

# Kreiselphänomene

H. Joachim Schlichting

*...daß doch die Kreisel ganz zugleich stehen und sich bewegen,  
wenn sie mit der Spitze an einem und denselben Orte haftend sich herumdrehen.*

Platon

## Kurzfassung

Es wird ein altbekanntes Spielzeug erinnert, das nicht nur in spielerischer sondern auch in physikalischer Hinsicht auf vielfältige Weise interessant ist: an den Kreisel. Dabei geht es zum einen um eine Beschreibung der wichtigsten Phänomene, die vom Kreisel hervorgebracht werden, sowie um eine elementare Darstellung der diesen Phänomenen zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien. Zum anderen soll ein Überblick über die verschiedenen Aspekte gegeben werden, die den Kreisel für den Physikunterricht interessant machen. Durch ausführliche Literaturhinweise erhält der Leser die Möglichkeit zu einer Vertiefung des einen oder anderen Aspektes.

## Faszination Kreisel

Der Kreisel ist eines der ältesten Spielzeuge und gehört wie kaum ein zweites zum ständigen Repertoire des Spielzeugmarktes. Seine Beliebtheit unterliegt weitaus weniger modischen Schwankungen, als die zahlreicher anderer Spielzeuge.

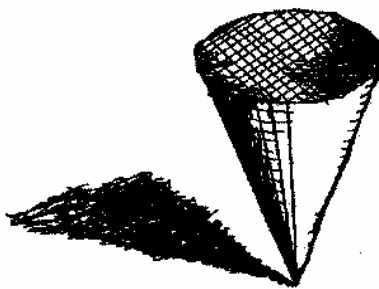


Abb. 1: Kreisel

Der Beliebtheit des Kreisels entsprechend haben sich im Laufe der Zeit zahlreiche Varianten herausgebildet, die von bloßen Unterschieden im Design bis hin zu ganz andersartig erscheinenden Spielzeugen reichen, bei denen das Kreiselprinzip erst bei näherer Betrachtung zu erkennen ist. In dieses Spektrum verschiedenartiger Realisierungen gehören neben ebenfalls bereits klassisch gewordenen und mit normalen Kreiseln in Konkur-

renz stehenden Spielzeugen - wie das Jojo, das Diabolo und das Zauberrad - Kreisel, die sich in ihren Antriebsmechanismen unterscheiden. Darunter findet man teilweise derartig raffinierte und trickreiche Techniken, daß sie in ihrer Wirkung die eigentlichen Kreiseleffekte übertreffen.

Hinzu kommen jene Spielzeuge, bei denen die Kreiseleffekte mit anderen physikalischen Wirkungen kombiniert werden und völlig neuartige Phänomene hervorzubringen vermögen. Genannt seien hier nur die explizite Ausnutzung der Reibung mit der Unterlage (z.B. Stehaufkreisel), des Luftwiderstands (z.B. Frisbee, Bumerang, Flugkreisel) und des Magnetismus (z.B. Magnetkreisel, Wunderkreisel).

Schließlich gehören hier auch jene (Gesellschafts-) Spiele her, bei denen Kreiselwirkungen der Spielidee entsprechend geschickt gehandhabt werden müssen (z.B. Romba, Turbokreisel, Kreiselgolf). Dabei kommt es vor allem darauf an, ein Gefühl für die ungewöhnlichen Kräfte und Bewegungen des Kreisels zu entwickeln.

Woher rührt die Faszination des Kreisels? Eine wesentliche Ursache dürfte darin liegen, daß sich ein Kreisel völlig anders verhält als die unsere Lebenswelt prägenden nicht rotierenden Objekte, an denen sich unsere Intuition ausgebildet hat. Obwohl wir uns mit unserer Erde auf mehrfache Weise in einer Drehbewegung befinden, sind die Auswirkungen auf unsere Alltagserfahrung so unauffällig, daß wir sie normalerweise nicht bemerken.

Bestimmend für unsere Erfahrungen sind Bewegungen unter dem Einfluß der Schwere: Ein der Schwerkraft unterliegender Gegenstand fällt. Auch ein normaler Spielzeugkreisel fällt um, wenn er auf die Spitze gestellt wird. Erst wenn man ihn vorher in schnelle Drehung versetzt, bleibt er auf der Spitze stehen; aus einer labilen wird eine (dynamisch) stabile Situation. Bemerkenswert ist dabei, daß der schnell rotierende Kreisel den Eindruck völliger Bewegungslosigkeit vermittelt.

Wie sehr der Eindruck täuscht, erfährt man jedoch dann, wenn man versucht, den Kreisel in dieser schlafähnlichen Situation zu stören. Selbst bei dem geringsten Versuch, ihn umzukippen, erweist er sich als erstaunlich wach, indem er der Störung einen umso heftigeren Widerstand entgegengesetzt, je schneller er rotiert. Dieser Widerstand ist von einem merkwürdig erscheinenden Ausweichverhalten begleitet: Im Unterschied zur gewohnten Reaktionsweise ruhender Körper, die eine Ausweichreaktion in Richtung der Einwirkung zeigen, erscheint uns der Kreisel auf lebhafteste Weise entzweigen zu wollen. Man muß schon etwas genauer hinsehen, um zu entdecken, daß der Kreisel senkrecht zur Richtung ausweicht, in der die Kraft auf ihn einwirkt.

Die Vielfalt der Verhaltensmöglichkeiten des Kreisels läßt erahnen, daß eine allgemeine physikalische Beschreibung (Aufstellen und Lösung der Bewegungsgleichung) äußerst anspruchsvoll sein dürfte. In der Tat konnte eine abschließende umfassende theoretische Beschreibung erst im letzten Jahrhundert gegeben werden, wie man beispielsweise der "Bibel" der Kreiselphysik, von Felix Klein und Arnold Sommerfeld (1894), einem Mammutwerk von 780 Seiten, entnehmen kann [1]. Verzichtet man jedoch auf eine quantitative Darstellung und beschränkt sich auf die wesentlichen Kreiselwirkungen, so läßt sich das Verhalten der Kreiselspielzeuge und -spiele auf einfache Weise physikalisch erklären. Es zeigt sich, daß die meisten Phänomene auf die Achsenstabilität und das senkrechte Ausweichen des Kreisels zurückgeführt werden können.

### Achsenstabilität

Die Stabilität des rotierenden Kreisels äußert sich darin, daß er die einmal eingenommene Drehachse beizubehalten trachtet. Dieser Sachverhalt kommt besonders unverfälscht zum Ausdruck, wenn man den Kreisel in einer Situation beobachtet, in der er keinen äußeren Kräften, also insbesondere nicht der Schwerkraft, ausgesetzt ist. Solche Bedingungen lassen sich z.B. dadurch herstellen, daß man den Kreisel im Schwerpunkt unterstützt oder dem freien Fall aussetzt. Letzteres ist auf einfache Weise zu realisieren, wenn man den rotierenden Kreisel einem Partner zuwirft. Der Kreisel behält seine Orientierung während des Fluges bei, ganz anders als nicht rotierende Objekte, die aufgrund der Startbedingungen und der Wechselwirkungen mit der Luft meist torkelnde Bewegungen ausführen. Für ein solches Wurfexperiment eignen sich vor allem Kreisel, deren rotierende Teile in einem Gehäuse untergebracht sind (z.B. ein Whizzer-Kreisel (Abb. 8) oder ein in einer Schachtel fixiertes Gyroskop (Abb. 15)).

Auch der Versuch, dem Kreisel beim Abwurf einen Drehimpuls im Winkel zur Drehachse mitzugeben, mißlingt. Dabei beeindruckt vor allem die Tatsache, daß ein äußerlich unbeweglicher Gegenstand, der - im Falle des Whizzer-Kreisels - wie ein Tennisball in der Hand ruht, durch Drehungen des Handgelenks plötzlich "zum Leben erweckt" wird, das sich in heftigen Ausweichreaktionen manifestiert und starke Rückwirkungen auf das Handgelenk ausübt. Es gibt sogar ein Kreiselspielzeug, Dyna-Bee (Abb. 12 u. 13), bei dem durch geschickte Handbewegungen die Rückwirkungen auf den Kreisel zum Antrieb des Kreisels ausgenutzt werden können. Der Kreisel kann auf diese Weise so hochtourig beschleunigt werden, daß die Handbewegungen zu einer sportlichen Kraftübung werden.

Worauf beruht dieses "Bedürfnis", die einmal eingenommene Drehrichtung beizubehalten?

Zur Vorbereitung der Antwort betrachten wir einige einfache Freihandversuche, in denen wir eine (z.B. in einem Schraubstock) fixierte Bohrmaschine als Antrieb benutzen:

1. Als "Rotor" wird eine Schmirgelscheibe in die Bohrmaschine eingespannt und auf Touren gebracht. Sobald man einen Eisengegenstand an die Scheibe drückt, verläßt ein heller Strahl von Feuerfunken, also glühende Eisenteilchen, die Scheibe in tangentialer Richtung .

2. Ein kreisrundes Stück Schreibpapier wird auf einer Schraube als Achse fixiert und mittels der Bohrmaschine in schnelle Rotation versetzt. Das Papier wird dadurch so steif und fest, daß man es als "Kreissäge" benutzen kann. Kreide und Styropor lassen sich mit Leichtigkeit durchsägen, Holz wenigstens anritzen.

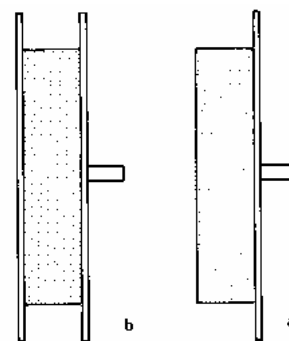


Abb. 2: Profil des Rotors

3. Der folgende Rotor kann aus einer runden Holzscheibe, Tabaksdose aus Metall u. ä. leicht hergestellt werden. Dazu wird die Scheibe u.ä. mit einer Achse versehen, die ins Bohrfutter der Bohrmaschine paßt. Je nachdem ob man nun noch

gemäß Abb. 1 eine a) oder zwei b) feste Papp-scheiben anbringt lassen sich zwei verschiedene Experimente durchführen.

Legt man im Falle a) um den Rotor eine geschlossene ab Kette und bringt ihn in schnelle Drehung, so löst sich schließlich die Kette ab (notfalls mit einem Stift etwas nachhelfen) und läuft wie ein fester Reifen über den Boden, bis die Rotationsenergie durch Reibung so weit dissipiert worden ist, daß die Kette wieder in sich zusammenfällt. Im Falle b) benutzt man eine etwas längere Kette, die gut durchhängt. Bei genügend hoher Drehzahl läßt sich die Kette mit einem Brett wie ein fester Reifen aus der Führungsrille des Rotors herausheben. Eindrucksvoll ist in beiden Fällen die "gestaltbildende" Potenz der Rotation. Wie ein wohlgestimmtes System von unsichtbaren Speichen wird die normalerweise schlaffe Kette in kreisrunder Form gehalten.

Im 1. Experiment werden durch die Schmirgelscheibe Eisenteilchen abgeschliffen und dabei auf die Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe beschleunigt. Statt gemeinsam mit der Schmirgelscheibe die "Rundreise" anzutreten, entfernen sie sich tangential geradlinig gleichförmig von der Scheibe weg: Es ist keine Kraft vorhanden, die Eisenteilchen aus der Bewegungsrichtung, die sie bei ihrer Entstehung erhielten, abzulenken.

Eine ähnliche Erscheinung stellen die Wasserfontänen dar, die beispielsweise ein Fahrrad oder Auto auf regennasser Straße hinter sich herzieht. In diesem Fall kann man gut beobachten, daß aufgrund der Adhäsionskraft zwischen Reifen und Wasser das Wasser noch einige Zeit am Reifen haftet und erst später "abreißt".

Ein entsprechender "Abriß" kann beispielsweise dazu führen, daß ein Auto "aus der Kurve getragen" wird: Fährt nämlich ein Autofahrer zu schnell in eine Kurve, so riskiert er, daß die Reibung zwischen den Rädern des Autos und der Straße nicht ausreicht, das "träge" Auto auf der Straße zu halten. Motorrad- und schnelle Radfahrer müssen sich sogar "in die Kurve legen", um zu verhindern, daß ihr Schwerpunkt die Bewegung in ursprünglicher Richtung fortsetzt und zum Umkippen des Fahrzeugs führt. Kurvenreiche Straßen und Schienenwege werden überhöht gebaut, um ähnlichen Unfällen vorzubeugen.

Eine derartige Kraft tritt im 2. Experiment in Form der das Papier zusammenhaltenden Kohäsion in Erscheinung. Sie sorgt dafür, daß die Maseteilchen des Papiers entgegen der Tendenz, in geradlinig gleichförmiger Bewegung zu verbleiben (Trägheitsprinzip) ständig zum Drehzentrum hingezogen und somit auf eine Kreisbahn gezwungen werden. Das flexible Papier erfährt auf

diese Weise die im Experiment demonstrierte Versteifung.

Auch die Versteifung der Kette zu einem kreisförmigen festen Ring im 3. Experiment ist eine Folge der Zentripetalkraft, welche die einzelnen Kettenglieder entgegen ihrer trägheitsbedingten Tendenz, sich geradlinig gleichförmig weiterzubewegen, zum Drehzentrum hin ablenkt.

Die Kraft  $F$ , die aufgebracht werden muß, um die Teilchen aus dem geradlinig gleichförmigen Bewegungszustand auszulenken, wächst quadratisch mit der Geschwindigkeit  $v$  und nimmt linear mit dem Abstand  $r$  vom Drehzentrum ab, so daß betragsmäßig gilt:

$$F = \frac{mv^2}{r}.$$

Eine rotierende Scheibe stabilisiert gewissermaßen ihre Drehachse von selbst. Denn jede Richtungsänderung der Achse führt zu zusätzlichen Richtungsänderungen der Geschwindigkeiten und damit zu Beschleunigungen der einzelnen Maseteilchen. Dazu sind aber Kräfte nötig, die umso größer sind, je schneller die Scheibe rotiert.

Ein physikalisches Maß für die Achsenstabilität ist das Produkt aus Winkelgeschwindigkeit  $w$  und Trägheitsmoment  $I$ , der Drehimpuls des Kreisels,  $L = Iw$ . Der Drehimpuls ändert sich nur unter der Wirkung eines äußeren Drehmoments:  $M = dL/dt$ . Ein solches Drehmoment wird beispielsweise ausgeübt, wenn man versucht, einen rotierenden Kreisel umzukippen.

Ein sehr eindrucksvolles Beispiel für die Achsenstabilität ist das Verhalten eines Jojos. Die Richtung der Rotationsachse bleibt während der Rotation konstant, obwohl manchmal große Torsionskräfte des verdrehten Fadens auftreten, die die Achse zu drehen trachten. Erst wenn das Jojo, z.B. in der "Schlafstellung" (d.h. am tiefsten Punkt um die lose Schlaufe der Schnur rotierend), schließlich aufgrund der Reibung zur Ruhe kommt, setzt eine kräftige Rotation senkrecht zur Drehachse ein, die den Faden zu entdrillen sucht.

### Das senkrechte Ausweichen

Auch für das senkrechte Ausweichen des Kreisels ist das Trägheitsprinzip verantwortlich. Um das einzusehen, müssen wir etwas mehr in Einzelheiten gehen:

Wir betrachten der Einfachheit halber einen rotierenden Ring (Abb. 3). Das Verhalten dieses Kreisels untersuchen wir zunächst an vier markanten Punkten,  $P_1$  bis  $P_4$ , deren Geschwindigkeit durch Pfeile gekennzeichnet ist.

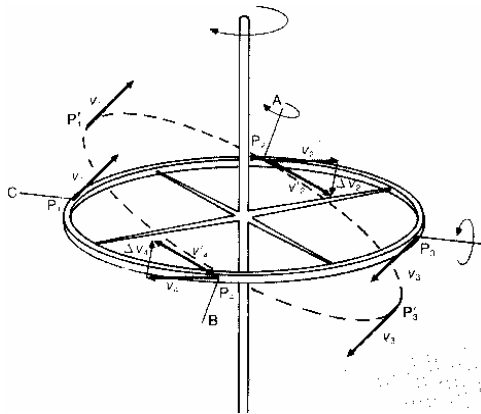


Abb. 3: Schematische Darstellung zum senkrechten Ausweichen (Erläuterungen siehe Text)

Wird der rotierende Kreisel gestört, beispielsweise dadurch, daß man ihn um die Achse  $\overline{AB}$  zu drehen trachtet, so hat diese Störung keinen Einfluß auf die Geschwindigkeit in den Punkten  $P_1$  und  $P_3$ , da diese nur parallel verschoben werden. Hingegen erfährt die Geschwindigkeit in den Punkten  $P_2$  und  $P_4$  eine Richtungsänderung (Abb. 3). Was passiert, kennt man von der Kurvenfahrt im Auto: Aufgrund der Trägheit, "möchte" der Fahrer seine Bewegungsrichtung beibehalten. Da das Auto aber durch die Reibungskraft der eingeschlagenen Räder mit der Straße beispielsweise eine Rechtskurve ausführt, kommt es zu einer "Kollision" des Fahrers mit der Fahrzeugtür. Aus der Sicht des Fahrers wird er von einer Kraft (Zentrifugalkraft) gegen die Tür gedrückt. Ganz entsprechend sieht es beim "gestörten" Kreisel aus. Die Punkte  $P_2$  und  $P_4$  "möchten" ihren Bewegungszustand beibehalten und rufen dieser Tendenz entsprechend eine Auslenkung entgegengesetzt zur Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$

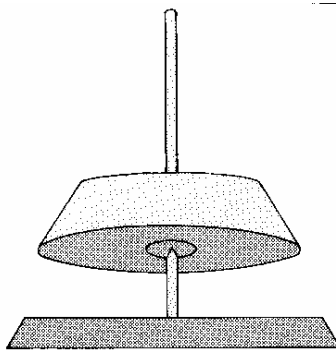


Abb. 4: Ptolemäus-Kreisel

hervor, welche aufgrund der entgegengesetzten Geschwindigkeitsrichtung in  $P_2$  und  $P_4$  zu einem um die Achse  $\overline{CD}$  wirkenden Kräftepaar bzw. Drehmoment führt. Folglich kommt es zu einer

"Ausweichbewegung" des Kreisels senkrecht zur Störbewegung.

(Was hier für vier repräsentative Punkte gezeigt ist, gilt mutatis mutandis auch für alle dazwischen liegenden Punkte. Die Trägheitswirkung ist jedoch umso kleiner, je mehr man sich den Punkten  $P_1$  und  $P_3$  annähert, weil die von der Drehung betroffenen Geschwindigkeitskomponente immer kleiner wird).

Damit ist gezeigt, daß das merkwürdig erscheinende Ausweichen eines Kreisels senkrecht zur Einwirkungsrichtung nichts anderes ist als eine Trägheitswirkung, ein "Widerstand" also, der jede Änderung des Bewegungszustands zu verhindern versucht ([2]-[5]).

Mit anderen Worten: Der Drehimpuls  $L = I\omega$  des mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  rotierenden Kreisels erfährt aufgrund des von außen angreifenden Drehmoments  $M = \Delta L/\Delta t$  während der Zeit  $\Delta t$  des Einwirkens von  $M$  eine Änderung um  $\Delta L_M = M\Delta t$  so, daß er schließlich den Drehimpuls  $L_G(t + \Delta t) = L + \Delta L_M$  annimmt (siehe Abb. 5).

### Präzession

Viele Spielzeugkreisel besitzen einen festen Unterstützungspunkt entweder aufgrund der Konstruktion (z.B. beim Ptolemäus Kreisel (Abb. 4), oder sie werden durch die Wirkung der Reibung mit der Auflage praktisch auf einem Punkt festgehalten. Sobald die Figurenachse des Kreisels auch nur ein wenig von der Vertikalen abweicht, kann die Schwerkraft ein umkippendes Drehmoment auf den Kreisel ausüben.

Nach den obigen Überlegungen reagiert jedoch der Kreisel auf diese Kraftwirkung durch senkrecht Ausweichen. Aufgrund der ständigen Wirkung der Schwerkraft, stellt sich eine Bewegung der Figurenachse des Kreisels auf einem Kegelmantel (Abb. 5) ein. Diese sog. Präzession ist also eine direkte Folge der Schwerkraft und neben dem bekannten Phänomen eines um die

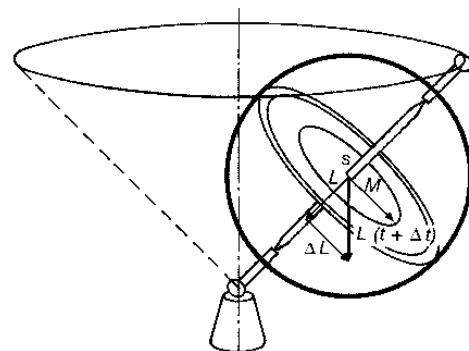


Abb. 5: Präzedierendes Gyroskop. S bezeichnet den Schwerpunkt

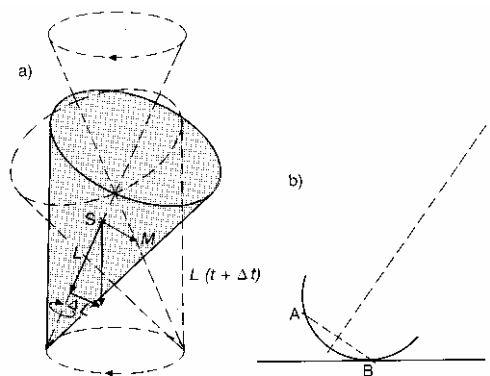
Erde kreisenden Satelliten ein weiteres Beispiel dafür, wie etwas unter dem Einfluß der Schwere in Richtung auf die Erde beschleunigt wird, ohne diese jedoch zu erreichen.

Die Präzessionsbewegung erfordert natürlich zusätzlich Energie. Sie wird dadurch aufgebracht, daß der Kreisel den Präzessionswinkel vergrößert und dadurch potentielle Energie verfügbar macht. Die Verlangsamung der Drehgeschwindigkeit des Kreisels u.a. aufgrund der Reibung der Kreiselspitze mit der Unterlage ist also nicht von einer Verkleinerung der Präzessionsgeschwindigkeit begleitet sein, sondern bedingt eine ständige Vergrößerung des Präzessionswinkels, bis der Kreisel auf den Boden aufsetzt. Unter dem Einfluß von Reibungseffekten nähert sich die Kreiselachse dann doch allmählich der Erde ([2]-[4], [6]).

### Wenn der Kreisel schläft...

Bei einigen kleineren Spielzeugkreiseln beobachtet man im Unterschied zu der hier am Beispiel des Gyroskops diskutierten Präzession, ein Aufrichten des Kreisels, also eine Präzessionsverkleinerung bzw. einen Abbau von Störungen. Ein solcher Kreisel dreht sich dann aufrecht stehend so ruhig, daß man ihm die Bewegung nicht ansehen kann. Man sagt auch, der Kreisel schläft.

Die Ursache für das "Einschlafen" des Kreisels muß in einem der Präzession entgegenwirkenden und das heißt den Kreisel aufrichtenden Effekt zu suchen sein. Wenn aufgrund der Präzession eines Kreisels die Figurenachse mit der Unterlage einen Winkel bildet ( Abb 6b), dann wird die Gleitrei-



**Abb. 6:** a: Sich aufgrund von Reibung allmählich aufrichtender Kreisel. S bezeichnet den Schwerpunkt  
b: Vergrößerung der Kreiselspitze, die wie ein Wagenrad mit dem Durchmesser AB über den Boden rollt und zu einer Beschleunigung der Kreiselspitze führt

bung zwischen Spitze und Unterlage von einer Abrollbewegung überlagert, die den Kreisel in a) eine fortschreitende Bewegung zu bringen trachtet. Ist die Spitze des Kreisels genügend sphä-

risch, so führt die Abrollbewegung zu einer der Präzession entsprechenden Kreisbahn (Abb. 6a). Der Schwerpunkt bleibt dann nahezu stationär. Da die Rotationsgeschwindigkeit i.a. sehr viel größer ist als die Präzessionsgeschwindigkeit und die Abrollbewegung nur mit einem erheblichen Schlupf erfolgt, übt die damit verbundene Gleitreibung eine das Abrollen beschleunigende Kraft aus. Der Vorgang erinnert an das Balancieren eines Stabes auf dem Finger: Indem man den Unterstützungspunkt so beschleunigt, daß er wieder unter den Schwerpunkt zu liegen kommt, verhindert man das Umkippen des Stabes. Auf entsprechende Weise führt die Beschleunigung der rotierenden Kreiselspitze zu einem den Kreisel aufrichtenden Drehmoment. Auch in diesem Fall übt man eine der schwerkraftsbedingten Präzession entgegengesetzte Wirkung aus ([2], [3]).

Mit einem kleinen Experiment läßt sich dieser Vorgang direkt nachvollziehen. Man läßt einen geeigneten Kreisel auf einem Brettchen rotieren und präzedieren. Führt man nun mit dem Brett der Kreisbewegung nach und beschleunigt auf diese Weise die Kreiselspitze, dann richtet sich der präzedierende Kreisel auf.

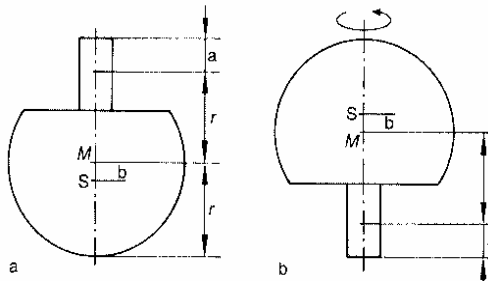
Da die Reibung mit einer Energiedissipation verbunden ist, die letztlich zu einer Verminderung der Drehzahl und damit zu einer Verkürzung der Rotationszeit des Kreisels führt, kommt es bei der Konstruktion guter "Schlafkreisel" darauf an, die Krümmung der Kreiselspitze möglichst klein zu machen, aber auch wiederum nicht so klein, daß der Abrolleffekt unterbunden wird.

### Wenn der Kreisel Kopfstand macht...

Eine weitere, überraschende Variante des reibungsbedingten Aufrichtens wird im sog. Stehaufkreisel (Umkehrkreisel, tippe-top) realisiert. Dieser Kreisel ähnelt rein äußerlich einem Stehaufmännchen und verhält sich in der Ruhelage auch so: Anders als beim normalen Kreisel ist die Ruhelage stabil. Aber nicht nur in der Ruhelage, erst recht im Falle der Rotation stellt der Stehaufkreisel das normale Kreiserverhalten auf den Kopf, indem er sich selbst auf den Kopf stellt (Abb. 7).

Bringt man ihn nämlich in schnelle Rotation, so wird die Ausgangslage instabil. Der Kreisel neigt sich. Dieser Neigungsvorgang kommt nicht etwa bei einem Winkel von  $90^\circ$  zur Ruhe, wie man es von ähnlich gebauten sphärischen Kreiseln gewohnt ist, sondern setzt sich solange fort, bis er auf dem Stiel rotiert, der in Ruhelage nach oben zeigt. Widerspricht bereits das normale Kreiserverhalten unserer Intuition und stellt hohe Anforderungen an unsere physikalische Anschauung, so erscheinen im Kopfstand des Ste-

haufkreisels auch einige physikalische Prinzipien auf den Kopf gestellt:



**Abb. 7:** Schematische Darstellung des Umkehrkreisels. **a:** in Ruhelage **b:** beim Kopfstand. Der Schwerpunkt S liegt in der Ruhelage unterhalb, beim Kopfstand oberhalb des Krümmungsmittelpunktes

Beispielsweise liegt im Endzustand der Schwerpunkt des Kreisels höher als beim Start. Das scheint aber auf den ersten Blick ohne Verletzung des Energiesatzes nicht möglich zu sein, zumal die Schlafstellung die der Stehaufkreisel schließlich bei seinem Kopfstand annimmt, zunächst nicht erkennen läßt, wie stark die Rotationsgeschwindigkeit und damit die Rotationsenergie abgenommen hat. Erst die Beobachtung, daß der Schlaf des Kreisels nur von kurzer Dauer ist, weist auf den großen Energiebedarf hin, die mit dem Umkippen verbunden ist.

Die für die Schwerpunktsanhebung nötige zusätzliche potentielle Energie stammt also offenbar aus dem Reservoir der Rotationsenergie. Bleibt zu klären, wie sich ein solcher Energietransfer mit dem Drehimpulserhaltungssatz vereinbaren läßt. Eine Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit ist nämlich notwendig mit einer Abnahme des Drehimpulses verbunden, die wiederum auf die Wirkung eines äußeren Drehmomentes schließen läßt.

Wie schon bei der Aufrichtung des normalen Kreisels, so ist auch für den Kopfstand des Stehaufkreisels die Reibung mit der Unterlage verantwortlich (Abb. 8). Ohne hier in Details gehen zu können, kann ganz global festgestellt werden, daß die Reibungskraft des mit erheblichem Schlupf über die Unterlage "rollenden" Kreisels neben einem die Gleitbewegung bremsenden auch ein den Kreisel kippendes Drehmoment ausübt ([7]-[10]).

### Energetische Abschätzung des Kopfstands:

Dreht man den Kreisel an und verleiht ihm eine Winkelgeschwindigkeit  $w$ , so beträgt seine Anfangsenergie

$$E_1 = \frac{1}{2} I \omega_1^2 \quad (I \text{ ist das Trägheitsmoment}).$$

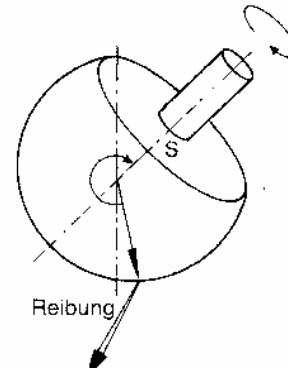
Geht man davon aus, daß keine Reibung auftritt, so müßte im Endzustand die Energie

$$E_2 = \frac{1}{2} I \omega_2^2 + mg(a + 2b)$$

betragen (Abb. 8). Der zweite Term gibt die hinzugekommene potentielle Energie aufgrund der Anhebung des Schwerpunktes um  $a + 2b$  an ( $m$  ist die Masse des Kreisels,  $g$  die Erdbeschleunigung).  $E_1$  muß aber gleich  $E_2$  sein, da voraussetzungsgemäß kein Energieaustausch mit der Umgebung stattfindet. Durch Gleichsetzen der entsprechenden Ausdrücke ergibt sich

$$\omega_1 > \omega_2 \text{ und damit } I\omega_1 > I\omega_2.$$

Aufgrund des Kopfstandes müßte sich der Drehimpuls verringert haben. Als Ursache für die



**Abb. 8:** Durch Reibung wird ein den Kreisel umkippendes Drehmoment ausgeübt

Wirkung eines äußeren Drehmomentes  $M$  ist aber nur die Reibung des Kreisels mit der Unterlage denkbar. Deshalb ist unsere Voraussetzung der Reibungsfreiheit grundsätzlich unzulässig. Vielmehr muß folgende Energiebilanz:

$$\frac{1}{2} I \omega_1^2 = \frac{1}{2} I \omega_2^2 + mg(a + 2b) + Q$$

( $Q$  ist die durch Reibung dissipierte Energie) und folgende Drehimpulsbilanz gelten:

$$I \omega_1 = I \omega_2 + \int_1^2 M dt \text{ mit } \omega_1 > \omega_2$$

$$\text{und } \int_1^2 M dt > 0.$$

Dabei bezeichnen die Indizes 1 und 2 den Anfangs- und Endzeitpunkt des Umkehrvorgangs [7].

## Kreiselantrieb

Bislang wurde die Aufmerksamkeit auf das Verhalten des bereits rotierenden Kreisels gerichtet. Es zeigte sich, daß die Kreisel aufgrund unterschiedlicher Konstruktionen ein unterschiedliches Endverhalten annehmen. Dabei spielte die Wechselwirkung zwischen primären Kreiseffekten und der Reibung mit der Unterlage eine entscheidende Rolle.

Die Vielfalt der existierenden Kreiselkonstruktionen wird aber in noch größerem Maße bestimmt durch die verschiedenen Methoden, den Kreiseln eine möglichst große Rotationsgeschwindigkeit zu erteilen. Dabei kommt es darauf an, auf effektive Weise ein möglichst großes Drehmoment bezüglich der Figurenachse des Kreisels auszuüben. Die bekanntesten Antriebsarten sollen im folgenden zusammengestellt werden:

- **Fingerantrieb:**

Kleine Holz- und Plastikkreisel besitzen eine relativ geringe Masse und ein kleines Trägheitsmoment. Daher lassen sich solche Kreisel in schnelle Drehung versetzen, indem man ihren Stiel kurzfristig zwischen Daumen und Zeigefinger kraftvoll andreht. Die meisten kleinen Kreisel werden auf diese Weise in Gang gesetzt.

- **Handantrieb:**

Ab einer bestimmten Größe und Masse der Kreisel reicht die Fingerkraft nicht mehr aus, ein genügend großes Drehmoment auszuüben. Diese Kreisel (z.B. große Holzkreisel mit langem Stiel) sind daher so konstruiert, daß man sie zwischen beide Handflächen pressen und durch kräftiges Verschieben der Hände gegeneinander auf Touren bringen kann.

- **Seilzugantrieb:**

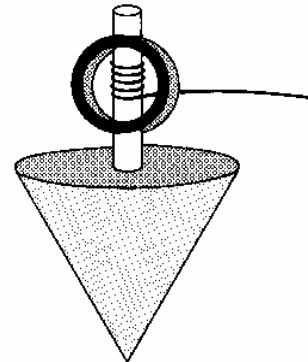
Größere Kreisel werden häufig auch durch kräftiges Abziehen einer um die Kreiselachse gewundenen Schnur angetrieben. Dabei lassen sich mehrere Methoden des Abziehens unterscheiden:

- Der Kreisel, um den die Schnur geschlungen ist, wird kräftig weggeschleudert, so daß er mit seiner Spitze auf dem Boden auftrifft. Dadurch, daß man das eine Ende der Schnur festhält, muß sich der Kreisel aufgrund der Reibung mit der Schnur abrollen und gerät dadurch in Drehung.

- Eine andere Methode besteht darin, den Kreisel mit der einen Hand an einem am Stiel drehbar gelagerten Ring festzuhalten und mit der anderen Hand an einem beweglich an einer um den Stiel angebrachten Ring gehalten. Mit geschlungenen Schnur zu ziehen (Abb. 9). Das

oben erwähnte Gyroskop wird auf eine ähnliche Weise in Gang gesetzt.

- Schließlich wird auch der bekannte Peitschenkreisel durch Seilzug angetrieben. Indem man das Seil einer Peitsche gegen den rotierenden Kreisel schlägt, schlingt es sich kurzfristig um den Krei-

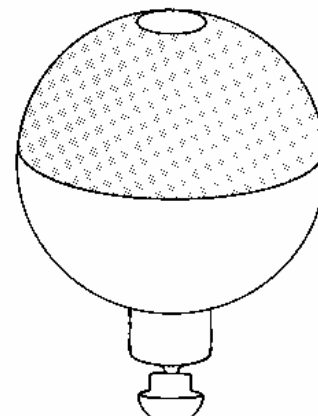


**Abb. 9:** Mit der einen Hand wird der Kreisel an einem beweglichen Ring gehalten. Mit der anderen Hand wird die um die Achse geschwungene Schnur abgezogen.

sel und überträgt beim unmittelbar darauf folgenden Abziehen einen Drehimpuls. Der Peitschenantrieb ist eine der Methoden, mit der man (durch wiederholtes Schlagen) eine dauernde Drehung aufrechtzuerhalten vermag.

- **Federzugantrieb:**

Manche Kreisel können mit Hilfe einer elastischen Feder in Drehung versetzt werden. Dazu wird der Kreisel mit dem oberen Ende in eine Spannvorrichtung eingeführt. Durch mehrmaliges Drehen wird eine Spiralfeder gespannt und anschließend durch Knopfdruck zu einer plötzlichen

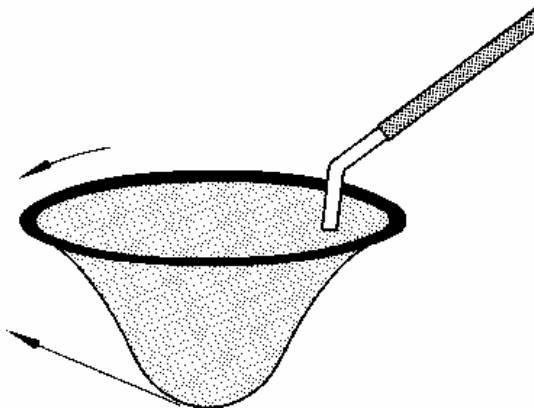


**Abb. 10:** Indem der untere Gummiwulst schräg auf über die Unterlage gerieben wird, gerät die Kreiselachse in Drehung

Entspannung gebracht. Dabei wird der Kreisel freigegeben und gleichzeitig auf Touren gebracht.

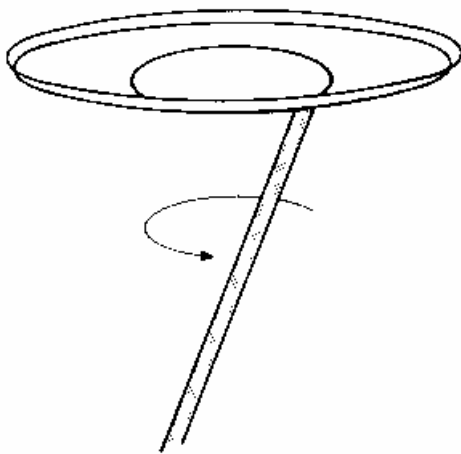
- **Friktionsantrieb:**

Der bekannteste durch Frikktion betriebene Kreisel ist der sog. Whizzer- Kreisel. Dabei handelt es sich um ein kugelförmiges Plastikgehäuse, in dem eine Schwungscheibe drehbar gelagert untergebracht ist. Die Achse ragt aus dem Gehäuse heraus und ist an einem Ende mit einem Gummiwulst versehen (Abb. 10). Indem dieser Wulst über eine Unterlage geschoben wird, läßt sich der



**Abb. 11:** Durch exzentrisches Schieben mit Hilfe eines gebogenen Stabs, gerät dieser Plastikhut- Kreisel sich vorwärts bewegend in Drehung

Kreisel auf hohe Touren bringen, ohne daß man es ihm äußerlich ansieht. Führt man jedoch Bewegungen mit dem zunächst ruhig in der Hand liegenden Kreisel aus, die eine Lageänderung der



**Abb. 12:** Durch schnelles Entlangführen eines Stabes am unteren äußeren Rand eines Tellers, läßt sich dieser Drehung versetzen

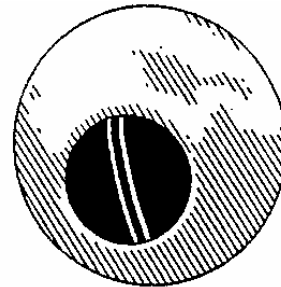
Kreiselachse zur Folge haben, so wird er durch heftige Reaktionen, die sich als Rückwirkungen auf das Handgelenk bemerkbar machen, gewissermaßen "aus dem Schlaf gerissen".

Eine interessante Variante des Friktionsantriebs ist in einem Kreiselspielzeug realisiert, das durch exzentrisches Schieben mit Hilfe eines vorne gebogenen Stocks in Drehung gebracht wird (Abb. 11). Selbst ein Teller kann zu einem Kreisel werden. Dazu muß der Teller auf einen Stab gesetzt und dieser sehr schnell an der Innenseite des unteren Tellerrandes entlang geführt werden. Da der Rand an einem normalen Teller meist sehr flach ist, erfordert der "Tellertanz" große Geschicklichkeit. Auf dem Spielzeugmarkt wird daher ein eigens dafür geschaffener Plastikteller angeboten mit dem diese "Nummer" fast auf Anhieb und ohne Bruch gelingt. (Abb. 12).

Schließlich sei noch der mit Dyna-Bee bezeichnete Kreisel genannt ([12],[13]). Er wird dadurch auf Touren gebracht, daß man den etwas aus dem ragenden Rotor in Gehäuse herausragenden Rotor einige Male über Bewegung gesetzt. eine raue Unterlage reibt (Abb. 14).

- **Antrieb durch äußere Bewegungen:**

Wichtiger als der Friktionsantrieb ist bei Dyna-Bee (Abb.13 u. 14) die Aufrechterhaltung der



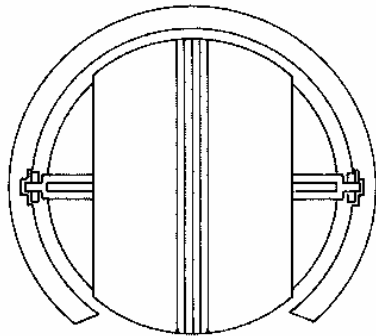
**Abb. 13:** Dyna- Bee wird durch Reiben des aus dem Gehäuse ragenden Teils des Rotors in Bewegung gesetzt

Drehung durch geeignete Handbewegungen [13]. Nachdem der Kreisel "angeworfen" worden ist, läßt sich durch geschicktes Schwenken des Kreiselgehäuses ein äußeres Drehmoment so auf den Kreisel übertragen, daß die Bewegung nicht nur aufrechterhalten, sondern darüber hinaus noch erheblich gesteigert werden kann. Die Drehzahl des Kreisels kann so hoch werden, daß die Handhabung zu einer anstrengenden sportlichen festen Gehäuse aufgehängt. Übung ausartet.

Aber auch ein normaler Kreisel läßt sich mit einigem Geschick durch Bewegungen des "Bezugs-systems" antreiben. Dazu wird der Kreisel zunächst auf einem Brett auf eine der üblichen Wei-



sen in Drehung versetzt. Durch Dreh- und Kippbewegungen des Brettes kann man dann ein äußeres Drehmoment auf den Kreisel einwirken lassen, so daß dadurch nicht nur die Drehbewegung aufrechterhalten, sondern der Kreisel auch noch weiter beschleunigt werden kann.



**Abb. 14:** Querschnitt durch Dyna- Bee. Der Rotor ist leichtgängig im festen Gehäuse aufgehängt.

- **Drillantrieb:**

Ähnlich wie bei einem Drillbohrer kann man manche Kreisel dadurch zum Drehen bringen, daß man eine schneckenförmig gewundene Schubstange hoch und runter bewegt. Das wohl bekannteste Beispiel eines Kreisels mit Drillantrieb ist der Blechbrummkreisel.

- **Schwerkraftantrieb:**

Es gibt Kreisel, die eine magnetische Achse besitzen. Sie lassen sich an Eisendrähten "aufhängen". Werden sie dabei gleichzeitig der Schwerkraft ausgesetzt, so beginnen sie, an dem Eisendraht herunterzurollen und, nachdem sie das untere Ende erreicht haben, aus Trägheit wieder ein Stück hinaufzurollen. Dreht man den Draht jeweils dann um, wenn der Kreisel das Ende erreicht hat, so kann man ihn auf diese Weise ständig in Rotation halten. In labyrinthartig verschlungenen Drahtgestellen (z.B. Spiraculum, Radiaculum [11]) kann der Magnetkreisel zu äußerst kunstvollen Bewegungen veranlaßt werden.

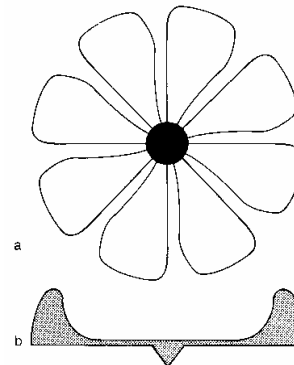
- **Aerodynamischer Antrieb:**

Es gibt Kreisel, die mit einem turbinenartigen Profil ausgestattet sind. Bläst man Luft auf das Profil, so wird der Kreisel in Rotation versetzt. Auch dieser Kreisel kann durch wiederholtes Anblasen in ständiger Drehung gehalten werden (Abb. 15).

- **Elektromagnetischer Antrieb:**

An ein Perpetuum mobile wird man durch einen Kreisel erinnert, der auf einem uhrglasförmigen

Podest chaotische Bahnen durchlaufend, ohne Ermüdungserscheinungen rotiert. Ursache für dieses Verhalten, das dem Kreisel auch den Namen Wunderkreisel eingebracht hat, ist zum einen ein batteriegespeister elektromagnetischer Antrieb, der in dem Podest untergebracht ist. Zum anderen enthält der kleine Plastikkreisel selbst einen scheibenförmigen Permanentmagneten. Wird der Kreisel zunächst mit den Fingern auf dem Podest in Rotation versetzt, so steuert er durch sein

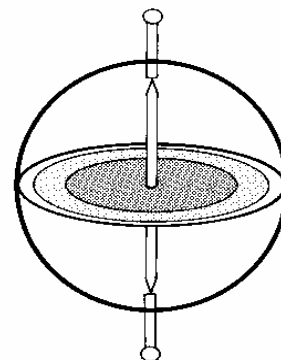


**Abb. 15:** Turbinen-Kreisel a: in Aufsicht b: im Querschnitt.

bewegtes Magnetfeld auf induktive Weise einen Transistor an und schaltet im Takt der Drehung einen durch eine Spule fließenden elektrischen Strom an und aus. Das dadurch im selben Rhythmus aufgebaute magnetische Feld übt ein antreibendes Drehmoment auf den Kreisel aus [14].

## Gyroskop

Bei dem schon erwähnten Gyroskop [11] handelt es sich um einen sehr präzise gearbeiteten, reibungsarm in einem festen Metallgestell gelagerten Kreisel mit schwerer Schwungscheibe (Abb. 16). Diese kann durch Abziehen einer um die Kreiselachse gewickelten Schnur in verhältnismäßig schnelle und lang anhaltende Drehung versetzt werden. Er ist daher für genauere Untersu-

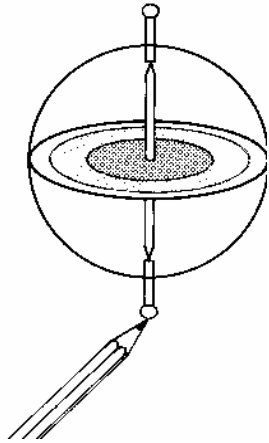


**Abb. 16:** Gyroskop. Der Rotor ist leichtgängig in einem festen Gestell untergebracht

chungen im Rahmen des Physikunterrichts besonders geeignet.

Einige einfache Experimente sollen hier kurz skizziert werden:

Setzt man den rotierenden Kreisel mit der Spitze auf den Rand eines Weinglases, einer Bleistiftspitze (Abb. 17) oder einer gespannten Schnur so scheint er auf beeindruckende Weise wie ein Hochseilakrobat der Schwerkraft zu trotzen. Selbst dann noch, wenn er aufgrund der Energie-



**Abb. 17:** Gyroskop auf einer Bleistiftspitze rotierend

dissipation bereits unter einem großen Winkel präzediert, bleibt er mit seiner Spitze wie angewurzelt auf der schmalen Unterlage fixiert.

Das Gyroskop wird meist in einer festen, würfelförmigen Plastiksachtel geliefert, in die es gerade mit diagonal ausgerichteter Achse hineinpaßt. Legt man den aufgezogenen, schnell rotierenden Kreisel in die Schachtel und verschließt sie, so zeigt die äußerlich harmlos erscheinende Schachtel überraschende Verhaltensweisen. Beispielsweise kann sie auf einer Ecke oder Kante stehen, ohne umzufallen. Sie beginnt sogar wie von unsichtbaren Kräften geleitet zu rotieren und zu präzedieren. Daß die Schachtel "dynamisch aufgeladen" ist, kommt auch dadurch zum Ausdruck, daß sie sich gegen Änderung der Orientierung im Raum durch heftige Ausweichbewegungen zu "wehren" versucht.

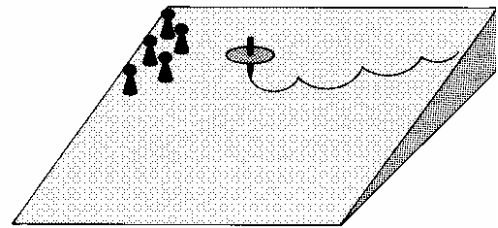
Einen sichtbaren Eindruck von den hinter diesem Verhalten stehenden Vorgängen gewinnt man, wenn man mit dem rotierenden, waagrecht an einem Faden hängenden Gyroskop durchs Zimmer geht. Jede Richtungsänderung - und sei sie noch so unauffällig - registriert das Gyroskop durch entsprechende Änderungen im Rotationsverhalten. Von diesem Phänomen ausgehend könnte man zu einem Verständnis der Funktionsweise eines Kreiselskompasses anleiten [6].

Überraschende Phänomene lassen sich immer dann hervorrufen, wenn es zu einer Kombination verschiedener Drehimpulse kommt. Beispielsweise kann man das Gyroskop auf einen rotierenden Plattenteller stellen, mehrere Gyroskope zu einem Gebilde zusammensetzen oder das Gyroskop verschiedenen Wurfbewegungen aussetzen.

## Kreiselspiele

Die überraschenden und meist unvorhersehbaren Kreiselp Phänomene werden in zahlreichen Spielen ausgenutzt.

Bei dem Kegelspiel Romba (Abb. 18) besteht die



**Abb. 18:** Romba- ein Kreiselspiel. Der Kreisel bewegt sich in Zykloiden senkrecht zur Falllinie

Aufgabe darin, die an der einen Seite einer leicht geneigten Ebene stehenden kleinen Kegel mit Hilfe eines Kreisels zum Umkippen zu bringen, der an der gegenüberliegenden Seite des Brettes gestartet wird [15]. Überraschenderweise bewegt sich der Kreisel nicht etwa die schiefe Ebene hinab, sondern weicht der in der Falllinie wirkenden Schwerkraft senkrecht aus und bewegt sich auf einem zykloidenförmigen Weg auf die gegenüberliegenden Kegel zu. Interessant ist, daß der Kreisel dabei häufig so gut wie keine Höhe verliert und Kreisel erreichen kann, die auf seiner Starthöhe liegen. Natürlich geht der Gewinn an potentieller Energie zu Lasten der Rotationsenergie. Dadurch wird ebenso wie durch die Reibung die Laufzeit des Kreisels erheblich vermindert.

Ein auf demselben Prinzip beruhendes Kreiselspiel ist zur Zeit unter dem Namen Toupie-Golf (also Kreisel-Golf) auf dem Markt. Es handelt sich um eine leicht konkav gewölbte und mit einem erhöhten Rand abgeschlossene Scheibe, die an der höchsten Stelle ein Loch besitzt. Aufgabe ist es, den auf dem Teller zum Rotieren gebrachten Kreisel durch Neigen des Tellers in das Loch zu manövrieren. Wegen der dabei auftretenden ungewohnten Reaktionen des Kreisels (senkrecht Ausweichen) und der Notwendigkeit, darauf schnell reagieren zu müssen, stößt der ungeübte Spieler auf ähnliche Schwierigkeiten wie bei der Kontrolle von Bewegungen in einem Spiegel.

Ein weiteres bekanntes Kreisel­spiel ist das Kreiselroulette. Das Spiel besteht aus einer flachen Holzschale, auf der sich farbige Kugeln befinden. Bringt man den mit scharfen Ecken versehenen Kreisel auf der Schale in Drehung, so stößt er wahllos mit Kugeln zusammen und befördert sie gegebenenfalls in Löcher am Rande der Schale. Die Löcher sind mit Zahlen versehen, mit denen die einzelnen Treffer bewertet werden. Gewonnen hat derjenige, der auf diese Weise die höchste Punktzahl erreicht. Abgesehen davon, daß man den Kreisel in möglichst schnelle Drehung versetzen muß, damit er möglichst lange rotiert und möglichst viele Kugeln trifft, wird der Spieldangriff vor allem durch Zufall bestimmt.

Schließlich sei noch ein Spiel erwähnt, das unter dem Namen Turbo-Kreisel erhältlich ist. Mehrere Personen versuchen, jeweils einen turbinenförmigen Kreisel durch Anblasen (mit einem Trinkhalm) auf einer flachen Schale in ständiger Bewegung zu halten. Schwierigkeiten bereiten dabei besonders die Zusammenstöße mit gegnerischen Kreiseln. Sieger ist derjenige, der seinen Kreisel am längsten im Spiel hält.

### Weiteres Spielzeug mit Kreiselmechanismus

In zahlreichen Spielzeugen, die aufgrund ihres Aussehens und ihrer Handhabung nicht als Kreisel gelten, werden Kreiseffekte ausgenutzt. Die bekanntesten seien hier genannt:

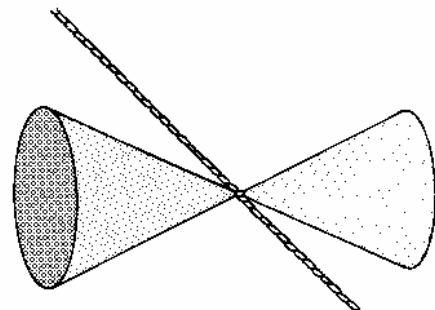
Das Jojo ist ein seit Jahrhunderten sehr bekanntes und weltweit verbreitetes Spielzeug, das im wesentlichen aus zwei auf einer Achse befestigten Schwungscheiben besteht ([16]-[19]). Um das Achsenstück zwischen den Scheiben wird eine (mit dem einen Ende an der Achse fixierte) Schnur gewickelt. Hält man das andere Schnurende fest und läßt das Jojo los, so läuft es - sich langsam beschleunigend - an der Schnur hinab. Nachdem das fixierte Schnurende erreicht ist, läuft es wieder ein Stück an der Schnur herauf, indem es dieselbe wieder aufwickelt. Durch einen Ruck an der Schnur im Moment der Bewegungs­umkehr kann man dafür sorgen, daß das Jojo sich wieder vollständig aufrollt. Auf diese Weise kann das Jojo in ständiger Auf- und Abbewegung gehalten und darüber hinaus durch zusätzliche Bewegungen des Fadens zu kunstvollen Kapriolen veranlaßt werden.

Bei manchen Jojos ist die Schnur nicht an der Achse fixiert, sondern nur durch eine Schlaufe gehalten. Wenn die rotierende Scheibe das Ende der Schnur erreicht steigt sie nicht wieder auf, sondern rotiert auf der Stelle weiter. Man spricht wieder vom "Schlafen" des Spielzeugs. Durch einen Ruck am Faden (Erhöhung der Reibung),

kann es aber wieder zum Leben und das heißt zum Hinaufklettern an der Schnur veranlaßt werden. Mit einem solchen Jojo läßt sich eine Vielzahl interessanter Bewegungsfiguren realisieren [19]. Zur Zeit ist außerdem ein so genanntes Yomega Yo-Yo auf dem Markt [11], das mit Hilfe eines Zentrifugalmehanismus bei Überschreiten einer bestimmten Geschwindigkeit die Schlafstellung auslöst und wieder aufhebt, sobald in der Schlafstellung die kritische Geschwindigkeit wieder unterschritten wird.

Der Maxwellsche Papagei [11] ist eine Variante des Jojos, die einem von Maxwell entwickelten Rad nachempfunden ist, das als Demonstrationsgerät Eingang in die Physiksammlungen der Universitäten und vieler Schulen gefunden hat. Im Unterschied zum Jojo sitzt des Schwungrad, in diesem Fall in der Form eines Papageis, in der Mitte einer längeren Achse, und statt einer Schnur in der Mitte werden zwei Schnüre an den beiden äußeren Achsenden auf- und abgewickelt. Aufgrund des großen Trägheitsmoments des Papageis beeindruckt der Vogel durch eine verhältnismäßig kleine Dreh- und Sinkgeschwindigkeit, die kaum erwarten läßt, daß sich der Vogel nach Durchlaufen des Minimums wieder so hoch an der Schnur "hinaufzuhangeln" vermag.

Das Diabolo (Abb. 19) besteht aus zwei mit den

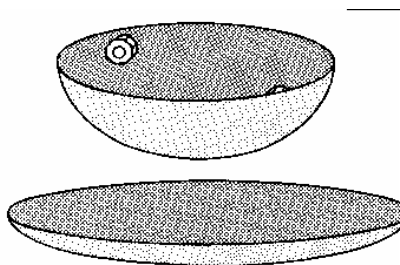


**Abb. 19:** Ein auf einem Seil mit raumfester Achse rotierender Diabolo

Spitzen vereinigten Kegeln. Indem man das Diabolo an seiner engsten Stelle auf eine mit zwei Stöcken gehaltene Schnur legt und diese vorsichtig hin- und herzieht, gelingt es aufgrund der Reibung zwischen Schnur und Spielzeug dieses in so schnelle Drehung zu versetzen, daß die Achse stabil bleibt und das Diabolo auf der Schnur "zum Tanzen" gebracht werden kann. Entscheidend für den Schnurantrieb ist, daß man durch mehr oder weniger schnelles Ziehen die Reibungskraft so variiert, daß sie in einer Zugrichtung stärker ist als in der anderen.

Der keltische Wackelstein ist ein asymmetrisches Gebilde, das an einen in Längsrichtung durchge-

schnittenen Ellipsoid erinnert (Abb. 20). Versetzt man es in Drehung, so zeigt es die verblüffende und physikalisch nur schwer zu erklärende Eigenschaft, eine Drehrichtung zu bevorzugen: In der einen Richtung dreht es sich ohne Probleme. Ver-



**Abb. 20:** Keltischer Wackelstein in zwei verschiedenen Formen

sucht man es in Gegenrichtung kreisen zu lassen, so fängt es nach wenigen Drehungen an zu schaukeln, um schließlich doch noch in der bevorzugten Richtung zu drehen ([20], [21]).

Ein heute nicht mehr so bekanntes Spielzeug mit Kreiseffekt ist die Cusanuskugel. Es handelt sich um eine Kugel mit exzentrisch gelagerten Schwerpunkt bzw. um eine homogene Halbkugel, die um ihre Symmetrieachse in Drehung versetzt und dabei auf den möglichst glatten Boden geschleudert wird. Die Cusanuskugel beschreibt dann einen spiralförmig sich verengenden Weg. Ziel des bereits von Nikolaus von Cusa (daher der Name) diskutierten Spiels [15] ist es, in einer entsprechenden Spirallinie angeordnete Kegel zum Umkippen zu bringen.

## Alltagskreisel

Zahlreiche Gegenstände des Alltags lassen sich aufgrund ihrer Form als Kreisel "mißbrauchen". Zum Beispiel:

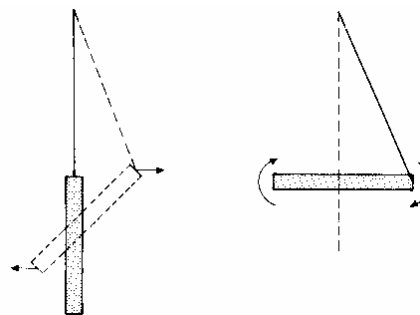
- Beim sogenannten Plätteln versetzt man einen flachen Stein in schnelle Rotation und läßt ihn mit der etwas schräg angestellten flachen Seite auf der Wasseroberfläche eines Gewässers auftreffen. Statt wie jeder andere schwere Gegenstand sofort unterzugehen, prallt der rotierende Stein in zunehmend kleiner werdenden Sprüngen mehrmals wieder von der Wasseroberfläche ab, bis die Rotationsenergie "aufgebraucht" ist. Die Abnahme der Energie läßt sich an den immer kürzer werdenden "Sprüngen" des Steins erkennen. Hier wird u.a. die Achsenstabilität des rotierenden Steins ausgenutzt, um ihn stets mit der flachen Seite auf dem Wasser auftreffen zu lassen, wodurch der Stein einen maximalen Widerstand erfährt und besonders gut reflektiert wird.

Interessant ist dabei außerdem die Beobachtung, daß der Stein eine leichte Links- oder Rechtskurve auf der Wasseroberfläche beschreibt, je nachdem ob er rechts- oder linkshändig abgeworfen wird. Dieses Verhalten beruht auf dem typischen senkrechten Ausweichen eines rotierenden Objekts: Dadurch daß der Stein aufgrund der Schrägstellung vor allem mit dem hinteren Teil auf dem Wasser aufschlägt, erfährt er ein Drehmoment um eine Achse quer zur Bewegungsrichtung. Infolgedessen machen sich Seitenkräfte bemerkbar, die zu einem Auslauf in einer gekrümmten Bahn führen.

- Eine ähnliche - wenn auch gerade in umgekehrter Richtung wirkende Ablenkung- kann man beispielsweise bei einem - wie ein Diskus rotierend- geworfenen Bierfilz beobachten. Aufgrund der schrägen Anstellung, ruft der Luftwiderstand ein den Filz weiter aufrichtendes Drehmoment hervor, das sich - wiederum infolge des senkrechten Ausweichens - in einer seitlichen Kippbewegung bemerkbar macht. Ein rechtshändig geworfener Bierfilz dreht sich linksherum.

- Eine Münze, ein Deckel oder ein Rad, um die lange Achse in Drehung versetzt, kann aufgrund der kleinen Berührstelle mit der Unterlage ziemlich lange in diesem Drehzustand verbleiben. Ist die Rotationsenergie schließlich fast aufgebraucht, so fällt das Objekt nicht plötzlich um in die stabile Ruhelage, sondern nähert sich ihr langsam an durch torkelnde Abrollbewegungen [22]. Auffallend ist dabei, daß ähnlich wie bei einem zur Ruhe kommenden hüpfenden Ball die Frequenz (hier: die Abrollfrequenz) immer größer wird. Dieser Sachverhalt macht sich darin bemerkbar, daß das Geräusch aufgrund der Reibung mit der Unterlage in der Tonhöhe ansteigt.

- Ein an einem rotierenden Faden (z.B. durch die Rückstellkraft einer starken Verdrillung hervorgerufen,) hängender länglicher Stab stellt sich fast



**Abb. 21:** Ein an einem Faden hängender länglicher Stab wird - in Drehung versetzt - instabil und geht in eine nahezu waagerechte Lage über

waagrecht (Abb. 21): Durch die Rotation wird das System instabil. Eine kleine Abweichung von der Senkrechten führt dazu, daß der Stab eine Kreisbewegung beschreibt. Infolgedessen werden die beiden Enden des Stabs trägheitsbedingt (siehe oben) nach außen gedrängt, was zu einer der Schwerkraft entgegengesetzten und damit den Schwerpunkt des Systems hebenden nahezu waagerechten Ausrichtung des Stabes führt. (Dieser Vorgang ähnelt sehr stark dem an der Kugelwippe [23] zu beobachtenden Hochrollen einer Kugel).

Versieht man den rotierenden Faden mit einer Schlaufe oder hängt man eine geschlossene Kette daran, so richten sich Faden oder Kette nicht nur fast waagrecht aus, sondern nehmen auch noch eine stabile Kreisform an. Von diesem Effekt wird übrigens beim Werfen eines Lassos Gebrauch gemacht.

- Schließlich sei noch folgendes Phänomen erwähnt: Ein liegendes Ei kann durch einen kleinen Trick dazu veranlaßt werden, aufrecht zu "stehen". Dazu muß es nur in genügende schnelle Drehung versetzt werden. Im Unterschied zum rotierenden Stab richtet sich das Ei auf und rotiert dann, um die lange Achse bis die Rotationsenergie dissipiert ist. Dieser im Falle eines ruhenden Eis labile Zustand wird durch eine Rotation dynamisch stabil. Dabei spielen Reibungsvorgänge eine ähnlich konstruktive Rolle wie beim Stehaufkreisel.

### Zusammenwirken verschiedener Effekte

Die Kombination von Kreiselwirkungen mit anderen physikalischen Effekten kann zu völlig neuartigen Phänomenen führen. Erwähnt wurde bereits die Rolle der Reibung beim Stehaufkreisel. Hinzugefügt seien hier das Zusammenspiel der magnetischen Anziehungskraft mit der Rotation beim Magnetkreisel und des Luftwiderstands mit dem Effekt des senkrechten Ausweichens bei aerodynamischen Kreiseln wie etwa der Frisbee-Scheibe und dem Bumerang.

### Magnetkreisel

Der schon bei den Kreiselantrieben genannte Magnetkreisel besteht aus einem Rotor mit einer magnetischen Achse. Mit ihm lassen sich einige auf den ersten Blick merkwürdig erscheinende Phänomene hervorbringen.

Schiebt man ein leichtes, flaches Eisenblech an die rotierende Achse, so wird das Blech je nach seiner Form in lebhafte Hin- und Herbewegungen oder Drehbewegungen versetzt. Im Falle des als Spielzeug erhältlichen Magnetkreisels wird beispielsweise eine Metallschlinge in schlängelnde

Stoßbewegungen versetzt oder eine Art Uhrzeiger je nach Drehrichtung des Kreisels links oder rechtsherum gedreht.

Diese Phänomene sind das Ergebnis eines Wechselspiels zwischen Rotation, Reibung und magnetischer Anziehung: Ähnlich wie der Kreisel im Falle des oben erwähnten Drahtlabyrinths (z.B. Spiraculum) an dem Eisendraht entlangläuft, wird das an der Achse des Magnetkreisels anhaftende Blech an der Achse entlang gezogen. Der Kreisel bleibt aufgrund der relativ großen Reibung der Spitze mit der Unterlage an einer Stelle fixiert [24].

### Aerodynamischer Kreisel

Auch der Luftwiderstand kann auf konstruktive Weise mit den Kreiseffekten wechselwirken und Phänomene hervorbringen, wie man sie an fliegenden rotierenden Objekten, wie etwa Frisbee und Bumerang beobachten kann. Das soll hier kurz am Beispiel des Bumerangs angedeutet werden.

Der Bumerang wird dadurch gestartet, daß er aus fast senkrechter Stellung kräftig nach vorn geschleudert und gleichzeitig in Drehung um die waagerechte Achse versetzt wird. Aufgrund des Tragflügelprofils des Bumerangs erfährt er einen aerodynamischen Auftrieb, der sich in dieser senkrechten Stellung als nach der Seite wirkende Kraft bemerkbar macht. Die Ausübung einer Kraft auf ein rotierendes Objekt hat aber eine senkrechte Ausweichbewegung zur Folge. Das führt zu dem beobachteten Flachlegen des senkrecht gestarteten Bumerangs. Während sich der Bumerang allmählich flachlegt, kehrt er bekanntlich auf einer geschlossenen Kurve zum Startpunkt zurück. Diese Drehung um eine senkrechte Achse ist darauf zurückzuführen, daß der aerodynamische Auftrieb am vorderen Teil des Bumerangs größer ist als am hinteren, weil der hintere Teil stets in die durch den vorderen Teil verwirbelte Luft eintaucht [25].

Interessant ist dabei die Tatsache, daß auch der aerodynamische Auftrieb ähnlich wie die Kreiseffekte als eine Konsequenz der Trägheit angesehen werden können [26]. Denn die Auftriebskraft kommt im wesentlichen dadurch zustande, daß der vom fliegenden Bumerang erfahrene Luftstrom durch eine leichte Anstellung und ein aerodynamisches Profil eine Ablenkung nach unten und damit eine Kraftwirkung erfährt, die sich gemäß *actio gleich reatio* in einer entsprechenden Rückwirkung auf den Bumerang und das heißt im Auftrieb manifestiert. Das Flachlegen und die Kreisbahn des Bumerangs verdanken sich so gesehen einem kreativen Zusammenspiel zweier verschiedener Trägheitswirkungen.

## Literaturhinweise:

- [1] Klein, F., Sommerfeld, A.: Über die Theorie des Kreisels. Leipzig 1910.
- [2] Perry, J.: Drehkreisel. Leipzig und Berlin 1913.
- [3] Crabtree, H.: Spinning tops an gyroscopic motion. New York 1967.
- [4] Gelfert: Der Kreisel und seine Anwendungen. Berlin 1927.
- [5] Edwards, P.L.: A physical explanation of the gyroscope effect. Am. J. Phys. 45, 1194 (1977).
- [6] Scott, G.D.: Precession of a Gyro and Model of a Gyro-Compass. Am. J. Phys. 25, 80 (1957)
- [7] Del Campo, A.R.: Tippe Top continued. Am. J. Phys. 23, 544 (1955)
- [8] Pliskin, W.A.: The Tippe Top. Am. J. Phys. Am. J. Phys. 22, 28 (1954)
- [9] Kane, T.R., Levinson, D.A.: A Realistic Solution of the Symmetric Top Problem. J. Appl. Mech. 45, 903 (1978).
- [10] Cohen, R.J.: The tippe top revisited. Am. J. Phys. 45, 12 (1977)
- [11] erhältl. in der Physik - Boutique. Stark-Verlag. Postfach 1852, 8050 Freising.
- [12] Higbie, J.: The Physics of the "Dyna Bee". The Physics Teacher, 147 (1980).
- [13] Schweitzer, G.: Antrieb eines Spielkreisels durch Taumelbewegungen seines Gehäuses. Hrsg. Lehrstuhl B für Mechanik. Technische Universität München.
- [14] Berge, O.E.: Ein geheimnisvoller Kreisel. Naturwissenschaft im Unterricht 27, 132 (1979)
- [15] Dussler, G.: Spiel und Spielzeug im Physikunterricht. Frankfurt: 1933.
- [16] Boudreau, W.: Cheap and Simple Yo-Yos. The Physics Teacher p. 90 (1990).
- [17] Bürger, W.: Das Jojo - ein physikalisches Spielzeug. Phys. Bl. 39/12, 401 (1983).
- [18] Kofsky, I.L.: Yo-Yo Technics in Teaching Kinematics. Am. J. Phys. 19, 126 (1951).
- [19] Duncan Yo-Yo trick book. Duncun Toys Company. Baraboo, Wisconsin 1979.
- [20] Dammermann, W.: Keltische Wackelsteine. Physik i. u. Zeit 12/6, 178 (1981).
- [21] Bondi, H.: The rigid body dynamics of unidirectional spin. Proc. Roy. Soc. Lond. A 405, 265 (1986).
- [22] Ollson, G.: Coin Spinning On a Table. Am J. Phys. 40, 1543 (1972)
- [23] Schlichting, H.J.: Geduld oder Physik. Ein einfaches Spielzeug mit physikalischen Aspekten. In diesem Heft.
- [24] Schlichting, H.J.: Allerlei Reiberei - Freihandversuche mit Magnetkreiseln. In diesem Heft.
- [25] Schlichting, H.J., Rodewald, B.: Der Bumerang - ein Spielzeug mit verblüffenden Flugeigenschaften Praxis der Naturwissenschaften- Physik 35, 18 (1986).
- [26] Schlichting, H.J., Rodewald, B.: Ikarus' Traum und die aerodynamische Wirklichkeit. Praxis der Naturwissenschaften- Physik 35/5, 7 (1986).