Spielwiese

Vom Zauber der Hui-Maschine

H. JOACHIM SCHLICHTING

Das unter verschiedenen Namen immer wieder neu entdeckte Spielzeug Hui-Maschine fasziniert durch sein an Zauber grenzendes Verhalten. Das lässt sich jedoch auf einfache physikalische Prinzipien zurückführen.

Man reibt mit einem kleinen Rundholz über einen geriffelten Holzstab und ein an dessen Stirnseite locker angebrachtes schmales Brettchen beginnt zu rotieren (Abbildung 1). Nichts Aufregendes also. Dennoch kann sich kaum jemand der Faszination entziehen, die von diesem in der Schlichtheit seiner Konstruktion kaum zu unterbietenden Spielzeug ausgeht. Wie kann ein gemächliches Hin und Her zu einer rasenden Rotation führen?

An Zauberei scheint die Aktion zu grenzen, wenn der Vorführende ohne die Hin- und Herbewegung zu unterbrechen kraft eines gedehnt ausgesprochenen „Huuiiiii" die Drehrichtung gewissermaßen aus dem Stand zu ändern vermag. Durch diese Fähigkeit ist es dem Spielzeug möglich, Fragen mit Ja (Linksdrehung) und Nein (Rechtsdrehung) zu beantworten, und es erlangt dadurch den Rang eines Orakels.

Die Verwunderung wird vor allem dadurch ausgelöst, dass der Zuschauer keine direkte Verbindung zwischen Aktion und Reaktion zu sehen vermag. Trotz der primitiven, in allen Einzelheiten durchschaubaren Konstruktion ist ein kausaler Zusammenhang in Form eines physikalischen Mechanismus jedenfalls auf den ersten Blick nicht zu erkennen.

Die Sache wird nicht besser, wenn man den Zuschauer auffordert, die Hui-Maschine in Gang zu setzen. Es wird ihm kaum gelingen, eine über längere Zeit andauernde Drehung in einer bestimmten Richtung aufrecht zu erhalten, von einem gezielten Bewegungswechsel ganz zu schweigen.

Alles hängt von einem einfachen Trick ab. Und wenn man diesen schließlich verrät, wird der Zuschauer in der Regel auf Anhieb in der Lage sein, die Hui- Maschine zu beherrschen.

Der Trick besteht darin, dass man während des Hin- und Herstreichens den Daumen seitlich schräg von oben (Abbildung 2) oder den Zeigefinger schräg von unten mit mäßigem Druck am Stab entlang gleiten lässt. Der Druck lässt sich ohne sichtbaren Wechsel von Daumen und Zeigefinger variieren. Dadurch kann man eine Änderung des Drehsinns sehr unauffällig einleiten. Hinzu kommt, dass der Wechsel mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung erfolgt, so dass der Zuschauer in diesem Moment nicht die geringste Bewegungsänderung wahrnehmen kann. Das „Huuiiiii" ist also nur ein vorgetäuschtes Manöver, so wie Abrakadabra.

Die Beherrschung des Tricks verrät indes noch nicht den physikalischen Mechanismus. Was versetzt also den Propeller in Drehung?

Es fällt auf, dass der Propeller nur ziemlich locker auf einem Drahtstift sitzt. Um herauszufinden, wie über den Stift ein Drehmoment auf den Propeller übertragen werden kann, betrachten wir ein einfaches Modell. Wir schneiden aus kräftiger Pappe einen Propeller heraus, den wir mit einem Loch versehen, das etwa doppelt so groß ist wie der Durchmesser des Bleistifts, der durch das Loch gesteckt wird (Abbildung 3).

Fast jedem gelingt es auf Anhieb, den Propeller zum Drehen zu bringen, indem er den Bleistift behutsam in eine kreisende Bewegung versetzt, so dass der Propeller schließlich „mitgenommen" wird. Der Bleistift gleitet an der Innenseite des Loches herum und überträgt aufgrund der dadurch ausgeübten Reibungskraft ein entsprechendes Drehmoment auf den Propeller. Auf analoge Weise bringt der Drahtstift in der Hui-Maschine den Propeller zum Rotieren.

Abb. 1 *Die Hui-Maschine, schräg von vorn gesehen.*

DOI: 10.1002/piuz.200501085

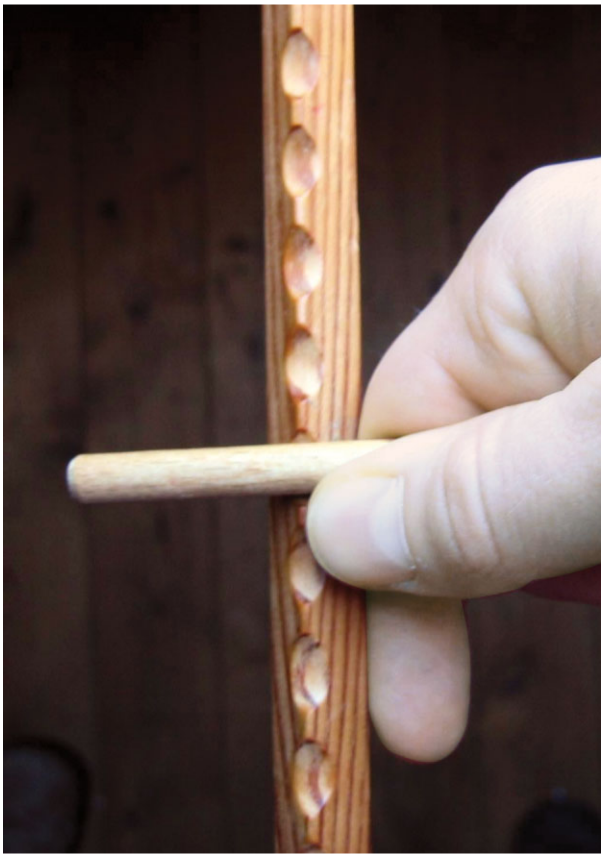


Abb. 2 ***Der geriffelte Stab. Abhängig davon, ob der Daumen schräg von oben oder der angelegte Zeigefinger schräg von unten gegen den geriffelten Stab drückt, dreht sich der Propeller nach links oder nach rechts.***

Durch die Hin- und Herbewegung des fest auf die Kerben gedrückten Rundholzes erfährt der geriffelte Stab eine Kraft abwechselnd nach unten und nach oben, je nachdem, ob eine Erhebung oder eine Vertiefung getroffen wird. Die Folge ist eine vertikale Schwingung mit einer durch die Riffelung vorgegebenen Frequenz. Zu einer Abweichung von der zunächst rein linearen vertikalen hin zu einer elliptischen Schwingung kommt es, wenn man mit dem Finger oder Daumen der streichenden Hand schräg von der Seite auf den Stab drückt.

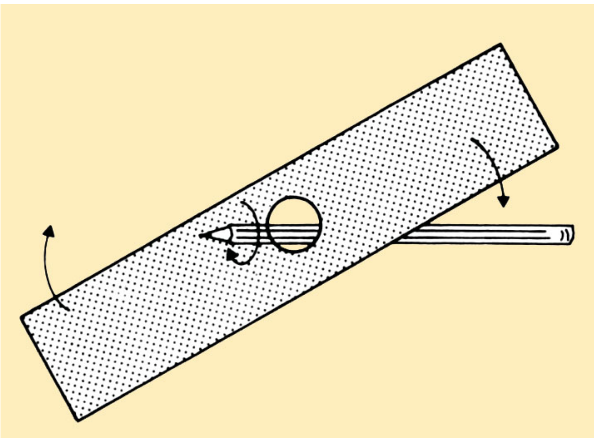


Abb. 3 ***Mit einem rotierenden Bleistift kann man einen Pappstreifen in Drehung versetzen.***

Dabei kommt es entscheidend darauf an, dass der Druck schräg (also beispielsweise in einem Winkel von 45° zur Vertikalen) ausgeübt wird. Wenn er senkrecht von oben erfolgte, bliebe es bei einer rein vertikalen Schwingung. Ein horizontal von der Seite ausgeübter Druck würde ebenfalls zu keiner Wirkung führen, weil die Kraft dann orthogonal zur vertikalen Schwingung erfolgt und damit an deren Periodizität nicht teilhaben kann. Dies gelingt nur durch schräg ausgeführten Druck. Zusätzlich zur Vertikalschwingung wird dann nämlich eine dazu phasenverschobene Schwingung hervorgerufen. In der Überlagerung beider Schwingungen führt dies zu einer elliptischen Schwingung des Stabes, die zum Antrieb des Propellers erforderlich ist.

Ein Druck schräg von oben links oder schräg von unten rechts führt zu einer Drehung des Propellers im Uhrzeigersinn, und ein Druck von schräg von oben rechts oder schräg von unten links zu einer Drehung entgegen dem Uhrzeigersinn. Dies lässt sich leicht beobachten, wenn man den angestrichenen Stab gegen einen hellen Hintergrund beobachtet. Die Schwingung des Stabes macht sich durch ein „Verschmieren“ der Ränder bemerkbar. Wenn das Rundholz beim Reiben von oben gegen den Stab gedrückt wird, bleiben die seitlichen Ränder scharf: Der Stab schwingt vertikal. Sobald aber der Daumen schräg am Stab entlang gleitet, verschwimmen die seitlichen Ränder ebenso wie der obere und untere Rand.

Modell der elliptischen Bewegung

Um ein quantitatives Modell der elliptischen Bewegung nach [1] entwickeln zu können, gehen wir der Einfachheit halber von folgender Annahme aus. Der geriffelte Stab gerät durch das Streichen in eine periodische vertikale Schwingung in z-Richtung:

$$z_1 = z_{10} \cos \omega t.$$

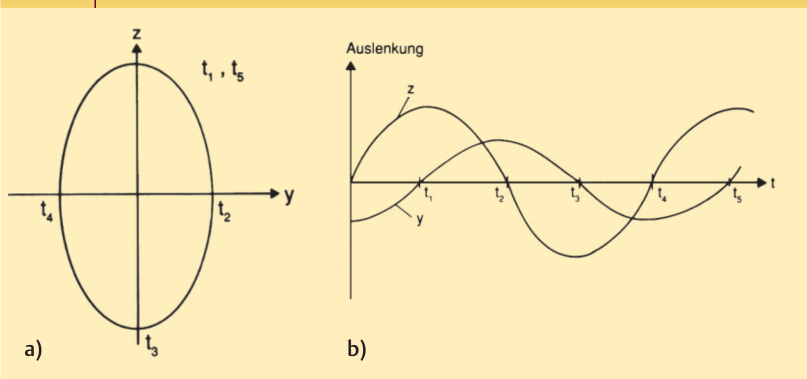
Durch diese Schwingung wird die Kraft F, mit der der Daumen auf den Stab drückt, in Phase mit ihr so variiert, dass sie maximal (minimal) wird, wenn sich der Stab am oberen (unteren) Umkehrpunkt befindet:

$$F = F_0 \cos \omega t.$$

Für eine elliptische Bewegung ist eine zusätzliche Horizontalschwingung erforderlich, die nur durch die y-Komponente F_y von F hervorgerufen werden kann. F_y würde jedoch verschwinden, wenn der Fingerdruck senkrecht von oben käme. Wenn der Daumen nur horizontal gegen den Stab drückte, könnte F_y nicht an der Periodizität der Vertikalschwingung teilhaben. Damit erklärt sich die Notwendigkeit des schräg ausgeführten Fingerdrucks.

Die Folge dieser Kraft ist eine zusätzliche, gegen die Anregung etwas phasenverschobene Schwingung in z- und in y-Richtung (Abbildung 4):

ABB. 4 | AUSLENKUNGEN



a) Überlagerung beider Schwingungen in der z-y-Ebene für verschiedene Zeiten t_i.

b) Vertikal- (z) und Horizontal- (y)-Auslenkung als Funktion der Zeit.

$z_2 = - z_{20} \cos(\omega t - \varphi)$,
$y_2 = y_{20} \cos(\omega t - \varphi)$.

Die gesamte Bewegung des Stabes wird also beschrieben durch

$$z = z_{10} \cos(\omega t) - z_{20} \cos(\omega t - \varphi) = z_0 \cos(\omega t - \varphi_z) \text{ und}$$
$$y = y_{20} \cos(\omega t - \varphi). \quad (1)$$

Die Teilschwingungen hinken um φ_z und um φ hinter der periodischen Daumenkraft her, sind also um

$$\Delta\varphi = \varphi_z - \varphi$$

gegeneinander phasenverschoben.

z_0 und φ_z ergeben sich mit Hilfe von $\cos(\alpha+\beta) = \cos\alpha \cos\beta - \sin\alpha \sin\beta$ zu:

$$z_0 = \sqrt{z_{10}^2 - 2z_{10} z_{20} \cos\varphi + z_{20}^2},$$
$$\cos\varphi_z = \frac{z_{10} - z_{20}\cos\varphi}{z_0} \text{ und}$$
$$\sin\varphi_z = -\frac{z_{20}\sin\varphi}{z_0}.$$

Aus den Schwingungsgleichungen (1) liest man folgende Sonderfälle ab:

- $\varphi = 0 \rightarrow \varphi_z = 0 \rightarrow \Delta\varphi = 0$.
- Würde die durch den Daumendruck erzwungene Schwingung nicht hinter der Anregung herhinken, dann wären Horizontal- und Vertikalschwingung nicht gegeneinander phasenverschoben. Das Ergebnis wäre eine lineare Schwingung.
- Wenn der Finger im Winkel von 45° gegen die Horizontale wirkt (also $z_{20} = y_{20}$ bei einem runden oder quadratischen Stab), dann ergibt sich eine kreisförmige Schwingung aus $z_{20} = z_{10}\sqrt{2}/2$ und $\varphi = 45°$:

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{z_{10}}{2z_{20}}$$
$$\Rightarrow \begin{cases} z_0 = z_{20} = y_{20} \\ \cos\varphi_z = \cos\varphi \Rightarrow \varphi_z = -\varphi = -45° \Rightarrow \Delta\varphi = 90° \end{cases}$$

- Der durch den Augenschein nahegelegte Fall $z_0 = z_{10} = z_{20}$ ($= y_{20}$) ergibt sich mit $\varphi = 60°$, woraus eine Phasendifferenz zwischen den beiden Teilschwingungen von 120° resultiert.

Den Umlaufsinn der Ellipse kann man herausfinden, indem man die Auslenkungen für verschiedene Werte von ωt in ein Koordinatensystem einträgt (Abbildung 5). Dabei ergibt sich für Daumendruck von links oben ein Umlauf im Uhrzeigersinn, bei Daumendruck von links unten entgegen dem Uhrzeigersinn. Für den zweiten Fall ändert sich in den Gleichungen (1) nur ein Vorzeichen.

Literatur

[1] H. J. Schlichting, U. Backhaus, Physik und Didaktik **1988**, *16* (3), 238.

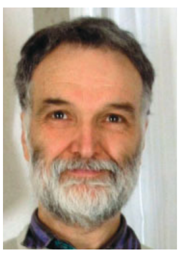
Zusammenfassung

Obwohl die Hui-Maschine in ihrer Konstruktion leicht zu durchschauen ist, fasziniert sie durch ihr auf den ersten Blick an Zauberei erinnerndes Verhalten. Sie fordert zu einer physikalischen Erklärung geradezu heraus. Es zeigt sich, dass die Drehung des Propellers auf die Überlagerung zweier Schwingungen zurückzuführen ist.

Stichworte

Hui-Maschine, Schwingungen, Phasendifferenz.

Der Autor



Hans-Joachim Schlichting verfasst seit rund zehn Jahren Artikel für die Serie Spielwiese.

Anschrift
Prof. Dr. Hans-Joachim Schlichting, Didaktik der Physik, Universität Münster, 48149 Münster. schlichting@uni-muenster.de.