehrt werden. Man suchte also allen Ernstes Materie aus Nichts zu erschaffen. Nach einer Erzählung, welche verbreiteten Glauben fand, warf ein Alchemist einige Stäubchen eines grauen Pulvers auf $2\frac{1}{2}$ Lot schmelzendes Silber und erhielt dadurch 3 Lot echtes Gold.*) Ein anderes Mal wurden 3 Lot Quecksilber durch ein Grain des Steins in 5 Lot reines Gold verwandelt. Mehreren Berichten dieser Art wurde als sogenannten „historischen Beweisen“ grosse Glaubwürdigkeit zugestanden.**) Freilich konnte keiner von denen, welche vorgaben den Stein der Weisen gefunden zu haben, bewogen werden, sein Geheimnis zu verraten; allein es ist bezeichnend für den Stand der chemischen Einsichten, dass Behauptungen, welche so sehr im Gegensatz zu unserem Gesetze stehen, überhaupt möglich waren und in weiteren Kreisen Beachtung fanden.

Die Alchemisten haben sich der Wage zu wissenschaftlichen Zwecken in nennenswerter Weise nicht bedient. Ein planloses Mengen und Glühen der Substanzen sagte ihnen besser zu; und wenn sie nach einem vollkommeneren Verfahren suchten, so geschah es nur in der Absicht, aus einem Erze mehr Metall herauszuziehen als bisher, ja als überhaupt darin enthalten war. Ihre Methode entbehrte ebensosehr aller Wissen-

*) Kopp. Gesch. d. Chemie, II. S. 176.
**) Kopp. Gesch. d. Chemie, II. S. 175.

schaftlichkeit, als das Motiv ihres Handelns, und als der Ursprung und das Ziel ihrer Probierkunst. Dementsprechend bestanden auch ihre Erfolge nur in einer Anzahl von Einzelkenntnissen, welche alle nur lose zusammenhingen durch den Zweck, dem sie dienen sollten, Gold zu gewinnen. Die Alchemisten haben trotz der Ausdauer, mit der sie von ihren Schmelztiegeln Gebrauch machten, kein einziges chemisches Gesetz aufgestellt.

In der Mitte des 17. Jahrhunderts hatte die Philosophie sich neue Wege gebahnt; sie verliess das Feld der reinen Spekulation und näherte sich dem sicheren Boden der thatsächlichen Verhältnisse. Dadurch trat sie mit den übrigen Wissenschaften in innigere Berührung und prägte diesen den Stempel ihres wissenschaftlichen Geistes ein. Ihr Einfluss auf die Chemie war deutlich zu verspüren. Bisher hatte letztere ausschliesslich zur Förderung materieller Interessen, der Metallveredelung und der Heilung von Krankheiten gedient. Jetzt tritt ein rein theoretisches Interesse in den Vordergrund. Die selbständige Erforschung der Zusammensetzung und Zerlegung aller Stoffe, sowie der dabei sich zeigenden Erscheinungen und der Gesetze, nach welchen sie erfolgen, kurz, die Erkenntnis chemischer Wahrheiten wurde letzter Zweck der Chemie. Aber trotz ihres wissenschaftlichen Charakters in Ziel und Methode betrat die Chemie auch jetzt noch nicht den Weg, auf dem sie zu Gesetzen gelangen konnte, welche die Quantität der Materie betreffen. Alle Eigentümlichkeiten chemischer Vorgänge glaubte man einzig und allein durch die Erforschung qualitativer Verhältnisse erkennen zu können. Die Gewichtsverhältnisse liess man ausser Acht. An diesem Fehler der Einseitigkeit litt auch die weitgreifende und für diese Periode charakteristische Phlogiston- oder Verbrennungstheorie.

Wenn irgendwo, so scheint bei der Verbrennung Materie verloren zu gehen. So lange man keine Kenntnis der Luftarten hatte, musste das Verbrennen als ein Zerstören und Vernichten der Substanzen, als ein Trennen ihrer Teile erscheinen. Demgemäss wurde auch von den Alten die Erscheinung des Feuers durch das Ausscheiden einer Feuermaterie aus dem brennenden Körper erklärt. Bei dem arabischen Alchemisten Geber war es ein gewisses schwefliges Prinzip, bei anderen der Schwefel selbst, dessen Vorhandensein die Körper verbrennlich macht. Zwar suchte sich ein späterer Alchemist und Arzt van Helmont im Anfang des 17. Jahrhunderts eine sachgemässere Ansicht zu bilden, indem er ein bei der Verbrennung sich entwickelndes Gas, das „gas sylvestre“ (Kohlensäure) von der atmosphärischen Luft unterschied und vermittels der Wage seine Meinung rechtfertigte, dass Feuer in keinem Körper als materieller Bestandteil enthalten sein könne. Allein weder diese noch die übrigen Anschauungen van Helmonts, in denen bereits die Idee unseres Gesetzes zu verspüren ist, fanden irgend welche Beachtung. Um die Mitte des 17. Jahrhunderts lehrte Becher wieder, die Verbrennung bestehe darin, dass eine wägbare fettartige Erde aus dem verbrennlichen Körper scheide. Durch seinen Schüler Stahl wurde diese Ansicht zu einer tief in alle Teile der Chemie eingreifenden Verbrennungstheorie erhoben, und das verbrennlich machende, materielle Prinzip „Phlogiston“ genannt. Diese Bezeichnung hat sich so lange erhalten, als jene hypothetische Substanz selbst in den Vorstellungen der

Chemiker vorhanden war. Das Phlogiston hielt man nun für den Bestandteil eines verbrennbaren Körpers, dessen anderer Bestandteil das Verbrennungsprodukt bildete.

Wenn man unedles Metall unter Luftzutritt erhitzt, so bildet sich auf der Oberfläche ein aschiger Überzug, z. B. beim Eisen der sogenannte Hammerschlag; dies ist damaliger Ausdrucksweise gemäss der Kalk des Metalles. Nach Stahl besteht also ein regulinisches Metall aus dem Metallkalk und dem Phlogiston. Die Verkalkung kommt dadurch zu stande, dass das Phlogiston aus dem Metalle entweicht. Wenn man umgekehrt ein Metallkalk mit einem phlogistonhaltigen Körper erhitzt, so tritt das Phlogiston in den Metallkalk ein, und wir erhalten wieder das reine Metall. Die Wirkung des Phlogiston ist demnach derjenigen grade entgegengesetzt, welche nach jetzt geltenden Anschauungen in den meisten Fällen der Sauerstoff ausübt. Je lebhafter die Verbrennung vor sich geht, desto phlogistonreicher ist der Körper. Da den Chemikern dieser Periode nicht entging, dass der Metallkalk schwerer wog, als das dazu verwendete Metall, so musste man schliessen, ein Bestandteil eines Körpers könne absolut schwerer sein als der Körper selbst. Auch war die Thatsache nicht unbekannt geblieben, dass eine Verbrennung oder Verkalkung nur unter dem Zutritt der Luft stattfindet.

Wie ist nun die Gewichtszunahme bei der Verbrennung oder Verkalkung zu erklären, und welchen Anteil nimmt hieran die Luft? Anfangs hielt man die Gewichtsvermehrung für eine unwesentliche, die Verkalkung nur zufällig begleitende Erscheinung, die man um so mehr vernachlässigen zu dürfen glaubte, als das Gewicht eines Körpers im allgemeinen nicht konstant sei; unter anderen behauptete Stahl, wenn man eine gewogene Menge Metall calciniere und nacher wieder reduziere, so erhalte man niemals die ganze Gewichtsmenge Metall wieder, welche zur Verkalkung angewandt sei. Andere Chemiker verwechselten sogar spezifisches und absolutes Gewicht und meinten eine Erklärung gefunden zu haben, als sie bemerkten, dass das spezifische Gewicht des Kalkes geringer sei als dasjenige des Metalles. Lange konnte sich dieser Irrtum nicht halten und nun nahm man zu einer Erklärung seine Zuflucht, welche sich auf eine alte, besonders durch Aristoteles und die Scholasten vertretene Ansicht stützte. Die Feuermaterie sei gleichsam mit negativer Schwere, nämlich mit dem Bestreben behaftet, der Erde zu entfliehen und die höchstgelegenen Orte des Weltalls aufzusuchen, von wo sie herstamme; deshalb müsse der Zutritt von Phlogiston das Gewicht des Körpers vermindern. Diese Idee von der absoluten Leichtigkeit fand um so bereitwilligere Aufnahme, als sie das Rätsel der Gewichtszunahme bei der Verkalkung auf eine sehr einfache Weise zu lösen schien; indessen konnte man sie nicht recht mit dem bereits allgemein anerkannten Gesetze Galileis in Einklang bringen, dass alle Körper gleich schnell zur Erde fallen. Die Überzeugung, dass alles Materielle Gewicht haben müsse, brachte Guyton de Morveau auf den Gedanken, für das Phlogiston nicht eine absolute, sondern eine relative Leichtigkeit anzunehmen. Er erläutert seine Ansicht durch folgendes Gleichnis: Es befinden sich zwei Bleistücke an einem Wagebalken hängend unter Wasser im Gleichgewicht. Befestigt man einen Kork an einem der Stücke, so steigt letzteres; es wird leichter,

obwohl etwas hinzugekommen ist. Was nun der Kork im Wasser, das leistet das Phlogiston bei der Verkalkung in der Luft. Das Phlogiston ist nicht ganz gewichtlos, aber es ist leicht im Vergleich zur Luft. Guyton und seine Verehrer haben nicht beachtet, dass durch den Kork das Volumen des Bleistückes vergrössert wird, während doch beim Reduzieren des Metallkalks sich das Volumen verkleinert. Eine andere Ursache der Gewichtszunahme bei der Verkalkung fand man in dem Zutritt der Luft. Schon im Jahre 1630 veröffentlichte Jean Rey eine Schrift über die Gewichtsvermehrung des Zinns und Bleis bei ihrer Verkalkung. Er behauptet, dass alle Dinge, auch Feuermaterie und Luft, von der Erde angezogen würden, und zwar behalte jeder Körper stets sein Gewicht, auch wenn er mit andern Körpern in Verbindung trete. Bei der Verkalkung erfolge der Luftzutritt und somit die Gewichtsvermehrung bis zum Sättigungspunkte und daher in einer festbestimmten Weise. Durch die Luft werde der verbrennende Körper schwerer, wie Sand an Gewicht zunimmt, wenn sich Wasser daran hängt. Auch Boyle und andere hielten den Luftzutritt bei der Verkalkung nicht für eine chemische Erscheinung, sondern für eine Absorption und überliessen die Erklärung der Gewichtsvermehrung daher den Physikern. Mittlerweile wurde die Thatsache beobachtet, dass in luftdicht verschlossenen Gefässen die Verbrennung oder Verkalkung nur teilweise stattfindet. Dies führte zu der Ansicht, die Luft diene nur zur Aufnahme des Phlogiston, und eine abgegrenzte Menge der Luft könne nur eine bestimmte Menge Phlogiston aufnehmen. Abgeändert wurde diese Ansicht durch Hooke; nach ihm befindet sich in der Luft ein Stoff, der die Eigenschaft hat, alle verbrennlichen Körper bei hinreichender Temperatur aufzulösen. Das Auflösungsmittel selbst dringt in den verbrennenden Körper und vermehrt dessen Gewicht. Die kleinsten Teile des Mittels geraten in sehr schnelle Bewegung; in dieser Bewegung besteht das Feuer. In verschlossenen Gefässen hört die Verbrennung deswegen auf, weil die in der Luft befindliche Lösung bald gesättigt ist. Nach diesen Auffassungen dient die Luft nur zur Aufnahme oder zur Auflösung des Brennbaren, während die Verbrennung selbst durch das Ausscheiden des Phlogiston erfolgt. Man konnte sich immer noch nicht der naheliegenden Idee bemächtigen, dass die Verbrennung in einer chemischen Verbindung eines Bestandteiles der Luft mit dem verbrennenden Körper bestehe, so fest hatte die althergebrachte Vorstellung von der Feuermaterie und die Phlogistontheorie überall Wurzel gefasst.

Freilich warf man ein, dass es nie gelungen sei, die vielbehandelte Feuermaterie in isoliertem Zustande darzustellen; Buffon erklärte (1774) gradezu, das Phlogiston existiere mehr in den Köpfen der Chemiker als in der Natur. Doch fanden derartige Bedenken bald scheinbar ihre Erledigung. Cavendish liess einige Stückchen Eisen in einer Säure verkalken; das dabei aufsteigende Gas, meinte er, entwickle sich aus dem Metalle, und da es leicht entzündlich war, hielt er es für reines Phlogiston. Diese Ansicht fand verbreitete Anerkennung; doch wurde sie später durch Cavendishs eigene Entdeckung der Zusammensetzung des Wassers widerlegt. Bergmann stellte sogar umfangreiche Experimente an, den Gehalt der Metalle an Phlogiston zahlenmässig zu bestimmen. Überhaupt schenkte dieser ausgezeichnete Chemiker den

quantitativen Verhältnissen mehr Beachtung, als es dem Bestehen der Phlogistontheorie dienlich und den Anschauungen seiner Zeit gemäss war. Bereits war die Zusammensetzung mehrerer Salze erforscht worden; die Summe der Gewichte der Bestandteile fand sich gleich dem Gewichte des Salzes. Bergmann bestimmte zuerst die Quantität der Bestandteile nicht in isoliertem Zustande, sondern in einer leicht zu isolierenden Verbindung, deren Zusammensetzung bekannt war. Er löst z. B. eine gewogene Menge wasserfreier Soda im Wasser auf, giesst eine gewogene Menge Säure hinzu und setzt den durch die Zerlegung entstehenden Gewichtsverlust gleich dem Gewicht der aus dem Salze entwichenen Kohlensäure. Dieses Verfahren stützte sich auf die Voraussetzung, dass bei den chemischen Vorgängen die gesamte Masse der beteiligten Stoffe unveränderlich sei. Dieselbe Voraussetzung lag in noch ausgedehnterem Masse den Arbeiten Blacks zu Grunde. Bisher hatte die Meinung gegolten, dass die milden Alkalien einfache Substanzen seien, welche durch Verbindung mit Feuerstoff ätzend würden. Black konstatierte zuerst, dass diese Alkalien an Gewicht verlieren, wenn sie zu ätzenden werden; da nun ein absolut schwererer Körper in einem leichteren als Bestandteil nicht enthalten sein könne, so schloss er, müssten die milden Alkalien zusammengesetzt sein und, um ätzend zu werden, einen ihrer Bestandteile abgeben. Diesen Bestandteil nannte er „fixe Luft" (Kohlensäure). Durch Entziehung der fixen Luft wird demnach ein mildes Alkali ätzend und durch Verbindung mit derselben ein ätzendes milde. Black war zu seinen Ergebnissen durch den richtigen Gebrauch der Wage gelangt, und er zuerst suchte allgemein geltend zu machen, dass bei allen chemischen Untersuchungen die quantitativen Verhältnisse ausschlaggebend seien. Einen für unsere Betrachtung wichtigen Versuch veröffentlichte Bayen i J. 1774. Derselbe erhitzte Quecksilberkalk, welcher sich in Quecksilber und „Luft" zerlegte; die Bestandteile wurden gewogen, und ihr Gewicht genau gleich dem des Kalks gefunden. Als überdies einige Monate später durch Priestley der Sauerstoff entdeckt wurde, da begann ein lebhaftes Streben und Streiten unter den tüchtigsten Chemikern, welches ungefähr 2 Decennien dauerte und mit dem Sturz der Phlogistontheorie und der allgemeinen Anerkennung unseres Gesetzes enden sollte.

Überblicken wir die Periode der Chemie vom Anfang des 17. bis zum letzten Viertel des 18. Jahrhunderts, so sehen wir die Chemiker, dem Geiste dieser Zeit entsprechend, ihr reges und kräftiges Streben einem schönen Ziele menschlicher Forschung, der Erkenntnis der Wahrheit, widmen. Dadurch wurde die Chemie unabhängig von materiellen Interessen und gewann ihren wissenschaftlichen Charakter. Der charakteristische Ausdruck ihrer Anschauungen war die Phlogistontheorie, die erste und grosse Hypothese, welche fähig war, die damals bekannten Erscheinungen unter allgemeinen Gesichtspunkten leicht und umfassend zu veranschaulichen und dadurch die Forschung von dem Zustande planlosen Probierens zu befreien. Da aber die Phlogistiker nur die qualitativen Eigentümlichkeiten chemischer Vorgänge berücksichtigten, so war der methodische Erfolg ihrer Bestrebungen die einseitige Ausbildung der qualitativen Analyse. Den quantitativen Erscheinungen standen sie anfangs gleichgültig, später ratlos gegen-

über und verwickelten ihre Ansichten in offenbare Widersprüche mit dem ersten und allgemeinsten chemischen Gesetze, dem Gesetze von der Erhaltung der Quantität der Materie. Zwar fühlten mehrere Chemiker die Wahrheit dieses Gesetzes heraus und fanden Thatsachen, welche seine Gültigkeit für einzelne Fälle erwiesen, indessen dürfen wir sie keineswegs als die Entdecker des Gesetzes ansehen; denn sie waren ausser Stande, die Tragweite ihrer Beobachtungen zu ermessen und ihre Ergebnisse zu verallgemeinern. Die Begründung eines Gesetzes besteht nicht in der Äusserung einer Ansicht und in der Beweisführung durch einzelne wenige Versuche, sondern in dem Nachweis seiner Anwendbarkeit und Gültigkeit für eine unbegrenzte Menge von Thatsachen, in der Durchführung der Idee des Gesetzes durch den ganzen Bereich der Erfahrung. Hierzu war unbedingtes Erfordernis, das fingierte Phlogiston aus den Vorstellungen der Chemiker zu verbannen; das phlogistische System stand unserm Gesetze hindernd im Wege: es musste durch ein anderes verdrängt werden, welches auch alle quantitativen Erscheinungen umfasste. In der That sehen wir die Anerkennung unseres Gesetzes mit der Aufnahme einer ganz neuen Verbrennungstheorie gemeinsam fortschreiten. Die Vorarbeiten zur Reform der Ansichten waren bereits vollendet. Seit der Entdeckung des Sauerstoffs fehlte es keineswegs an beobachteten Thatsachen; es erübrigte nur noch, mit universellem Geiste alle chemischen Erkenntnisse unter einem erhöhten Gesichtspunkte zu vereinigen und die verschiedenen Anschauungen im Lichte der neuen Theorie zu verarbeiten. Diese Arbeit, gross genug um eine ganze Periode der Chemie in allmähligen Übergängen auszufüllen, ist in verhältnismässig kurzer Zeit durch einen einzigen Mann zu stande gebracht worden.

Lavoisier hat die Wissenschaft mit zahlreichen Entdeckungen bereichert; aber sein Verdienst besteht nicht in der Entdeckung einzelner Thatsachen, sondern darin, dass er die Allgemeinheit des Gesetzes von der Erhaltung der Quantität der Materie durch eine Reihe glänzender, scharfsinniger Versuche rechtfertigte, und infolgedessen dem bisherigen Untersuchungsverfahren eine neue, die quantitative Richtung gab. Diesem Zwecke dienen durchweg alle Arbeiten und Versuche dieses unermüdlichen Forschers. Ich kann hier nur einzelne aus seinen zahlreichen Versuchen kurzer Hand herausgreifen, um an ihnen sein prinzipielles Denken zu erläutern.

In den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts kam zwar die Wage allmählig in ausgedehnteren Gebrauch; aber wie schlecht man verstand mit diesem Instrumente umzugehen, beweist die Veröffentlichung eines Versuchs von Helmbstädt, einem Professor der Chemie an der Berliner Universität, welcher sich um die technische Chemie und später um die Verbreitung der neuen Ansichten in Deutschland verdient gemacht hat. Derselbe behauptete noch im Jahre 1774, dass ein Pfund Braunstein beim Erhitzen 1430 Kubikzoll „Luft" (Sauerstoff) abgebe, ohne dabei an Gewicht zu verlieren.*) Gradezu ein Verächter des Gebrauchs der Wage war der ausgezeichnete schwedische Phlogistiker Scheele, der unabhängig von Priestley einige Monate nach diesem den Sauerstoff entdeckte, und dessen Experimente in der qualitativen Analyse

*) Kopp. Gesch. d. Chem.

vielleicht noch heute unübertroffen dastehen. Scheeles Autorität war noch überall ausschlaggebend, als der junge Lavoisier seine ersten Arbeiten veröffentlichte. Es handelte sich um die Entscheidung der Frage, welche von alten Philosophen und im Anschluss an van Helmont und Boyle von damaligen Chemikern eifrig erörtert wurde, ob Wasser in Erde verwandelt werden könne.*) Lavoisier destillierte drei Monate lang eine gewogene Menge reinen Wassers in einem Glasgefäss, welches so eingerichtet war, dass das destillierte Wasser immer wieder auf den Boden des Gefässes zurückfloss. Es setzte sich etwas Erde ab. Eine genaue Wägung ergab, dass das Gewicht der erdigen Substanz (20,4 Grain) ungefähr gleich dem Gewichtsverluste (17,2 Grain) des Gefässes war, während das Gewicht der Wassermenge unverändert blieb. Die Differenz der beiden Gewichte erklärte Lavoisier für einen Versuchsfehler; durch erneute Versuche erhielt er übereinstimmende Ergebnisse. Scheele, welcher gleichzeitig denselben Gegenstand untersuchte, verfährt ganz anders; er wiegt weder Gefäss noch Wasser, sondern analysiert qualitativ die Erde und findet, dass sie nur aus solchen Stoffen besteht, welche in dem Glase, nicht aber in dem Wasser enthalten sind. Beide Forscher kommen zu demselben Schlusse, dass nicht Wasser in Erde verwandelt sei, sondern dass letztere sich aus dem Gefässe abgesetzt habe. Allein die Art ihres Schliessens ist grundverschieden. Während Scheele nur die qualitativen Verhältnisse in Rücksicht nimmt, beruht Lavoisiers Schluss auf der Idee, dass die Erde aus demjenigen Körper, Wasser oder Glasgefäss, herstamme, welcher einen dem Gewichte der Erde gleichen Gewichtsverlust erlitten habe. Und so sicher wurde er von dieser Idee geleitet, dass er einen monatelang andauernden Versuch nicht scheute, dass er dazu eine Wage anfertigen liess, welche alle andern an Feinheit übertraf und dass er ein anfänglich abweichendes Ergebnis sofort als einen Beobachtungsfehler erkannte. Es beweist dies, dass die Überzeugung von der Gültigkeit unseres Gesetzes in seinem Geiste bereits vor der Anstellung des Versuchs vorhanden war.

Sein Augenmerk richtete Lavoisier ferner auf die bekannte Thatsache der Gewichtszunahme bei der Verkalkung der Metalle und bei der Verbrennung von Schwefel, Phosphor und anderen Stoffen. Die Verkalkung einer gewogenen Menge Metalls lässt er in einem luftdicht verschlossenen Gefässe vor sich gehen, welches er vorher und nachher wiegt. Aus dem Umstande, dass keine Gewichtsveränderung stattfindet, schliesst er zunächst, dass eine Phlogistonmaterie nicht hinzugetreten sei. Dann wiegt er den Kalk und die übrig gebliebene Luft und findet, dass die Gewichtszunahme des Metalls genau gleich dem Gewichtsverlust der Luft ist. Noch ist er mit solchen Versuchen beschäftigt, als ihm die Nachricht von Priestleys Entdeckung des Sauerstoffs überbracht wird. Sogleich stellt er durch Versuche fest, dass der Sauerstoff die Luftart ist, welche sich bei der Verkalkung mit dem Metalle verbindet. Durch eine quantitative Analyse des Metallkalks findet sich das Gewicht desselben gleich demjenigen des darin enthaltenen Sauerstoffes und Metalles. Auf Grund der Voraussetzung, dass allgemein das Gewicht eines Körpers gleich der Summe der Gewichte seiner Bestandteile sei, leugnet

*) Lavoisier, Oeuvres, II. 1–28

er jetzt gradezu die Existenz des vielfach erwähnten Phlogiston. Durch eine eingehende Untersuchung der Säuren erkennt er, dass auch diese Sauerstoff enthalten, und dass jede Verbrennung in einer Verbindung des Sauerstoffs mit dem verbrennlichen Körper bestehe. Im Jahre 1778 veröffentlichte Lavoisier eine Abhandlung über die Verbrennung. Seine Ansichten lassen sich kurz zusammenfassen: Überall da, wo eine Verbrennung stattfindet, wird Sauerstoff verbraucht; daher kann ein Körper nur in sauerstoffhaltiger Luft verbrennen; dabei ist in allen Fällen die Gewichtszunahme des verbrennlichen Körpers gleich dem Gewicht des verbrauchten Sauerstoffes.*) Der verbrennende Körper wird im allgemeinen in eine Säure, oder wenn er ein Metall ist, in ein Metalloxyd verwandelt. Die Metalle sind darnach als bis dahin unzerlegbare Körper zu betrachten.

Dagegen warfen die Phlogistiker ein, dass bei der Auflösung der Metalle in Säuren die „entzündliche Luft" (Wasserstoff) sich aus dem Metalle entwickle. Zur Widerlegung dieses Einwurfs stellte Lavoisier über das Verbrennungsprodukt dieses Gases anfangs vergebliche Versuche an; da wurde ihm i. J. 1783 die durch Cavendish entdeckte Thatsache mitgeteilt, dass durch Verbrennung der entzündlichen Luft Wasser entstehe. Hieraus musste sich nach der neuen Ansicht über die Verbrennung sofort ergeben, dass Wasser eine Verbindung von Wasserstoff und Sauerstoff sei, und dass bei der Lösung der Metalle eine Zersetzung des Wassers stattfinde, dessen Sauerstoff das Metall oxydiert, während Wasserstoff frei wird. Nach dieser Erklärung stand das neue System in seinen Hauptteilen fertig da. Die Zusammensetzung des Wassers, auf welche sich diese Erklärung wesentlich stützte, untersucht Lavoisier auf synthetischem und analytischem Wege. Durch Synthese beweist er, dass Wasser nur aus diesen Stoffen besteht. Von den auf analytischem Wege ausgeführten Versuchen führe ich nur einen an.**) Er leitet Wasserdämpfe über eine gewogene Menge glühender Eisenspähne und fängt den entweichenden Wasserstoff auf. Letzterer wird gewogen, das Gewicht des Sauerstoffs gleich der Gewichtszunahme der Eisenspähne, und das Gewicht der Wasserdämpfe gleich dem Gewichtsverlust des Wassers gesetzt. Auf diese Weise ergiebt sich, dass das Gewicht des zerlegten Wasserdampfes genau gleich der Summe der Gewichte des daraus entstehenden Sauerstoffs und Wasserstoffs ist.

Setzen wir nun voraus, wozu wir nach dem Ergebnis des auf synthetischem Wege erfolgten Versuches berechtigt sind, dass Wasser keine andern Bestandteile hat, als Sauerstoff und Wasserstoff, so folgt, dass sich bei dem chemischen Vorgange der Analyse die Gewichtsmengen der Bestandteile nicht verändern. Ebenso lässt sich die Richtigkeit unseres Gesetzes an jedem Versuche erproben, sobald uns die Gewichte der Bestandteile einer Verbindung und das Gewicht der letzteren bekannt sind.

Setzen wir anderseits die Gültigkeit des Gesetzes und ausserdem die Richtigkeit der erwähnten Zusammensetzung des Wassers voraus, so ergiebt sich, dass eine beliebige der drei Gewichtsbestimmungen überflüssig ist und aus den beiden übrigen berechnet werden kann. Diese Idee bringt Lavoisier in allgemeiner Form zum Aus-

*) Lavoisier, Oeuvres, II. pag. 227.
**) Lavoisier, Oeuvres, II. pag. 360—372.

druck, indem er sagt: „Man kann die angewandten Substanzen und die erhaltenen Produkte in eine algebraische Gleichung bringen, aus der man, wenn ein Glied unbekannt ist, dieses berechnen kann.“*) An einer anderen Stelle, gelegentlich eines Streites mit Cavendish über die Priorität der Entdeckung der Zusammensetzung des Wassers, bemerkt er, es verstehe sich von selbst, dass das Wasser so viel wiege, als seine Bestandteile zusammen.**) Im übrigen hat Lavoisier auf die Formulierung des Gesetzes keinen Wert gelegt; es lag dies in der Anschauung der Zeit begründet, dass nicht mehr ein einzelner Satz, sondern experimentell festgestellte Thatsachen den Anfang und das Ende eines Beweises bildeten. Die einfache Aufstellung des Gesetzes würde daher auf seine Zeitgenossen, welche überdies den quantitativen Untersuchungen keine Bedeutung beilegten, wenig Eindruck gemacht haben. Er musste ihnen mit unabweisbaren Thatsachen näher treten; und daran hat er es wahrlich nicht fehlen lassen. Fast jeder seiner zahlreichen und sinnigen Versuche wurde mit Hülfe der Wage ausgeführt und enthielt eine neue Bestätigung des Gesetzes, welches allen seinen Spekulationen und Theorien zu Grunde lag.

Die Widerlegung der Phlogistontheorie, die Aufstellung einer neuen Verbrennungslehre und die Entdeckung unseres Gesetzes sind nicht als drei Aufgaben zu betrachten, welche einzeln und unabhängig von einander, oder welche durch einen oder wenige Versuche zu lösen sind. Vielmehr war das ganze Wirken eines Mannes von der Ausdauer und dem Scharfsinn Lavoisiers erforderlich, um die Reform in den Anschauungen der Chemiker und damit zugleich die Anerkennung der Wahrheit und Anwendbarkeit unseres Gesetzes, auf welches jene Reform sich stützt, herbeizuführen.

Die neuen Ansichten standen so sehr im Gegensatz zur Phlogistontheorie, welche sich anderthalbhundert Jahre bewährt und glänzende Früchte gezeitigt hatte, dass sie von den bedeutendsten Chemikern, unter andern von Priestley und Scheele, heftig angegriffen wurden. Überdies verriet das Lavoisiersche System noch einige Lücken, welche ausgefüllt werden mussten. Es fanden sich chemische Verbindungen, welche alle Eigenschaften der Säuren zeigten, ohne Sauerstoff zu enthalten; anderseits wurden Verbrennungserscheinungen beobachtet, welche ohne Mitwirkung des Sauerstoffs vor sich gingen. Daher fand das neue System nur allmählige Anerkennung und zwar in demselben Umfange, als man sich gewöhnte, die Richtigkeit einer Theorie durch die Wage zu entscheiden; einmal anerkannt fand es schnelle Verbreitung. In Frankreich hatte der grosse Forscher bereits allgemeine Anerkennung gefunden, als er im Jahre 1794 den Tod durch die Schreckensherrscher in Paris erlitt.

Die Lavoisierschen Begründungen unseres Gesetzes bestehen alle in dem Nachweise, dass, wenn verschiedene Stoffe in luftdicht verschlossenen Gefässen chemische Veränderungen erleiden, dieselben ihr Gewicht nicht verändern. Immer ist hierbei nur von einer bestimmten Kraftäusserung der Materie, dem Gewichte die Rede. In der That ist die Quantität der Materie nicht anders, als durch die Wirkung ihrer Kräfte zu messen. Die unmittelbare Erkenntnis irgend einer Eigenschaft der Materie bleibt uns

*) Ladenburg, Vorträge, S. 23.
**) Lavoisier, Oeuvres, T. II, pag. 338—339.

ebenso verschlossen, als diejenige des Kantschen „Ding an sich“; denn die Brücke, welche von den Dingen zu unserm Erkennen führt, ist die Erfahrung; in dieser ist aber nichts wahrzunehmen, als das wechselvolle Spiel der Kräfte. Wenn wir daher unser Gesetz auf die Quantität der Materie ausdehnen, so machen wir dadurch nur insofern keine neue Voraussetzung, als in ihrem Begriff die Proportionalität zwischen der Quantität der Materie und dem Gewichte bereits enthalten ist. Auch muss festgehalten werden, dass wir es hier nur mit einer einzelnen allgemeinen Eigenschaft der Materie zu thun haben, ihrer Wägbarkeit. Ob die Materie eines Körpers noch andere Eigenschaften besitzt, welche sich bei allen Veränderungen des Körpers konstant erhalten, ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

In neuerer Zeit findet man in den Vorgängen des Sonnensystems eine Bestätigung unseres Gesetzes, welche sich von den bisherigen durch die grossartigen Erscheinungen, die dabei in Betracht kommen, unterscheidet.*) Die Umlaufszeit der Erde um die Sonne hängt von ihrer Masse ab; da nun diese Umlaufszeit konstant geblieben ist, so folgt, dass alle chemischen Vorgänge auf der Oberfläche der Erde und im Innern derselben weder eine Vermehrung noch eine Verminderung der Erdmasse bewirkt haben, dass also trotz aller chemischen Veränderungen, welche im Tier- und Pflanzenreich wie in dem Bereiche der leblosen Natur täglich vor unsern Augen stattfinden, weder Materie erzeugt noch vernichtet wird.

Schliesslich sei noch bemerkt, dass unser Gesetz auch als eine Folge des im nächsten Teile dieser Abhandlung zu erläuternden Energiegesetzes aufgefasst werden kann. Jedes Massenteilchen ist der Träger einer gewissen Menge Energie. Gesetzt, es gebe ein energieloses Massenteilchen, so würde ihm sofort durch die übrigen Massen Energie mitgeteilt. Es kann also keine energielose Masse bestehen. Nehmen wir beispielsweise an, es sei ein Massenteilchen ohne Wärme, welche, wie wir später sehen, eine Art der Energie ist; so würde dasselbe von seiner Umgebung sofort Wärme erhalten; und diese Wärmemenge könnte es niemals wieder vollständig an andere Körper abgeben, weil Wärme von einem kälteren Körper zu einem wärmeren ohne weiteres nicht übergehen kann. Wenn daher irgend ein Massenteilchen verschwände, so würde dadurch zugleich Energie in Nichts verwandelt, was dem Energiegesetz widerspricht.

Den Inhalt des Gesetzes von der Erhaltung der Quantität der Materie können wir etwa wie folgt zum Ausdruck bringen:

Wenn man die Gewichtsmengen derjenigen Stoffe bestimmt, welche an der Bildung eines Körpers teilnehmen, oder in welche dieser Körper zerlegt wird, so findet man, dass bei allen Veränderungen, mögen diese auf chemischem oder physikalischem Wege erfolgen, niemals ein Gewichtsverlust oder eine Gewichtsvermehrung stattfindet. Das Gewicht eines Körpers ist stets gleich der Summe der Gewichte seiner Bestandteile, und bei allen Veränderungen bleibt die Quantität der Materie der beteiligten Stoffe konstant.

In Folge der Anerkennung dieses Gesetzes fanden die bis dahin fast gänzlich vernachlässigten Gewichtsverhältnisse bei den Naturerscheinungen eine bessere Wür-

*) Ostwald, Grundriss der Chemie, S. 2.

digung; es entwickelte sich schnell die quantitative Analyse, und das Versuchsverfahren erhielt durch die Kontrole, welche das Gesetz den Chemikern in die Hand gab, jene Genauigkeit, der wir die wesentlichsten Fortschritte und Gesetze der Chemie dieses Jahrhunderts zu verdanken haben.

Geschichte des Gesetzes von der Erhaltung der Energie.

Wie die Chemie, so entwickelte sich auch die physikalische Wissenschaft eine geraume Zeit hindurch nur nach einer einzelnen Richtung hin. In der Chemie waren es die qualitativen, in der Physik die mechanischen und unter den letzteren wieder die statischen Verhältnisse, welche dem Verständnis zunächst lagen und daher auch zuerst in Betracht gezogen wurden. Archimedes hatte die Statik bereits so weit ausgebildet, dass sie der neueren zur Grundlage dienen konnte, während die Dynamik ihm gänzlich unbekannt gewesen zu sein scheint. Ihm war die Mechamik „ein Spiel der Mathematik"; seinen mechanischen Betrachtungen haftet in der That auch die Starrheit der euklidschen Geometrie an.

Die ersten dynamischen Erkenntnisse fand im 15. Jahrhundert Leonardo da Vinci. Die Bewegung eines auf schiefer Ebene rollenden Körpers, das Pendel, die Reibung und der Stoss der Körper waren Gegenstände seiner geistreichen Untersuchungen. Auch finden sich bei ihm einige Andeutungen der Prinzipien vom Parallelogramm der Kräfte, der virtuellen Geschwindigkeiten und der Trägheit. Indessen sind nur unzusammenhängende Aufzeichnungen Leonardos zu uns gelangt, und überdies war seine Musse durch andere Dinge so sehr in Anspruch genommen, dass er nur einzelne Schritte auf dem Wege unternahm, den die Mechanik einschlagen sollte.

Der eigentliche Begründer der Dynamik war Galilei; nicht so sehr, weil er die ersten grundlegenden Sätze aufstellte, sondern vor allem durch die Art und Weise, wie er sie suchte und begründete. Sein Denkverfahren war stets auf die Thatsachen gerichtet; aber das was ihn vor den reinen Empirikern im Sinne Bacos auszeichnete, war seine musterhafte Handhabung der induktiven Spekulation. Deswegen war es ihm vergönnt, ein Prinzip aufzudecken, welches allen Bewegungserscheinungen zu Grunde liegt und dennoch allen Erfahrungen scheinbar widerspricht. Durch den Augenschein verleitet, hatte Aristoteles und nach ihm die Scholastik angenommen, dass einigen Körpern das Streben nach Ruhe ebenso eigentümlich sei, wie den anderen das Streben nach immerwährender Bewegung. Dieser Irrtum, welcher eine Zergliederung und Darlegung der Bewegungserscheinungen von vornherein unmöglich machte, war die Ursache, weshalb die Dynamik sich nicht eher entwickelt hat. Galilei räumte dies Hindernis hinweg. Ihm erschien die Materie frei von irgendwelchem Bestreben, ihren Bewegungszustand zu ändern. Ein Körper kann zur Bewegung nur veranlasst werden durch einen Anstoss (impeto), den er von aussen erhält. Die Grösse dieses Anstosses ist proportional der Masse des Körpers und der ihm erteilten Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeitsgrösse kann nur durch neue Anstösse vermehrt oder vermindert werden; wenn daher die Kraft aufhört zu wirken, so bewegt sich der Körper mit der bis dahin erlangten Geschwindigkeit gradlinig fort. Das Beharrungsgesetz lag allen Anschauungen

Galileis zu Grunde.*) Den Anstoss selbst betrachtet er als eine Summe von Elementaranstössen, welche in den einzelnen kleinsten Zeitabschnitten stetig erfolgen, so lange die Ursache des Anstosses vorhanden ist. Der stetigen Summierung der Elementaranstösse entspricht eine allmähliche ununterbrochene Vermehrung der Geschwindigkeitsgrösse. Diese neue durch Galilei zuerst zur Geltung gebrachte Anschauung von der stetigen Erzeugung der Bewegungsintensität ist den mechanischen Vorgängen in der Natur, welche ebenfalls stetig und niemals sprungweise entstehen, ganz angemessen und ergiebt in Verbindung mit dem Verharrungsprinzip ohne weiteres, dass in allen Fällen, wo eine konstante Kraft wirkt, die dem Körper erteilte Geschwindigkeit proportional der Zeit ist, während welcher die Bewegung stattfand. Hierdurch ist die Grundlage für alle gleichförmig beschleunigten Bewegungen geschaffen; es fehlt nur noch die mathematische Formulierung und die experimentelle Ausmittelung der Geschwindigkeiten. Bezeichnen wir die am Ende des ersten Zeitabschnittes erlangte Geschwindigkeit der Masse Eins mit g, und die am Ende des t. Zeitabschnittes erlangte Geschwindigkeit mit v, so ist nach obigem:

$$v = gt.$$

Die in den einzelnen Zeitabschnitten durchlaufenen Strecken sind:

$$\frac{g}{2},\ g + \frac{g}{2},\ 2g + \frac{g}{2},\ \text{u. s. w.}$$

Durch einfache arithmetische Summierung ergiebt sich die Gesamtlänge des in der Zeit t durchlaufenen Weges s:

$$s = \frac{g}{2}\, t^2$$

Durch Elimination des t aus beiden Gleichungen ergiebt sich:

$$v^2 = 2gs.$$

Oder für die Masse m:

$$m\, v^2 = 2\ mgs.$$

Diese Formel werden wir weiter unten noch in nähere Betrachtung ziehen.

Galilei dehnte seine Untersuchungen auch auf die Bewegung eines Körpers auf der schiefen Ebene aus und fand durch eine der vorstehenden ähnliche Überlegung, dass die Geschwindigkeit desselben nur von der Gleithöhe abhängig ist; aber vergeblich bemühte er sich, auch die Pendelgesetze in derselben Weise abzuleiten und zu begründen. Er hatte nicht über die erforderlichen mathematischen Hülfsmittel zu verfügen und war daher mehr als beim Fall der Körper hier auf das Experiment angewiesen. Dennoch sind seine Beobachtungen der pendelnden Bewegung für die Entwicklung des Energiegesetzes von besonderer Wichtigkeit. Sein Pendel ist eine an einem möglichst dünnen Faden aufgehängte schwere Kugel, also wesentlich ein mathematisches. Die Schwingungszeiten findet er unabhängig vom Gewicht; woraus folgt, dass alle Körper gleich schnell fallen. Der schwingende Körper hat immer dieselbe Geschwindigkeit, wenn er auf der einen oder der anderen Seite wieder dieselbe Höhe erreicht. Daraus folgt, dass der Körper durch das Herabschwingen aus einer beliebig bestimmten Höhe einen Anstoss erhält, welcher grade hinreicht, um ihn auf der anderen

*) Galilei, Discorsi, 4. Tag.

Seite in dieselbe Höhe zurückzubringen. Jetzt denkt sich Galilei einen Körper zum Mittelpunkt der Erde fallend; derselbe würde, wenn er freien Weg fände, weiter bis zur entgegengesetzten Stelle der Erde sich bewegen, von dort wieder zurück hin und her pendeln. Auf den Einfluss, den die Veränderlichkeit der Intensität der Schwere ausüben würde, kommt es hier nicht an. Ein lotrecht aufwärts geworfener Körper führt nun einen Teil einer solchen pendelnden Bewegung aus; es ergiebt sich demnach, dass derselbe mit derjenigen Geschwindigkeit zur Erde gelangt, welche er hatte, als er die Erde verliess, und in einer beliebig bestimmten Höhe wird er beim Aufsteigen und Fallen die gleiche und entgegengesetzte Geschwindigkeit besitzen.

Diese Idee wendet Galilei auch auf die schiefe Ebene an. Wenn man dem Körper auf der schiefen Edene eine Geschwindigkeit nach oben erteilt, so wird er so hoch getrieben, dass er beim Herabgleiten im Ausgangspunkte wieder die ursprüngliche Geschwindigkeit erlangt. Da nun aber die Geschwindigkeit des gleitenden Körpers nicht von der Neigung der Ebene, sondern nur von der Gleithöhe abhängig ist, so folgt, dass ein Körper, welcher auf einer schiefen Ebene herabgleitet, sich auf einer anderen Ebene von beliebig anderer Neigung, oder auf einer krummen Fläche bis zu seiner ursprünglichen Höhe erhebt und jedesmal in den Zwischenlagen gleicher Höhe gleiche Geschwindigkeiten hat.

Unter anderen Physikern führte namentlich Huyghens die galileische Idee weiter aus. Statt eines einfachen Körpers betrachtete er ein System festverbundener Körper und gewann den allgemeinen Satz: Bei irgend welchen durch die Schwere und ohne Widerstand erfolgenden Bewegung, sucht der Schwerpunkt eines Körpers seine anfängliche Steighöhe wieder herzustellen; auch nimmt er jedesmal dieselbe Geschwindigkeit wieder an, wenn er in dieselbe Niveaufläche der Erde anlangt; einerlei auf welchem Wege und in welcher Zeit diese Bewegung erfolgt. Noch deutlicher als bei Huyghens wird dieser Satz von Johann Bernoulli zum Ausdruck gebracht. Der Sohn des letzteren Daniel Bernoulli wandte das Prinzip auf die Bewegung von Flüssigkeiten an und bestätigte dasselbe durch ausgedehnte Versuche.

Nach der oben entwickelten Formel $mv^2 = 2\ mgs$ ist die Steighöhe s proportional dem Quadrate der Geschwindigkeit v. Berücksichtigen wir noch, dass m und g konstant sind, so drückt das galilei-huyghenssche Prinzip aus, dass der sich bewegende Körper das Produkt aus seiner Masse und dem Quadrate seiner Geschwindigkeit zu erhalten strebt. Diesem Produkte gab Leibniz den Namen „lebendige Kraft", indem er diese Kraft durch die Leistungsfähigkeit mass, welche ein Körper vermöge seiner Masse und seiner Geschwindigkeit besitzt. Er ging von der Ansicht aus, es erfordere denselben Kraftaufwand, wenn man 9 kg ein m, oder 1 kg 9 m hoch heben will. Nun muss man dem Körper eine 3mal grössere Geschwindigkeit erteilen, wenn er 9mal höher steigen soll; folglich ist der Kraftaufwand (Leistungsfähigkeit) proportional der Masse und dem Quadrate der Geschwindigkeit. „Lebendig" nannte Leibniz die Kraft im Gegensatz zu derjenigen, welche ein ruhender Körper vermöge seiner Lage und seines Gewichtes ausübt, die er als tote Kraft bezeichnete. Leibniz hielt die Begriffe Kraft und Leistungsfähigkeit nicht auseinander, indem er bei der Definition der

Kraft die Zeit nicht berücksichtigte. Diesen Fehler wollte Cartesius vermeiden. Er sagte sich, die Kraft, welche der Masse m in derselben Zeit die doppelte oder dreifache Geschwindigkeit erteilt, ist auch doppelt oder dreimal grösser, als diejenige, welche derselben Masse die einfache Geschwindigkeit erteilt. Das Produkt mv und nicht mv^2 ist das wahre Mass der Kraft. Diese Anschauung von der Kraft kommt der unserigen nahe, da wir seit Newton die Grösse einer Kraft durch das Produkt mg messen. Indem aber Cartesius die Erhaltung der Kraft aus metaphysischen Gründen behauptete, befand er sich in einem Irrtum, welchem Leibniz in einer besondern Schrift entgegentrat, indem er zeigte, dass nicht das Produkt mv, sondern mv^2 dasjenige sei, was sich bei allen Bewegungserscheinungen in der Welt erhalte. Bei dem lebhaft geführten Streite zwischen Leibniz und Cartesius sowie deren Anhängern handelt es sich nicht um die Anerkennung unseres Gesetzes, sondern um das Mass dessen, was sich bei der Bewegung eines Körpers erhält. Als einen Erfolg dieses Wortstreites können wir die Thatsache verzeichnen, dass die Begriffe der lebendigen Kraft und der Bewegungsgrösse begrenzt und unterschieden wurden. Die Klarstellung dieser und einiger anderen Begriffe trugen nicht wenig zur späteren Erkennung und Verbreitung des Gesetzes bei, durch dessen undeutliche Vorstellung jener Streit heraufbeschworen war. Zu diesen Begriffen gehörten diejenigen der „Arbeit“ und der „Energie“. Im Anfang dieses Jahrhunderts schrieb Th. Young: „In fast allen Fällen, welche in der praktischen Mechanik vorkommen, ist die Arbeit, welche zum Hervorbringen einer Bewegung aufgewandt werden muss, proportional der Energie der Bewegung, welche durch die Arbeit erhalten wird.*) Diese Ausdrucksweise sieht der heute gebräuchlichen sehr ähnlich; indessen ist wohl zu beachten, dass das Wort Energie bei Young noch nichts anderes bedeutet, als das Produkt mv^2, das ist die lebendige Kraft eines ponderablen Körpers. Daher galt ihm die Äquivalenz von Arbeit und Energie nur in der praktischen Mechanik, und auch hier nur in „fast“ allen Fällen. Bei ihm trat auch der Begriff der Arbeit nicht klar hervor. Erst Poncelet definierte deutlich die mechanische Arbeit als das Produkt, mgs oder ks, aus der Länge des Weges s, den ein Körper zurücklegt, und aus der längs dieses Weges wirkenden Kraft k. Nennen wir noch mit Cariolis $\frac{mv^2}{2}$ statt mv^2 die lebendige Kraft, so spricht die Formel

$$\frac{mv^2}{2} = ks$$

die Gleichheit von lebendiger Kraft und Arbeit aus. Poncelet bediente sich dieser Gleichung als Hülfsmittel zur Lösung mechanischer Aufgaben und zeigte, dass niemals Arbeit oder Energie aus nichts gewonnen werde oder auch gänzlich verloren gehe, sondern dass ein Gewinn von Arbeit oder Energie nur durch eine entsprechende Übertragung der einen in die andere erzielt werden könne. Das Prinzip von der Erhaltung der lebendigen Kraft, wie es seit Leibniz genannt wurde, sagt nun aus: „Das Produkt aus der Masse und dem Quadrate ihrer Geschwindigkeit sucht sich stets wieder herzustellen, wenn der Körper dieselbe Niveaufläche erreicht, und diese Grösse kann

*) Rosenberger, Geschichte der Physik, III. S. 245.

ohne Hinzutritt einer neuen Kraft weder vermehrt noch vermindert werden.“ Dem schien aber die Thatsache zu widersprechen, dass beim unelastischen Stosse lebendige Kraft verloren gehe. Diesbezüglich bemerkt Leibniz: „Was durch die kleinsten Teile absorbiert wird, geht keineswegs absolut für das Universum verloren, obwohl es für die Gesamtkraft der zusammenstossenden Körper verloren ist“.*) Unser Prinzip war bis dahin nur gültig für ein beschränktes Gebiet der Physik, für dasjenige der reinen Mechanik, und von seiner grossen Verallgemeinerungsfähigkeit hatte man nur eine undeutliche Ahnung.

Eine erhebliche Weiterentwicklung des Energiegesetzes konnte nicht anders, als dadurch erfolgen, dass man sich über den Verbleib der durch Überwindung von irgend welchen Hindernissen für ein in Bewegung befindliches System von Körpern scheinbar verlorenen lebendigen Kräften bestimmte positive Kenntnisse verschaffte. Dies geschah durch die Untersuchungen über die Verwandlungsfähigkeit der verschiedenen Naturkräfte in einander. Die nächstliegende Aufgabe war es, die fest eingewurzelte Theorie der Imponderabilien zu überwinden. Die Chemiker hatten bereits nach langem Kampfe das Phlogiston aus dem Bereiche ihrer Forschung verbannt, als noch die Physiker an der Überzeugung von dem Vorhandensein eines gewichtlosen Wärme- und Lichtstoffes, sowie der elektrischen und der davon verschiedenen magnetischen Flüssigkeiten unerschütterlich festhielten. Alle physikalischen Erscheinungen suchten sie zu erklären als Wirkungen besonderer Materien, welche mit eigentümlichen Urqualitäten dauernd behaftet seien. Von der Verwandlung einer solchen Qualität oder Kraft in eine andere war natürlich keine Rede.

Freilich bewies Graf Rumford durch seine Versuche über Reibungswärme (1798), dass von einem Körper, ohne sein Verhalten gegen die Wärme wesentlich zu ändern, in unbegrenzter Menge Wärme abgegeben werden könne, und dass diese Wärmemenge in einem bestimmten Äquivalenzverhältnis zu der aufgewandten mechanischen Arbeit stehe. Auch H. Davy stellte ähnliche Versuche an. Damit keine Wärme zugeleitet oder durch chemische Prozesse frei werden könne, liess er durch ein Uhrwerk in einem von Eis umgebenen luftleeren Raume ein metallenes Rad an einer Metallplatte reiben. Die beträchtliche Menge Wärme, welche er auf diese Weise erhielt, konnte nur durch die mechanische Arbeit der Reibung entstanden sein; da wir den Fall ausschliessen dürfen, dass durch diese Arbeit der hypothetische Wärmestoff erzeugt wird, so folgt, dass Wärme in Bewegung besteht. Davy behauptet ausdrücklich, dass die schwingende Bewegung der kleinsten Teile eines Körpers, die Wärme, wieder zurück in mechanische Arbeit, ja dass alle Kräfte die eine in die andere verwandelt werden können.**) Die Versuche von Rumford und Davy konnten nicht unbeachtet bleiben und regten andere Physiker zu ähnlichen Untersuchungen an. Das Ergebnis derselben war die Annahme, dass der Wärmestoff mit Bewegung begabt sei, von deren Intensität die Wirkung zum Teil abhinge; aber man konnte sich nicht entschliessen, von dem Vor-

*) Pogg. p. Ann., L. 157, S. 351.
**) Pogg. Daselbst.

handensein des Wärmestoffes selbst ganz abzusehen; so tief hatte sich die Theorie der Imponterabilien in alle Teile der physikalischen Wissenschaften eingewurzelt. Ebenso vergeblich unternahm Young nach Huyghens Vorgang den Lichtstoff durch seine Undulationstheorie zu verdrängen. In der Elektrizität endlich herrschte die Voltasche Kontakttheorie, welche in der Weise, wie sie damals aufgefasst wurde, gradezu den Ideen widersprach, die zu einer Verallgemeinerung des mechanischen Prinzips von der Erhaltung der Kraft drängten.

Erst als Oersted im Juli 1820 seine Entdeckung von der Ablenkung der Magnetnadel durch den galvanischen Strom veröffentlichte, und als bald nachher Ampère die vollständige Reciprocität der Wirkungen von elektrischen Strömen und Magneten nachwies, da drang die Vorstellung von der Umwandelbarkeit der Kräfte gleichzeitig auch auf anderen Gebieten durch. Die Akustik hatte zwar niemals eine besondere Materie als Ursache des Schalles angenommen, aber sie diente durch die Ausbildung der Lehre von der Wellenbewegung, namentlich seit der Entdeckung der Interferenzerscheinungen, als wesentliche Stütze der Undulationstheorie. Fresnel erklärte bereits alle Lichterscheinungen durch Schwingungen des Äthers; da es aber auch den Vertretern der Emissionstheorie, Biot und Brewster, an sinnreichen Erklärungen der Lichterscheinungen nicht fehlte, so gelangte die Undulationstheorie nur langsam zur Geltung. Die einfacheren Erklärungen der Beugungs- und Polarisationserscheinungen haben endlich den Sieg der neuen Theorie herbeigeführt und den Lichtstoff aus der Physik verdrängt. Die Grundlage einer neuen Anschauung von der Wärme schaffte Melloni durch den Nachweis, dass die Strahlen der Wärme sich von denen des Lichts nur durch die Länge der Wellen unterschieden. Für die strahlende Wärme wurde jetzt der Äther als Träger angesehen.

Durch die Einführung des Äthers wurde das frühere System der physikalischen Theorien, welches auf der Hypothese der Imponderabilien beruhte und in seiner Einfachheit und Einheitlichkeit die beste Stütze fand, untergraben; aber die Grundlagen der Physik, wie sie jetzt geschaffen waren, boten durch ihre augenfällige Ungleichartigkeit wenig Garantie für ihr Bestehen. Auf der einen Seite sollten die ponderable Materie, die elektrisch-magnetischen Flüssigkeiten und der Wärmestoff mit besonderen Elementarkräften behaftet sein, die unabhängig von dem Bewegungszustande in die Ferne wirkten; ihnen stand anderseits in der Optik und der strahlenden Wärme der Äther gegenüber, welcher nur durch Schwingungen seine Wirkung äussern konnte, um letztere von Ort zu Ort zu übertragen. Dieser Zwiespalt in den Anschauungen von der Materie sowohl wie von den Kräften drängte mächtiger noch, als die Neigung, das mechanische Prinzip von der Erhaltung der lebendigen Kraft zu verallgemeinern, auf eine Änderung der Anschauungen zu Gunsten einer einheitlichen Naturauffassung. Und diese konnte nur erfolgen auf Grund einer noch mehr in die Tiefe greifenden Erforschung der verwandtschaftlichen Beziehungen aller Naturkräfte unter einander.

Wenn wir Kräfte mit einander vergleichen wollen, so ist unbedingtes Erfordernis, ihre Quantitäten in Rücksicht zu ziehen. Finden wir beispielsweise, dass jedesmal

durch Reibung Wärme entsteht, so liegt die Vermutung nahe, dass die Bewegung der Reibung in die Bewegung der Wärme umgewandelt sei; allein berechtigt zu diesem Schlusse sind wir erst dann, wenn wir nachgewiesen haben, dass in allen Fällen einer bestimmten Menge der erzeugten Wärme eine bestimmte Arbeitsgrösse, die durch die Reibung geleistet wird, entspricht. Die Untersuchung, welche die Einheit der Naturkräfte und ihre Umwandlungsfähigkeit betraf, musste über den Verbleib der Kraftgrössen Rechenschaft geben und dadurch notwendig auf die Erkenntnis unseres Gesetzes führen. Diese Untersuchung ist heute noch nicht beendet; aber sehr wichtige Ergebnisse sind namentlich in den vierziger Jahren unseres Jahrhunderts erzielt worden. Alle stehen in der innigsten Beziehung zu unserm Energiegesetze.

Die Kontakttheorie nahm in ihrer früheren Auffassung an, dass durch einfache Berührung verschiedener Körper ohne Mitwirkung chemischer Prozesse freie Elektrizität in unbegrenzter Menge erzeugt werde; dagegen wendet bereits i. J. 1829 Rojet ein, dass eine solche Kraft sich von allen anderen Naturkräften unterscheiden würde, und fügt hinzu: „Alle Kräfte und Bewegungsquellen, mit deren Vorgängen wir bekannt sind, werden in demselben Verhältnisse verbraucht, als diese Wirkungen erzeugt werden, und daraus entsteht die Unmöglichkeit, durch ihre Beihülfe eine immerwährende Wirkung, oder perpetuum mobile zu erhalten".*) Ein eifriger Gegner der damaligen Kontakt-Theorie und aller Hypothesen, welche dem Gesetze von der Erhaltung der Kraft widerstritten, war Faraday. Er hielt es für unmöglich, dass ein elektrischer Strom ohne irgend einen Wechsel in den wirkenden Substanzen und ohne Verbrauch einer treibenden Kraft entstehen könne. Er schreibt i. J. 1840: „Es wäre dies in der That eine Erschaffung einer Triebkraft aus Nichts, und verschieden von jeder anderen Naturkraft. Es giebt mancherlei Vorgänge, wobei die Erscheinungsform der Kraft sich dermassen verändern kann, dass eine scheinbare Umwandlung von einer Kraft in die andere stattfindet. Auf diese Weise können wir chemische Kräfte in einen elektrischen Strom, oder diesen in chemische Kraft verwandeln. Die schönen Versuche von Seebeck und Peltier zeigen den gegenseitigen Übergang von Wärme und Elektrizität, und andere von Oersted und mir angestellte Experimente zeigen die gegenseitige Verwandlungsfähigkeit von Elektrizität und Magnetismus. Allein in keinem Falle, nicht einmal bei dem elektrischen Aale und Rochen findet eine Erschaffung oder Erzeugung von Kraft statt ohne einen entsprechenden Verbrauch von etwas Anderem".**) Zwei Jahre später machte Grove durch einen im Londoner Institute gehaltenen Vortrag seine Ansichten über die Wechselwirkung der physischen Kräfte bekannt. Er verwirft die Theorie der Imponderabilien und führt alle Arten der Kraft auf Bewegung zurück. Indem er den Äther als eine Materie im gewöhnlichen Sinne auffasst, sucht er die völlige Gleichartigkeit der Kräfte sowie der Träger der Bewegungen herzustellen. Jede physische Kraft kann, wie er ausführt, eine beliebige andere hervorbringen, und da immer eine Wirkung mit einer entsprechenden Gegenwirkung verbunden ist, so leistet die neue Kraft einen

*) Faradays Entdeckungen, S. 61.
**) Faradays Entdeckungen, S. 60.

Widerstand proportional der Energie, durch welche sie hervorgerufen wurde; so findet die Thätigkeit einer elektro-magnetischen Maschine ihre Gegenwirkung in der von ihr erzeugten Magnet-Elektrizität. Als das oberste Ziel der Physik erscheint ihm die vollständige Bestimmung der Kraftäquivalente durch Mass und Zahl bezogen auf eine gegebene Einheit. Erschwert wird die Erreichung dieses Zieles durch den Umstand, dass durch eine einzige Kraft oft zugleich alle anderen erregt werden. Wird z. B. das schwefelsaure Antimon elektrisiert, so wird es zugleich magnetisch, warm und bei hinreichender Stärke auch leuchtend, dabei dehnt es sich aus, so dass Bewegung entsteht, und es zersetzt sich, so dass chemische Thätigkeit erzeugt wird. Wahrscheinlich würde sich ein ähnliches Verhalten bei jeder Materie zeigen, wenn sie sich in geeigneten Zuständen befände, und unsere Mittel, es zu bestimmen, fein genug wären. Jede Kraft kann als die erzeugende, und zugleich keine derselben als Anfangskraft gelten, weil sie eine frühere voraussetzt, von welcher sie erzeugt wurde. „Wir können ebenso wenig die Kraft oder die Bewegung (aus Nichts) erzeugen, als die Materie".*) Mit dem Ausdruck der Erkenntnis von der Ewigkeit der Kraft in demselben Sinne, wie seit dem Umsturz der phlogistischen Theorie und der Reform der Chemie zur Zeit Lavoisiers die Annahme von der Erhaltung der Materie offen ausgesprochen sei, schliesst Grove seine leicht und anziehend geschriebenen Betrachtungen. Zu derselben Zeit bestimmte der dänische Philosoph und Physiker L. A. Colding durch zahlreiche Experimente den Zusammenhang zwischen Wärme und mechanischer Arbeit und suchte die allgemeine Gültigkeit unseres Gesetzes durch metaphysische Erörterungen zu beweisen. Kräfte, die intellektuellen nicht weniger als die Naturkräfte, sind nach ihm geistige und immaterielle Wesen, und als solche der Vergänglichkeit nicht preisgegeben.

Diese Anschauungen, denen ähnliche anderer Physiker an die Seite gestellt werden könnten, beweisen uns, dass die Idee von der Erhaltung der Energie nicht mehr nebelhaft, wie bei den alten Naturphilosophen, sondern erhellt durch die Thatsachen der Erfahrung im allgemeinen Bewusstsein der Zeit lag. Zur vollständigeren Lösung des grossen Problems der Kräfte, fehlte es noch, den Begriff der Kraft genau zu begrenzen, sowie die Idee des Gesetzes durch den ganzen Bereich der Naturwissenschaft im einzelnen durchzuführen und zur Geltung zu bringen. Die Männer, welche sich dieser Aufgabe unterzogen, fanden für ihre Arbeit ein geebnetes Feld, und die Gedankenhöhe derselben brauchte vielleicht nur wenig diejenige ihrer Zeitgenossen zu überragen.

Der erste, welcher nicht minder in sachlicher, als in weitgreifender Auffassung das Gesetz der Erhaltung der Energie begründete, war der Heilbronner Arzt J. R. Mayer. Nach eigener Erzählung fand Mayer auf Java das Blut eines seiner Patienten auffallend rot gefärbt. Es schien ihm dies erklärlich, weil das Blut in einem heisseren Klima zur Unterhaltung einer bestimmten Temperatur eine geringere Oxydation erfordere, als in kälteren Gegenden, weil also der Erzeugung einer geringeren Wärmemenge auch ein geringerer Aufwand von Arbeit entspreche. Sogleich vermutete er, „dass die vom

*) Grove, Die Wechselwirkung der phys. Kräfte, übers. von Russdorf. S. 188.

lebenden Körper erzeugte mechanische Wärme mit der dazu verbrauchten Arbeit in einem unveränderlichen Grössenverhältnisse stehen müsse".*) Dieses Verhältnis suchte er zahlenmässig festzustellen und wurde dann zur Untersuchung der Naturkräfte im allgemeinen veranlasst. Seine ersten „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur" veröffentlichte Mayer im Jahre 1842 in Liebigs Annalen. Als den Zweck derselben bezeichnet er die Beantwortung der Frage, was unter Kräften zu verstehen sei, und wie solche sich unter einander verhalten. Mayer bestimmte die Grösse einer Kraft, dem Vorgange Leibnizens folgend, lediglich durch die Grösse der Wirkung, welche sie unabhängig von der Zeit leistet, oder zu leisten fähig ist. Die Kraft ist eine Ursache in der Weise, dass für sie der Satz gilt: causa aequat effectum. Daraus ergiebt sich ohne weiteres, dass eine Kraft, während sie eine ihr gleiche Wirkung hervorbringt, selbst gänzlich verschwinden muss. Wenn ferner die Wirkung wieder die Ursache einer neuen Wirkung ist, so muss diese gleich der vorigen Wirkung sein. Das heisst, bei allen Veränderungen ist die Kraft konstant. So ergiebt sich nach Mayer die unbedingte Gültigkeit des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft unmittelbar aus der Auffassung des Kraftbegriffs. Indessen fussen solche Deduktionen noch nicht auf dem Boden der Thatsachen; es ist vielmehr an der Hand der Erfahrung erst nachzuweisen, dass dem aufgestellten Begriffe auch etwas Wirkliches entspricht; es ist ferner darzulegen, dass bei den qualitativ so verschiedenen Erscheinungen immer die Möglichkeit vorhanden ist, Ursache und Wirkung mit gleichem Masse zu messen. Die Beziehungen der Naturkräfte unter einander, sowie den neuen Kraftbegriff hob Mayer in seiner ersten Schrift nicht in überzeugender Weise hervor. Überdies war die philosophische Darstellungsweise wenig geeignet, die Aufmerksamkeit der Physiker anzuregen, zumal grade damals die Verirrungen der Hegelschen Naturphilosophie klar zu Tage traten und jede allgemein gehaltene Reflexion von vornherein verdächtig erscheinen liessen. Es ist daher erklärlich, dass die später so berühmte Abhandlung kaum einen andern Erfolg hatte, als die Priorität der darin enthaltenen Gedanken für den Verfasser zu sichern.

Seinen Zweck erreichte Mayer um so vollkommener in seinem Hauptzwecke: „Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel", welches im Jahre 1845 zu Heilbronn erschien. Dasselbe enthält eine Vertiefung und Ergänzung des in der ersteren Kundgebung angedeuteten Inhaltes. Beide Schriften beginnen mit der Entwicklung des Kraftbegriffs. Die Bewegung ist eine Kraft. „Stösst der weisse Ball den roten central an, so verliert der weisse seine Bewegung, und der rote geht mit dessen Geschwindigkeit fort."**) Die Bewegung des weissen Balles verwandelt sich, während sie selbst verschwindet, in eine ihr gleiche Kraft; denn die Erfahrung lehrt uns, dass, wenn der rote Ball sich mit der erhaltenen Geschwindigkeit zurückbewegt, der weisse die ursprüngliche Geschwindigkeit wiedererhält. Die lebendige Kraft der (elastischen) Bälle ist vor und nach dem Stosse konstant geblieben. Die Ursache, welche die Hebung einer Last bewirkt, ist eine Kraft; aber die gehobene Last ist selbst

*) J. R. Mayer, Die Mechanik der Wärme. S. 252.
**) Mayer, Mechanik. S. 21.

wieder eine Kraft, weil sie bewegende Wirkungen äussern kann; und zwar ist letztere Kraft gleich der sie erzeugenden. Die Kraft der gehobenen Last nennt Mayer abweichend vom gewöhnlichen Sprachgebrauch „Fallkraft"; wir würden sie jetzt potentielle Energie oder Energie der Lage nennen. Zwar verrichtet die gehobene Last, wenn sie in der Höhe festgehalten wird, indem sie einen Zug oder Druck ausübt, keine Arbeit; aber sie besitzt die gleiche Arbeits- oder Wirkungsfähigkeit, als die sie hebende hatte. Nur wenn der Körper sinkt oder steigt, leistet oder verbraucht er Arbeit, und verliert oder gewinnt er eine entsprechende Quantität an Fallkraft. Letztere ist demnach für ein und denselben Körper nur abhängig von seiner Entfernung von der Erde. Aber wird diese Fallkraft eines in unendlicher Entfernung von der Erde befindlichen Körpers nicht unendlich gross? Nein, denn die Geschwindigkeit G, welche eine gegen die Erde fallende Masse m erlangen kann, ist eine endliche Grösse, nämlich $G = 34450'$ in einer Sekunde. Seine lebendige Kraft oder seine Wirkungsfähigkeit ist also mG^2; das Produkt mG^2 nennt Mayer die „totale Fallkraft". Letztere ist nur abhängig von der Masse eines Körpers, und daher wie diese konstant. Jetzt denken wir uns einen Körper aus unendlicher Entfernung zur Erde fallen; durch diese Bewegung wird ein Teil der totalen Fallkraft in eine Kraft der Bewegung, d. i. in lebendige Kraft umgewandelt; und in jedem Augenblicke gewinnt der fallende Körper so viel an lebendiger Kraft, als er an Fallkraft verliert. Stösst der Körper auf einen andern, so kann er seine Bewegungskraft auf diesen ganz oder teilweise übertragen, oder dieselbe in Fallkraft umwandeln; bei diesen Übertragungen gilt das bereits bekannte Prinzip von der Erhaltung der lebendigen Kraft.

Oft aber sehen wir Bewegung ganz verschwinden, ohne dass sie eine andere Bewegung oder Gewichtserhebung hervorbringt, und es fragt sich, wo in solchen Fällen die Bewegungskraft bleibt. Zu nichts kann sie nicht werden, denn es ist nicht denkbar, dass eine Ursache ohne äquivalente Wirkung sei. In der That zeigt die Erfahrung, dass sich hierbei in den meisten Fällen Wärme entwickelt, während zugleich eine Formveränderung der Körper erfolgt. Da wir für die Entstehung dieser Wärme keine andere Ursache finden, als das Verschwinden der Bewegungskraft, und da umgekehrt die Wärme sich in mechanischen Effekt verwandeln lässt, so sind wir zu der Annahme gezwungen, dass die Bewegung des Körpers in eine solche der kleinsten Teile und deren Verschiebung übergegangen sei. Die lebendige Kraft d. i. die aktuelle Energie des Körpers geht hier über in die aktuelle und die potentielle Energie der Moleküle. Mayer erklärt eingehend den konstanten Zusammenhang zwischen Wärme und Fallkraft. „Wir wissen, dass Wärme zum Vorschein kommt, wenn die einzelnen Massenteile des Körpers sich näherrücken; was nun für die kleinsten Teile und ihre Zwischenräume gilt, muss auch seine Anwendung auf grosse Massen und messbare Räume finden. Das Herabsinken einer Last ist eine wirkliche Volumsverminderung des Erdkörpers." Der potentiellen Energie der Moleküle entspricht also die Fallkraft; erstere kann durch Kompression in die aktuelle Energie der Moleküle, in Wärme, übergeführt werden; ebenso wandelt sich die (potentielle) Fallkraft eines Körpers in (aktuelle) Bewegungskraft um. Wärme und Bewegungskraft sind also Kräfte wesentlich derselben Art;

daher muss auch die Umwandlung der einen in die andere stets in einem bestimmten Verhältnis erfolgen, welches unabhängig ist von der Beschaffenheit der dazu dienenden Materien. Dieses konstante Verhältnis, die Wärmemenge, welche zur Hervorbringung eines bestimmten mechanischen Effekts aufzuwenden ist, kann nur auf experimentellem Wege ermittelt werden. Mayer gelangte zur Bestimmung dieses Verhältnisses durch folgende Überlegung: Für die Erwärmung einer Menge Gases im Normalzustande um 1° ist eine verschiedene Menge Wärme erforderlich, je nachdem man entweder das Volumen oder den Druck des Gases konstant erhält. In letzterem Falle findet der Mehrverbrauch an Wärme und zugleich eine Ausdehnung des Gases statt. Bei dieser Ausdehnung wird die auf dem Gase ruhende Schicht atmosphärischer Luft (oder die absperrende Flüssigkeit) gehoben. Drückt man die hierdurch geleistete Arbeit in Meterkilogrammen und den Mehrverbrauch der Wärme in Calorien aus, so findet sich die Zahl der Meter, welche ein Kilogramm durch das Verschwinden einer Calorie gehoben wird. Diese Zahl ist das mechanische Wärmeäquivalent. Mayer stützte seine Rechnungen auf die damals genauesten Messungen französischer Physiker, weil ihm selbst die Gelegenheit zum Experimentieren fehlte; er fand die Zahl 425. Für die übrigen Kräfte konnte er ein mechanisches Äquivalent nicht bestimmen, weil die erforderlichen Messungen fehlten; indessen zeigte er wenigstens qualitativ, dass jeder Erzeugung von Kraft ein Verschwinden einer anderen als Ursache entspreche.

Die Schwere ruft in einem Körper je nach seiner Lage dessen Fallkraft hervor, welche proportional der Quantität, aber unabhängig von der Qualität der Materie ist. Zwischen den Atomen verschiedener Körper findet auch noch eine andere Anziehung statt, welche von der Qualität der Materie abhängt und eine Kraft hervorruft, welche wir chemische Differenz der Materien nennen. Schwere und chemische Verwandtschaft sind keine Kräfte im Sinne Mayers; er sind keine Energieen. Mayer betrachtet sie als Eigenschaften oder als unveränderliche Urqualitäten der Materien, auf welche sich das Energiegesetz und unsere Betrachtung nicht bezieht. Wir haben es hier nur mit der begrenzten Arbeitsfähigkeit zu thun, welche einem Körper oder seinen Atomen vermöge der Lage oder Bewegung innewohnt. Auch die Wirkungsfähigkeit der Atome ist bedingt durch ihre räumliche Verschiedenheit, und ihre Kraft ist mechanischer Natur. Die Menge der entstehenden Wärme giebt uns Aufschluss über die Gewalt der Zugkraft zwischen den Atomen. Die chemische Differenz von 1 g Wasserstoff und 8 g Sauerstoff ist äquivalent der Wärmemenge (34 700 Grammkalorien), welche die totale Fallkraft von 2 g einer beliebigen Materie erzeugen kann.*) Dieselbe Wärmemenge, welche durch die chemische Verbindung zweier Gasmengen entsteht, wird bei ihrer Zerlegung verbraucht.

Auch Elektrizität und Magnetismus sind durch mechanische Arbeit hervorzubringende und in dieselbe zu verwandelnde Kräfte. „Die Reduktionserscheinungen und die Entwicklung von Wärme und mechanischem Effekt, welche wir als Wirkungen der (Voltaschen) Säule auftreten sehen, verdanken ihre Entstehung dem Aufwande einer

*) Mayer, Mechanik. S. 44.

Kraft, dem gegebenen Abstand von Metall und Sauerstoff, von Salz und Säure.“*) Es ist eine bekannte Thatsache, dass durch Reibung Wärme entsteht, wenn aber der geriebene Körper elektrisch wird, so fehlt die Reibungswärme ganz oder teilweise; es ist die Arbeit des Reibens in Elektrizität umgewandelt; die Quelle der Reibungselektrizität ist mechanische Kraft.

Beachten wir noch, dass Schwingungen der Körper, etwa einer Glocke, sich in Erschütterungen der Luft verwandeln, die wir als Schall empfinden, dass Schwingungen der Moleküle den Äther in vibrierende Bewegung versetzen können, die wir als Licht oder strahlende Wärme wahrnehmen, so sehen wir, dass alle physikalischen und chemischen Erscheinungen sich auf mechanische Kräfte zurückführen lassen, die, so verschieden sie sich äussern, alle wesentlich derselben Art, nämlich Bewegungskräfte sind. Alle Naturkräfte sind so mit einander verwandt, dass überall die eine in die andere verwandelt werden kann. Licht geht in Wärme über, diese in Elektrizität und weiter in Magnetismus und mechanische Kraft; letztere lässt sich wieder in Licht und Wärme umsetzen, und bei allen Umwandlungen bemerken wir, dass dem Entstehen der einen ein Verschwinden der anderen entspricht; dies zeigt sich in allen Gebieten der unorganischen und organischen Natur, sowie in der Mechanik des Himmels. Die arbeitende Maschine giebt weniger Wärme frei als die stillstehende; der Mehrverbrauch der Wärme ist in mechanische Arbeit umgesetzt. Die mechanische Kraft der Pferde in den Papiermühlen verwandelt sich in die Wärme des Wassers und erhitzt die Axen der sich drehenden Räder. Die durch die Anziehung des Mondes entstehende Flutwelle wälzt sich, stets östlich vom Mondmeridian, also der Axendrehung der Erde entgegen, wie eine Bremse reibend über die Erdoberfläche; dadurch entsteht mechanische Kraft und Wärme auf Kosten der Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde.

Die reichste Quelle mechanischer Bewegung ist die Sonne; aber auch diese ist nicht unversiegbar; sie würde erlischen, wenn sie nicht, etwa durch Aufnahme kosmischer Körper, ihre Kraftverluste ersetzte.**) Aus der Sonne ergiesst sich unaufhörlich ein Strom von Kraft in Form von Ätherschwingungen über die Erde und hält wie eine beständig sich spannende Feder das Getriebe irdischer Thätigkeiten im Gange. Die Kraft der Licht- und Wärmestrahlen ist es, welche sich in einen nutzbaren und unermesslichen Vorrat an aktueller und potentieller Energie verwandelt, indem sie die Bewegungen in der Atmosphäre bewirkt und die Gewässer zu Wolken emporhebt. Um diese beweglichste aller Kräfte, das Licht, im Fluge zu haschen und aufzuspeichern, hat sich die Erdkruste mit Organismen überzogen. Nicht durch die geheimnisvolle Kraft des Lebens, sondern auf Kosten der Energie der Sonnenstrahlen findet die Reduktion der Kohlensäure in den Pflanzen statt. Der Kohlenstoff der Wälder und der Sauerstoff der Luft besitzen, wie eine gehobene Last, durch ihre chemische Spannung eine potentielle Kraft; diese wird durch die Verbrennung und die Lungenthätigkeit der Tiere wieder aktuell; die tierische Wärme setzt sich durch die Muskel in mechanische Kräfte um, so dass auch während des Lebensprozesses nur eine Umwandlung, niemals

*) Mayer, Mechanik. S. 48.

**) Mayer, Beiträge zur Dynamik des Himmels.

eine Erschaffung der Kraft ohne den äquivalenten Verbrauch einer anderen stattfindet. „Bei allen physikalischen und chemischen Vorgängen bleibt die gegebene Kraft eine konstante Grösse.“*) Es giebt nur eine Kraft; dieselbe ist qualitativ wandelbar und quantitativ unzerstörlich.

Die umgestaltende Wirkung und die Tragweite der neuen Lehre auf dem ganzen Gebiete der Naturwissenschaft hat Mayer wohl ermessen; er spricht es deutlich aus, dass die Idee von der Einheit, der Umwandlungsfähigkeit und der Unzerstörlichkeit der Kraft die alte, besonders seit Newton herrschende Theorie der imponderablen Materien stürzen müsse: „Wohl fühlen wir, dass wir mit den eingewurzeltsten, durch grosse Autoritäten kanonisierten Hypothesen in den Kampf gehen, dass wir mit den Imponderabilien die letzten Reste der Götter Griechenlands aus der Naturlehre verbannen wollen; aber wir wissen auch, dass die Natur in ihrer einfachen Wahrheit grösser und herrlicher ist, als jedes Gebild von Menschenhand und als alle Illusionen des erschaffenen Geistes.“**)

Mayer hat den von ihm angegebenen Zweck erreicht. Er hat den Begriff der Kraft richtig erläutert und begrenzt und die Beziehungen der Kräfte untereinander, so weit es mit seinen Mitteln anging, erschöpfend dargelegt. Das mechanische Äquivalent der Wärme hat er, freilich gestützt auf die Experimente Anderer, quantitativ angegeben, die Äquivalente der übrigen Kräfte hat er als notwendige Postulate hingestellt und dabei die Art der Umwandlung in den schwierigsten Gebieten der Natur aufgedeckt. Ihm gebührt der Ruhm, das Energiegesetz zuerst aufgestellt zu haben.

Was der deutsche Arzt, den praktischen Anwendungen der Mechanik fernstehend, ohne die Ermutigung eines anerkannten Erfolges durch vorwiegend spekulative Betrachtungen der Natur ausgedacht hat, das fand unabhängig von ihm ein Physiker von Beruf, in einer der industriereichsten Städte Englands lebend, angeregt durch Untersuchungen, welche der Praxis dienen sollten, und ausgerüstet mit allen Mitteln physikalischer Apparate auf induktivem Wege. J. P. Joule ging von der Beobachtung einzelner Erfahrungsthatsachen aus, und indem er schrittweise zum klaren Bewusstsein von der Allgemeingültigkeit unseres Gesetzes gelangte, gab er diesem die breite und sichere Grundlage des Experiments. Seit 1840 stellte er Versuche über Wärmeentwicklung bei elektrischen Strömen an. Diese Arbeiten, denen wir das nach Joule benannte Gesetz zu verdanken haben, legten die Frage nahe, ob nicht die im Stromkreis auftretende Wärmemenge zu der den Strom erzeugenden chemischen oder mechanischen Kraft in einer einfachen Beziehung stehe. Joule suchte diese Frage durch magneto-elektrische Experimente zu entscheiden. Zwischen den Polen eines kräftigen Magneten liess er einen in einem Calorimeter befindlichen Elektromagneten durch herabsinkende Gewichte rasch rotieren. Ein Vergleich der entstehenden Wärme mit der geleisteten Arbeit der Gewichte ergab: „Die Wärmemenge, welche im Stande ist, ein Pfund Wasser um einen Grad der Fahrenheitschen Skala zu steigern, ist gleich

*) Mayer, Mech. S. 48.
**) Mayer, Mech. S. 52.

und kann verwandelt werden in eine mechanische Kraft, welche im Stande ist, 838 Pfund zu einer senkrechten Höhe von einem Fuss zu erheben.“*) Dieses Ergebnis veröffentlichte Joule im Jahre 1843. In derselben Abhandlung finden sich Äusserungen, welche beweisen, dass ihm die Idee unseres Gesetzes klar vor Augen schwebt. Er ist fest überzeugt, „dass die gewaltigen Naturkräfte durch des Schöpfers „Werde“ unzerstörbar sind, und dass man immer, wo man eine mechanische Kraft aufwendet, ein genaues Äquivalent an Wärme erhält“.**) Die Erzeugung der tierischen Wärme, meint er, müsse man vorwiegend chemischen Veränderungen zuschreiben. „Aber wenn das Tier ein Stück einer Maschine drehte, oder auf einen Berg stiege, so würde sich, wie ich glaube, im Verhältnis zu der hierzu verwandten Muskelanstrengung eine Verminderung der bei einer gegebenen chemischen Thätigkeit in dem System entwickelten Wärme ergeben.“***) Die Intensität eines Stromes und der durch ihn erzeugten Wärme hängt ab von der elektromotorischen Kraft; letztere aber wird hervorgerufen durch den Zusammensturz der Atome. Durch die Verbindung von 8 Pfd. Sauerstoff und 1 Pfd. Wasserstoff entwickelt sich eine Kraft, welche 50 Millionen Pfd. einen Fuss hoch heben kann. Könnten wir diese Gase in flüssigem Zustande sich verbinden lassen, so würde die Kraft oder die Verbindungswärme geringer sein, weil die Atome einen geringeren Raum zu durchfallen hätten. Im folgenden Jahre zeigte Joule, dass die Wärmemenge, welche bei der Verdünnung oder Verdichtung der Luft verbraucht oder entwickelt wird, der erzeugten oder verbrauchten Kraft proportional sei; insbesondere findet er, was schon Gay-Lussac wusste, dass keine Wärme verschwindet, wenn Luft sich in einem luftleeren Raume ausdehnt. „Diese Resultate“, sagt er, „sind unerklärlich, wenn wir annehmen, dass Wärme eine Substanz sei.“†) Zur Unterstützung seiner Ansicht, dass die Wärme in der Bewegung der kleinsten Teile eines Körpers bestehe, weisst er auf die Versuche von Rumford und Davy hin und verwirft entschieden Carnots Theorie von der materiellen Natur der Wärme, „weil sie zu dem Schlusse führt, dass . . . lebendige Kraft zerstört werden könne“.††) „Da ich der Ansicht bin, dass nur der Schöpfer die Macht zu zerstören besitzt, so stimme ich mit Rojet und Faraday darin überein, dass jede Theorie, welche in ihren Konsequenzen zur Vernichtung von Kraft gelangt, notwendig falsch ist.“ Diese Äusserungen Joules, welche noch vor dem Jahre 1845 veröffentlicht wurden, beweisen zur Genüge, dass er unabhängig von Mayer eine deutliche Einsicht in die Gültigkeit des Energiegesetzes gewonnen hatte. Übrigens lag es nicht in der Richtung seines Geistes, sich in deduzierende Erörterungen einzulassen; seine Arbeiten waren experimentelle Beweise. Ohne den allgemeinen Gesichtspunkt zu verlieren, beschränkten sich seine Untersuchungen auf eine sorgfältige Bestimmung der quantitativen Beziehungen einzelner Kräfte, auf das Bestreben, Thatsachen unwiderruflich festzustellen. Der schwierigen

*) Joule, Wärmeäquivalent, übers. von Spengel. S. 37.
**) Daselbst. S. 39.
***) Daselbst. S. 39.
†) Daselbst. S. 73.
††) Daselbst. S. 75.

physikalischen Ausmessung des mechanischen Wärmeäquivalents widmete er vornehmlich seine Zeit und sein unermüdliches Schaffen. Erfinderisch in der Entdeckung von Mitteln und Methoden führte er seine Versuche mit bewunderungswürdigem Eifer und Scharfsinn aus. Seine exaktesten Messungen datieren vom Jahre 1849. Es sind die Bestimmungen des Wärmeäquivalents durch Reibung, insbesondere durch Reibung von Wasser und anderen Flüssigkeiten, welche er durch metallene Schaufelräder vermittels sinkender Gewichte in Bewegung setzt. Eine erhebliche Anzahl von Versuchsreihen ergab:

1) „dass die durch Reibung von Körpern, seien es nun feste oder flüssige, entwickelte Wärmemenge immer proportional ist der aufgewandten Kraft, und
2) dass zur Entwicklung der Wärmemenge, welche im Stande ist, ein Pfund Wasser (im leeren Raum und zwischen 55° und 60° F. gewogen) um 1° F. zu erwärmen, die Aufwendung einer mechanischen Kraft erforderlich ist, welche repräsentiert wird durch den Fall von 772 Pfund durch einen Fuss.“ Diesem mechanischen Wärmeäquivalent entspricht nach unseren Massen nahezu die Zahl 423.5.

Während Mayer sein Augenmerk darauf richtet, die prinzipielle Möglichkeit und die Gültigkeit seiner Hypothese für alle Naturerscheinungen deduktiv nachzuweisen und empirische Daten nur, in so weit sie bereits vorhanden sind, zur Erklärung und Bestätigung heranzieht, arbeitet sich Joule seine Theorie aus neu beobachteten Thatsachen heraus, sucht die Erhaltung der in der Natur verbreitetsten Kräfte der Wärme und der mechanischen Arbeit festzustellen und dehnt alsdann das für dieses Gebiet als sicher erkannte Gesetz wie eine selbstverständliche Wahrheit auf alle übrigen Naturerscheinungen aus. Wie also Mayer sich vorwiegend durch die Spekulation unter fortwährender Berücksichtigung vorhandener Erfahrungsthatsachen den Weg zu der neuen Wahrheit bahnt, gelangt Joule, auf dem Wege der Empirie schrittweise seinen Gesichtskreis vorsichtig erweiternd, zu demselben Ziele.

Es erübrigte noch, durch die dritte Methode physikalischer Forschung, die mathematisch-deduktive, die gewonnenen Anschauungen zu bestätigen. Das Energiegesetz musste noch mathematisch formuliert, und dessen theoretische und praktische Wichtigkeit gebührend hervorgehoben werden. Dieser Aufgabe hat sich Helmholz unterzogen. Seine im Jahre 1847 erschienene Abhandlung „Über die Erhaltung der Kraft“ legte in gedrängter Kürze den Grund zu einer mathematischen Entwicklung des Energiegesetzes. Helmholz stellt das Gesetz als eine unserer Erkenntnis nicht widersprechende Hypothese hin, leitet aus dieser die Wirkungsweisen der einzelnen Erscheinungen ab und hält alsdann Umschau, inwiefern das Verhalten der mannigfaltigen Naturkräfte unser Gesetz bewahrheitet.

Durch erkenntnistheoretische Betrachtungen folgert Helmholz zunächst aus der vollständigen Begreiflichkeit der Natur, dass alle Erscheinungen auf Kräfte zurückzuführen seien, welche zwischen zwei materiellen Punkten in deren Verbindungsgraden anziehend oder abstossend wirken, und deren Intensität nur von der Entfernung abhängt.*)

*) Helmholz, Erhaltung der Kraft, Einleitung. Vergleiche auch die Zusätze 1 bis 3.

Nur da, wo solche „Centralkräfte“ wirken, gilt nach ihm der mechanische, durch die Erfahrung gewonnene Grundsatz der Unmöglichkeit des perpetuum mobile oder das Gesetz von der Erhaltung der lebendigen Kraft. Um nun dies Gesetz für einen materiellen Punkt m, der von einem festen System angezogen wird, durch eine Gleichung allgemein auszudrücken, bezeichnen wir seine Tangentialgeschwindigkeit mit q, seine rechtwinkligen Koordinaten mit x, y und z, sowie die Komponenten der Kraft in den Richtungen der Axen mit X, Y und Z. Es ist dann, sofern das Gesetz Gültigkeit hat,

$$\tfrac{1}{2}\, m\, d(q^2) = Xdx + Ydy + Zdz.$$

Die linke Seite der Gleichung bedeutet die lebendige Kraft, und die rechte Seite die geleistete Arbeit, beide bezogen auf einen unendlich kleinen Zeitabschnitt. Um nun aus dieser Gleichung diejenige herzuleiten, welche das Gesetz von der Erhaltung der Kraft zum Ausdruck bringt, ersetzt Helmholz das Differential der Arbeit durch das negativ genommene Produkt aus der augenblicklichen, anziehenden Kraftintensität φ und dem Differential des Weges dr. Es ergiebt sich alsdann

$$\tfrac{1}{2}\, md(q^2) = -\, \varphi dr.$$

Oder wenn Q und R, sowie q und r zusammengehörige Tangentialgeschwindigkeiten und Entfernungen vorstellen,

$$\tfrac{1}{2}\, m\, Q^2 - \tfrac{1}{2}\, m\, q^2 = -\int_r^R \varphi dr.$$

Nennen wir mit Helmholz das Produkt φdr die augenblickliche „Spannkraft,“ so sagt vorstehende Gleichung aus: „Die Zunahme der lebendigen Kraft eines Massenpunktes bei seiner Bewegung unter dem Einfluss einer Centralkraft ist gleich der Summe der zu der betreffenden Änderung seiner Entfernung gehörigen Spannkräfte.“*) In demselben Masse, als die lebendige Kraft zweier sich anziehenden Punkte wächst, nimmt ihre Spannkraft ab. Das umgekehrte findet bei abstossenden Kräften statt, so dass also die Summe der lebendigen Kraft und der Spannkraft gleich einer konstanten endlichen Grösse, dem Maximum der zu leistenden Arbeit (totale Fallkraft) ist. Dehnen wir diese Betrachtung auf ein ganzes System von materiellen Punkten aus, so ergiebt sich die Gleichung:

$$\Sigma\, (\tfrac{1}{2}\, m_a\, Q_a^2) = \Sigma\, (\tfrac{1}{2}\, m_a\, q_a^2) = -\, \Sigma \left[\int_{r_{ab}}^{R_{ab}} \varphi_{ab}\, dr_{ab} \right].$$

Dieselbe sagt aus: „In allen Fällen der Bewegung freier materieller Punkte unter dem Einfluss ihrer anziehenden oder abstossenden Kräfte, deren Intensitäten nur von der Entfernung abhängig sind, ist der Verlust an Quantität der Spannkraft stets gleich dem Gewinn an lebendiger Kraft, und der Gewinn der ersteren gleich dem Ver-

*) Helmholz, Erhaltung der Kraft. S. 14.

just der letzteren. Es ist also stets die Summe der vorhandenen lebendigen und Spannkraft konstant."*) Diese präzise mathematische Formulierung und die Ausdehnung unseres Gesetzes auf das ganze Gebiet der physikalischen Wissenschaft ist das Hauptverdienst der Helmholzschen Arbeit.

Bei den Anwendungen des Gesetzes auf die mechanischen Theoreme sowie auf das Kraftäquivalent der Wärme begegnen wir im wesentlichen den bereits von seinen Vorgängern Mayer, Joule und anderen ausgesprochenen Ideen. Neu dagegen und von besonderer Bedeutung ist die Verwertung unseres Gesetzes für elektrische, magnetische und elektromagnetische Vorgänge.**) Für die Elektrostatik ergiebt sich, dass die Arbeit, welche eine gegebene Elektrizitätsmenge zu leisten im Stande ist, dadurch, dass sie selbst zum Verschwinden gebracht wird, gleich ist dem Potential dieser Menge auf sich selbst. Geht nun unter der Voraussetzung, dass das System nur inneren Kräften überlassen ist, das Potential desselben von einem anfänglichen Werte ΣW_1 in einen anderen Wert ΣW_2 über, so wird hierdurch die Arbeit $\Sigma W_1 - \Sigma W_2$ geleistet. Hatte das System eine gewisse Geschwindigkeit, so dass seine lebendige Kraft $\frac{1}{2}\,\Sigma m v_1^2$ war, so muss die geleistete Arbeit ganz als lebendige Kraft in dem System vorhanden sein. Es ist also:

$$\Sigma\, W_1 + \tfrac{1}{2}\,\Sigma\, m v_1^2 = \Sigma\, W_2 + \tfrac{1}{2}\,\Sigma\, m v_2^2.$$

Diese Gleichung sagt aus, dass die Summe der potentiellen Energie (ΣW_1) und der aktuellen Energie ($\frac{1}{2}\,\Sigma m v_1^2$) in einem System konstant ist, so lange es nur inneren Kräften überlassen bleibt; und eine Änderung in dem Systeme kann nur derart bewirkt werden, dass eine der Energiearten in die andere verwandelt wird. Nun ist das Potential der Elektrizität auf der inneren Belegung einer Leidener Flasche $\frac{K}{2} \cdot \frac{Q^2}{S^2}$, wenn Q die Elektrizität, S die Oberfläche der Belegung und K eine Konstante bedeutet. Wird die Flasche entladen, so wird das Potential $= 0$; folglich muss die geleistete Arbeit gleich jenem Potential sein. Setzen wir voraus, dass alle Arbeit als Wärme auftritt, so ist die durch die Entladung erzeugte Wärmemenge $\Theta = A \cdot \frac{K}{2} \cdot \frac{Q^2}{S}$, wenn A das Wärmeäquivalent der Arbeit bezeichnet. Diese Forderung des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft stimmt nun mit der Erfahrung völlig überein, wie Vorsselmann de Heer aus den Versuchen von Riess gezeigt hat. Zu bemerken ist noch, dass die Konstante K von der Art der Flaschenkonstruktion abhängt; bei Flaschen mit denselben Isolatoren ist die entwickelte Wärmemenge proportional $\frac{Q^2}{S}$.

Auf dem Gebiete des Galvanismus brachte Helmholz die Voltasche Kontakttheorie mit dem Energiegesetze in Einklang, indem er zeigte, wie man die Entstehung des Stromes aufzufassen habe, um dieselbe auf anziehende und abstossende Kräfte, als letzte Ursache zurückführen zu können. Seine Ansicht lässt sich in folgenden

*) Helmholz, Erhaltung der Kraft. S. 17.
**) Kapitel 5 und 6.

Sätzen wiedergeben. Die chemisch verschiedenen Stoffe üben auf die beiden Elektrizitäten verschiedene Anziehungskräfte aus. Die Kontaktkraft, oder, wie wir jetzt sagen, die elektromotorische Kraft ist die Differenz dieser Anziehungskräfte, welche die an der Berührungsstelle liegenden Teilchen auf die Elektrizitäten ausüben. Es wird ein Gleichgewichtszustand eintreten, wenn ein elektrisches Teilchen beim Übergange nichts mehr an lebendiger Kraft gewinnen oder verlieren würde. Sobald dieser Gleichgewichtszustand eintritt, kann kein Strom entstehen, wie beispielsweise in einem rein metallischen Kreise. Wird aber das Gleichgewicht gestört und dadurch bewirkt, dass die elektrische Potentialfunktion an einer Stelle einen anderen Werth hat, so entsteht ein Strom. Diese Störung des Gleichgewichts kann bewirkt werden durch Wärmezufuhr an einer Berührungsstelle (Thermoströme), oder durch Einschaltung eines Elektrolyten (hydroelektrische Ströme). Es ist also die Arbeit der Wärme, oder die chemische Molekulararbeit die Ursache des elektrischen Stromes. Durch diese Auffassung der elektromotorischen Kraft wird es nun möglich, die Wirkungen galvanischer Ströme, Wärmeentwicklung, chemische Vorgänge und Polarisation vermittelst unseres Gesetzes zu bestimmen, und letzteres experimentell zu bestätigen. Das Experiment bestätigt das Gesetz, wenn gefunden wird, dass die gesamte im Stromkreis entwickelte Wärme gleich jener ist, welche durch die chemischen Vorgänge in der Kette frei wird. Für die Thermoströme muss analog die an der kälteren Lötstelle entwickelte Wärme gleich der an der wärmeren Lötstelle verschluckten sein. Leistet aber der Strom noch irgend eine Arbeit, wozu auch die Polarisation zu zählen ist, so tritt das Äquivalent dieser Arbeit an Wärme weniger auf. Alle Forderungen des Gesetzes stimmen nun mit den bisher gemachten Erfahrungen überein. Für die magnetischen Erscheinungen gilt dies von vornherein, weil sie sich durch die Annahme zweier Fluida, die sich umgekehrt wie die Quadrate der Entfernungen anziehen und abstossen, erklären lassen.

Bezüglich der elektrodynamischen und der Induktionserscheinungen bemerkt Helmholz, dass sie sich nicht auf konstante Centralkräfte zurückführen lassen, sondern dass sie von W. Weber erklärt werden durch anziehende und abstossende Kräfte, welche nicht lediglich von der Entfernung, sondern auch von der Geschwindigkeit und Beschleunigung der materiellen Punkte abhängig sind. Es war aber bereits von F. Neumann gezeigt worden, dass für die Wirkung geschlossener Ströme nach dem Ampèreschen Gesetze ein Potential existiert, da sich die Komponenten der Kraft darstellen lassen als die partiellen Derivierten eines und desselben Ausdrucks:

$$W = -\tfrac{1}{2}\, i\, i' \iint \frac{\cos \varepsilon}{r}\, ds\, ds';$$

worin i und i′ die Intensitäten, ds und ds′ die Elemente der Ströme, ε den Winkel, den die beiden linearen Elemente im Raume mit einander bilden, und r die Entfernung der Elemente bedeuten.

Helmholz behandelt nun im einzelnen folgende Erscheinungen:

1) Es bewegt sich ein Magnet unter dem Einfluss eines Stromes.
2) Es bewegt sich ein Magnet unter dem Einfluss eines Elektromagneten.

3) Eisen oder Stahl wird durch einen Strom magnetisch.
4) Zwei geschlossene Ströme bewegen sich gegeneinander.

Auf die Forderungen unseres Gesetzes für diese Fälle kommen wir weiter unten bei der Betrachtung des Weberschen Gesetzes zurück.

Was Helmholz alsdann über die Erscheinungen in der organischen Natur bezüglich unseres Gesetzes sagt, findet sich bereits ausführlicher bei Mayer. Er schliesst seine inhaltsreiche Abhandlung mit folgenden trefflichen Worten: „Ich glaube durch das Angeführte bewiesen zu haben, dass das besprochene Gesetz keiner der bisher bekannten Thatsachen der Naturwissenschaften widerspricht, von einer grossen Zahl derselben aber in einer auffallenden Weise bestätigt wird. Ich habe mich bemüht, die Folgerungen möglichst vollständig aufzustellen, welche aus der Kombination derselben mit den bisher bekannten Gesetzen der Naturerscheinungen sich ergeben, und welche ihre Bestätigung durch das Experiment noch erwarten müssen. Der Zweck dieser Untersuchung, der mich zugleich wegen der hypothetischen Teile derselben entschuldigen mag, war, den Physikern in möglichster Vollständigkeit die theoretische, praktische und heuristische Wichtigkeit dieses Gesetzes darzulegen, dessen vollständige Bestätigung als eine der Hauptaufgaben der nächsten Zukunft der Physik betrachtet werden muss.“*)

Nach der Arbeit von Helmholz stand der Ausbau unseres Gesetzes in seinen konstruktiven Teilen fertig da. An seinem allmählichen Entstehen haben viele Forscher mitgewirkt. Die ganze Entwicklung der Wissenschaft seit Entdeckung des Gesetzes von der Erhaltung der Quantität der Materie drängte deutlich auf ein analoges Kraftgesetz hin. Aber vor allen anderen waren es drei Physiker, welche mit kräftiger Hand nahezu in derselben Zeit, und dennoch der eine unabhängig vom anderen, und jeder nach einer anderen Seite hin den Bau des Gesetzes gefördert haben. Mayer hat auf vorwiegend deduktivem Wege die Idee des Gesetzes gefunden und ausgebildet; Joule hat empirisch vorgehend der Mayerschen Hypothese die feste Grundlage des Experiments geschaffen, und Helmholz endlich hat durch das physiko-mathematische Verfahren die Anwendung und Gültigkeit des Gesetzes für alle bis dahin bekannten Thatsachen bewiesen. Jeder dieser drei berühmten Männer hat eine einzelne der Methoden physikalischer Forschung, diejenige, welche seiner Geistesrichtung am angemessensten war, mit ganz besonderem Geschick ausgewertet, ohne jedoch die beiden anderen zu vernachlässigen. Die allgemeine Beachtung und Würdigung konnte dem Gesetze auf die Dauer nicht mehr fehlen. Schon in den fünfziger Jahren wurde es von der ganzen wissenschaftlichen Welt als ein oberstes Prinzip anerkannt, welches sich über alle Zweige naturwissenschaftlicher Forschung ausbreitet.

Allein mit der allgemeinen Anerkennung des Gesetzes ist seine Geschichte noch nicht abgeschlossen. Das Gesetz, wie es aus den Händen Helmholz' hervorgegangen war, hat sich einer Erweiterung fähig gezeigt. Die Bedingungen, unter denen es Gültigkeit haben sollte, waren zu weitgehend, sein Umfang daher zu eng. Helmholz war weniger durch physiko-mathematische, als durch philosophische Erwägungen zu der Ansicht

*) Helmholz, Erhaltung der Kraft. S. 71.

gelangt, dass das Gesetz seine Gültigkeit verliere, sobald in der Natur Kräfte aufzufinden seien, welche anders als nach der Verbindungslinie je zweier wirksamer Punkte wirken, oder welche von Zeit und Geschwindigkeit abhängig sind. Diese Behauptung erwies sich als nicht stichhaltig. Schon im Jahre 1846 hatte W. Weber in seiner Abhandlung „Elektromagnetische Massbestimmungen" gezeigt, dass die Kräfte, welche bewegte Elektrizitätsteilchen aufeinander ausüben, nicht nur von der gegenseitigen Entfernung, sondern auch von der Geschwindigkeit und sogar von der Beschleunigung dieser Teilchen abhängen. Vor Weber waren die Erscheinungen der Elektrizität in drei grosse Gruppen geteilt; und wenn auch für jede Gruppe ein oberstes Gesetz gefunden war, wodurch die Erscheinungen sich erklären liessen, so war doch das Bedürfnis unabweisbar, alle elektrischen Vorgänge aus einem einzigen Grunde zu erklären In der Elektrostatik herrschte das Coulombsche Gesetz ganz analog dem Newtonschen Gravitationsgesetz $\varphi = -\frac{ee'}{r^2}$. Durch das Ampèresche Gesetz $w = -\frac{ii'\,ds\,ds'}{r^2}(\cos.\varepsilon - \frac{3}{2}\cos\delta.\cos\delta')$ liessen sich die Erscheinungen der Elektrodynamik vollständig erklären mit Ausnahme der Induktionserscheinungen; und diese wurden wiederum durch die Gesetze der Induction erklärt. Dieser Dreiteilung des elektrischen Gebietes machte Weber ein Ende, indem er zeigte, dass alle diese genannten Gesetze nur spezielle Fälle eines anderen Gesetzes seien, welches also mit Recht den Namen eines elektrischen Grundgesetzes verdient. Dieses Webersche Grundgesetz findet seinen allgemeinen Ausdruck in der Gleichung:

$$w = \frac{ee'}{r^2}\left\{1 = \frac{1}{c^2}\left(\frac{dr}{dx}\right)^2 + \frac{2}{c^2}\,r\,\frac{dv}{dx}\right\},$$

in welcher e und e' die elektrischen Massenteilchen, r ihre Entfernung, $\frac{dr}{dx}$ also ihre relative Geschwindigkeit, $\frac{dv}{dx}$ ihre relative Beschleunigung und c eine Konstante bedeutet. Durch die Einführung des absoluten Masssystems und Vergleichung der elektrostatischen und elektrodynamischen Messungen war es Weber ferner möglich, die Konstante c numerisch zu bestimmen. Es ist dieses c die konstante relative Geschwindigkeit, bei welcher 2 elektrische Teilchen gar keine Wirkung mehr auf einander ausüben. Es ergab sich $c = 439\,450 \,.\, 10^6$ mm. Bei diesem Werte von c lässt sich nun das oben aufgestellte Gesetz selbst als das allgemeinste Gesetz der Wirkung zweier Teilchen aufeinander auffassen, so dass auch das Newtonsche Gravitationsgesetz nur ein Spezialfall des allgemeinen Weberschen Gesetzes wird; denn die hinzutretenden Glieder sind so gering, dass sie vernachlässigt werden dürfen; dann aber hat das Webersche Gesetz die Form des Newtonschen.

Auf den ersten Blick scheint nun in der That das Webersche Gesetz im Widerspruch mit unserm Gesetze von der Erhaltung der Kraft zu stehen. Letzteres verlangt nämlich, dass, wenn auf ein System nur innere Kräfte wirken, die Summe der Spannkräfte und die geleistete Arbeit stets konstant sind. Haben also die Teile des Systems einen Kreisprozess durchlaufen, das heisst, ist ihre Energie wieder dieselbe, so darf

weder Arbeit gewonnen noch verloren sein. Bei Kräften, deren Intensität nur von der Entfernung abhängt, findet dies Verhalten freilich immer statt; denn in diesem Falle sind die Kräfte darstellbar als Funktionen der Koordinaten der Massenpunkte, und die geleistete Arbeit ist bei unendlich kleiner Verschiebung das vollständige Differential einer solchen Funktion. Die Summe aller Arbeiten bei einem Kreisprozess ist also das Integral dieses Differentials über eine geschlossene Kurve und als solches gleich Null. Wenn so gezeigt ist, dass für die Wirkung von Centralkräften, deren Intensität nur von der Entfernung abhängt, unser Gesetz gilt, so folgt nicht, dass bei anders wirkenden Kräften das Gesetz nicht bestehen könne. Vielmehr folgt aus obiger Betrachtung, dass die Existenz einer Funktion, deren partielle Differentialquotienten nach irgend einer Richtung die Komponente der Kraft nach dieser Richtung liefert, eine hinreichende Bedingung für die Gültigkeit unseres Gesetzes ist. Dabei ist es ganz gleichgültig, ob jene Funktion nur Koordinaten der materiellen Punkte, oder auch noch andere Grössen als Veränderliche enthält. Es wird also das Webersche Gesetz in dieser Beziehung dem Energiegesetze nicht widersprechen, wenn die nach demselben wirkenden Kräfte ein Potential haben. Dieses Potential ist von Weber selbst im Jahre 1848 abgeleitet worden. Es lautet:

$$W = \frac{ee'}{r}\left\{1 - \frac{1}{c2}\left(\frac{dr}{dx}\right)^2\right\}.^{*)}$$

Damit ist einerseits der Einwurf widerlegt, welcher von verschiedener Seite, insbesondere von den Engländern Thomson und Tait gegen das Webersche Gesetz erhoben wurde, dass es mit dem Gesetze von der Erhaltung der Kraft nicht im Einklange stehe; anderseits erhält dadurch unser Gesetz eine Erweiterung seines Inhalts, weil die Beschränkung auf Kräfte, welche von Zeit und Geschwindigkeit unabhängig sind, durch die Aufstellung des Potentials wegfällt.

Eine ähnliche Erweiterung erhielt das Gesetz durch Clausius. Wie Weber, so stellt auch Glausius ein elektrisches Grundgesetz auf, nach welchem die wirkenden Kräfte von den Geschwindigkeiten abhängen. Clausius geht sogar noch einen Schritt weiter, indem er annimmt, dass die elektrischen Teilchen nicht ausschliesslich nach ihren Verbindungsgraden wirken, sondern dass Kraftkomponenten auch in die Richtung der Bewegung jener Teilchen fallen können. Aber auch er zeigt, dass die nach seinem Gesetze wirkenden Kräfte ein Potential haben. Während also nach dem Weberschen Gesetze die Helmholzsche Einschränkung unseres Gesetzes auf Centralkräfte bestehen konnte, so zeigte Clausius, dass auch diese Beschränkung nicht aufrecht zu erhalten sei.

In der Folge wurde über diese Gesetze, namentlich das Webersche, eifrig hin und her gestritten. Dabei machte sich das Bedürfnis nach einer sachgemässeren Bezeichnungsweise der Wirkungsverhältnisse geltend. Die von Helmholz eingeführte Bezeichnung „Spannkraft“ beruhte auf der Vorstellung, dass die von zwei Punkten auf einander ausgeübte Wirkung stets in ihrer Verbindungslinie erfolge; sie war nach der Erweiterung des Gesetzes nicht mehr zutreffend. In England führte man den bereits

*) Pogg. Annal. 73. S. 229.

von Young für rein mechanische Grössen gebrauchten Ausdruck „Energie“ ein und unterschied aktuelle und potentielle Energie, je nachdem die Grösse des Wirkungsvermögens durch die Bewegung oder die Lage eines Körpers und seiner kleinsten Teile hervorgerufen wurde. Auch die Bezeichnung „Kraft“ in der Leibnizschen Bedeutung einer begrenzten Arbeitsfähigkeit gab man auf und bediente sich derselben nur im Sinne des Galilei, Cartesius und Newton. Bei uns bürgerte sich der Name „Energie“ erst langsam ein, nachdem Clausius denselben adoptiert hatte. Seitdem heisst unser Gesetz dasjenige der Energie.

Im Anfang der fünfziger Jahre unseres Jahrhunderts hatte Clausius eine der Carnotschen Stofftheorie entgegengesetzte mechanische Theorie der Wärme begründet, welche sich wesentlich auf das bereits festgestellte Gesetz von der Äquivalenz von Wärme und Bewegung stützte. Die zum Teil neuen Entdeckungen, namentlich über das Verhalten der permanenten Gase und Dämpfe, welche Clausius durch seine Theorie auf mathematischem Wege fand, wurden durch das Experiment vollkommen bestätigt und rechtfertigten auf eine glänzende Weise sowohl die neuen Anschauungen von der Verwandelbarkeit der Kräfte, als auch unser Gesetz. Sein vielbehandelter zweiter Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie kommt hier nicht in Betracht.

Wenn ich ferner von den Ergebnissen des Streites über die Webersche Theorie absehen darf, so kann ich doch nicht die Arbeiten von C. Neumann ganz unerwähnt lassen, weil diese dem Gesetze der Erhaltung der Energie den vollendetsten mathematischen Ausdruck verliehen haben. Lässt man einstweilen die elektrischen Wechselwirkungen zwischen den Teilen eines Systems unberücksichtigt, und bezeichnet man mit T^0 die lebendige Kraft des Systems, mit U^0 das Potential der inneren Kräfte und mit S^0 die Arbeit, welche von den auf das System wirkenden äusseren Kräften verrichtet, also von dem System aufgenommen wird, so ist

$$d\,(T^0 + U^0) = d\,S^0;$$

das heisst, der Zuwachs der Summe $T^0 + U^0$ während eines Zeitabschnittes ist immer gleich der während dieses Zeitraumes von dem System aufgenommenen Arbeit. Die Summe $T^0 + U^0$ eines sich selbst überlassenen Systems ist also für alle Zeiten, in denen es sich selbst überlassen bleibt, unveränderlich. Kommen nun aber noch innere elektrische Kräfte hinzu, so erweitert sich die Formel zu folgender:

$$d\,(T + U^0 + U - V) = d\,S,$$

wo T die lebendige Kraft, U^0 das mechanische, U das elektrostatische und V das elektrodynamische Potential bedeutet. Die Summe $T + U^0 + U - V$ ist die Energie des Systems. „Für jeden Zeitraum wird der Zuwachs des Systems an Energie gleich gross sein mit der vom System während dieses Zeitraumes consumierten Arbeit.“ *) Wird nun von der aufgenommenen Arbeit ein Teil in Wärme Q umgesetzt, so ist dieselbe von dS abzuziehen. Bezeichnen wir noch die Gesamtenergie mit E, so ergiebt sich:

$$d\,E = d\,S - d\,Q;$$

*) Neumann, Programm der Tübinger Universität. 1868.

das heisst, der Zuwachs der Energie ist gleich gross mit der von den äusseren Kräften während der Zeit dt verrichteten Arbeit, davon abgezogen die während dieser Zeit vom System entwickelten Wärmemenge. Ist nun das System sich selbst überlassen, so ist $E = \text{const.}$, das heisst: Die Energie der Welt ist konstant.

Mit diesem allgemeinsten Ausdrucke unseres Gesetzes können wir seine Geschichte schliessen; die nächsten Bestimmungen, welche die mechanische Wärmetheorie, namentlich der Carnot-Clausiussche Satz enthält, betreffen nicht unser Gesetz, sondern stellen Bedingungen auf, unter welchen die eine Art der Energie in die andere umgewandelt werden kann. Das Gesetz der Erhaltung der Energie berücksichtigt nur eine Seite der Energie, nämlich ihre quantitative Unzerstörbarkeit, über die Art ihrer Umwandlungsfähigkeit sagt es nichts aus. Mit der vollkommenen Konstanz der Energie muss zugleich die Umwandlungsfähigkeit aller Energieformen in einander angenommen werden; aber auf die Frage, wie die Möglichkeit dieser Umwandlung zu denken sei, welches die Bedingungen seien, unter denen sie stattfindet, giebt unser Gesetz keine Antwort. Vielmehr dient es uns gerade als Mittel, diese Schwierigkeiten zu umgehen; denn es setzt uns in stand, aus der Grösse einer bestimmten Energieform diejenige der umgewandelten im Voraus zu berechnen und auf diese Weise eine Naturerscheinung auf eine andere bekannte zurückzuführen, ohne dass wir genötigt sind, auf eine Untersuchung der inneren Vorgänge in der Materie sowie der letzten Ursachen der Bewegung näher einzugehen. Das Gesetz der Erhaltung der Energie dient dem Physiker als Führer bei seinen Spekulationen und gleichzeitig, wie das Gesetz der Erhaltung der Quantität der Materie den Chemikern, als Kontrole bei seinen Versuchen. Die Analogie, welche zwischen beiden Gesetzen besteht, weist auf die Möglichkeit hin, den Dualismus von Materie und Kraft zu beseitigen; vielleicht gelingt dies, wenn das Ideal der neueren Physik, eine rein kinetische Naturerklärung erreicht ist.

Aachen, März 1891.

Joseph Peveling.