

Warum "schwirrt" die Scheibe?

Physikalische Aspekte eines interessanten Spielzeugs

H. Joachim Schlichting Universität GH Essen

*Die Spirale ist ein vergeistigter Kreis.
In der Form der Spirale hat der Kreis
- unrund und aufgebogen - aufgehört, schlecht zu sein;
- er ist befreit.*

Vladimir Nabokow

*Für mich ist die Spirale Symbol des Lebens. Ich glaube, die Spirale ist dort,
wo die Materie aufhört zu sein
und beginnt, etwas Lebendiges zu werden.*

Friedensreich Hundertwasser

Selbsttätig rotierende Scheiben

Manche Spielzeuge sind Alltagsgegenstände, die einer Spielidee entsprechend benutzt werden. Man denke etwa an Dosendeckel oder andere Scheiben, mit denen schon wie mit einem Frisbee gespielt wurde, als es Frisbees noch gar nicht gab. Der Frisbee ist ein gutes Beispiel dafür, dass kommerzielle Spielzeuge häufig nur eine verbesserte Version längs bekannter Alltagsspielzeuge darstellen.

Ein anderes Beispiel ist der vor einigen Jahren von Jearl Walker beschriebene Fiddlestick [1]. Es handelt sich dabei um einen Rundstab, an dem Plastikscheiben zur Drehung und Umrundung des Stabs gebracht werden: Indem man einige Scheiben über den Stab schiebt und beispielsweise mit der flachen Hand kräftig über die Außenseite der Scheiben fährt, kann man sie in Rotation versetzen (Bild. 1).

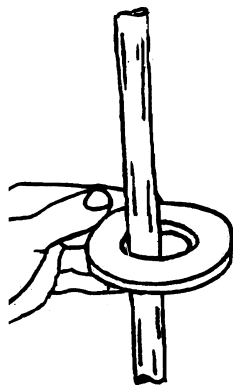


Bild 1: Der Schwirring wird mit der Hand in Gang gesetzt.

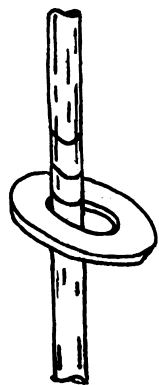


Bild 2: Der Ring läuft auf einer Spiralbahn am Stab hinab.

Reizvoll und interessant ist dabei, dass die Scheiben unerwartet gemächlich und mit gleichbleibender Drehfrequenz auf einer spiralförmigen Bahn am Stab hinabrotieren (Bild. 2). Auch wenn der Start in (allerdings nicht zu stark) unterschiedlicher Weise erfolgt, finden sich die Scheiben über kurz oder lang (lang = kurz vor dem Stabende) fast immer in "ihren" Bewegungszustand ein. Auch überlebt die Bewegungsfigur ohne weiteres kleine Störungen in Form von Schwenks mit dem Stab.

Ich fühle mich an meine Kindheit erinnert, in der ich einen solchen Stab zum festen Repertoire meiner selbst hergestellten Spielzeuge zählte. Ich erinnere mich, damals Eisendraht (z.B. Schweißdraht) u.ä. benutzt zu haben, an dem ich Unterlegscheiben verschiedener Größe hinabschnurren ließ. Aufgrund von Walkers Erinnerungshilfe entdeckte ich mein altes Spielzeug neu. Dabei zeigte es sich, dass weitere Realisationen geradezu auf der Hand liegen: Besenstiele mit Holz- oder Plastikgardinenringen, Dübelstäbe oder andere Rundhölzer aus Baumärkten mit Ringen oder Scheiben, die in Bastelgeschäften für die verschiedensten Zwecke angeboten werden. Der Phantasie sind da keine Grenzen gesetzt.

Auch das Phänomen der Rotation der Scheiben läßt sich auf vielfältige Weise variieren. Je nach der Art (Durchmesser, Masse, Form (flache oder runde Innenseite, Rauigkeit der Oberfläche); der Scheibe und des Stabs (Durchmesser, Steifheit, Rauigkeit der Oberfläche) kommt es zu unterschiedlichen Vorgängen.

Zum Beispiel: - Die Scheibe windet sich in relativ großem Winkel in kurzer Zeit am Stab hinab.

- Die Scheibe rotiert solange auf derselben Höhe, bis ihre Rotationsenergie nahezu verbraucht ist, und rutscht dann im freien Fall am Stab hinab. Dem Nabokowschen Zitat entsprechend ist dies ein "schlechter Kreis". Es gilt, ihn zu einer Spirale aufzubiegen, um der Scheibe die Freiheit des energetischen Austausches mit der Umgebung und damit ein (stab-)langes Leben zu ermöglichen.- Die im Kreis gefangene einmalig rotierende und dann abstürzende Scheibe schafft es unter bestimmten Umständen - insbesondere dann, wenn noch ein Rest an Drehung (Drehimpuls) vorhanden ist - an einer tieferen Stelle hängen-zubleiben und die Fallenergie nutzend, ein erneutes Rotationsintermezzo einzulegen.

- Benutzt man gleichzeitig mehrere Scheiben, so laufen sie entweder gleichzeitig in schöner Gleichförmigkeit am Stab hinab, oder eine der oberen Scheiben ist schneller bzw. steiler als die darunterliegenden und läuft in diese hinein. Dabei kann es zu einer Art elastischer Reflexion kommen. Dieser Vorgang kann sich mehrere Male wiederholen.

- Schließlich kann man es mit einiger Übung und einer relativ stabil rotierenden Scheibe erreichen, die Rotation beliebig zu verlängern. Man dreht den Stab um kurz bevor die Scheibe oder -noch schwieriger- die Scheiben das Stabende erreicht haben.

Vom Stab zum Ring: die Zeit wird zyklisch

Die Idee, die "Lebensdauer" der rotierenden Scheibe (beliebig) zu verlängern, kann noch vervollkommen werden. Biegt man den Stab zu einem

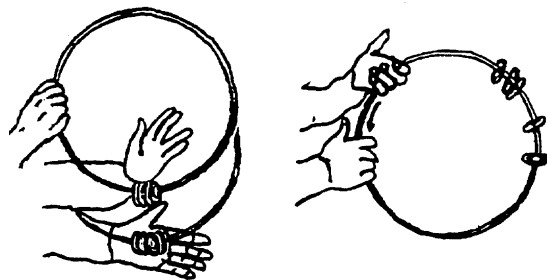


Bild 3: Man versetzt die Scheiben gemäß linker Abbildung mit der Hand in Rotation und dreht dann den Ring gemäß rechter Abbildung in dem Maße, wie die Scheiben hinabrotieren .

Ring, indem man Anfang und Ende miteinander verbindet, so kann man die Rotation der Scheibe aufrechterhalten. Man muß nur durch Drehen des Rings dafür sorgen, dass die Scheibe ständig auf dem absteigenden "Ast" bleibt. Bei gleichmäßiger Drehung des Ringes rotiert die Scheibe auf gleicher Höhe. Sie nutzt jetzt die kinetische Energie der Drehung. Aus der Sicht der Scheibe ist gewissermaßen die Zeit zyklisch geworden: Es wird immer

wieder derselbe Ring durchlaufen.

Als gelungene Realisation dieser Idee mag der sogenannte Schwirring entstanden sein, der zur Zeit als Spielzeug zu erhalten ist [2]. Dieser Ring hat einen Durchmesser von 28 cm und besteht aus 6,4 mm starkem Metall. Er ist mit fünf Plastikscheiben ausgestattet, deren Löcher einen etwa doppelt so großen Durchmesser haben wie der Ring (Bild. 3). Die Scheiben werden auf ähnliche Weise in Gang gesetzt wie beim Stab (Bild 3). Die Bezeichnung Schwirring soll vielleicht an das Schwirren eines Vogels erinnern, der mit schnellen Flügelschlägen auf der Stelle verharrt und dabei ein gleichmäßiges Geräusch erzeugt.

Zur Physik des spiralförmigen Abstiegs

Sofern der Ring als gebogener Stab angesehen werden kann - wir gehen im folgenden davon aus- ist die Erklärung des "Schwirrens" für die Scheibe am Stab auch eine Erklärung für die Scheibe am Ring. Wir beschränken uns daher im folgenden der Einfachheit halber auf eine Betrachtung der Scheibe am Stab.

Hat man die Scheibe beispielsweise auf die oben beschriebene Art gestartet, so findet sie sich relativ schnell in einen stationären Rotationszustand ein. Da sie mit dem Stab rein topologisch "schicksalhaft" verbunden und deshalb in ihren Bewegungsmöglichkeiten nicht frei ist, kann sie in tangentialer Richtung, in die sie "angeschoben" wird, nicht bleiben. Ihr (kontinuierlich oft) wiederholter Versuch, aus Trägheit eine geradlinig gleichförmige Bahn zu verfolgen, führt stattdessen zu Umrundungen des Stabes. Dabei drückt die Scheibe mit ihrer Innenseite mehr oder weniger kräftig gegen den Stab und strebt mit ihrer Außenseite radial vom Stab weg. Diese (beschleunigte) Kreisbewegung wird durch die elastische Kraft hervorgebracht, die im umlaufenden Berührungspunkt zwischen Scheibe und Stab wirkt.

Eine weitere Konsequenz ist, dass diese Kraft einen Absturz der Scheibe unter dem Einfluß der Schwerkraft verhindert: Im Berührungspunkt von Scheibe und Stab (Punkt A' in Bild.: 4) bringt sie eine Haftreibung hervor, die groß genug ist, die Schwerkraft zu kompensieren. (Deshalb funktioniert der Start auch nur oberhalb einer Mindestgröße des Startimpulses). Wider Erwarten äußern Schülerinnen und Schüler an dieser Stelle häufig Verständnisschwierigkeiten. Sie sehen nicht ohne weiteres ein, dass die so hervorgerufene Haftreibung durch den Umlauf des Berührungspunktes offenbar nicht beeinträchtigt wird. Vielleicht hilft hier der Hinweis auf das vertrautere Phänomen des Vortriebs und Spurhaltens beim Autofahren. Auch in diesem Fall rotiert der

Berührungspunkt (zwischen Reifen und Straße), in dem die Haftreibungskraft wirkt.

Da die Haftreibungskraft nicht (wie die Schwerkraft) im Schwerpunkt der Scheibe angreift, wirkt auf die Scheibe ein kippendes Drehmoment ein (Kräftepaar in A und A' in Bild 4). Infolgedessen

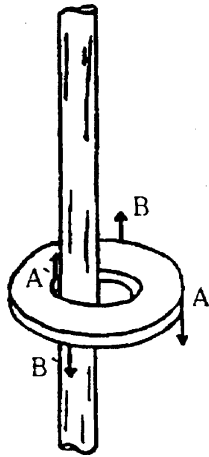


Bild 4: An der Scheibe angreifende Kräfte

neigt sich die Scheibe etwas zu der Seite, die dem Berührungspunkt gegenüberliegt. Da durch die Neigung der Bewegungszustand der Scheibe geändert wird, kommt es zu einem trägheitsbedingten "Sträuben" gegen diese Änderung, die aber anders als bei geradlinig bewegten Körpern nicht in Richtung der Einwirkung sondern senkrecht dazu erfolgt. Dabei wird die durch die Neigung hervorgerufene Schräganstellung der Scheibe im Berührungspunkt durch ein entsprechendes um 90 Grad phasenverschobenes Anheben (Kräftepaar in B und B' in Bild. 4) ständig gerade wieder aufgehoben. Man hat es also mit einer Präzessionsbewegung zu tun, bei der die (gedachte), um den Stab herum rotierende Kreisachse auf einem Kegelmantel um den Stab herum läuft.

Genaugenommen würde nur im reibungsfreien Falle die Schräganstellung der Scheibe durch das trägheitsbedingte Anheben der Scheibe vollständig aufgehoben werden und zu einer kreisförmigen Bahn um B' den Stab herum kommen. Aufgrund der reibungsbedingten Energiedissipation wird die Schräganstellung jedoch nicht vollständig aufgehoben. Die Scheibe bleibt etwas schräg nach unten geneigt, und der Kreis um den Stab herum wird zu einer Spirale am Stab hinab aufgebrochen.

Dieser Symmetriebruch ist das entscheidende Ereignis. Erst dadurch erwirbt die rotierende Scheibe ganz im Sinne des Ausspruchs von Nabokow die Fähigkeit zur Selbstorganisation, durch die jenes so faszinierende Phänomen hervorgerufen und gegen stets vorhandene äußere Störungen stabilisiert.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass die Energiedissipation nicht etwa zu einer Verlangsamung der Drehung und damit zu einer Verringerung der Haftreibung führt, womit der baldige Absturz unvermeidlich wäre. Die durch die Dissipation bedingte Abwärtsbewegung ermöglicht es der Scheibe nämlich, ähnlich wie ein eine schiefe Ebene hinabrollender Zylinder die dadurch verfügbar werdende potentielle Energie zur Erhöhung der Umlaufge-

schwindigkeit, d.h. zur eigenen Beschleunigung zu nutzen.

Der Regelmechanismus: Je schneller, desto langsamer

Anstatt aber immer schneller zu werden, nimmt die Scheibe bereits unmittelbar nach dem geglückten Start einen stationären Bewegungszustand ein. Das ist nur möglich, wenn die die Scheibe beschleunigende Antriebskraft aufgehoben wird durch eine ebenfalls mit der Geschwindigkeit wachsende Bremskraft. Ja, die bremsende Kraft muß sogar schneller mit der Geschwindigkeit zunehmen als die antreibende Kraft, damit erstere letztere "überholen" und infolgedessen begrenzen kann. Im stationären Bewegungszustand müssen beide Kräfte gleich groß sein. Energetisch gesehen kann dieser Zustand konstanter kinetischer Energie nur dadurch aufrechterhalten werden, dass die von außen zufließende Antriebsenergie vollständig dissipiert, d.h. als Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Oder anders ausgedrückt: Die rotierende Scheibe muß im zeitlichen Mittel genau so viel Energie aus der Umgebung aufnehmen, wie sie durch Dissipation einbüßt.

Doch wie "weiß" die Scheibe, wieviel Energie sie aus dem Reservoir der zur Verfügung stehenden potentiellen Energie aufnehmen muß, um die stationäre Bewegungsstruktur aufrechtzuerhalten und gegen stets vorhandene äußere Störungen, die sich in Geschwindigkeitsänderungen äußern können, abzubauen?

Zur Beantwortung dieser Frage untersuchen wir zunächst, was passiert, wenn sich die Rotationsgeschwindigkeit erhöht. In diesem Fall wird die mit der Geschwindigkeit zunehmende senkrechte Ausweichbewegung und damit das "Anheben" der Umlaufbahn der Scheibeninnenseite stärker ausgeprägt und die Bahnneigung nach unten entsprechend verkleinert. Folglich verringert sich der Energiezufluß und reicht nicht mehr aus, die Reibungsverluste zu kompensieren: Die Scheibe wird langsamer. Eine Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit hat aber wieder eine Verringerung der senkrechten Ausweichbewegung und eine Vergrößerung der Bahnneigung zur Folge. Es kommt infolgedessen wieder zu einer Beschleunigung und damit verbundenen erhöhten Energieaufnahme und so immer weiter.

In diesem zyklischen Wechselspiel von Beschleunigung und Verlangsamung bzw. Vergrößerung und Verkleinerung der Bahnneigung erkennt man un schwer einen für die Stationarität und Stabilität der am Stab hinabspiralenden Scheibe wesentlichen Regelmechanismus. Aufgrund dessen pendelt die Geschwindigkeit

- im Normalfall kaum merklich - um den Wert der stationären Geschwindigkeit die das stationäre Gleichgewicht zwischen Antrieb und Dissipation charakterisiert. Mit anderen Worten: Der Regelvorgang läßt sich letztlich reduzieren auf die Aussage: Eine Vergrößerung der Geschwindigkeit hat eine Verkleinerung der Geschwindigkeit, hat eine Vergrößerung der Geschwindigkeit usw. ad infinitum zur Folge. Wir haben es hier also mit einem Rückkopplungszirkel zu tun, den wir in ähnlicher Form auch bei anderen Systemen vorfinden (siehe z.B. [3]).

Literatur

[1] J. Walker: The Flying Circus of Physics. New York etc.: Wiley 1975, p.32 [2] Physik Boutique Stark Verlag Freising

[3] H.J. Schlichting: Komplexes Verhalten modelliert anhand einfacher Spielzeuge. Physik und Didaktik 17/3, 231 (1989).