

Mechanik.

A. Allgemeine Grundbegriffe.

§ 7. Die Grundlage der Mechanik, d. h. der Lehre vom Gleichgewicht und von der Bewegung der Körper, bilden die 3 **Newton'schen Bewegungsgesetze**, von denen übrigens die beiden ersten schon **GALILEI** bekannt waren:

- 1) Jeder Körper verharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der geradlinigen, gleichförmigen Bewegung, solange keine neue Kraft eine Änderung dieses Zustandes bewirkt.

Dieses sogenannte Trägheitsgesetz (Trägheit=Beharrungsvermögen) ist eine Erfahrungstatsache und erklärt es z. B., warum man in einem Eisenbahnzuge etc. nach vorn fällt, wenn er plötzlich hält.

- 2) Die Änderung der Bewegung ist proportional der einwirkenden Kraft und erfolgt geradlinig zu dieser.

Ein starker Stoß bringt z. B. einen größeren Ausschlag eines Pendels hervor als ein schwacher. Da beim Zusammenwirken mehrerer Kräfte jede einzelne derselben ohne Rücksicht auf die anderen bzw. auf eine bereits vorhandene Bewegung ihren Einfluß ausübt, so heißt das Gesetz auch Unabhängigkeitsprinzip.

- 3) Wenn zwischen zwei Körpern Kräfte tätig sind, so ist ihre Wirkung stets wechselseitig und gleichgroß. (Actioni aequalis est reactio).

Dieses Prinzip der Wechselwirkung besagt z. B., daß ein Brett ebenso stark ein auf ihm liegendes Gewicht drückt, wie umgekehrt; daß die Wagen eines Zuges die Lokomotive ebenso stark anziehen, wie diese die Wagen etc. Bei ungleichen Kräften kommt es natürlich zu einer fortschreitenden Bewegung in der Richtung der stärkeren, d. h. also, das Brett wird zerdrückt, die Wagen werden fortgezogen etc. Immer ist aber hierbei ein Teil der stärkeren Kraft durch das Maximum der schwächeren neutralisiert.

Zum genaueren Verständnis dieser Bewegungsgesetze ist es nun nötig, die in ihnen enthaltenen Begriffe einzeln zu betrachten.

§ 8. **Ruhe** ist Negation der Bewegung. Da nun überall bewegende Kräfte existieren, so ist Ruhe vorhanden, wenn die einwirkenden Kräfte einander aufheben. Es gibt aber keine absolute Ruhe, nur relative. Führt man z. B. in einem Wagen, so kann man in Beziehung auf diesen in Ruhe sein. Der Wagen aber bewegt sich auf der Erde, diese dreht sich um sich selbst und um die Sonne, und auch das ganze Sonnensystem zeigt eine fortschreitende Bewegung. In gewissem Sinne ist also alles in Bewegung (*πάντα ῥεῖ* des HERAKLIT). Bei der Bewegung kommt in Betracht die

§ 9. **Geschwindigkeit**, d. i. der Weg, der in einer bestimmten Zeit (in der Regel 1 Sekunde) durchlaufen wird. Sie ist um so größer, ein je längerer Weg in derselben Zeit zurückgelegt wird, andererseits um so kleiner, je mehr Zeit man dazu braucht. Daher sagt man, Geschwindigkeit ist direkt proportional dem Wege, umgekehrt proportional der Zeit; mathematisch¹ ausgedrückt:

$$v = \frac{s}{t}.$$

Daraus folgt: $s = vt \quad t = \frac{s}{v}.$

Einheit der Geschwindigkeit ist die, bei der die Einheit des Weges (1 cm) in der Zeiteinheit (1 Sek.) zurückgelegt wird.

Eine Geschwindigkeit kann nun gleichförmig sein, wenn sie in jedem Augenblick gleichgroß ist, oder ungleichförmig. Die ungleichförmige Geschwindigkeit muß nach dem ersten Bewegungsgesetze durch Kräfte bedingt sein, die entweder eine Beschleunigung oder eine Verlangsamung bewirken. Letztere kann auch negative Beschleunigung genannt werden.

§ 10. **Beschleunigung** ist demnach der Zuwachs an Geschwindigkeit bezogen auf die Zeit. Sie ist nämlich um so größer, je größer die resultierende Geschwindigkeit ist, und in je kürzerer Zeit dies geschieht.

$$a = \frac{v}{t}.$$

Einheit der Beschleunigung ist die, bei der die Einheit der Geschwindigkeit in der Zeiteinheit erreicht wird. Die Beschleunigung kann ebenfalls wieder gleichförmig oder ungleichförmig sein. Eine gleichförmige Beschleunigung ist z. B. beim freien Fall vorhanden, eine gleichförmige Verlangsamung beim Wurf in die Höhe.

¹ Die üblichen Abkürzungen sind: *v* oder *c* für Geschwindigkeit (velocitas oder celeritas), *a* für Beschleunigung (acceleratio), *g* für Beschleunigung durch Erdanziehung (gravitas), *s* für Weg (spatium), *t* für Zeit (tempus).

Eine gleichförmig beschleunigte Bewegung kann man sich auch ersetzt denken durch eine Bewegung von mittlerer gleichförmiger Geschwindigkeit. Hat z. B. ein Körper zuerst die Geschwindigkeit 0, und steigt dieselbe innerhalb einer Sekunde an bis v , so ist das Resultat dasselbe, als hätte es sich mit der gleichförmigen Geschwindigkeit $\frac{v}{2}$ bewegt. Der Körper legt somit in 1 Sekunde $\frac{v}{2}$ cm zurück in t Sekunden $\frac{1}{2} vt$.

*die hier steht über
janz auf einen
Körper aufsteigende
Beschleunigung
bewirkt man
als Kraft.*

§ 11. **Kraft** ist nach dem zweiten NEWTON'schen Gesetze Ursache einer Bewegungsänderung, und dadurch auch allein wahrnehmbar und meßbar. Bezeichnet man das Produkt aus Masse in ihre Geschwindigkeit ($m \cdot v$) als Bewegungsgröße, so ist eine Kraft proportional der Bewegungsgröße, die sie in der Zeiteinheit hervorbringen kann.

$$F = \frac{(mv)}{t}.$$

Da man $\frac{(mv)}{t}$ auch $m \frac{v}{t}$ schreiben kann, $\frac{v}{t}$ aber, wie gezeigt, = Beschleunigung ist, so kann man Kraft auch definieren als Produkt aus Masse und Beschleunigung [vgl. Anhang]. Allen Massen wird nun durch die Erde die Beschleunigung $g = 9,81$ erteilt [§ 17], d. h. sie werden von der Erde angezogen mit einer Kraft P (Pondus) = mg . Diese auf sie ausgeübte Kraft äußern sie durch den Druck auf ihre Unterlage, mit andern Worten durch ihr Gewicht. Daraus folgt: 1) Kräfte können durch Gewichte gemessen werden; als praktische Einheit¹ der Kraft wird daher in der Mechanik das Kilogramm benutzt, das somit das Gravitationsmaß der Kraft vorstellt; 2) daß die Gewichte den Massen proportional sind, da g für jeden Ort auf der Erde eine konstante Zahl ist.

Kräfte sind sogenannte gerichtete Größen, d. h. sie haben neben einer bestimmten Größe auch eine bestimmte Richtung. Daher lassen sie sich durch Linien von bestimmter Länge und Richtung graphisch darstellen. Wenn also eine Kraft positiv genannt wird, heißt die entgegengesetzt gerichtete Kraft negativ.

Die wichtigste Form der Kraft, auf die sich in letzter Linie alle anderen zurückführen lassen, ist die Anziehung und Abstoßung zweier Massen. Die Anziehung zwischen den Teilchen desselben Körpers heißt Kohäsion, zwischen zwei verschiedenen Körpern Adhäsion. Auf letzterer beruht z. B. das Leimen etc. Speziell die Anziehungs-

¹ Die absolute Krafteinheit ist die Dyne, über die Näheres im Anhang gesagt ist.

kraft der Weltkörper heißt **Gravitation**, zu der auch die Anziehungskraft der Erde, die **Schwerkraft**, gehört. Nach **Newton** ziehen sich nun zwei Massen M und m in der Entfernung r an mit der Kraft

$$F = \frac{Mm}{r^2} k$$

wobei k , der sogen. Proportionalitätsfaktor, eine Zahl darstellt, die von der Natur der Körper abhängt. In Worten: die anziehende Kraft ist direkt proportional dem Produkt der Massen, umgekehrt proportional dem Quadrate ihrer Entfernung.

Das Wesen der Gravitation ist ein bisher ungelöstes Rätsel. Jedenfalls darf man sich dieselbe nicht als Fernwirkung vorstellen, d. h. als Wirkung durch den leeren Raum; denn ein solcher existiert nicht. Vielleicht ist die Gravitation wie alle scheinbaren Fernkräfte von gewissen Spannungszuständen des Äthers abhängig.

§ 12. **Arbeit** im physikalischen Sinne heißt das Produkt aus Kraft und dem von ihr zurückgelegten Weg.

$$A = F s$$

Als praktisches Arbeitsmaß¹ gilt das Kilogramm-meter oder Meterkilogramm, d. i. also die Arbeit, welche geleistet wird, wenn 1 kg 1 m gehoben wird.

Die Arbeit wird $= 0$, wenn in dem Produkte $F s$ ein Faktor 0 wird. Hängt z. B. ein Gewicht an einem Faden, so wirkt hier zwar eine Kraft, nämlich die Anziehung der Erde, aber der Körper wird nicht verschoben. Folglich ist s und somit auch die geleistete Arbeit $= 0$.

Gewöhnlich wird auch als Beispiel angeführt, daß, wenn ein Gewicht im ausgestreckten Arme gehalten wird, im physikalischen Sinne keine Arbeit geleistet wird. Das ist falsch. Denn jede dauernde Muskelkontraktion (Tetanus) setzt sich aus einer Reihe von Zuckungen zusammen.

Es kann aber auch $F = 0$ werden, wie dies z. B. der Fall ist, wenn sich ein Gas in einen luftleeren Raum ausdehnt [vgl. auch § 18]; dann wird ebenfalls keine Arbeit geleistet.

§ 13. **Nutzeffekt** oder **Effekt** heißt die Arbeit, die in einer gegebenen Zeit geleistet wird. Als praktische Einheit¹ dient die Pferdekraft, d. i. eine Arbeit von 75 Meterkilogramm pro Sekunde. Sie entspricht ungefähr der Arbeitsleistung von kräftigen Männern in einer Sekunde.

¹ Die absoluten Einheitsmaße der Arbeit und des Effektes sind das Erg und Joule bezw. das Sekundenerg und Watt, über die Näheres im Anhang gesagt ist.

§ 14. **Energie.** Die Fähigkeit eines Körpers, Arbeit zu leisten, bzw. sein Arbeitsvorrat, wird **Energie** genannt, und zwar unterscheidet man **aktuelle** und **potentielle** Energie.

Aktuelle oder **kinetische**¹ **Energie**, **Energie** der **Bewegung**, auch wohl **lebendige Kraft**² genannt, ist die **Energie**, die ein Körper jeden Augenblick durch seine **Bewegung** besitzt. Sie entspricht der **Arbeit**, die er leistet, wenn er die **Bewegung** verliert.

Ein einfaches Beispiel ist eine abgeschossene Kanonenkugel, die durch ihre **Bewegung** befähigt wird, die dicksten Mauern zu zertrümmern. Als eine Form der **Arbeit** wird die **kinetische** **Energie** ausgedrückt durch $Fs = \frac{mv}{t} \cdot s$. Da es sich hier nun um eine gleichmäßig beschleunigte **Bewegung** handelt, bei der die **Geschwindigkeit** am Anfang 0 , am Ende v ist, so ist hier nach § 10 $s = \frac{1}{2} vt$. Daraus folgt:

$$\text{kinetische Energie} = \frac{mv}{t} \cdot \frac{1}{2} vt = \frac{1}{2} mv^2.$$

Die **kinetische** **Energie** ist also direkt proportional der **Masse** und dem **Quadrate** der **Geschwindigkeit**. Bei der **Wucht**, wie die **kinetische** **Energie** auch noch genannt wird, spielt also die **Geschwindigkeit** des bewegten Körpers die **Hauptrolle**.

Potentielle **Energie**, auch **Energie** der **Lage** oder **Spannkraft** genannt, ist die **zweite** Form der **Energie**. Hier leistet ein Körper zwar noch nicht **Arbeit**, aber er besitzt vermöge seiner **Lage** oder **Spannung** die **Möglichkeit** (*potentia*), sie jeden Augenblick zu leisten. So erklären sich die **Namen**. Ein **Stein** auf dem **Dache** hat z. B. durch seine **Lage** zur **Erdoberfläche** **potentielle** **Energie**; denn wenn er fällt, kann er **Arbeit** leisten. Hieraus geht schon hervor, daß **potentielle** **Energie** eine **relative** **Größe** ist, da man ja von **Lage** eines Punktes immer nur in **Beziehung** auf einen andern sprechen kann. Also ein **Stein** auf dem **Dache** hat **potentielle** **Energie** in **Bezug** auf das **Niveau** der **Erdoberfläche**, ein **Stein** auf dieser **potentielle** **Energie** etwa in **Bezug** auf einen tiefen **Schacht** etc. Auch die **Atome** in einem **Molekül** besitzen **potentielle** **Energie**, wie sich dies besonders markant bei den **explosiven** **Körpern** zeigt. Wenn z. B. beim **Schießpulver** durch **äußere** **Einwirkung** die **Moleküle** **gesprengt** werden, so nehmen die **Atome** **zueinander** ganz andere **Lagen** ein;

¹ *zuvor* bewegen.

² Die „lebendige Kraft“ ist, streng genommen, keine Kraft, sondern eine **Arbeit**, ebenso wie die „Pferdekraft“ ein **Effekt** ist.

es entstehen Gase mit großem Ausdehnungsbestreben, wodurch die Sprengwirkung erklärt wird. Auch eine gespannte Feder hat potentielle Energie.

Interessant ist der Gegensatz zwischen Tier- und Pflanzenwelt. Letztere bereitet durch Reduktionsprozesse Spannkraft, die im tierischen Organismus durch Oxydation in kinetische Energie (Bewegung, Wärme, Elektrizität etc.) übergeführt werden.

§ 15. **Gesetz von der Erhaltung der Energie.** Diese beiden Formen der Energie sind der Ausdruck für alle existierenden Kräfte resp. Arbeitsleistungen. Wie die einzelnen Formen der kinetischen Energie ineinander übergeführt werden können, z. B. mechanische Arbeit in Wärme, so kann auch die kinetische Energie übergehen in potentielle, und umgekehrt. Nie aber kann Energie aus Nichts entstehen, nie kann bei solchen Umwandlungen ein Plus oder Minus an Energie resultieren. In einem abgeschlossenen System, z. B. im Sonnensystem, ist die Summe der kinetischen und potentiellen Energie eine konstante Größe. Die Vermehrung der einen von beiden Formen bedingt eine Verminderung der anderen. Dieses Gesetz, welches das schon durch die Erfahrung widerlegte Prinzip des Perpetuum mobile auch logisch für immer beseitigt, heißt das Gesetz von der Erhaltung der lebendigen Kraft, besser das Gesetz von der Erhaltung der Energie. Zuerst ausgesprochen wurde es 1842 von ROBERT MAYER, einem Arzte in Heilbronn, mathematisch formuliert von HELMHOLTZ.

Zwei Beispiele mögen es noch besser erläutern:

1) Wenn ein Pendel (Fig. 2) durch einen Stoß aus der Ruhelage *A* *B* gebracht wird und nach einer Seite schwingt, wird seine potentielle Energie, d. h. seine Entfernung von der Erde, größer. Nach dem Gesetze von der Erhaltung der Energie muß seine kinetische Energie um ebensoviel kleiner werden. Das beweist auch die Erfahrung; denn nach einer gewissen Zeit bleibt der Pendel stehen, etwa in *C*. Dann kommt er wieder langsam in Bewegung und schwingt in umgekehrter Richtung ebenso weit über den Ruhepunkt hinaus, etwa bis *D*, und so fort. Bei *C* ist also die kinetische Energie = 0, die potentielle hat ihr Maximum erreicht. Bei der umgekehrten Bewegung wird die potentielle Energie kleiner, dafür wächst die kinetische, die dann in *B* ihr Maximum hat.

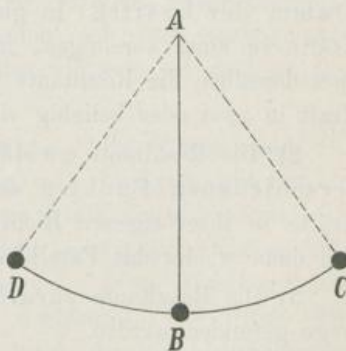


Fig. 2.

2) Die Planeten bewegen sich um die Sonne in elliptischen Bahnen. In der Sonnennähe, dem sogenannten Perihel, ist ihre potentielle Energie

klein, folglich muß ihre kinetische Energie groß sein, d. h. sie bewegen sich an dieser Stelle schnell. Fern von der Sonne, im Aphel, ist es natürlich umgekehrt. Daraus folgt ohne weiteres, daß ihre Verbindungslinien mit der Sonne, die Radii vectores, in gleichen Zeiten gleiche Flächen durchmessen (zweites Gesetz von KEPLER).

B. Gesetze der festen Körper.

§ 16. **Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften.** Für manche Betrachtungen ist es nötig, mehrere Kräfte durch eine einzige zu ersetzen und umgekehrt. Dies geschieht nach folgenden Grundsätzen:

1) Es handelt sich zunächst um zwei Kräfte, die an einem Punkte angreifen. Entweder haben sie genau die gleiche oder genau die entgegengesetzte Richtung. Im ersten Falle können sie ersetzt werden durch eine Kraft gleich ihrer Summe, im zweiten

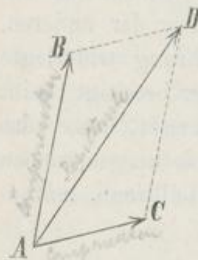


Fig. 3.

durch eine Kraft gleich ihrer Differenz. Zwischen diesen Extremen liegen noch viele andere Möglichkeiten, wenn nämlich die Kräfte miteinander einen Winkel bilden. In Punkt *A* (Fig. 3) greifen z. B. die Kräfte *AB* und *AC* an. Dann ist die Wirkung die gleiche, wie wenn allein die Kraft *AD* angegriffen hätte. *AD* heißt die Resultante, *AB* und *AC* die Komponenten. Die Resultante läßt sich nun leicht finden: sie ist die Diagonale des Parallelogramms, zu dem sich die ursprünglichen Kräfte vervollständigen lassen (Gesetz vom Parallelogramm der Kräfte). In gleicher Weise kann man beliebig viele Kräfte zu einer vereinigen, indem man nacheinander immer zu je zwei derselben die Resultante konstruiert. Umgekehrt läßt sich jede Kraft in zwei oder beliebig viele Komponenten zerlegen.

2) Die Resultante zweier nicht paralleler Kräfte, die an verschiedenen Punkten angreifen, findet man, wenn man die Kräfte in ihrer eigenen Richtung verschiebt, bis sie sich schneiden, und dann wieder das Parallelogramm der Kräfte konstruiert.

3) Die Resultante paralleler Kräfte kann nur auf einem Umwege gefunden werden.

Um z. B. die Resultante der an *AB* (Fig. 4) angreifenden parallelen Kräfte *P* und *Q* zu finden, denke man sich auf *A* und *B* die gleich großen, aber entgegengesetzt gerichteten Kräfte *E* und *E'* wirkend, wodurch ja der Bewegungszustand des Systems nicht geändert wird. Aus *AE* und *AP* ergibt