

Druck und Verformung

Zu den Standardsätzen in den Physikbüchern der Schulen gehört, dass Kräfte an zwei Wirkungen zu erkennen seien, erstens an Beschleunigungen und zweitens an Verformungen von Körpern. Wir befassen uns hier mit der zweiten Wirkung.

Gewiss können Kräfte Verformungen bewirken – schließlich beruhen die Kraftmesser auf diesem Effekt. Aber schauen wir genauer hin.

Die einfachste, in der Schule meist gründlich behandelte „Verformung“ ist die Verlängerung einer Feder (Hooke'sches Gesetz).

Es lautet korrekt : $\sigma = E \cdot \varepsilon$. Dabei bezeichnen σ die Spannung (Kraft/Querschnitt) , E den Elastizitätsmodul, ε die relative Verlängerung $\Delta L/L$ (L : Länge der Feder). Im Fall, dass $\Delta L \ll L$ und dass die Änderung des Querschnitts bei der Verlängerung vernachlässigt werden kann, geht das Gesetz in die „Schulbuchform“ $F = D \cdot \Delta L$ über.

Aber beachten wir den Hinweis, dass die für die Verformung „verantwortliche“ Größe nicht die Kraft, sondern der Druck (bzw. im Fall des Ziehens die Spannung) ist. Es ist offenkundig, dass etwa beim Einsinken eines Objektes in den Boden (Raupenfahrzeuge, Tierfüsse u.s.w.) der Druck als Quotient aus Kraft und Fläche entscheidend ist und nicht die Kraft (in den genannten Beispielen das Gewicht) . Wenn jemand ins Eis eingebrochen ist, werden die Retter versuchen, ihr Gewicht auf eine möglichst große Unterlage zu verteilen, um den Druck klein zu machen und um so die „Verformung“, sprich den Bruch der Eisdecke, zu verhindern. Es lassen sich viele weitere und recht anschauliche Beispiele für den Druck als kritische Variable im Fall einer Verformung finden.

Mir scheint, dass auch ein anderes, zu Recht beliebtes Demonstrationsexperiment sich besser verstehen lässt, wenn man den Druck als entscheidende Größe ins Spiel bringt. Gemeint ist das im folgenden beschriebene Experiment, das zur Demonstration der Masseträgheit eingesetzt wird, und das mein Freund und Kollege Dr. Emil Cavelius bei einer Fortbildungsveranstaltung in folgender Form vorgeführt hat (ich zitiere aus seinem Manuskript): „ Man befestigt zwei scharfe Rasierklingen in Muffen an zwei sich ca. 1m gegenüberstehenden Stativstangen. Darüber hängt man Papierschleifen (nachdem man dem Publikum die Schärfe der Klingen demonstriert hat), hängt in diese Schleifen einen ca. 1,20 m langen, dünnen Holzstab (Durchmesser 2 – 3 mm) und stellt unter den Stab eine Papierkiste, um den Schlag abzufangen und um kein Loch in den Fußboden zu schlagen. Dann schlägt man sehr schnell und hart mit einem Axtstiel, einem Hockeyschläger o.ä. auf die Mitte des Stabes (Vorsicht vor herumfliegenden Splittern!). Meistens bleiben die Papierringe heil; der Stab hingegen zerbricht immer in zwei bis drei Teile.“

Auch in diesem sehr schönen und beeindruckenden Experiment spielt der Druck, wie wir sehen werden, eine Hauptrolle. Das gilt zunächst natürlich für die Rasierklingen. Die „Schärfe“ der Klingen wird vorgeführt, indem man zeigt, dass eine kleine Kraft genügt, den Papierring zu „verformen“, sprich durchzuschneiden. Das Schärfen einer Klinge, z.B. der Klinge einer Schere, ist eines der vielen Beispiele dafür, dass der Druck, nicht die Kraft, die kritische Variable beim Verformen ist. Das Experiment zeigt also, dass bei den Klingen, bei den Aufhängestellen, keine Kraft „ankommt“. Und genau das hier in Anführungszeichen gesetzte „Ankommen“ werden wir präzisieren müssen.

Stellen wir uns vor, es gäbe überhaupt keine Aufhängung; der Stab würde frei fallen, und der Axtstiel käme mit sehr großer Geschwindigkeit von oben auf ihn herab und würde ihn, wie

mein Freund und Kollege schreibt, „sehr schnell und hart in der Mitte“ treffen. Der Schlag müsste dazu um einiges schneller geführt werden als im Experiment (mindestens um die momentane Fallgeschwindigkeit schneller) Was würde geschehen? Wie im Experiment würde der Stab in Stücke zerspringen. Ich vermute ferner, dass seine Teile im wesentlichen den freien Fall fortsetzen würden. Genauer gesagt: Dass der Schwerpunkt der Einzelteile den freien Fall fortsetzen würde, der Stab gewissermaßen explodieren würde.

Das zuletzt genannte Experiment lässt sich so in der Schule nicht vorführen. Zum Glück aber gibt es eine Sportart, bei der es tausendfach vorgeführt wird.

Ich meine das Tontaubenschießen. Dabei wird auf eine Scheibe geschossen, die einen schiefen Wurf ausführt. Während eines schiefen Wurfes bewegt sich der Körper schwebefrei, nicht anders als in einem freien Fall. Was geschieht, wenn die Scheibe getroffen wird? Sie bewegt sich nicht etwa als Ganzes oder in Trümmern in Richtung des auftreffenden Geschosses weiter, sondern sie zerspringt in viele Stücke, die ähnlich den Trümmern einer explodierenden Granate nach allen möglichen Richtungen wegfliegen. Könnte es sein, dass der Schwerpunkt der vielen Stücke, in welche die Scheibe beim Tontaubenschießen zerspringt, sich in etwa auf der ursprünglichen schiefen Wurfbahn weiterbewegt, so wie es bei einer explodierenden Granate geschieht ?

Kommen wir zu unserem Experiment zurück. Was geschieht im Fall des sehr schnellen, harten Zuschlagens etwa „in der Mitte“ ?. Stellen wir uns dazu einen Moment lang vor, das „Zuschlagen“ auf den Stab geschähe nicht in der Mitte, sondern in der Weise, dass ein balkenförmiger Kolben, der in etwa die Ausdehnung des Stabes hätte, diesen von oben sehr schnell und kurz trafe, aber nicht, wie beschrieben „hart in der Mitte“, sondern gleichmäßig über die ganze Länge verteilt. Der Stab würde sich nach dem Stoß als Ganzes nach unten bewegen, und die Papierschleifen würden durchtrennt werden.

Tatsächlich aber kommt kein großflächiger Kolben an, sondern der Stab wird wie die Scheibe beim Tontaubenschießen von einem ankommenden Körper, der einen sehr großen Impuls hat, auf einer kleinen Fläche getroffen (beim Tontaubenschießen ist das die Spitze des Geschosses, hier ist es die Kante des Axtstiels oder des Hockeyschlägers).

Beim Auftreffen ist aufgrund der trägen Masse des getroffenen Körpers die Kraft groß, die Fläche ist sehr klein, der Druck also ungeheuer groß. Beim Treffen nahezu in der Mitte baut sich eine Druckwelle auf, die schockartig in kürzester Zeit durch den getroffenen Körper jagt, dort für große innere Druck- bzw. Spannungsunterschiede sorgt, welche den Körper „verformen“, sprich zerreißen. An den Enden kommt diese Welle wohl gar nicht erst an.

Was spricht für die Richtigkeit der Behauptung, der Schwerpunkt der zerrissenen Körper (Stab bzw. Tonscheibe) bewege sich danach fast so weiter, als sei nichts geschehen (von der Zerreißung einmal abgesehen...)?

Die Zeit der Wechselwirkung zwischen der Kraft F und dem getroffenen Körper ist sehr klein; er zerspringt bald nach dem Auftreffen. Damit ist auch bei großer Kraft F der Kraftstoß $\int F dt$ klein. Dieser Kraftstoß ist gleich der Impulsänderung, welche der gesamte getroffene Körper erfährt und welche die Bahn seines Schwerpunktes ändert. Bei nur kleiner Impulsänderung behält der Schwerpunkt des getroffenen Körpers seine Bahn im wesentlichen bei. Bei einem zuvor ruhenden Stab müssten die Trümmer nach verschiedenen Richtungen im Raum herumfliegen.

Was geschieht mit dem Impuls, den der auftreffende Körper mitbringt, wenn nur ein kleiner Teil davon an den zerspringenden Körper abgegeben wird?

Im Fall des zersplitternden Stabes ist die Sache klar: Der ankommende Körper fliegt mit großem (Rest)Impuls weiter (daher die Vorsichtsmaßnahme mit der auffangenden

Papierkiste). Im Fall der Scheibe beim Tontaubenschießen bin ich mir nicht sicher. Vielleicht geht in diesem Fall ein größerer Teil des von der Kugel mitgebrachten Impulses auf die zertrümmerte Scheibe über. Da deren Impuls vor dem Stoß aufgrund ihrer im Vergleich zur Kugel sehr großen Masse und ihrer beträchtlichen Geschwindigkeit durchaus vergleichbar, wenn nicht größer als der des Geschosses ist, könnte es sein, dass sie zwar eine Impulsänderung erfährt, diese aber im Vergleich zu ihrem mitgebrachten Impuls nicht allzu groß ist.