

## Erfahrung und Verabredung bei der Einführung physikalischer Größen

U. BACKHAUS, H. J. Schlichting

### Einleitung

Physikalische Größen werden eingeführt, um Vorgänge in der natürlichen und technischen Umwelt quantitativ beschreiben und vorhersagen zu können. Einige wenige werden ohne Rückgriff auf andre Größen eingeführt: die sogenannten Grundgrößen. Nur mit deren Behandlung beschäftigt sich die Arbeit.

Im Schulunterricht werden Grundgrößen in der Regel durch Angabe eines sogenannten Meßverfahrens „definiert“, indem vereinbart wird, unter welchen Umständen zwei physikalischen Objekten dieselbe Zahl für eine gewisse Eigenschaft (Gleichheitsregel), wann ein bestimmtes Vielfaches (Vielfachheitsregel) zugeordnet wird und auf welches Normobjekt die Vergleich bezogen werden sollen (Einheitsregel). Bei einem solchen Vorgehen entsteht leicht der Eindruck, als sei diese Einführung rein konventionell. Bereits einfache Beispiele zeigen jedoch, daß dabei gewisse Eigenschaften natürlicher Vorgänge vorausgesetzt werden, ohne die man sich in Widersprüche verwickeln würde.

In dieser Arbeit soll anhand von Beispielen einerseits auf diese empirischen Voraussetzungen aufmerksam gemacht werden; andererseits sollen aber auch die Stellen deutlich werden, an denen menschliche Wünsche und Absichten – und damit Konventionen – in die Größeneinführung einfließen.

Nach JAMMER (1, S. 61) kann man bei der Begriffsbildung drei Stufen unterscheiden: „1. Die Konzeption (das ist der eigentliche Prozeß der Formung); 2. die Systematisierung (das ist die Einverleibung des neugeformten Begriffes in den Aufbau des wissenschaftlichen Systems); und 3. die Formalisierung (das ist die formale Definition des Begriffes innerhalb des Gefüges der deduktiven wissenschaftlichen Darstellung).“ Trotz der engen Beziehungen zwischen diesen Stufen war die Begriffssformung Gegenstand einer vorangegangenen Arbeit [2], während wir uns hier auf die Systematisierung und die Formalisierung konzentrieren wollen.

### 2. Komparative Begriffe

Als Voraussetzung für die Einführung einer Größe, mit der gewisse Erscheinungen beschrieben werden sollen, müssen diese erst einmal die Aufmerksam-

keit und den Wunsch nach genauerer Untersuchung geweckt haben (siehe [2]). Selbst nach Konzentration des Interesses auf einen bestimmten Aspekt der Vorgänge – und eine solche Beschränkung ist immer erforderlich! – bleiben i.a. noch mehrere Möglichkeiten, diesen Aspekt quantitativ zu erfassen.

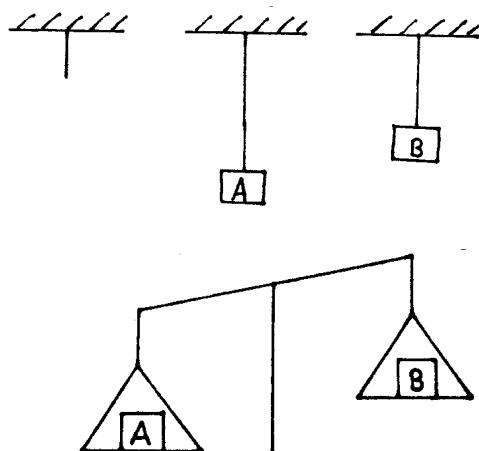
Vor einer Entscheidung sollte man sich über das Ziel einer Begriffsbildung klar werden: man möchte – zunächst – gewisse physikalische Objekte in eine Rangfolge bringen, die die zunehmende Ausprägung des betrachteten Merkmals widerspiegelt. Voraussetzung dafür ist die Verabredung, eine gewisse empirische Beziehung zwischen den Objekten als Anzeichen unterschiedlicher Ausprägung des Merkmals zu werten.

Beispiele:

#### 1. Schwere

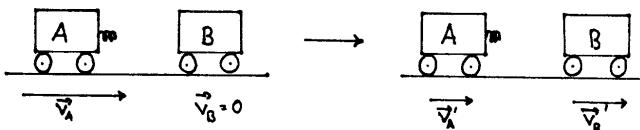
Ein Körper A wird als schwerer als ein Körper B betrachtet, wenn a<sub>1</sub>) A durch B auf einer Balkenwaage nicht hochgehoben wird, oder

a<sub>2</sub>) ein Gummiband durch A stärker verlängert wird als durch B.



#### 2. Trägheit

Ein Körper A wird als träger als ein Körper B betrachtet, wenn a<sub>1</sub>) A beim elastischen Stoß mit dem ruhenden Körper B seine Bewegungsrichtung nicht ändert, oder



- a<sub>2</sub>) B durch dieselbe Kraft schneller in Bewegung gesetzt wird.

Damit man die betrachteten Objekte auf diese Weise in eine Rangfolge bringen kann, muß die zugehörige empirische Relation u. a. transitiv sein, da z. B. nur dann die sich ergebene Rangfolge unabhängig von der Reihenfolge der Experimente ist. Ange- sichts des Ziels, eine Rangfolge aufzustellen, ist diese Bedingung eine logische Notwendigkeit. Ihr Erfülltsein muß allerdings empirisch überprüft werden.

Das Problem der Größeneinführung wird dadurch weiter verkompliziert, daß niemals alle Objekte mittels einer einzigen Relation miteinander verglichen werden können: z. B. können nicht alle Körper auf eine Balkenwaage gelegt werden. Dieser Aspekt kann hier jedoch nicht weiter verfolgt werden.

Bei der Entscheidung für eine von mehreren in Frage kommenden Relationen können u.a. folgende Gesichtspunkte eine Rolle spielen:

1. Ein Teil der Relationen erfüllt evtl. die obige Bedingung nicht:

#### Beispiele:

- a) der Schwerevergleich mit der Balkenwaage ist nur transitiv, wenn u.. a. die benutzte Waage symmetrisch ist.
  - b) Der Schwerevergleich mit Gummibändern ist es nur, wenn u. a. Vergleichsmessungen am selben Ort durchgeführt werden und wenn Auftriebseffekte vernachlässigbar sind.
  - c) Der Trägheitsvergleich durch Stoßversuche ist nur transitiv, wenn u. a. die benutzte Fahrbahn horizontal ist.
2. Einige der Relationen sind evtl. äquivalent zu einander.

#### Beispiele:

- a) Obige Vergleichsrelationen 1a<sub>1</sub> und 1a<sub>2</sub> für die Schwere und 2a<sub>1</sub> und 2a<sub>2</sub> für die Trägheit sind äquivalent zueinander.
- b) Trägheitsvergleiche können mit vielen verschiedenen Experimenten – z. B. „Zerfalls“, elastischen oder unelastischen Stoß- oder mit Beschleunigungsversuchen – durchgeführt werden. Erst die Erfahrung der Äquivalenz aller dieser Experimente berechtigt zu der Verwendung eines einzigen Trägheitsbegriffes und überzeugt von der umfassenden Bedeutung des zu bildenden Begriffes.

- c) Es zeigt sich, daß immer dann, wenn ein Körper schwerer ist als ein anderer, er auch träger ist – und umgekehrt. Diese Erfahrung war wohl das entscheidende Argument dafür, diese Eigenschaften – und nicht das Volumen – als Anzeichen unterschiedlicher Quantität der Materie zu werten (siehe [2]).

Nach der Feststellung der Äquivalenz zweier Relationen ist es prinzipiell gleichgültig, welche der beiden zur Begriffsbildung herangezogen werden: beide führen zu derselben Rangfolge. Die Auswahl kann deshalb nach pragmatischen Gesichtspunkten getroffen werden.

Die Aufstellung einer Rangfolge (man sagt auch: die Bildung eines komparativen Begriffes) beruht also auf zahlreichen empirischen Sachverhalten, z. B. dem Erfülltsein gewisser logisch notwendiger Eigenschaften und der Erfahrung der Äquivalenz mehrere Relationen. In die Begriffsbildung fließen aber auch Konventionen ein, beispielsweise die Entscheidung, gewisse physikalische Beziehungen als Anzeichen gewisser Objekteigenschaften zu betrachten und vom mehreren äquivalenten Relationen eine bestimmte auszuwählen.

Bereits diese Ebene der Begriffsbildung regt vielfache Untersuchungen an und erlaubt bereits alle halbquantitativen (z. B. je-desto-) Aussagen. Ange- sichts dessen scheint uns die Bedeutung quantitativer Aussagen überschätzt zu werden.

### 3. Metrische (extensive) Begriffe

Mit den bisherigen Festlegungen ist es nicht möglich, den Objekten eindeutig Zahlen zuzuordnen, die als Maß für die betrachtete Eigenschaft angesehen werden können (man sagt auch: den komparativen Begriff zu metrisieren). Dazu gibt es i. a. mehrere Möglichkeiten, von denen aufgrund gewisser Erfahrungen und Interessen eine ausgewählt wird.

#### Beispiele:

##### 1. Schwere

Körper A wird als mehr als doppelt so schwer wie Körper B bezeichnet, wenn er b<sub>1</sub>) schwerer ist als zwei Körper zusammen, die beide mindestens so schwer wie B sind, oder b<sub>2</sub>) dasselbe Gummiband mehr als doppelt so stark dehnt wie B.

##### 2. Trägheit

Körper A wird mehr als doppelt so träge wie Körper B bezeichnet, wenn B bei Beschleuni- gung durch dieselbe Kraft aus der Ruhelage nach derselben Zeit b<sub>1</sub>) mehr als die doppelte Geschwindigkeit erreicht hat, oder b<sub>2</sub>) mehr als die doppelte Strecke zurückgelegt hat.

In beiden Beispielen entsprechen beide Möglichkeiten dem üblichen verfahren zur Vielfachheitsdefinition, führen aber zu unterschiedlichen Ergebnissen. Welche dieser ( und weiterer) Möglichkeiten soll bevorzugt werden?

Die entscheidende Konvention, die in die Beantwortung dieser Frage einfließt, ist die Verabredung, einem in gewisser Weise aus zwei Teilen zusammengesetzten Objekt als Maßzahl die Summe der einzelnen Maßzahlen zuzuordnen:

$$g(A_0B) = g(A) + (B)$$

Beispiele: Obige Vielfachheitsdefinition 1b<sub>1</sub> für die Schwere entspricht offensichtlich dieser Verabredung. Die Festlegung 2b<sub>1</sub> des Trägheitsvielfachen erweist sich als äquivalent zu ihr.

Daß diese Vereinbarung als besonders naheliegend empfunden wird, liegt dran, daß durch sie das Messen zu einer Verallgemeinerung des Zählvorganges wird. Sie führt zu besonders einfachen Gesetzen, weil sie für viele Größen analog getroffen wird.

Voraussetzung für diese Verabredung – und nur darin ist sie auch plausibel! – ist insbesondere (weitere Bedingungen können hier nicht behandelt werden) die Erfahrung, daß ein zusammengesetztes Objekt jedes seiner Teilobjekte „überwiegt“:

$$g(A_0B) > g(A)$$

Diese Bedingung ist z. B. bei den sogenannten Größen verletzt.

Aufgrund der Additivitätsvereinbarung ist es im Prinzip möglich, das Größenverhältnis zweier Objekte beliebig genau zu bestimmen. Dazu muß eine Reihe von Experimenten durchgeführt werden, die sukzessiv die Beantwortung der folgenden Fragen erlaubt:

$$g(A) \geq g(B)?$$

$$g(B) \geq g(A) ?$$

$$g(A) \geq g(2B) ? \quad g(2A) \geq g(B) ?$$

$$g(A) \geq g(3B) ? \quad g(2A) \geq g(3B) ? \quad g(3A) \geq g(2B) ? \\ g(3A) \geq g(B) ?$$

#### 4. Schlußfolgerungen

Die Bildung physikalischer Begriffe entsteht aus einem komplexen Zusammenspiel von Konventionen und Empirie. Schüler sollten an Beispielen einen Einblick darein erhalten, um das Gefühl des Ausgeliefertseins an allwissende Lehrer und undurchschaubare Sachzwänge überwinden zu können. Entsprechende Kenntnisse der Lehrer sind dazu Voraussetzung.

Komparative Begriffe stellen eine wichtige Station auf dem Wege von der qualitativen zur quantitativen Beschreibung natürlicher Vorgänge dar. Ihnen sollte deshalb mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden. Wir schlagen deshalb vor, das weit verbreitete Einführungsschema für physikalische Größen wie folgt abzuändern:

- a) Die Gleichheitsregel wird ersetzt durch eine Ungleichheitsregel, d. h. durch eine „größer-als“- oder eine „mindestens-so-groß-wie“-Regel. Dadurch wird von Beginn an dem Ziel Rechnung getragen, Unterschiede zwischen Objekten beschreiben zu können. Diese Regel bildet die Grundlage eines komparativen Begriffes, mit dessen Hilfe alle betrachteten Objekte miteinander verglichen werden können.
- b) Allen Vielfachheitsregeln bei extensiven Größen liegt die Additivitätsforderung zugrunde. Sie sollte deshalb stattdessen explizit gemacht werden. An Beispielen (z. B. Herstellung eines Massensatzes, Eichung von Federkraftmessern oder Amperemetern ([3, S. 177 ff])) kann erarbeitet werden, wie mit ihrer Hilfe konkrete Messungen durchgeführt werden können.
- c) Die untergeordnete Bedeutung der Einheitswahl sollte deutlich werden. Wir haben sie deshalb in dieser Arbeit übergangen.

#### Literatur:

- [1] JAMMER, M.: Der Begriff der Masse in der Physik, Wiss. Buchgesellschaft: Darmstadt 1974
- [2] SCHLICHTING, H. J.; BACKHAUS, U.: Probleme der Größeneinführung, aufgezeigt am Beispiel der Masse, in diesem Band
- [3] SCHLICHTING, H. J.; BACKHAUS, U.: Physikunterricht 5-10, Urban & Schwarzenberg: München u. a. 1981