Freihandexperiment

Flummies und die Gesetze der Physik

Helmut Kühnelt

Jedes Kind weiß, daß ein fallen gelassener Ball nicht höher zurückspringt, als seine Anfangshöhe war - in der Regel wesentlich weniger hoch. Ping-Pong-Bälle und Flummies sind da keine Ausnahme. Umso mehr verblüfft das folgende Freihandexperiment.

Auf einen Flummy setzen wir huckpack einen Ping-Pong-Ball oder einen kleinen Flummy und lassen beide vertikal über einander zu Boden fallen (s. Abb.). Um dies zu bewerkstelligen, kann man sich - mit wechselndem Erfolg - auf sein Geschick verlassen oder einen Trick verwenden (Halskrause, Klebstoff, Faden,...). Probieren Sie es aus, bevor Sie weiterlesen!

Zur Überraschung des Publikums springt der leichte Ball wesentlich höher zurück.

Neben der Frage *"Wie gestaltet man das Experiment optimal, läßt man nicht besser die Schüler selbst experimentieren?"* - eine Frage, die jede Leserin und jeder Leser für sich selbst beantworten muß, gilt es 3 Fragen zu klären:

1. *Wie kommt der Effekt zustande (qualitativ)?*
2. *Wie hoch kann der Ping-Pong-Ball im Idealfall springen (quantitativ)?*
3. *Was kann über den Versuch hinaus gelernt werden?*

1. Zur Klärung der ersten Frage teilen wir den Ablauf in 3 Phasen: In der ersten Phase zwischen Abwurf und Aufprall des unteren Balles (Ball 1) fallen die beiden Bälle jeweils gleich schnell.

Die zweite Phase beginnt mit dem Aufprall von Ball 1 am Boden, wobei er sich elastisch deformiert. Bewegungsenergie wird in elastische Energie, diese wieder in Bewegungsenergie umgewandelt. Ball 1 springt mit nahezu gleicher Geschwindigkeit (wenn wir für das Weitere auf die innere Reibung vergessen) zurück. Diese Phase dauert nur einige Millisekunden (wie läßt sich diese Behauptung überprüfen?) - zu kurz, um sie ohne Hilfsmittel zu sehen.

Phase 3 beginnt mit der Kollision der beiden Bälle. Im Laborsystem, im Bezugsystem von uns als Betrachtern, stoßen die beiden Bälle mit entgegengesetzt gleichen Geschwindigkeiten zusammen. Ball 1 wird als "schwerer Junge" die Kollision kaum merken, d.h. wenig Energie verlieren, für Ball 2 ist der Energieübertrag im Vergleich zur kinetischen Energie vor der Kollision groß, er wird erheblich höher zurückgeschleudert als erwartet.

2. Zur Klärung der zweiten Frage überlegen wir uns, welche Geschwindigkeit Ball 2 erreichen kann, aus $v_2' = \sqrt{2gh_2'}$ folgt dann die Rücksprunghöhe h_2'. Hier seien zwei Erklärungen angeboten: die begrifflich etwas schwierigere ohne Rechnung und eine Lösung mit Rechnung, aber weniger Durchblick.

a) Es wird nun Zeit, das Bezugsystem zu wechseln (wie ja oft ein Wechsel des Blickpunkts ratsam ist). Wir wechseln ins Schwerpunktsystem. Wodurch zeichnet sich das Schwerpunktsystem aus? Die Geschwindigkeiten der Körper werden relativ zum (bewegten) Schwerpunkt betrachtet, die Summe der Impulse relativ zum Schwerpunkt ist Null. Bei einem elastischen Stoß zweier Körper bleiben im Schwerpunktsystem die Geschwindigkeitsbeträge gleich, nur die Richtungen ändern sich.

In Phase 1 fallen beide Bälle mit gleicher Geschwindigkeit, mit ihnen fällt der Schwerpunkt; relativ zum Schwerpunkt bewegen sich die Bälle nicht.

Auf Grund des Massenverhältnisses bewegt sich der Schwerpunkt praktisch immer mit der Labor-Geschwindigkeit von Ball 1. Zu Beginn der Phase 3 (nach dem Rücksprung von Ball 1) bewegt sich der Schwerpunkt mit v nach oben, Ball 2 mit v nach unten. Im Schwerpunktsystem bewegt sich Ball 2 mit $2v$ gegen den Schwerpunkt, nach der Kollision daher mit $2v$ vom Schwerpunkt weg. Im Laborsystem wird daher Ball 2 im Idealfall mit $3v$ zurückspringen und daher (maximal) die neunfache Höhe erreichen.

b) Die Rechnung ist einfach. Bezeichnen wir die Geschwindigkeiten im Laborsystem vor dem Stoß mit v_1 und v_2, nach dem Stoß mit v_1' und v_2'. Beachten wir, daß vor dem Stoß die Geschwindigkeiten v_1 und v_2 gleich groß, aber entgegengerichtet sind und nur durch die Fallhöhe h bestimmt sind:

$$v_1 = v, v_2 = -v.$$

Der Impulssatz liefert uns:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

Der Energiesatz liefert uns:

$$\frac{1}{2}(m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2) = \frac{1}{2}(m_1 v_1'^2 + m_2 v_2'^2)$$

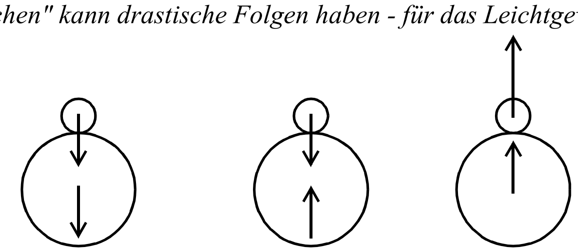
Division der Gleichungen und Umformung führt sofort auf:

$$v_2' = 3v\left(1 - \frac{4m_2}{3(m_1 + m_2)}\right)$$

Interessant sind die beiden Grenzfälle $m_2 \ll m_1$ und $m_1 = m_2$.

3. Doch was bringt das Experiment an Erkenntnis? Als Anwendungen seien genannt: Frontalkollision eines Kleinwagens mit LKW. Welche Chancen haben leichtgewichtige Eishokkeyspieler? Warum braucht man bei Crashtests nicht 2 Autos, warum reicht ein Betonklotz? Swing-by Manöver von Raumsonden an Planeten (s. Luchner, PLUS LUCIS 1/94). Tennisaufschlag.

Die Kollision eines Leichtgewichts mit einem "Schweren Burschen" kann drastische Folgen haben - für das Leichtgewicht!



im freien Fall *vor der Kollision* *nach der Kollision*