

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Die Grundlagen der Bewegungslehre von einem modernen Standpunkte aus

Jaumann, Gustav

Leipzig, 1905

Vierter Teil. Kraftlehre

Vierter Teil.

Kraftlehre.

26. Die räumlichen Kräfte.

542. Wir wenden uns nun zur Beschreibung jener Vorgänge, welche durch die Kraftempfindung angezeigt werden können. Diese führt zur Wahrnehmung der Größe und Richtung der Kräfte.

Die Kraftempfindungen zeigen entweder eine Veränderung der Bewegung der ergriffenen Körper an, z. B. wenn man einen Stein wirft oder einen bewegten Körper aufhält. Oft begleiten sie eine unveränderliche Bewegung und zeigen dann, wie man heute weiß, eine Wärmeproduktion an (z. B. wenn man einen Körper, der eine starke Reibung an seiner Unterlage hat, fortschiebt). Endlich zeigen die Kraftempfindungen auch Deformationen der ergriffenen Körper an, z. B. wenn man einen Stab biegt. In den letzteren zwei Fällen sind die mit der Krafterrscheinung verbundenen Bewegungen oft sehr unbedeutend, oft gar nicht vorhanden. Man empfindet Kraft, wenn man den Körper auf seiner Unterlage fortzuschieben sucht, ohne es zu vermögen, oder wenn der Stab gebogen ist, ohne sich zu bewegen. So empfindet man auch Kraft, wenn man einen Stein frei in der Luft erhält, ohne ihn zu heben. In letzteren statischen Fällen hindert man die Körper, sich zu bewegen. Alle Krafterrscheinungen haben gelegentlich Beziehungen zu Bewegungserscheinungen, deren theoretische Wichtigkeit und deren Gesetz jedoch nicht ohne weiteres einleuchtet.

543. Als erste aller physikalischen Wissenschaften entwickelte sich die reine Kraftlehre. Es können alle Anordnungen, an welchen wir unsere Kraft erprobt haben, auch

untereinander kombiniert werden und ersetzen sich dann gegenseitig den wirkenden Menschen.

Wir können einen Körper in Bewegung setzen, aufhalten oder tragen, andererseits können wir eine Feder spannen. Kombiniert man eine gespannte Feder A und einen bewegten oder schweren Körper B , so erfahren beide ähnliche Veränderungen. Da man den einen Teil A dieser Kombination beliebig wählen kann und doch erzielt, daß der andere Teil B dieselben Veränderungen erfährt, hat man sich gewöhnt, entweder den einen Teil A immer durch einen kraftleistenden Menschen ersetzt zu denken, oder ganz von seinen speziellen Eigenschaften zu abstrahieren.

Im ersten Falle sagt man, der hinzugedachte Mensch übt eine Kraft aus, und der Teil B der Kombination, dessen Veränderungen man betrachtet, erfährt diese Kraftwirkung. Vollendet man aber die Abstraktion von dem ersten Teile A der Kombination, so sagt man: auf den zweiten Teil B der Kombination wird eine Kraft ausgeübt (von beliebigem Ursprung) und umgekehrt.

Der erste Teil der Kombination bestimmt eine Kraft und diese bestimmt die Veränderung des zweiten Teiles der Kombination und umgekehrt.

544. Man erkennt, daß diese Kraft nichts anderes ist als eine eingeschaltete Hilfsvariable. Indem diese verschiedenen Veränderungen verschiedener Komplexe A, B mit derselben Hilfsvariablen verglichen werden, wird nichts anderes als ihre Äquivalenz oder Vertauschbarkeit festgelegt.

Diese Hilfsvariable kann durch unsere Kraftempfindung, wenn auch in nur roher Weise, gemessen oder abgeschätzt werden, und ist also ein Vektor von bestimmter Größe und Richtung.

Wir werden sogleich ein objektives Kraftmaß kennen lernen, durch dessen Einführung die Kraftlehre wissenschaftlichen Charakter annahm.

545. *Einfache Gesetze für die Größe der Kräfte.* Wenn wir die Kräfte auch zunächst nur nach unserer Empfindung abschätzen können, so zeigt sich doch, daß sie durch sehr einfache Gesetze bestimmt sind, und also große physikalische Wichtigkeit haben.

Die Kraft, welche eine gespannte Feder ausübt, hängt z. B. nur von ihrem Material, von Form und Dehnung ab, nicht aber von dem Ort des Versuchs und anderen Umständen, ja nicht einmal von der Natur und dem Zustande des angegriffenen, von der Feder bewegten Körpers.

546. *Summierung der Kräfte.* Wenn zwei Menschen mit gleicher entgegengesetzt gerichteter Kraft an einem Körper ziehen, so heben sich diese Wirkungen auf, d. h. der Körper bleibt in Ruhe. Solche statische Fälle treten auch bei Kombination anderer für sich „Kräfte ausübender“ Umstände auf, z. B. gespannter Seile, Magnete usw., und für diese Fälle gelten nun universelle Gesetze.

Als gleiche Kräfte bezeichnen wir solche, welche sich aufheben bez. ersetzen können. Sind zwei Kräfte einer dritten gleich, so sind sie auch untereinander gleich. Es ist dies eine andere Form des Satzes von der Äquivalenz oder Vertauschbarkeit kraftbestimmender Umstände (544.).

Zwei Menschen üben bei gleicher und gleichgerichteter Anstrengung eine größere, in einfachen Fällen gerade die doppelte Wirkung aus.

Wenn zwei gleiche Kräfte eine dritte entgegengesetzte aufheben oder ersetzen, so ist letztere als doppelt so groß zu betrachten.

Die Wichtigkeit dieses Satzes zeigt sich sofort dadurch, daß er allgemein aufrecht erhalten werden kann, was keineswegs selbstverständlich ist, sondern auf ein fundamentales Naturgesetz hindeutet.

547. Man gelangt hierdurch zu einem objektiven Kraftmaß. Wir können jede Kraft messen, indem wir sie durch eine Anzahl von Einheitskräften aufheben oder ersetzen. Die algebraische Summe mehrerer in die gleiche oder entgegengesetzte Richtung fallender, an einem Körper wirkender Kräfte muß nach diesen Voraussetzungen im Ruhefalle Null sein.

Einen noch größeren Erfolg brachte die Entdeckung der allgemeinen Form dieses Gesetzes: Die vektorische Summe aller an einem Körper wirkender Kräfte ist im Ruhefalle Null.

Es war mit dieser Einführung des Kraftmaßes ein weites

Beobachtungsfeld gegeben. Die verschiedensten Umstände, welche Kräfte ausüben, waren zu untersuchen, und Größe sowie Richtung dieser Kräfte zeigten sich immer als durch einfache Gesetze bestimmt.

Mehrere an demselben kleinen Körper angreifende Kräfte können immer durch eine Resultierende ersetzt werden, welche gleich ihrer vektorischen Summe ist.

548. *Die Gewichte.* Als Vergleichskräfte oder Einheitskräfte bedient man sich am besten der Gewichte. Da wir eine Kraft ausüben müssen, um einen Körper vor dem Fallen zu bewahren, so muß diese Konfiguration eine entgegengesetzt (nach unten) gerichtete Kraft bestimmen, welche wir das Gewicht des Körpers nennen. Dieses bestimmt sich durch besonders einfache und genau geltende Gesetze.

Zwei in jeder anderen Beziehung gleiche Körper haben gleiches, zusammengenommen doppeltes Gewicht. Von jeher hat man die Anzahl gleichartiger Körper, z. B. Getreidekörner oder das Volum homogener Flüssigkeiten, nach dem Gewichte beurteilt.

Gleiche Gewichte halten sich an einer fixen Rolle das Gleichgewicht. Ein über eine Rolle geführtes Seil übt an beiden Enden gleiche Kräfte in der Richtung dieser Enden aus. Gleiche Gewichte halten sich an einer gleicharmigen Wage in Ruhe.

Mit diesen Vorrichtungen ist es nun leicht Gewichte mit einer Gewichtseinheit oder einem Gewichtssatz, sowie andere Kräfte ihrer Richtung und Größe nach zu messen.

549. *Prinzip der virtuellen Verschiebungen.* Die Statik fand ihren Abschluß mit der endgültigen Fassung des Gesetzes des Gleichgewichtes mehrerer Kräfte, welche an einer aus teils starren, teils sehr leicht deformierbaren Bestandteilen bestehenden Maschine wirken. Zu diesem Gesetze trugen alle hervorragenden Physiker von Archimedes (200 n. Chr.) bis Johann Bernouilli (1717) etwas bei. Man bezeichnet als Arbeit einer Kraft das skalare Produkt derselben und der Verschiebung des Körpers, an welchem sie angreift. Bei jeder möglichen Verschiebung einer im Gleichgewicht befindlichen Maschine ist die Summe der Arbeiten aller Kräfte Null.

550. *Kinetische Krafttheorie.* Da für die statischen Erscheinungen universelle Gesetze gelten, welche unabhängig sind von der Herkunft der Kräfte, sollte man erwarten, daß auch die Bewegungsvorgänge durch ähnliche Hilfsvariable bestimmt werden, ja daß diese, die bewegenden Kräfte, vielleicht den statischen Kräften gleich sind, d. h., daß zwischen der auftretenden Bewegungsform und jenen Umständen, welche statische Kräfte bestimmen, eine einfache Beziehung bestehe. Die bekannteste dynamische Beobachtung war es, daß es desto größerer Kraft bedürfe, mit je größerer Geschwindigkeit ein Wagen fortgezogen wird. Wenn aber eine Kraft die Geschwindigkeit des angegriffenen Körpers direkt bestimmt, dann müßte ein geworfener Stein, sowie er die Hand verläßt, sofort seine Geschwindigkeit verlieren. Ferner war es bekannt, daß ein frei fallender Stein sich immer rascher bewegt, obgleich doch das Gewicht des Steines in jeder Höhe dasselbe ist.

Nachdem Galilei die konstante Beschleunigung des freien Falles beobachtet hatte, mußte er diese als die Wirkung der Gewichtskraft betrachten, eine Form des Gesetzes der bewegenden Wirkung der Kräfte, welche sofort für viele, aber nicht für alle Fälle zutreffend erschien. Man empfindet Kraft, wenn man einen Stein wirft oder einen bewegten Körper aufhält, weil dies eine Beschleunigung der betreffenden Körper bedeutet, man empfindet Kraft, um einen Körper frei schwebend zu erhalten, weil man die Schwerebeschleunigung desselben aufheben muß. Freilich muß dann die Reibung eine Beschleunigung, welche der Geschwindigkeit proportional ist, bestimmen, eine recht künstliche Umschreibung eines einfachen Vorganges.

551. Da die Schwerebeschleunigung aller Körper gleich ist, muß das Gewicht derselben eine spezifische Konstante der Körper, das Gewicht der Volumseinheit eine spezifische Konstante der Stoffe sein. Dieses spezifische Gewicht der Stoffe oder das Gewicht der Körper bestimmt auch ihr Verhalten für andere Kräfte. Da die Schwerkraft bei stets gleicher Beschleunigung dem Gewichte gleich ist, sind vielleicht auch andere Kräfte bei gegebener Beschleunigung dem Gewichte des Körpers proportional. Es verhält sich also irgend eine Kraft zum Gewicht des Körpers wie ihre Beschleunigung zur Schwerebeschleunigung.

Den Quotienten aus dem Gewichte und der Schwerebeschleunigung nennt man die Masse des Körpers.

Da die Schwerebeschleunigung an verschiedenen Orten der Erde etwas verschieden ist, an jedem Orte aber für alle Körper gleich, so müssen die Gewichte desselben Körpers an verschiedenen Orten etwas verschieden sein, das Verhältnis der Gewichte verschiedener Körper aber konstant sein.

552. Man kann nun jede auf einen kleinen starren Körper wirkende Kraft ersetzt denken durch eine derselben und der reziproken Masse proportionale partielle Beschleunigung. Diese ist zwar ebensowohl wie die Kraft im allgemeinen nur eine Hilfsvariable. Die Summe aller auf den Körper wirkenden Kräfte ist aber hiermit als ein reeller physikalischer Vektor, als das Produkt aus Masse und Beschleunigung erkannt. Damit konnten alle Errungenschaften der Kraftlehre für die Bewegungslehre verwertet werden.

27. Die Oberflächenkräfte.

553. Das Gleichgewicht und die Bewegung ausgedehnter starrer Körper wird schon durch die vektorische Summe und das Moment der an verschiedenen Teilen dieses Körpers wirkenden Kräfte bestimmt und man hat deshalb eine sehr große Freiheit in der Wahl dieser Hilfsvariablen. Sie können auf verschiedene Weise angenommen werden, so daß sie die Bewegung des Körpers richtig bestimmen und selbst durch einfache allgemein gültige Gesetze bestimmt werden. Es bot sich in vielen Fällen die Verlegung dieser Kräfte in die oberflächlichen Teile des Körpers und ihre gleichmäßige Verteilung auf diese Oberflächen als vorteilhaft dar. Die Kraft pro Flächeneinheit, welche ein in eine Flüssigkeit getauchter Körper an seiner Oberfläche erfährt, heißt der Druck der Flüssigkeit an dem betrachteten Punkte der Oberfläche und ist ein senkrecht gegen diese Oberfläche gerichteter Vektor. Ist der starre Körper in eine zähe Flüssigkeit oder ein elastisches Medium eingebettet, so erfährt er schief gegen seine Oberfläche gerichtete Oberflächenkräfte. Diese sind Hilfsvektoren, deren Produkt mit der Größe eines kleinen

Oberflächenstückes die auf einen unter demselben irgendwo in der Richtung der Oberflächenkraft liegenden Teil des starren Körpers wirkende Kraft und damit eine partielle Beschleunigungsgröße dieses Teiles angibt.

554. Diese Oberflächenkräfte werden nun in einfacher Weise durch den Deformationszustand des Mediums, in welchem der starre Körper eingebettet ist, in unmittelbarer Nähe des betrachteten Oberflächenstückes bestimmt. Mit dieser Hilfsvorstellung hat man sich auch in den Bewegungserscheinungen deformierbarer Medien zurechtgefunden. Jedes Teilchen eines solchen Mediums erfährt von dem umgebenden Medium dieselben Oberflächenkräfte wie ein starrer Körper und zeigt dieselbe resultierende Beschleunigung, wie sie ein starrer Körper von gleicher Form an seiner Stelle zeigen würde. Hierdurch ist die Bewegung aller Punkte des Mediums und damit auch die Deformation desselben gegeben, welche wieder die Oberflächenkräfte bestimmt.

Es ist aber hervorzuheben, daß dieselben nicht, wie man allgemein annimmt, als reale physikalische Vektoren aufgefaßt werden können. Der Druck im Innern einer Flüssigkeit soll z. B. eine Kraft, d. h. ein Vektor sein, welcher nach allen Richtungen in gleicher Weise bestimmt ist, nämlich auf jedem durch den betrachteten Punkt gelegten Flächenelement senkrecht steht.

Diese geometrische Unklarheit wird zwar durch entsprechende Anwendungsvorschriften unschädlich gemacht, man wird aber dennoch ihre Beseitigung wohltuend empfinden.

555. Die Bewegung wird bestimmt durch reale physikalische Größen von dem geometrischen Charakter der Dyaden, wie in 501 u. f., 517 u. f. ausführlich klargelegt wurde. Ihr inneres Produkt mit dem als Vektor anzusehenden Oberflächenelement ist erst ein Vektor von der Dimension einer Kraft.

Diese Dyaden sind derivierte Dyaden der Verschiebungs- oder Geschwindigkeitsverteilung. Sie bestimmen die Beschleunigung der Punkte des Mediums. Diese oder vielmehr das Produkt der Dichte und Beschleunigung ist der derivierte Vektor dieser Dyadenverteilung oder umgekehrt, die Spannungsdyade ist das dyadische Potential dieses Fluktors der

Beschleunigung. Das Raumintegral dieses derivierten Vektors ist gleich dem vektorischen Oberflächenintegral der Dyadenverteilung, daher der Nutzen der Annahme von vektorischen Oberflächenkräften. Dieser Nutzen reicht aber durchaus nicht weiter, als um die beste Methode der Berechnung der Bewegung starrer von dem deformierbaren Medium umgebener Körper anschaulicher zu machen. Im Inneren deformierbarer Medien Oberflächenkräfte anzunehmen, ist nicht nur sinnlos, sondern auch zwecklos. Dort gibt es keine Oberflächen und darum hat nur die Spannungsdyade, aber haben nicht deren Produkte mit gedachten Oberflächenelementen (die Oberflächenkräfte) physikalische Realität.

556. Die Kraftlehre liegt keineswegs mehr der Bewegungslehre zugrunde. Es ist veraltet, die ganze Bewegungslehre schlechtweg als Dynamik zu bezeichnen. Im Gegenteile sind die Krafterrscheinungen, soweit unser Wissen reicht, und also wahrscheinlich vollständig auf Bewegungserscheinungen zurückgeführt.

Obleich wir immer noch unseren Kraftsinn mit Vorteil bei groben physikalischen Beobachtungen und Arbeiten ausnützen werden, sind wir doch nicht mehr auf denselben angewiesen. Obleich wir oft den Kraftbegriff bei unseren Schlüssen verwenden werden, sind wir doch nicht mehr auf solche Schlüsse angewiesen. Würden wir heute den Kraftsinn und die Kraftvorstellung völlig verlieren, so hätten wir keinen Verlust an Naturverständnis zu befürchten.

Die Kraftlehre oder Dynamik nimmt in der Physik keinen anderen Rang ein als die Akustik einnimmt und als die Optik einnehmen würde, wenn die Lichterscheinungen völlig auf elektromagnetische Vorgänge zurückgeführt werden könnten. Jedoch ist der experimentelle und heuristische Wert der Akustik und mehr noch der Optik heute weit höher als jener der Dynamik, deren große Leistungen hinter uns liegen.