

Ein interessanter Doppelkreisel

Christian Ucke, Hans-Joachim Schlichting

Kreisel müssen nicht unbedingt mit der Spitze auf einer festen Unterlage rotieren. Im vorliegenden Spielzeug bringen zwei hängende Kreisel durch eine raffinierte Reibungskopplung eine drehbar gelagerte Stange in Rotation, indem diese Drehimpuls von den Kreiseln übernimmt.

Der in der Abbildung 1 gezeigte Karussellkreisel besteht aus einem Ständer mit einer konkaven Einbuchtung oben, einer Haltestange sowie zwei daran angehängten Kreiseln. Die klassischen, per Hand anzudrehenden Holzkreisel enthalten in der Achse einen dünnen, zylindrischen Magneten, dessen ebene Stirnfläche mit dem Kreiselstiel oben eben abschließt. Die Haltestange hat mittig einen kurzen Stift mit einer kleinen Stahlkugel von ungefähr 2 mm Durchmesser am Ende, der in der konkaven Einbuchtung frei drehbar lagert. An den Enden der Haltestange befinden ebenfalls stecknadelförmige Stahlstifte mit einer Stahlkugel von 2 mm Durchmesser, an die jeweils ein Kreisel mit seiner Magnetachse angehängt und durch magnetische Anziehung getragen wird. Die Kreisel sind gleich schwer, sodass das System im Gleichgewicht ist. Ihre Masse von 14 g ist so bemessen, dass sie ausreichend fest am Stift hängen und auch bei eventuell auftretenden leichten Schaukeln während des Rotierens nicht gleich abfallen.



Abb. 1: Ein originärer Karussellkreisel

Die Kreisel sind gleich schwer, sodass das System im Gleichgewicht ist. Ihre Masse von 14 g ist so bemessen, dass sie ausreichend fest am Stift hängen und auch bei eventuell auftretenden leichten Schaukeln während des Rotierens nicht gleich abfallen.

Der eigentliche Trick besteht nun darin, die beiden Kreisel möglichst schnell nacheinander per Hand auf eine möglichst hohe Drehzahl zu bringen, sie an die endseitigen Stifte der Haltestange anzuhängen und diese samt der rotierenden Kreisel vorsichtig auf den Ständer zu setzen. Man erreicht beispielsweise auf einem Rasierhohlspiegel als Unterlage bis 2000 U/min – eine typische Drehzahl für kleine, handangedrehte Kreisel. Da diese Prozedur einige Zeit und Geschicklichkeit benötigt, haben die angehängten Kreisel in unseren Versuchen meist nur noch Drehzahlen um die 1500 U/min.

Erst jetzt gewinnt die Bezeichnung Karussellkreisel ihren Sinn. Die Haltestange mit den noch schnell rotierenden Kreiseln fängt selbst an zu rotieren. Während die Stange mitsamt den beiden Kreiseln immer schneller wird, nimmt die Drehzahl der Kreisel selbst deutlich ab und diese kommen dann ziemlich schnell zu Stillstand. Danach büßt auch das System mit der Haltestange reibungsbedingt an Geschwindigkeit ein bis auch diese Drehung ihr Ende findet. Normalerweise kommt einer der beiden Kreisel zuerst zum Stillstand, da es nicht gelingt, beide Kreisel zu Beginn gleich schnell anzudrehen und unter exakt gleichen Voraussetzungen an die Haltestange zu hängen.

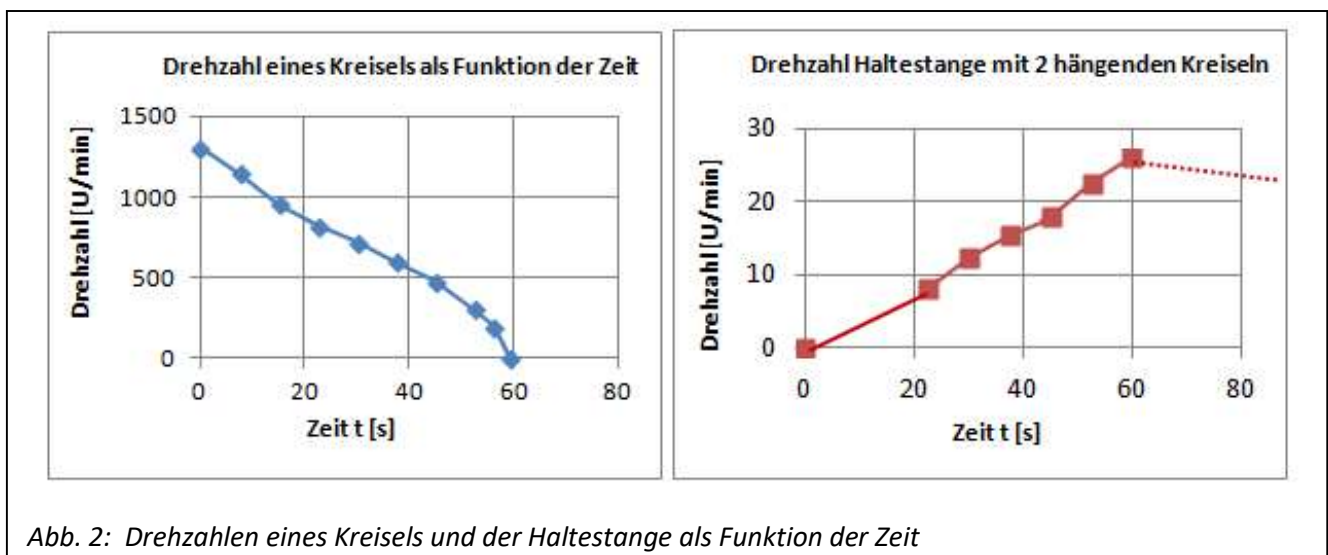
gen. Solange sich jedoch ein Kreisel noch dreht, dreht sich auch die Haltestange, und das aufgrund der Trägheit sogar über den Stillstand beider Kreisel hinaus.

Eine weitere und überraschend effektiv funktionierende Möglichkeit das System in Rotation zu versetzen besteht darin, die hängenden Kreisel mit einem Strohhalm seitlich anzupusten.

Der Reiz des Spielzeugs besteht vor allem darin, die auf den ersten Blick erstaunliche Übertragung der Drehung der Kreisel auf das Gesamtsystem zu erleben, in dem diese schließlich eine zweifache Drehung vollführen - eine um sich selbst und eine um das Zentrum des Systems. Insbesondere dann wenn die Kreisel – wie in einem Nachbau (Abbildung 3) zu sehen – aus kleinen Globussen besteht, wird man an eine Art Planetensystem erinnert, in dem die Drehungen durch gravitationale Kopplungen ebenfalls miteinander wechselwirken.

Wieso dreht sich die Haltestange, wenn die angehängten Kreisel rotieren?

Die magnetische Aufhängung der Kreisel mit einer Stahlkugel auf einer magnetischen Ebene bedeutet einerseits eine sehr geringe Berührungsfläche und damit auch geringe Reibung. Andererseits ist die Reibung noch groß genug, um ein kleines Reibdrehmoment bezüglich der Drehachse in der Mitte der Haltestange auszuüben. Und da die Kreisel – solange sie rotieren – das Drehmoment aufrechterhalten, wird die Haltestange mitsamt den Kreiseln bis zu einer maximalen Drehzahl angetrieben. Die Kreisel werden dabei sehr schnell langsamer, weil sie nicht nur Drehimpuls und Energie auf die rotierende Stange übertragen, sondern auch durch die Reibungskopplung verlieren.



Um sich auch ein quantitatives Bild von den Vorgängen zu machen, wurde nur ein Kreisel in Rotation versetzt, während der andere als Gegengewicht fungierte. Mit Hilfe einer Videoaufnahme [1] wurden jeweils die Drehzahl des Kreisels und der Haltestange mit den beiden Kreiseln als Funktion der Zeit ermittelt und gegeneinander aufgetragen (siehe Abbildung 2). Die Drehzahl des Kreisels nimmt kontinuierlich bis zum Stillstand nach etwa 60 s ab, während die Drehzahl der Haltestange in der gleichen Zeit kontinuierlich bis zum Maximum von etwa 26 U/min zunimmt. Aus Trägheit rotiert die Haltestange danach antriebslos noch etwa weitere 100 s bis sie auch zum Stillstand kommt.

Wie gut der Antrieb des Systems durch die beiden Kreisel funktioniert, hängt ganz wesentlich von der Reibungskopplung ab. Mit Hilfe der magnetischen Hängevorrichtung wird die Schwerkraft in ihrer Wirkungsrichtung umgekehrt. Auf diese Weise kann man durch Variation der Stärke der magnetischen Anziehungskraft (z.B. durch Wahl der Magnetstangen) die Kraft mit der die ineinander gleitenden Teile aufeinander wirken weitgehend selbst bestimmen. Dadurch ist man einerseits in der Wahl der angehängten Kreisel ziemlich frei. Andererseits kann die von der Anziehungskraft abhängende Reibungskraft, die maßgeblich für die Abbremsung der Kreisel verantwortlich ist, so klein wie möglich gemacht werden. Dabei ist natürlich zu berücksichtigen, dass die Reibung einen bestimmten Optimalwert nicht unterschreiten darf, weil die Übertragung des Drehmoments auf eine genügend große Reibungskraft angewiesen ist. Man hat es also mit einem subtilen Optimierungsproblem zu tun.



Abb. 3: Mit einigem Aufwand lassen sich andere Versionen realisieren. In diesem ‚Planetenkreisell‘ rotieren zwei kleine Erdkugeln um ein Zentrum. nicht käufliche Eigenkonstruktion.

Der Karussellkreisel fordert zu weiteren Experimenten geradezu heraus. Einige seien hier genannt:

- Unabhängig davon wie schnell man den einen oder anderen Kreisel andreht, kommt dem Antrieb des Systems die Summe des dadurch übertragenen Drehmoments zugute.
- Dreht man den einen Kreisel links und den anderen rechts herum, so kommt bezüglich Drehgeschwindigkeit und Drehsinn des Systems die Differenz der Einzeldrehmomente zum Tragen.
- Insbesondere bleibt das System in Ruhe, wenn dabei die Drehgeschwindigkeiten und die Reibung der in umgekehrter Richtung rotierenden Kreisel gleich groß sind.
- Die Reibung lässt sich dadurch verringern, dass die Magnete und/oder die Stahlkugeln vorsichtig mit Kerzenwachs eingerieben werden. Bringt man ein winziges Stück selbstklebendes Papier auf den Magneten der Kreiselachse an, so kann die Reibung auch vergrößert werden.

Es reizte uns außerdem die Idee, das Reibdrehmoments auf eine weitere Art zur Wirkung zu bringen. Auf einer an einer langen dünnen Eisenstange unten befestigten Holzscheibe sind zwei konkave, etwas angeraute Plasticscheiben aufgeklebt (Abb. 4). Die obere Spitze der Stange hängt reibungsarm an einem Magneten. Auf die Plasticscheiben lassen sich nicht allzu große Kreisel drehend aufsetzen. Die ganze Konstruktion dreht sich daraufhin in gleicher Weise wie die Karussellkreisel. Wegen des ja nur sehr kleinen Reibdrehmoments müssen die verwendeten Massen klein sein [2].



Abb. 4: An einem Magneten hängende Vorrichtung, um zwei Kreisel rotierend auf konkaven Scheiben aufzusetzen. Im Bild ist ein Kreisel durch ein äquivalentes Gewicht ersetzt.

Wir hoffen mir diesen Ausführungen, unsere Leser zu weiteren Konstruktionen anzuregen und wären an Rückmeldungen sehr interessiert.

Energiebetrachtung

Aus den Abmessungen der Einzelteile des Karussellkreisels und den Messungen der Drehzahlen von Kreisel und System mit Haltstange (Abb. 2) lässt sich eine Energieabschätzung ableiten.

Das Trägheitsmoment eines Kreisels I_{k2ber} **berechnet** als homogene, zylindrische Scheibe ($\varnothing = 4,5\text{cm}$; $m = 13,8\text{g}$) ergibt sich zu $I_{k2ber} = 0,5 \cdot 13,8\text{g} \cdot 2,25^2\text{cm}^2 = 35\text{gcm}^2$. Eine Messung hat $I_{k2ber} = 37\text{gcm}^2$ ergeben, d.h. die vereinfachte Näherungsrechnung stimmt ganz gut.

Das Trägheitsmoment der Stange **berechnet** bezüglich des Mittelpunkts der Stange ($l = 9,7\text{cm}$; $m = 1,85\text{g}$); Dabei wurde angenommen, dass die Stange homogen ist und gleich dick über die Länge $I_{St} = ml^2/12 = 14,5\text{gcm}^2$. Eine Messung hat $I_{k2ber} = 14,8\text{gcm}^2$ ergeben.

Das Trägheitsmoment eines im Abstand von $4,25\text{cm}$ an der Stange hängenden Kreisels ($m = 13,8\text{g}$) bezüglich der Mitte der Haltstange beträgt: $I_k = 13,8\text{g} \cdot 4,25^2\text{cm}^2 + 14,8\text{gcm}^2 = 264,1\text{gcm}^2$.

Das Gesamtträgheitsmoment (zwei hängende Kreisel plus Stange) beträgt:
 $I_G = 2 \cdot 264,1\text{gcm}^2 + 14,8\text{gcm}^2 = 543\text{gcm}^2$.

Die Energie des einzeln rotierenden Kreisels zu Beginn ist:

$E_{rot1} = 0,5 \cdot I_{K2} \cdot \omega^2 = 0,5 \cdot 37\text{gcm}^2 \cdot 136,3^2\text{s}^{-2} = 343687\text{gcm}^2\text{s}^{-2}$ (mit $\omega = 2 \cdot \pi \cdot 1300\text{ U/min} = 136,1\text{s}^{-1}$; entnommen aus Abb. 2)

Die Energie der rotierenden Stange mit zwei Kreiseln, direkt nachdem der eine Kreisel aufgehört hat zu rotieren, beträgt:

$E_{rot2} = 0,5 \cdot I_G \cdot \omega^2 = 0,5 \cdot 543\text{gcm}^2 \cdot 2,7^2\text{s}^{-2} = 1979\text{gcm}^2\text{s}^{-2}$ (mit $\omega = 2 \cdot \pi \cdot 26\text{ U/min} = 2,7\text{s}^{-1}$; entnommen aus Abb. 2).

Fazit: Extrem wenig der anfänglichen Kreiselenergie (<1%) ist direkt nach dem Stillstand des Kreisels noch in der Drehenergie der Stange mit den Kreiseln vorhanden; bei zwei rotierenden Kreiseln käme man auf etwa 1%. Von einem energietechnischen Standpunkt aus gesehen, ist das System extrem ineffizient. Für ein Spielzeug ist diese Betrachtung natürlich irrelevant.

Zusammenfassung

Beim sogenannten Karussellkreisel hängen zwei magnetisch gehaltene Kreisel symmetrisch an einer Haltstange, die mit den Kreiseln um eine Lagerung in der Mitte rotieren kann. Die in gleicher Richtung in Drehung versetzten Kreisel üben ein kleines Reibdrehmoment bezüglich der Drehachse in der Mitte aus und versetzen so die Haltstange selbst zunehmend in Drehung. Das ungewöhnliche Spielzeug verleitet zu weiteren Experimenten.

Quellen

[1] Videos unter folgenden Links zugänglich:

www.ucke.de/Karussellkreisel2_240fps.mp4

<https://youtu.be/c-bzugj3728>

aus diesem Video wurde die Abb. 2 extrahiert

Schönes Video eines einfachen Karussellkreisels

<https://www.instagram.com/p/BxAZA-7FwGh/>

[2] Video zu Abb. 4

www.ucke.de/Eigenbau3c2b1-30fps.m4v

<https://youtu.be/qjoqTyq4j8Y>

[3] Karussellkreisel in verschiedenen Variationen sind zu beziehen über

Unikate-Holzkunst Kurt Jürgen Weigl, Daimlerstr.1, 71254 Ditzingen Schöckingen,

<http://unikate-holzkunst.de/>

Nach dem Druck der bearbeiteten und korrigierten Version in ‚Physik in unserer Zeit‘ machte uns Otto Laupp/Straubenhardt auf folgende Quelle aufmerksam. Man sieht, dass einige der im obigen Artikel aufgeführten Versuche schon lange bekannt sind.

Gelfert, J., *Der Kreisel*, Verlag Otto Salle, Berlin 1927, S. 20-21

f) Eine weitere Reihe von sehr schönen Versuchen kann man anstellen, wenn man einen Metallstab drehbar auf dem Stativ anbringt und nun die Kreisel an den Enden auf den Metallstab aufsetzt. Befinden sich beide in gleichsinniger Rotation, so beschreibt der Stab eine Präzessionsbewegung entsprechend dem früher Gesagten. Erfolgt die Rotation der Kreisel in entgegengesetztem Sinne, so dreht sich der Stab nach der Richtung, die ihm durch die Präzession des rascher rotierenden Kreisels vorgeschrieben wird. Es ist höchst unterhaltend, zu beobachten, wenn der Balken bei nahezu gleichen Rotationskräften beider Kreisel zunächst unsicher hin und her schwankt, schließlich aber der stärkeren Kraft gehorcht.

Man kann diesen Versuch beliebig variieren, indem man die .Balkenarme ungleich lang macht oder zwei Kreisel von verschiedener Größe oder Umdrehungskraft benutzt. Die Gesetze des Hebels erscheinen hier in schöner Verbindung mit der Präzessionsbewegung des Kreisels (Fig. 16).

