

Zur Physik der Hui-Maschine¹

H. Joachim Schlichting, Udo Backhaus

Es wird ein u.a. unter dem Namen Hui-Maschine bekanntes Spielzeug beschrieben und in seiner Funktionsweise aufgrund einer einfachen Modellvorstellung erklärt. Eine kurze Konstruktionsbeschreibung zeigt, daß man das Spielzeug sich leicht selbst herstellen kann.

Vorbemerkungen

Die Hui-Maschine ist ein weit verbreitetes Spielzeug, das trotz seiner einfachen Konstruktion Phänomene zu zeigen vermag, die nicht ohne weiteres zu durchschauen sind und auf den Betrachter eine große Faszination ausüben. Das Spielzeug besteht im Prinzip aus einem geriffelten Holz- oder Plastikstab, an dessen einem Ende ein leicht drehbarer Propeller locker befestigt ist (Abb. 1). Dieser Propeller kann dadurch in mehr oder weniger schnelle Drehung versetzt werden, daß mit einem zweiten Stab über die Riffelungen gestrichen wird. Bereits dieses Phänomen ruft im allgemeinen Erstaunen hervor: Wie ist es möglich, daß eine Hin- und Herbewegung eine Drehung bewirkt, ohne daß ein geeigneter Übertragungsmechanismus erkennbar wäre? An Zauberei scheint die Spielerei jedoch zu grenzen, wenn man durch den Ausruf eines langgezogenen "Hui" bei scheinbar unverändertem Streichen die Drehrichtung des Propellers zu ändern vermag. (Daher offenbar der Name Hui-Maschine). Denn auf diese Weise ist es dem Spielzeug möglich, Fragen mit "Ja" (Linksdrehung) und "Nein" (Rechtsdrehung) zu beantworten und den Rang eines befragbaren Orakels zu erlangen.

Mindestens seit 1937 befaßt sich die fachdidaktische Literatur mit der unter verschiedenen Namen genannten Hui-Maschine [z.B. 1-7]. Die dort angegebenen Erklärungen sind unseres Erachtens jedoch nicht ausreichend und zum Teil nicht stichhaltig. Wir wollen daher im folgenden eine einfache Erklärung der wesentlichen Phänomene anbieten, die mit der Hui-Maschine hervor-

gebracht werden können. Anschließend sollen einige Tips zur eigenen Herstellung der Hui-Maschine gegeben werden. Aber zunächst soll der Trick verraten werden, durch den ein jeder in die Lage versetzt wird, die Hui-Maschine erfolgreich zu "bedienen".

Der entscheidende Trick

Jemand der zum ersten Mal eine Hui-Maschine in

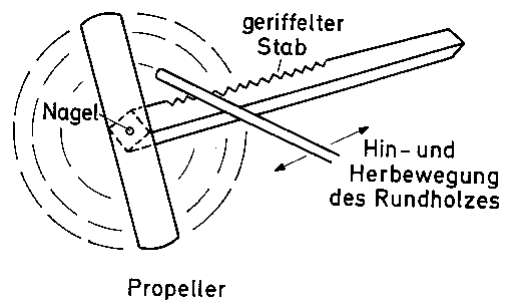


Abb. 1: Hui-Maschine, schräg von vorn gesehen.

Händen hält, tut sich normalerweise schwer, den Propeller durch einfaches Streichen über die Einkerbungen in Drehung zu versetzen und ihn über längere Zeit in einem bestimmten Bewegungszustand zu halten. Man beobachtet meistens ein chaotisches Drehen, mal nach links mal nach rechts und mal überhaupt nicht. Diese Beobachtungen konnten wir unabhängig von der speziellen Ausführung der Hui-Maschine machen. Insbesondere fanden wir im Unterschied zur Vermutung in [6] keine auffallenden Unterschiede bei Stäben mit unterschiedlichen Querschnitten, seien sie rund, quadratisch oder rechteckig. Außerdem variierten die durch einfaches Streichen hervorgerufenen Drehphänomene von Person zu Person, ja häufig hatte sogar dieselbe Person Schwierigkeiten, bestimmte Erscheinungen zu reproduzieren. Dieser Sachverhalt deutet u.E. auf *nicht formulierbare und reproduzierbare Einwirkungen* hin. Erst wenn man den Personen den Trick verrät, durch den der Propeller nicht nur auf Anhieb

¹ Erschienen in: Naturwissenschaft im Unterricht- Physik/Chemie 35/10, 25 (1987)

in Drehung versetzt, sondern sogar die Drehrichtung in eindeutiger Weise kontrolliert werden kann, beobachtet man vergleichbares und reproduzierbares Verhalten nicht nur bei verschiedenen Personen, sondern auch bei den verschiedensten Stäben (siehe oben). Auf diese Weise werden die Voraussetzungen geschaffen, das beobachtete Verhalten einer physikalischen Beschreibung und Erklärung zugänglich zu machen. Der Trick besteht darin, daß ein Finger oder der Daumen der streichenden Hand seitlich schräg von oben (siehe Abb. 2) oder seitlich schräg von unten unter einem gewissen Druck am Stab entlanggleitet.

Die Drehung des Propellers

Auffällig ist, daß der Propeller nur ziemlich locker auf einem Drahtstift mit entsprechend breitem Kopf sitzt. Es liegt nahe anzunehmen, daß diese Eigenschaft etwas mit dem Antrieb des Propellers zu tun hat. Wir wollen diese Annahme mit Hilfe eines Modells untersuchen. Dazu schneiden wir uns einen größeren Propeller aus Pappe aus, versehen diesen mit einem so großen Loch, daß beispielsweise ein Bleistift die Rolle des Drahtstiftes einnehmen kann. (Günstig ist es, den Lochdurchmesser etwa doppelt so groß wie den des Bleistiftes zu wählen). Jetzt stellen wir uns die Aufgabe, den Propeller in Rotation zu bringen. Wohl ein jeder wird nach einigem Probieren erfolgreich sein und den Papppropeller dadurch zum Drehen zu bringen, daß er den Bleistift behutsam in eine kreisende Bewegung versetzt, so daß der Propeller schließlich "mitgenommen" wird. Der Bleistift gleitet auf diese Weise an der Innenseite des Loches herum und überträgt aufgrund der dadurch ausgeübten Reibung ein entsprechendes Drehmo-

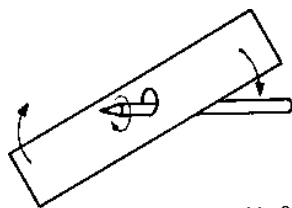


Abb. 2

ment auf den Propeller.

Die Drehung der Drehachse

Wenn diese Modellvorstellung für die Hui-Maschine zutreffen soll, dann bleibt zu klären, auf welche Weise der Drahtstift in eine Rotationsbewegung versetzt wird. An eben dieser Erklärung scheiden sich aber die Geister in der von uns durchgesehenen Literatur. Beispielsweise wird behauptet, durch das Streichen über die Kerben werde eine Schwingung in Diagonalrichtung er-

zeugt, die sich wellenförmig in Richtung auf den Propeller ausbreitet. Aufgrund der Inhomogenität des Holzes, breiteten sich die beiden Schwingungskomponenten parallel zu den Seiten des Stabs unterschiedlich schnell aus und führten aufgrund der dadurch bedingten Phasenverschiebung zu einer kreis- oder ellipsenförmigen Schwingung [7]. Ganz abgesehen davon, daß diese Erklärung für die meisten Adressaten zu schwierig sein dürfte, macht sie von einigen Voraussetzungen Gebrauch, die i.a. nicht zutreffen. Die Faserung des Holzes, auf der die Inhomogenität beruht, wird als parallel zu den Seiten des quadratischen Stabes angenommen. Holz mit einer Faserung parallel zur Diagonalen müßte daher ebenso ungeeignet sein wie ein Stab, bei dem die Riffelung parallel oder senkrecht zur Faserung angebracht wird. Das ist aber i.a. nicht der Fall. Davon kann man sich anhand von beliebig gefaserten und gekerbten Hölzern überzeugen. Außerdem lassen sich ebensogut Stäbe aus Rundholz und beispielsweise Kunststoff herstellen.

Eine ebenfalls weit verbreitete Erklärung geht auf die zeitlich erste, der von uns ausgewerteten Arbeiten zurück [1]. Darin wird davon ausgegangen, daß in einem rechteckigen Stab zwei Schwingungen mit der Frequenz der Anregung und senkrecht aufeinander stehenden Schwingungsebenen erzwungen werden. Wegen der verschiedenen Kantenlängen unterscheiden sich die zugehörigen Resonanzfrequenzen. Deshalb haben die beiden Schwingungen unterschiedliche Phasenlagen zur Anregung, sind also gegeneinander phasenverschoben und überlagern sich zu einer elliptischen Schwingung.

Entscheidend für diese Argumentation ist die Form des Stabquerschnittes, die nach unseren Erfahrungen keinen wesentlichen Einfluß auf das Verhalten der Hui-Maschine hat. Davon abgesehen kann so nur eine sehr kleine Phasenverschiebung begründet werden. Beide Schwingungen dürften nämlich fast synchron mit der Anregung sein, weil die Resonanzfrequenzen sehr viel größer sind als die Anregungsfrequenz. Das läßt sich beispielsweise dadurch demonstrieren, daß man den Stab in einem Schraubstock einspannt und durch Zupfen in Schwingung versetzt. Der Ton, der sich ergibt, klingt sehr viel höher als der beim Reiben erzeugte.

Die oben beschriebenen Funktion des Daumendrucks, der unserer Erfahrung nach erst eindeutige Ergebnisse ermöglicht, wird hier überhaupt nicht in Erwägung gezogen.

Ein einfaches Erklärungsmodell

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 ein "Berg" oder ein "Tal" getroffen wird. Die Folge ist eine vertikale Schwingung mit der dadurch aufgeprägten Frequenz. Entscheidend für das Zustandekommen der geforderten kreis- oder ellipsenförmigen Bewegung ist aber offenbar die Störung, die man dadurch hervorruft, daß man mit einem Finger oder dem Daumen der streichenden Hand seitlich auf den Stab einen Druck ausübt. Es zeigt sich, daß man durch Druck

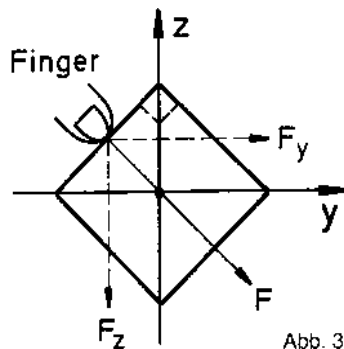


Abb. 3

- schräg von oben links oder schräg von unten rechts eine Drehung des Propellers im Uhrzeigersinn,
- schräg von oben rechts oder schräg von unten links eine Drehung entgegen dem Uhrzeigersinn und
- senkrecht von oben oder unten oder horizontal von der Seite

keine Drehung hervorrufen kann, (von jenen oben erwähnten personenabhängigen Phänomenen einmal abgesehen).

Erst durch die von dem Daumen ausgeübte, schräg seitlich angreifende Kraft wird also die lineare Schwingung elliptisch verformt. Das läßt sich auch leicht beobachten: Gegen einen hellen Hintergrund macht sich die Schwingung des Stabes durch eine "Verschmierung" 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 am Stab entlanggleitet, verschwimmen die seitlichen Ränder ebenso wie der obere und untere.

Den Einfluß des Daumens kann man sich folgendermaßen klarmachen: Nehmen wir an, der Fingerdruck wirke von schräg links oben. Dann erfährt der senkrecht (in z-Richtung) schwingende Stab (vereinfachend als harmonische Schwingung angenommen)

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

eine (Rückstell-) Kraft F , die ungefähr senkrecht zu der Oberfläche des Stabes sein sollte. Sie wird durch den senkrecht schwingenden Stab gesteuert: F ist maximal (minimal), wenn sich der Stab am oberen (unteren) Umkehrpunkt befindet. Das heißt: F variiert periodisch mit der Frequenz der Vertikalschwingung und in Phase mit ihr:

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

Für eine elliptische Bewegung ist eine zusätzliche Horizontalschwingung erforderlich, die nur durch die y-Komponente F_y von F hervorgerufen werden kann. F_y verschwindet bei Fingerdruck senkrecht von oben. Wenn der Daumen aber horizontal gegen den Stab drückt, kann F_y nicht an der Periodizität der Vertikalschwingung teilhaben.

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

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

Die gesamte Bewegung des Stabes wird also beschrieben durch

$$z = z_{10} \cos \omega t - z_{20} \cos(\omega t - \varphi) = z_0 \cos(\omega t - \varphi_z)$$

und

$$y = y_{20} \cos(\omega t - \varphi). \quad (*)$$

Die Teilschwingungen hinken um φ_z bzw. 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

$$z_0 = \sqrt{z_{10}^2 - 2z_{10}z_{20} \cos \varphi + z_{20}^2},$$

$$\cos \varphi_z = \frac{z_{10} - z_{20} \cos \varphi}{z_0}, \quad \sin \varphi_z = -\frac{z_{20} \sin \varphi}{z_0}$$

Über die Phasenverschiebung φ zwischen Daumenkraft und zusätzlicher Schwingung lassen sich wohl keine allgemeinen Aussagen machen. Jedoch sieht man den Schwingungsgleichungen (*) folgende Sonderfälle an:

$$\bullet \quad \varphi = 0 \Rightarrow \varphi_z = 0 \Rightarrow \Delta \varphi = 0$$

Hinkte die durch den Daumendruck erzwungene Schwingung nicht hinter der Anregung her, 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 (d.h. $z_{20} = y_{20}$ bei einem runden oder quadratischen Stab), dann ergibt sich eine kreisförmige Schwingung aus $z_{20} = z_{10} \sqrt{2} / 2$ und $\varphi = 45^\circ$:

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

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

Den Umlaufsinn der Ellipse kann man herausfinden, indem man die Auslenkungen für verschiedene Werte von ωt in ein Koordinatensystem ein-

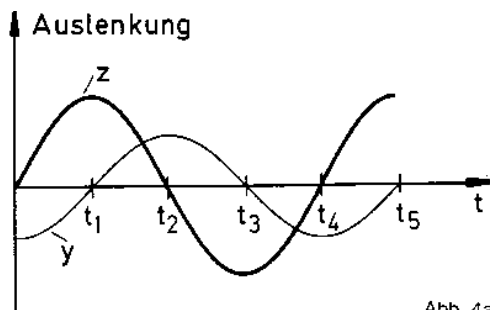


Abb. 4a

trägt (vgl. Abb.4). Dabei ergibt sich für Daumen-
druck von links oben (unten: in (*) ändert sich nur
ein Vorzeichen) ein Umlauf im (entgegen dem)
Uhrzeigersinn.

Die allgemeine analytische Auswertung von (*) ist
nicht einfach, kann aber leicht durch ein ganz
kleines Computerprogramm ersetzt werden, das
die resultierende Bewegung auf einen Bildschirm
zeichnet und dabei gleichzeitig den Umlaufsinn
offenbart (siehe Listing).

```
PROGRAM ellipse;
CONST ym = 320; zm = 200; {Bildschirmmittelpunkt}
      z10 = 1;
      m = 200; {Maßstabsfaktor}
VAR   i: integer;
      grad, phi, z20, y20, w: real;
BEGIN
Clear_screen;
grad := arctan(1)/45; {pi/180}
write(' z20, phi (in Grad) = '); readln(z20,phi);
phi := phi*grad; y20 := z20;
w := 0;
```

```
move_to      (ym+round(m*y20*cos(w-phi)),
zm+round(m*(-z10*cos(w)+z20*cos(w-phi))));
FOR i:=1 TO 36 DO
  BEGIN
    w:=i*10*grad;
    line1to   (ym+round(m*y20*cos(w-phi)),
zm+round(m*(-z10*cos(w)+z20*cos(w-phi))));
  END;
get(input) {Warten auf Tastendruck}
END.
```

Konstruktionsbeschreibung

Obwohl die Funktionsfähigkeit der Hui-Maschine
unserer Erfahrung nach relativ unkritisch gegen-
über Material und Dimensionierung ist, erweist es

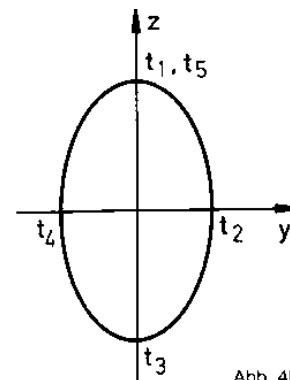


Abb. 4b

sich für jemanden, der sich ein solches Spielzeug
bauen möchte, als zweckmäßig, über konkrete
Hinweise zur Konstruktion zu verfügen. cm x 2
cm. In der Mitte bohre man ein Loch mit etwa
7mm Durchmesser. Als eigentlicher Körper der
Hui-Maschine eignet sich ein etwa 30 cm langer
Holzstab mit einem quadratischen Querschnitt von
etwa 1.3 cm x 1.3 cm. Diesen Stab versehe man
an einer seiner Kanten mit Hilfe einer runden
Raspel oder eines Schnitzmessers 4,5 cm vom
oberen Ende beginnend mit etwa 10 Einkerbungen
von 3 mm Tiefe, die jeweils 1.6 cm Abstand von-
einander besitzen. Jetzt bringe man mittels einer
etwa 4 mm starken Holzschraube den Propeller an
der oberen Stirnfläche des Stabes an, indem man -
um ein Aufspalten des Holzes zu verhindern - ein
entsprechendes Loch vorbohrt und die Schraube
nur so weit eindreht, daß der Propeller sich noch
mit genügend Spiel leicht bewegen kann. Damit
ist das Spielzeug eigentlich schon fertig. Als Stab,
mit dem man über die Kerben reibt und den Pro-
peller zum Drehen bringt, kann man nämlich ir-
gend ein Rundholz, z.B. einen Bleistift benutzen.
Wenn man es besonders schön machen will, kann
man sich natürlich das Rundholz auch selbst her-
stellen (z.B. 20 cm lang und 6 mm stark) und
mittels einer Schnur am unteren Ende des gerif-

felten Stabes befestigen. Alles weitere, wie Schmirgeln, Lackieren etc. sei dem jeweiligen Konstrukteur selbst überlassen. Im Grunde sind der Phantasie bei der Herstellung der Hui-Maschine kaum Grenzen gesetzt, sofern sie aus einem geriffelten Stab und mindestens einem locker angebrachten Propeller besteht. Man kann sogar Hui-Maschinen mit mehreren Propellern bauen [1].

Schlußbemerkungen

Die Hui-Maschine ist ein leicht herzustellendes und - das sollte hier gezeigt werden - leicht zu verstehendes Spielzeug. Für ein grobes Verständnis reicht es sogar aus, die Rückwirkung des Daumendrucks auf die Vertikalschwingung unberücksichtigt zu lassen und nur das Entstehen der zusätzlichen Horizontalschwingung in Betracht zu ziehen [8].

Das Spielzeug ermöglicht nicht nur einen motivierenden, weil spielerischen, Zugang zu in der Schule meist allenfalls am Rande diskutierten nichttrivialen Erweiterungen des Konzeptes harmonischer Schwingungen, indem insbesondere qualitativ neue Phänomene wie hier die Drehung auf die Kombination phasenverschobener linearer Schwingungen zurückgeführt werden können. Darüber hinaus können aber auch auf konkrete Weise wissenschaftstheoretische Überlegungen durchgeführt werden, indem gezeigt wird, daß (z.B. dann, wenn man ohne Daumen- oder Fingerdruck arbeitet) vielfach kaum kontrollierbare, individuelle Phänomene auftreten. Diese erweisen sich aufgrund ihrer Nichtreproduzierbarkeit oder Abhängigkeit von individuellen, oder nur mühselig erlernbaren Fähigkeiten als physikalisch nicht oder nur schwer zugänglich. Das ist aber ein allgemeines Kennzeichen physikalischer Erkenntnisgewinnung.

Literatur

- [1] Leonard, R.W.: An interesting demonstration of the combination of two linear harmonic vibrations to produce a single elliptic vibration. Am. Phys. Teacher (now: Am. J. Phys.) 5, 175 (1937).
- [2] Miller, J.S.: The notched stick. Am. J. Phys. 23/3, 176 (1955).
- [3] Laird, E.R.: A notched stick. Am. J. Phys. 23/7, 472 (1955).
- [4] Scott, G.J.: A mechanical toy: The gee-haw whammy-diddle. The physics teacher 12, 614 (1982).
- [5] Scott, G.D.: Control of the rotor on the notched stick. Am. J. Phys. 24/6, 464 (1956).

[6] Bürger, W.: Elementary dynamics of simple mechanical toys. Mitteil. der Ges. f. Angew. Math. und Mechanik 2, 21 (1980).

[7] Wittmann, J.: Trickkiste. München: BSV 1983, S. 115.

[8] Schlichting, H. J., Backhaus, U.: Physikalische Entzauberung eines geheimnisvollen Spielzeugs. NiU-PC 35, 25 (1987).