

Didaktische Überlegungen zur Einführung von Kraft und Masse

Udo Backhaus, Hans Joachim Schlichting

Ausgehend von der Überlegung, daß statische und dynamische Phänomene sowie Trägheits- und Schwereverhalten von Körpern eine wohlunterschiedene Beschreibung verlangen, wird die Sachstruktur eines Lehrganges angegeben, die auf einer entsprechend differenzierten Konzeptualisierung beruht. Dabei geht es insbesondere um die Unterscheidung zwischen statischer und dynamischer Kraftmessung sowie der Messung von Trägheit und Schwere. Besonderes Gewicht wird auf die klare Herausarbeitung von "freien Setzungen" und Naturgesetzen im Aufbau der Mechanik gelegt.

1. Einleitung

Grundlegend für die Beschreibung der Natur und ihre Mathematisierung ist die Einführung und Definition physikalischer Größen und die Gewinnung quantitativer Gesetze. Es wird deshalb im folgenden ein Weg vorgeschlagen, wie anhand der Größen "Kraft" und "Masse" die Begriffsbildung, die Mathematisierung und das Auffinden von Gesetzen dargestellt werden können. Die beiden Begriffe scheinen dazu in besonderem Maße geeignet, da bei ihnen die Trennung von Definition und Gesetz besonders schwierig und die Diskussion darüber offenbar immer noch nicht abgeschlossen ist ([1] - [4]). In der letzten Zeit sind einige Vorschläge zur Einführung der Begriffe "Kraft" und "Masse" sowohl für die Sekundarstufe I ([5] - [7]) als auch für die Sekundarstufe II ([8]) veröffentlicht worden. Sie laufen darauf hinaus, daß in der Sekundarstufe II nur der dynamische Kräftebegriff behandelt und zwischen schwerer und träger Masse, wenn überhaupt, nur sehr oberflächlich unterschieden wird. In der Sekundarstufe I wird zwischen statischem und dynamischem Kraftbegriff nicht streng unterschieden und allenfalls vorgeschlagen, die Einheit "1 Newton" dynamisch einzuführen. Der Massebegriff bleibt im wesentlichen auf das Schwereverhalten der Körper begrenzt.

Mit dem hier vorgeschlagenen Vorgehen soll dagegen dafür plädiert werden, sich in der Sekundarstufe I zunächst auf den statischen Kraftbegriff und die schwere Masse zu beschränken, daran anschließend dynamische Phänomene qualitativ zu behandeln und erst in der Sekundarstufe II die Begriffe "Kraft" und "Masse" durch dynamische Meßverfahren zu verallgemeinern.

2. Vorüberlegungen

Die Erfahrung zeigt, daß immer dann, wenn an einem Körper Veränderungen wie Verformungen oder Beschleunigungen auftreten, ähnliches auch an einem oder mehreren anderen Körpern zu beobachten ist. Diese Beobachtung wird durch den Begriff der *Wechselwirkung* beschrieben: Zwei Körper wechselwirken miteinander, wenn an ihnen gleichzeitig Veränderungen auftreten, zwischen denen gesetzmäßige Beziehungen bestehen. Die Kraft ist die physikalische Größe zur quantitativen Erfassung solcher Wechselwirkungen, deren Stärke durch Systemparameter (wie z.B. Länge, Druck, Masse, Beschleunigung) beschrieben werden kann. Die Einteilung dieser Parameter in statische und dynamische Größen kann - wie das z.B. bei *Höfiling* [9] angedeutet, aber nicht konsequent durchgeführt wird - zu zwei Kraftbegriffen führen, deren Übereinstimmung im Bereich gemeinsamer Anwendbarkeit gezeigt werden muß. Diese Trennung ist jedoch sehr abstrakt; ihr werden nur die besten Schüler folgen können, wenn ihnen genügend Zeit und Gelegenheit zur Festigung der Begriffe gegeben wird. Um trotzdem statische und dynamische Phänomene nicht zu vermischen, ziehen wir es deshalb vor, die Kraft zunächst durch statische Veränderungen zu definieren, dann den Zusammenhang mit den dynamischen Parametern herzustellen und schließlich die Newtonsche Grundgleichung der Mechanik als verallgemeinerte Kraftdefinition aufzufassen. Interessiert man sich nur für die Wirkung der wechselseitigen Beeinflussung auf einen Körper *K*, so sagt man auch, auf *K* wirke (bzw. *K* erfahre) die Kraft *F*. Der Vorteil dieser Einführung gegenüber der in den meisten Schulbüchern vorgeschlagenen ("Kräfte sind die Ursache von Verformungen und Bewegungsänderungen", siehe z.B. [10]) liegt darin, daß hier das Wechselwirkungsprinzip zu einem konstitutiven Bestandteil des Kraftbegriffes wird: Da z.B. die Verlängerung einer Feder ein Maß für die Stärke der Wechselwirkung zwischen zwei Körpern A und B ist, muß natürlich die Kraft, die A (von B) erfährt, entgegengesetzt gleich der Kraft sein, die auf B (von A) wirkt. Auf diese Weise werden Schwierigkeiten vermieden, die bei der Erarbeitung des Wechselwirkungsprinzips und der Abgrenzung gegenüber dem Kräftegleichgewicht üblicherweise

auftreten.

Über Probleme im Zusammenhang mit der Einführung eines Meßverfahrens für Kräfte ist schon ausführlich diskutiert worden (siehe insbesondere [5] und [6]). Deshalb sollen hier einige kurze Bemerkungen genügen:

1. Die Koppelung der Definition an die Gewichtskraft ist überflüssig und bewirkt die bekannten Schwierigkeiten, insbesondere durch die enge Verflechtung zwischen Kraft und Masse (siehe [6]).
2. Wird die Kräfteinheit in der Sekundarstufe I dynamisch definiert, nachdem Gleichheit und Vielfachheit statisch festgelegt worden sind, wie es in vielen Schulbüchern und auch von *Ruoss* [6] vorgeschlagen wird, erschwert das u. E. die getrennte Behandlung statischer und dynamischer Wirkungen und führt zu Interferenzen zwischen den Begriffen der schweren und der trägen Masse.
3. Es gibt zwei Möglichkeiten, die Einheit "1 Newton" statisch zu definieren, nämlich reit einem Normkörper oder mit einer Normfeder. *Ruoss* [6] stellt dar, wie durch letztere eine völlige Trennung von der Einführung der (schweren) Masse m erreicht werden kann. Dadurch ist eine Verwechslung zwischen Gewichtskraft und Masse kaum noch möglich, und die Schüler können die Proportionalität zwischen diesen beiden Größen als Gesetzmäßigkeit erfahren.

Die Behandlung des Zusammenhanges zwischen Wechselwirkung und dynamischen Größen erfordert die vorherige Behandlung des Trägheitssatzes. Selbst ältere Schüler sind unserer Beobachtung nach zunächst viel eher geneigt, nach Beziehungen zwischen Geschwindigkeiten und Kräften zu suchen, eine Wechselwirkung also als notwendig für die Aufrechterhaltung von Bewegungszuständen zu betrachten. Erst die Problematisierung dieser Auffassung kann u. E. zum Trägheitssatz und damit zur dynamischen Kraftmessung führen.

Nach der Behandlung des Trägheitssatzes bietet sich die Besprechung der Reibungskräfte an, um die alltägliche Erfahrung zu beschreiben, daß zur Aufrechterhaltung von Bewegungen Kräfte nötig sind. Werden jedoch Reibungskräfte vor dem Trägheitssatz besprochen, so besteht die Gefahr, daß dieser vorweggenommen wird, etwa dann, wenn bei gleichförmig bewegten Körpern von einer Zugkraft auf eine entgegengesetzt gleiche Reibungskraft geschlossen wird (siehe z.B. [10]).

Schwereverhalten und Trägheitsverhalten sind verschiedene Eigenschaften eines Körpers, für die zwei physikalische Größen eingeführt werden müssen. Die Verfasser sind im Gegensatz zu *Conradt* [4] der Auffassung, daß bei der Aufstellung der Newton-

schen Grundgleichung der Mechanik beide Eigenschaften eine wesentliche Rolle spielen und daß darüber hinaus nur bei strenger Trennung zwischen beiden die Äquivalenz von schwerer und träger Masse als Naturgesetz verstanden werden kann (E-ötvössche Versuche [11]).

Um die Einführung zweier Massebegriffe und die spätere Gleichsetzung der Einheiten für die Schüler nicht zu abstrakt werden zu lassen, sollte der Ausdruck "träge Masse" durch "Trägheit" ersetzt, für diese keine Einheit definiert, sondern nach Herausarbeiten der Proportionalität nur erwähnt werden, daß wegen des engen Zusammenhanges zwischen den beiden Größen beide Körpereigenschaften durch die Masse beschrieben werden können (siehe *Dorn-Bader* [12]).

Bei der getrennten Behandlung von Schwere- und Trägheitsverhalten ist folgendes zu beachten:

Die Trägheit darf nur über das Trägheitsverhalten eingeführt werden. Insbesondere muß die Vielfachheit über Beschleunigungs- oder Stoßversuche definiert werden, nicht aber wie bei der (schweren) Masse über das Zusammenfügen gleicher Massen (siehe z.B. [8] und [13]), da sonst schon aus der Tatsache, daß Körper gleicher (schwerer) Masse auch gleiche Trägheit haben, die Proportionalität zwischen den beiden Größen folgte.

Voraussetzung für die Identifizierung der beiden Größen ist ihre Proportionalität (siehe dagegen [9] und [13]). Sie läßt sich z.B. an einer Luftkissenbahn zeigen. Die auf diese Weise erfaßten Beziehungen zwischen der (statisch gemessenen) Kraft und den dynamischen Größen erlauben die Erarbeitung der Newtonschen Grundgleichung. Betrachtet man diese als neue Kraftdefinition, so stimmt diese Definition im Bereich der statischen Kräfte mit der statischen Kraftdefinition überein, umfaßt darüber hinaus aber auch die dynamischen Erscheinungen.

Im folgenden wird die Sachstruktur eines Lehrgangs skizziert, der sich an den obigen Vorüberlegungen orientiert.

3. Sachstruktur

Kraft. Nach Betrachtung verschieden starker Verformungen an unterschiedlichen Körpern wird die Aufmerksamkeit darauf gelenkt, daß die Veränderungen

- a) auf mehrere grundsätzlich verschiedene Weisen (z.B. durch elastische, magnetische oder elektrische Wechselwirkungen) hervorgerufen werden können (*Unabhängigkeit der Kraftdefinition von der Natur der wechselwirkenden Körper*) und
- b) immer begleitet sind von gleichzeitigen Veränderungen (Verformungen, Spannungs- oder

Druckänderungen) an einem oder mehreren anderen Körpern (*Wechselwirkungsprinzip*).

Die Stärke der Wechselwirkung wird dann durch folgendes Meßverfahren gemessen: Definition der Kraft:

- a) Zwei Kräfte sind gleich, wenn sie an demselben elastischen Körper die gleiche elastische Verformung hervorrufen.
- b) Eine Kraft F_n hat den n -fachen Betrag wie eine Kraft F_1 , wenn n Kräfte mit demselben Betrag wie F_1 , die gleichzeitig an demselben Punkt eines elastischen Körpers angreifen und in dieselbe Richtung wirken, die gleiche Verformung hervorrufen wie F_n .

(Einfacher zu handhaben, aber nicht so allgemein ist folgende Festlegung (*Ruoss* [6]): Eine Kraft F_n ist n -mal so groß wie die Kraft F_1 , wenn sie n parallel geschaltete gleichartige Federn genau so weit verlängert wie die Kraft F_1 eine beliebige dieser Federn.)

Definition der Krafteinheit:

Die Einheit der Kraft ist das Newton. 1 Newton ist die Kraft, die eine Normfeder bis zur Eichmarke dehnt.

Die durch die Einheitsdefinition bedingte Entscheidung für die Feder als Meßgerät sollte evtl. erst getroffen werden, nachdem diese Auszeichnung mit dem *Hookeschen Gesetz* begründet werden kann. Die Aufstellung dieses Gesetzes allein aufgrund der Kraftdefinition - also insbesondere ohne Benutzung der Proportionalität zwischen Gewichtskraft und Masse - erfolgt etwa durch den Nachweis, daß eine Feder durch zwei gleich stark gedehnte gleichartige Federn doppelt so stark verlängert wird wie durch eine von ihnen usw.

Schwere Masse. Um eine möglichst weitgehende Trennung zwischen Gewichtskraft und Masse zu erreichen, wird die *Gewichtskraft* erst dann als wichtiger Spezialfall besprochen, wenn die Behandlung des Kraftbegriffs durch die Erarbeitung des *Vektorcharakters der Kraft* abgeschlossen ist.

Die Tatsache der Ortsabhängigkeit der Gewichtskraft führt dann auf die Notwendigkeit eines Meßverfahrens, mit dem festgestellt werden kann, ob es eine physikalische Eigenschaft eines Körpers gibt, die sich bei Ortsveränderungen (z.B. bei einem Transport auf den Mond) *nicht* verändert. Das führt auf folgende Definition der (schweren) Masse:

- a) Zwei Körper haben dieselbe Masse, wenn eine Balkenwaage mit ihnen keinen Ausschlag zeigt.
- b) Ein Körper K_n hat die n -fache Masse eines anderen Körpers K_1 , wenn er dieselbe Masse hat wie n Körper zusammen, von denen jeder dieselbe Masse hat wie K_1 .

Definition der Masseneinheit:

Die Einheit der Masse ist das Kilogramm. 1 Kilogramm ist die Masse des Internationalen Kilogrammprototyps.

Die Masse kann natürlich auch mit Federwaagen gemessen werden. Zur Vermeidung von Verwechslungen mit der Gewichtskraft sollte jedoch die Balkenwaage als Meßinstrument gewählt werden.

Nach der unabhängigen Behandlung von Kraft und Masse kann folgendes Naturgesetz aufgestellt werden:

An jedem festen Ort sind Gewichtskraft und Masse von Körpern zueinander proportional.

Trägheit. Die Behandlung des Zusammenhanges zwischen Wechselwirkung und dynamischen Parametern kann durch das Problem der Entwicklung eines dynamischen Meßverfahrens für Kräfte unter einer Aufgabenstellung zusammengefaßt werden:

Die Frage nach anderen Kraftwirkungen und einem darauf beruhenden Meßverfahren führt u.a. zur Vermutung eines Zusammenhanges zwischen Kräften und Geschwindigkeiten, die sich evtl. in folgendem Vorschlag niederschlägt: "Zwei Kräfte sind gleich, wenn sie demselben Körper dieselbe Geschwindigkeit verleihen." Die Diskussion dieses Vorschlages führt zur Behandlung des *Trägheitssatzes*, der *Reibungskräfte* und der Trägheit als eine Körpereigenschaft, die nach Besprechung vieler Beispiele aus dem täglichen Leben durch das folgende Meßverfahren genau festgelegt wird.

Definition der Trägheit:

- a) Zwei Körper haben dieselbe Trägheit, wenn sie durch dieselbe Kraft dieselbe Beschleunigung erfahren.
- b) Die Trägheit eines Körpers K_n ist n -mal so groß wie die eines Körpers K_1 , wenn K_n für eine Beschleunigung die n -fache Kraft benötigt wie K_1 für dieselbe Beschleunigung.

Definition der Trägheitseinheit: entfällt.

Die naheliegende Gleichheitsfestsetzung für das dynamische Meßverfahren ("Zwei Kräfte sind gleich, wenn sie demselben Körper dieselbe Beschleunigung erteilen.") ist für den praktischen Gebrauch ungeeignet; schließlich kann der Kräftevergleich nicht immer an demselben Körper vorgenommen werden. Dies legt die Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Masse und Trägheit nahe, die zu dem Ergebnis führt:

(Schwere) Masse und Trägheit von Körpern sind proportional zueinander, d.h.:

1. Eine Vervielfachung der Masse hat eine ent-

sprechende Vervielfachung der Trägheit zur Folge.

2. Körper gleicher Masse haben - unabhängig von Material, Volumen usw. dieselbe Trägheit.

Aufgrund dieses Naturgesetzes können beide Körperigenschaften - das Schwere und das Trägheitsverhalten - durch dieselbe physikalische Größe, die Masse, beschrieben werden.

Das Problem der Kraftvervielfachung führt dann auf die Untersuchung der Abhängigkeit der Beschleunigung von der Kraft: Es zeigt sich, daß bei konstanter Masse die Beschleunigung proportional zur Kraft ist. Zusammen mit der Proportionalität von Masse und Trägheit ($F \sim m$ bei $a = \text{const}$) ergibt sich also

$$F = k \cdot ma \quad (1)$$

Eine Präzisionsmessung (z.B. an der Luftkissenbahn) ergibt

$$k = 1 \frac{N}{kg \frac{m}{s^2}} \quad (2)$$

Das Problem der dynamischen Kraftmessung ist damit abschließend gelöst. Gleichung (1) stellt den Zusammenhang her zwischen statischer Kraftmessung einerseits und der Messung von Massen und Beschleunigungen andererseits. Es liegt jedoch nahe, noch folgende Überlegungen anzuschließen:

1. Gleichung (1) stellt zusammen mit (2) für die Erscheinungen ein physikalisches Gesetz dar, bei denen alle drei Größen unabhängig voneinander gemessen werden können (das war bei allen bis jetzt durchgeführten Experimenten der Fall). In den Fällen, wo das nicht der Fall ist (z.B. kann der Mond nicht an eine Federwaage gehängt werden), kann man (1) auffassen als neue Definition der physikalischen Größe "Kraft". Diese Auffassung kann gerechtfertigt werden nicht nur durch die schon durchgeführten Versuche, sondern auch durch andere Überlappungsbereiche: So gilt z.B. das Gravitationsgesetz nicht nur für die statisch gemessenen Gewichtskräfte an der Erdoberfläche, sondern auch für die dynamisch gemessenen Wechselwirkungskräfte zwischen der Erde und anderen Himmelskörpern (z.B. Satelliten).
2. Aufgrund der Gleichung (2) liegt es nahe, für die durch Gleichung (1) neu definierte Größe "Kraft" die Einheit durch die Wahl

$$k = 1$$

festzusetzen ("Die Einheit der Kraft ist diejenige Kraft, die nötig ist, um einem Körper der Masse 1 kg die Beschleunigung 1 m/s² zu erteilen."). Diese

Wahl bedeutet, daß das Wort "Newton" nur noch eine Abkürzung für den längeren Ausdruck "Kilogramm mal Meter durch Sekundenquadrat" ist:

$$1N = 1kg \frac{m}{s^2}$$

Sie hat darüber hinaus zur Folge, daß in allen Fällen, in denen Kräfte sowohl statisch als auch dynamisch gemessen werden können, beide Meßverfahren zu demselben Ergebnis führen.

- 3) In der aus Gleichung (1) entstandenen

Newtonschen Grundgleichung der Mechanik:

$$F = m \cdot a$$

werden also folgende Sachverhalte zusammengefaßt:

- a) die Proportionalität von Masse und Trägheit ($F \sim m$ bei $a = \text{const}$)
- b) die Proportionalität von Kraft und Beschleunigung ($F \sim a$ bei $m = \text{const}$)
- c) die Erweiterung der Kraftdefinition auf Fälle, in denen statische Messungen nicht möglich sind
- d) die Neudefinition der Kräfteinheit durch $k = 1$

Schlußbemerkungen

Der hier skizzierte Unterrichtsgang erlaubt einerseits, unterschiedliche physikalische Erscheinungen klar zu trennen und andererseits, Definitionen und Gesetzmäßigkeiten sauber auseinanderzuhalten. So werden für das Schwere- und das Trägheitsverhalten der Körper zwei physikalische Größen eingeführt und statische und dynamische Kraftmessung so lange auseinandergelassen, bis sichergestellt ist, daß sie zu übereinstimmenden Ergebnissen führen, wenn beide angewendet werden können. Die Struktur bietet darüber hinaus Ansatzpunkte, über die Willkürlichkeit nicht nur von Definitionen, sondern auch der Einteilung in Definitionen und Gesetze nachzudenken. Die dadurch möglichen Einsichten in die Beschreibung der Natur durch die Physik werden Schülern in späteren Kursen zugute kommen (z.B. bei der Einführung der Größen Stromstärke, Ladung, Spannung, elektrisches und magnetisches Feld).

Zum Schluß sei noch darauf hingewiesen, daß in letzter Zeit grundsätzlich andere Möglichkeiten der Kraft- und Masseintroduction diskutiert werden. So schlägt Jung [14] vor, Schülern mit Hilfe des Kraftstoßkonzeptes von vornherein eine dynamische Kraftvorstellung zu vermitteln.

Die Betrachtung der Energie als Basisgröße legt es sogar nahe, Kraft als eine daraus abgeleitete Größe zu betrachten [15], [16]. Schon alt dagegen ist der

Vorschlag, die (träge) Masse mit Hilfe von Stoßversuchen einzuführen (siehe z.B. [17], [18]).

Es erscheint lohnend, diese Ansätze weiter zu verfolgen. Sie erfordern jedoch alle ein mehr oder weniger radikales Abgehen von tradierten Strukturen. Ziel dieser Arbeit war dagegen, die Struktur des üblichen Vorgehens klarzulegen und möglichst konsequent zu verfolgen.

Literaturangaben

- [1] *Westphal, W.H.*: Grundlagen der Dynamik und Newton's z. Axiom; Phys. Bl. 23, 558..561 (1967).
- [2] *Lange, E.*: Empirie und Ermessen in einem Naturgesetz; Phys. i. u. Zeit 2, 80 . . 85 (1971).
- [3] *Muschik, W.*: *Ludwig, W.*: Zum Newton'schen Bewegungsgesetz im Grundkurs Physik; Phys. Bl. 31, 166 . . 172 (1975);
- [4] *Conradt, R* : Bemerkungen zu [3]; Phys. Bl. 31, 417 . . 419 (1975).
- [5] *Duit, R.*: Zum Kraftbegriff in der Sekundarstufe I, Der Physikunterricht 10/1. 5 . . 23 (1976).
- [6] *Ruoss, H* : Zur Definition der Krafteinheit, Der Physikunterricht 10/1, 24 . . 38)1976).
- [7] *Meyer, E.*: Ein Unterrichtsvorschlag zur Einführung der Begriffe Masse und Dichte, Der Physikunterricht 10/1, 57 . . 67 (1976).
- [8] *Harbeck, G.*: Ein Grundkurs "Mechanik"; Der Physikunterricht 10/4, 27 . . 41 (1976).
- [9] *Höfling, O.*: Physik, Band II, Teil 1: Mechanik - Wärme; Dümmeler, Bonn; 1973.
- [10] *Höfling, O.*: Physik, Band I; Dümmeler, Bonn; 1972.
- [11] *Dicke, R. H.*: The Eötvös Experiment; Sci. Am. 205> 84 . . 94 (Dec. 1961).
- [12] *Dorn, F., Bader, F.*: Physik, Oberstufe, Band MS; Schroedel, Hannover; 1975.
- [13] *Kuhn, W* : Physik, Band III A: Mechanik; Westermann, Braunschweig; 1973.
- [14] *Jung, W.*: Zur Einführung des Kraftbegriffs, phys. did. 4, 171 . . 187 (1977).
- [15] *Rang, O.*: Winkel und Raumwinkelbegriff im Zusammenhang mit der Anschaulichkeit und Übersichtlichkeit physikalischer Größensysteme; Ingenieurschule 7/1, 5 . . 9 (1961).
- [16] *Swartz, C.E, Coldfarb, T. D.*: A Search for Order in the Physical Universe; Freeman, San Francisco; 1974.
- [17] *Weyl, H.*: Philosophy of Mathematics and Na-

Natural Science; University Press, Princeton 1949.

[18] *Zoubek, W.* : Dynamische Definition von Masse und Kraft im Zusammenhang mit dem Impulsprinzip und einer neuen Grundkurskonzeption für Klasse 11, MNU 31, 338 . . 347 (1978).