

3 Das Kugelstoßpendel

Thema

Jeder kennt es, Abb. 1, und jeder weiß auch wie es funktioniert – oder doch nicht?

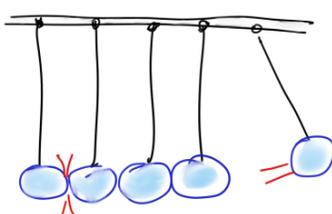


Abb. 1. Kugelstoßpendel

Die Stöße sind elastisch. Also sind sowohl der gesamte Impuls als auch die gesamte kinetische Energie vor und nach jeder Stoßsequenz gleich. Das sieht man mit bloßem Auge. Also, so mag man schließen, aus Energie- und Impulssatz folgt das Verhalten der Pendelkette.

Dieser Schluss wäre korrekt, wenn diejenigen Pendel, die gerade ruhend nach unten hängen, sich nicht gegenseitig berühren. Dann wäre jede Stoßsequenz eine Folge von Einzelstößen. Für jeden einzelnen Stoß würde gelten, dass das Verhalten nach dem Stoß aus Energie- und Impulssatz eindeutig folgt.

Das trifft aber nicht mehr zu, wenn sich die Pendel berühren. Energie- und Impulssatz stellen zwei Bedingungen dar: zwei Gleichungen, aus denen man zwei Unbekannte bestimmen kann. Im Fall des Stoßes von einer einzigen Kugel gegen eine einzige andere, hat man zwei Unbekannte, nämlich die Geschwindigkeiten der beiden beteiligten Kugeln nach dem Stoß. Hier ist die Sache also eindeutig. Hat man drei oder mehr Kugeln, die sich berühren, so hat man ein System mit drei oder mehr Freiheitsgraden, man hat drei oder mehr Unbekannte. Energie- und Impulssatz allein reichen zur Lösung nicht mehr aus, oder man kann auch sagen: sie lassen mehrere Lösungen zu. Um zu dem tatsächlich beobachteten Ergebnis zu kommen, muss man noch das recht komplizierte Kraftgesetz beim Stoß einer Kugel gegen eine andere bemühen (das Problem wurde übrigens von Heinrich Hertz untersucht).

Das Gerät

Man versucht, ein „idealisiertes“ Kugelstoßpendel auf der Luftkissenbahn aufzubauen. Statt einer Kugel nimmt man einen Gleiter mit einem elastischen Federpuffer. Man macht den Versuch zum Beispiel mit vier Gleitern 1, 2, 3 und 4, Abb. 2.



Abb. 2. Statt der an einem Faden hängenden Kugel, nimmt man einen Gleiter auf der Luftkissenbahn, der mit einer Feder versehen ist, sodass der Stoß zwischen zwei Gleitern elastisch ist.

Der Versuch

Alle vier Gleiter haben die gleiche Masse und alle drei Federn die gleiche Federkonstante. Man stellt die drei Gleiter 2, 3 und 4 so auf, dass sie sich berühren, die Federn aber noch entspannt sind, Abb.3.



Abb. 3. Anfangszustand

Nun lässt man man Gleiter 1 von links gegen diese Kette laufen. Man könnte erwarten, dass sich Gleiter 4 wegbewegt, und die drei anderen stehen bleiben – so wie im Experiment mit den Kugeln. Das passiert aber nicht. Vielmehr bewegen sich alle vier auf enttäuschend unübersichtliche Art. Ist das Experiment aus irgendeinem Grund misslungen? Sind die Federn vielleicht nicht perfekt genug? Ist die Reibung schuld? Weder - noch. Das beobachtete Ergebnis liefert auch die (etwas komplizierte) Rechnung.

Man ändert nun die Massen m_i und die Federkonstanten D_i ab:

$$\begin{aligned} m_1 &= m_4 = m \\ m_2 &= m_3 = 0,6 m \\ D_1 &= D_3 = D \\ D_2 &= 1,2 D \end{aligned}$$

und wiederholt das Experiment. Jetzt verhält sich die Gleiterkette wie die Kugelstoßkette.

Was man daraus lernen kann

Das unübersichtliche Verhalten ist zu erwarten, wenn einem klar ist, dass eine „Welle“, die durch eine Anordnung aus Federn und starren Körpern läuft, Dispersion erfährt – eine Erscheinung, die man von den Phononen in Festkörpern kennt.

Es gibt daher gar keinen Grund dafür, dass sich das System verhält wie das Kugelstoßpendel. Man kann auch anders herum sagen: Das Kugelstoßpendel ist ein falscher Freund.

Um das einfache Verhalten des Kugelstoßpendels zu verstehen, bedarf es einer größeren Anstrengung [1,2]. Tatsächlich ist die Wellenausbreitung in der Kugelkette gar nicht exakt, sondern nur näherungsweise dispersionsfrei.

[1] Herrmann, F. and Schmäzle, P., Am. J. Phys. **49**, 761 (1981)

[2] Herrmann, F. and Seitz, M., Am. J. Phys. **50**, 977 (1982)