

Und ewig dreht sich der Kreisel

Christian Ucke und Hans Joachim Schlichting

Es wäre schön, wenn man einen Kreisel per Hand andreht und er nicht mehr aufhört sich zu drehen. Solche ‚Ewige Kreisel‘ oder ‚non-stop-tops‘ gibt es tatsächlich. Sie verfügen über eine externe Energiezufuhr oder eingebaute Energiequelle, die eine Laufzeit von mehreren Stunden oder Tagen erlaubt. Ewig laufen sie natürlich nicht.

Ein einmal mit den Fingern oder Händen angedrehter Spielzeugkreisel kommt ohne weitere Energiezufuhr nach mehr oder weniger kurzer Zeit wieder zur Ruhe. Es ist naheliegend, in einen Kreisel einen Motor mit Energiequelle einzubauen, oder eine externe Anregung zu realisieren, so dass er lange läuft. Im Folgenden stellen wir drei Spielzeug-Dauerkreisel vor, darunter zwei Exemplare mit externer Energiezufuhr und einen mit eingebaute Energiequelle. Bei technischen Anwendungen, wie beispielsweise dem Kreiselkompass, sind derartige Konstruktionen schon lange realisiert.

Energiezufuhr von außerhalb des Kreisels

TopSecret-Kreisel, Wunderkreisel

Der Markenname TopSecret deutet auf etwas Verborgenes, nicht unmittelbar Zugängliches hin. Rein äußerlich gibt das zylinderförmige Podest, auf dem der Kreisel zum Laufen gebracht wird, auch keinen Hinweis auf den Antriebsmechanismus, der darin untergebracht ist. Dieses Geheimnis wird allerdings spätestens dann enthüllt, wenn man

den Kreisel nicht einfach nur vorgeführt bekommt, sondern selbst zum ersten Mal in Betrieb nimmt (Abbildung 1). Dann muss nämlich eine 9V-Batterie als Energiequelle in die Basis eingesetzt werden. Man erkennt auch sofort eine Spule mit Eisenkern. Daneben befindet sich etwas versteckt ein Transistor. Der kleine Kreisel (\varnothing 20mm) wird auf der etwas konkaven Plattform angedreht und erreicht schnell eine Umdrehungszahl von etwa 3000 U/min. Das kann dann einige Tage anhalten.

Grundlage für diesen Kreisel sind amerikanische Patente von 1974 und 1980 [1]. Das Funktionsprinzip ist darin klar beschrieben und mit anschaulichen Zeichnungen versehen (auch in [2] und [3]; Abb. 1b). Der Kreisel selbst enthält eine



Abb.1a: Ein Dauerkreisel mit dem Namen TopSecret; links Basis mit Kreisel, rechts das Innere der Basis. Deutlich zu erkennen eine Spule und 9V-Batterie.

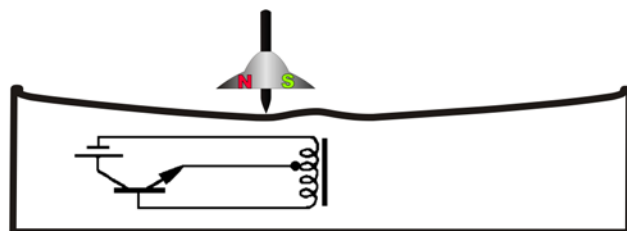


Abb.1b: Querschnitt durch den Dauerkreisel mit dem Schaltbild..

Scheibe, die in horizontaler Richtung wie ein Dipol magnetisiert ist. Läuft ein Pol des rotierenden Kreisels gerade über die darunter befindliche Spule, wird ein Spannungstoß induziert, der über einen elektronischen Schalter (Transistor) die Batterie kurzschaltet und umgekehrt in der Spule mit dem Eisenkern ein Magnetfeld induziert, das den Pol des Kreisels abstößt und ihm so jedes Mal einen ‚Schubs‘ gibt. Dabei ist es egal, in welche Richtung der Kreisel angedreht wird. Die Lauffläche des Kreisels ist uhrglasförmig gewölbt, damit der Kreisel immer wieder zum Zentrum gezwungen wird und sich nicht zu weit aus dem Einflussbereich der Energiezufuhr entfernt. Außerdem ist der Lauffläche eine kleine Barriere bzw. Erhöhung aufgeprägt, die den Lauf des Kreisels behindert und zu neuen Bahnen Anlass gibt. Dadurch wird so etwas wie ein Zufallselement in den Bewegungsablauf eingeführt.

Der Kreisel muss schnell genug angedreht werden, damit der Dipol-Magnet des Kreisels in der Induktionsspule einen genügend großen Spannungsimpuls erzeugt, der den Transistor schalten kann. Dann wird in der Induktionsspule ein Magnetfeld zur weiteren Beschleunigung des Kreisels erzeugt. Der Kreisel dreht sich dann immer schneller, bis die Verluste aus Reibung eine weitere Erhöhung der Drehzahl gerade kompensieren.

Würde man diese Schaltung unterhalb einer hinreichend dünnen ‚Tisch‘-Platte verstecken und darüber ein konkaves Uhrglas geeigneter Größe platzieren, würde der Kreisel genauso laufen. Damit könnte man etwas mehr ‚Geheimnis‘ demonstrieren und der Bezeichnung TopSecret etwas mehr gerecht werden. Das Interesse von Schülern und Lehrern über den scheinbar ewig laufenden Kreisel und die dahinter stehende, einfache Schaltung hat auch zu Publikationen zur Verwendung dieses Spielzeugs im Physikunterricht geführt [2, 3].

Levitron Perpetuator

Das physikalische Spielzeug schlechthin aus den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts ist der frei in der Luft schwebende magnetische Levitron-Kreisel (Abbildung 2) [4]. Ein Nachteil der ursprünglichen Version besteht darin, dass die maximale Schwebzeit ganz ähnlich wie die maximale Rotationsdauer bei rein mechanischen Kreiseln nur etwa vier Minuten beträgt, hauptsächlich bedingt durch Luftreibung

Die Physik des Levitrons ist von einer Komplexität, die hier nur kurz skizziert werden kann [5, 6]. Der Kreisel, selbst ein magnetischer Dipol (Abbildung 3), schwebt nur in einem eng begrenzten Höhenintervall und Drehzahlbereich stabil. Nur in der optimalen Höhe ist die abstoßende Kraft des Ringmagneten gegen den Dipol des Kreisels stark genug, um das Gewicht des Kreisels zu halten. Dafür muss der Kreisel mit einer gewissen Mindestdrehzahl ($f_k > 20\text{U/s}$) rotieren, da andernfalls die Präzession zu stark wird und der Krei-



Abb.2: Levitron-Kreisel mit Perpetuator.

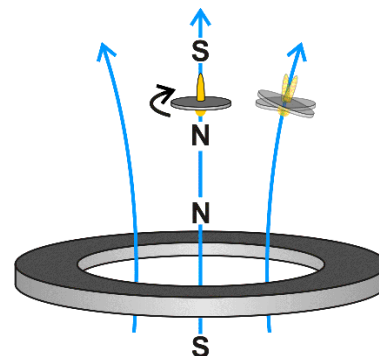


Abb.3: Levitron-Kreisel schematisch mit angedeuteten Feldlinien des unteren, ringförmigen Magneten und der Präzession des Kreisels (rechte Feldlinie).

sel umkippt und hinunter fällt. Die Drehzahl f_p der Präzession eines Kreisels ist nämlich umgekehrt proportional zur Drehzahl f_k des Kreisels. Für die stabilisierende Wirkung des Magnetfeldes des Ringmagneten gegen ein seitwärtiges Wegdriften des Kreisels ist andererseits aber eine gewisse Präzession der Kreiselachse notwendig. Und das bedingt eine Maximaldrehzahl ($f_k < 30 - 35U/s$), da bei zu hoher Drehzahl die Präzession zu klein wird. Der Kreisel würde sich dann quasi wie ein statischer Magnet verhalten und wäre gemäß dem Earnshaw-Theorem [9] nicht mehr stabil gegenüber einer horizontalen Translation. Das Earnshaw-Theorem besagt, dass es kein *statisches* Magnetfeld gibt, das magnetische Objekte in einem stabilen Gleichgewicht halten kann, insbesondere ist es nicht möglich, nur mit Dauermagneten eine stabil schwebende Konstruktion zu realisieren.

Diese notwendige Präzession kann man ausnutzen, um dem schwebenden Kreisel Energie zuzuführen und auf diese Weise Energieverluste auszugleichen. Das geschieht dadurch, dass der Kreisel aus einem gepulsten, horizontalen Magnetfeld ein Drehmoment erhält, und seine Drehzahl stabil auf etwa 28U/s gehalten wird. Das macht ein käufliches Gerät namens Perpetuator, kann jedoch auch mit Eigenmitteln (z.B. Helmholtzspulen; siehe Zusatzmaterial) konstruiert werden [6, 7, 8, 10]. Die Drehrichtung des Kreisels spielt auch bei diesem Aufbau keine Rolle.

Die in Abbildung 3 skizzierte Situation ist nicht maßstabsgerecht. Der Levitron-Kreisel bewegt sich in Wirklichkeit nur um wenige Millimeter von der zentralen Symmetrieachse des ringförmigen Magneten weg und der Präzessionswinkel der Kreiselachse beträgt kaum mehr als einige Grad.

Energiequelle im Kreisel

Non-Stop-Top

Man kann sich überlegen, dass ein Kreisel auch intern durch einen eingebauten batteriebetriebenen Motor permanent am Laufen gehalten werden könnte. Ein auf der Symmetrieachse des Kreisels eingebauter Motor müsste mit einem Exzenter ausgestattet sein, so dass der Motor selbst und mit ihm der Kreisel in entgegengesetzter Richtung rotierte. Alternativ kann der Motor selbst exzentrisch angeordnet sein. Solche Kreisel gibt es bereits. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel [11]. Mit zwei Knopfzellen (3V) läuft der Kreisel mit etwa 2000 U/min bis zu zehn Stunden. Der Motor befindet sich in der Mitte des Kreiselgehäuses unterhalb der Knopfzellen mit der Unwucht fast ganz unten (Abbildung 5), wodurch der Gesamtschwerpunkt relativ tief liegt und der Kreisel dadurch stabiler rotiert. Der Motor startet erst nach dem Andrehen mit der Hand mit Hilfe eines Fliehkraftschalters. Anfänglich präzediert der Kreisel noch, nach einigen Minuten scheint er ruhig



Abb.4: Non-stop-top 1. Der Durchmesser



Abb.5: Das Innere des Non-stop-tops 1. Der Motor mit einer Unwucht (rechts im Bild) befindet sich unterhalb der Knopfzellen.

immer auf derselben Stelle zu rotieren.

Der Kreisel dreht sich allerdings nicht um seine Symmetrieachse. Die Spitze des Kreisels wandert kreisförmig auf dem Boden um weniger als einen Millimeter herum. Das ist mit dem normalen Auge kaum wahrzunehmen, mit High-Speed-Videos aber sichtbar zu machen (siehe Zusatzmaterial).

Wegen der Drehimpulserhaltung muss der Bahndrehimpuls des Schwerpunkts der Unwucht umgekehrt gleich einem Bahndrehimpuls des Schwerpunkts des gesamten Kreisels (ohne Unwucht) sein. Da dieser eine viele größere Masse hat, ist der zugehörige Bahnradius entsprechend klein aber nicht gleich Null ($L_1 = r_1 \times p_1 = r_2 \times p_2$).

Zur konkreten Berechnung betrachten wir den Motor mit seiner Unwucht (Abbildung 6). Die Achse des Motors stimmt mit der Symmetrieachse des Kreisels überein (schwarzes Kreuz). Die Masse der Unwucht beträgt etwa 5g, die des Kreisels ohne Unwucht 80g, der Abstand des Schwerpunkts der Unwucht (blaues Kreuz) von der Motorachse etwa 4,5mm.

Die Motorachse mit der Unwucht dreht sich von oben gesehen links herum (schwarzer Kreis mit Pfeil), der Kreisel ohne Unwucht erhält infolgedessen ein entgegengesetztes Drehmoment und dreht sich rechts herum. Und beides, d.h. die Unwucht und der Kreisel, dreht sich um den gemeinsamen Schwerpunkt (rotes Kreuz) in einem Abstand von etwa 0,3mm von der Motorachse bzw. der Symmetrieachse des Kreisels (kleiner roter Kreis). Von oben auf den rotierenden Kreisel gesehen, sieht es jedoch wegen der kaum wahrnehmbaren Abweichung so aus, als wenn sich der Kreisel um seine Symmetrieachse drehen würde.

Diese Überlegung berücksichtigt allerdings nicht den Einfluss der Reibung der Kreiselspitze auf dem Untergrund.

Dieser Kreisel lässt sich nur rechts herum starten, da die Drehrichtung des Motors durch die Polung der Knopfzellen links herum festgelegt ist. Bei manchen Ausführungen derartiger Kreisel kann man die Batterien ‚falsch‘ herum einlegen und damit die Drehrichtung des Motors bzw. des Kreisels umkehren. Dieser Kreisel fasziniert insbesondere dadurch, dass man kaum Erfahrungen hat mit Objekten, die sich scheinbar von selbst drehen können. Man wird dabei leicht an Munchhausen erinnert.

Zusammenfassung

Mit externer Energiezufuhr oder interner Energiequelle (Batterien) lassen sich Kreisel konstruieren, die Stunden oder Tage lang (gefühlte ewig) laufen. Die Ursache und Aufklärung der dahinter stehenden Mechanismen fasziniert Kinder und Erwachsene. Insbesondere der über Stunden frei

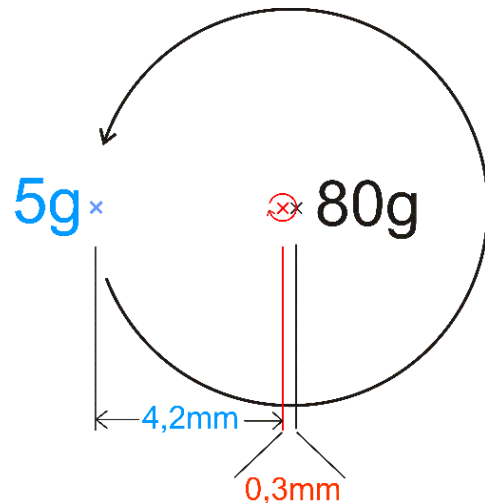


Abb.6: Lage des Schwerpunkts der Unwucht bezüglich der Kreiselachse. Man beachte den Maßstab! Der Durchmesser des Kreisels ist ca. zehn Mal größer, als der Durchmesser des schwarzen Kreisels.

schwebende und Magnetkreisel Levitron ist eine Attraktion. Aber auch der äußerlich wie ein gewöhnlicher Kreisel aussehende und wie dieser auf jeder Unterlage rotierende Non-Stop-Top fordert nicht nur den gesunden Menschenverstand, sondern auch den physikalischen Sachverstand heraus.

Stichwörter (mit diesen Stichwörtern findet man im Internet Bezugsquellen und bei YouTube Videos)

Ewiger Kreisel, Dauerkreisel, non-stop-top, perpetual top, infinity top, infinite spinning top, top secret spinning top, long spinning top, gyroscopic toy top, Levitron Perpetuator, endless Levitron

Literatur:

- [1] US Patent 3783550 Novelty electric motor (1974);
US-Patent 4200283: Magnetic spinning top game (1980)
- [2] Berge, O. E.: Ein geheimnisvoller Kreisel, *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik/Chemie* **27** (1979), 132-136
- [3] Mills, A.: The 'forever spin' top, *Physics Education* **47** (2012), 399
- [4] Ucke, C.; Schlichting, H. J.: Levitron, der schwebende Kreisel, *Physik in unserer Zeit* **26** (1995), 217
- [5] Berry, M.: The Levitron: an adiabatic trap for spins, *Proc. R. Soc. Lond. A* **452** (1996), 1207
- [6] Simon, M. D. et al: Spin stabilized magnetic levitation, *American Journal of Physics* **65** (1997), 286
- [7] EP Patent 0817363 A2, Electromagnetic drive method and apparatus for driving a rotationally stabilized magnetically levitated object (1998)
- [8] www.hcrs.at/LEVITRON.HTM
- [9] Earnshaw, S.: *Trans. Cambridge Philos. Soc.* **7** (1842), 97
- [10] www.youtube.com/watch?v=NwlvhZvtHjY
- [11] www.cyi.net

Zusatzmaterial zum Artikel ‚Und ewig dreht sich der Kreisel‘

Levitron

Der Faszination des schwebenden Levitron-Kreisels kann sich kaum jemand entziehen. Leider schwebt der Kreisel ohne Zusatzgerät nur wenige Minuten. Das vom Hersteller des Kreisels [1] angebotene Gerät mit dem sinngebenden Namen ‚Perpetuator‘ erlaubt es tatsächlich, den Kreisel ‚ewig‘ schweben zu lassen. Leider wird dieses Gerät nicht mehr produziert. In der zugehörigen Patentbeschreibung [2] sind jedoch eine Menge erklärende und hilfreiche Hinweise enthalten.

Mit den in vielen Physiksammlungen vorhandenen Helmholtzspulen lässt sich mit nicht allzu viel Aufwand ebenfalls ein dauerndes Schweben realisieren [3]. Wir beschreiben hier unseren Aufbau ¹⁾.

In Abbildung 1 sind Helmholtzspulen (Phywe, \varnothing 40cm; 154 Windungen/Spule), ein Leistungsfrequenzgenerator, ein Amperemeter und der in der Mitte der Spulen schwebende Kreisel zu erkennen. Zwischen den Spulen wird ein sinusförmig gepulstes, horizontales Magnetfeld erzeugt. Bei der im Bild ersichtlichen Frequenz von 39,6Hz und einer Stromstärke von 0,28A blieb der Kreisel stabil schweben. Der Kreisel selbst hatte dann eine Drehzahl von 29U/s (siehe Video 1; Video mit 420 Bildern/Sekunde aufgenommen). Interessanterweise ist die Frequenz des Generators nicht gleich oder ein ganzzahliges Vielfaches der Drehzahl des Kreisels.

Die Kreiselachse selbst hat eine Länge von 3,2cm (Unterseite bis Spitze). Die Unterseite des Kreisels schwebte in einer Höhe von 5,0 bis 5,5 cm über der Plattformoberfläche.

Die Frequenz des Leistungsgenerators ließ sich beim schwebenden Kreisel von 25 bis 52 Hz verstellen, die Drehzahl des Kreisels bewegte sich in einem Bereich von etwa 21 bis 32U/s. An den Bereichsgrenzen schwebte der Kreisel kaum noch stabil, der Präzessionswinkel der Kreiselachse wurde bei den niedrigen Frequenzen sichtbar größer (siehe Video 2; \sim 22U/s; Video mit 420 Bildern/Sekunde aufgenommen), was ja letztlich der Grund für das Umkippen des Kreisels bei niedriger werdenden Drehzahlen ist. Die Stromstärke wurde zwischen 0,24A und 0,35A variiert, wobei an den Grenzen ebenfalls die Stabilität abnahm. Das – horizontale - Magnetfeld der Helmholtzspulen (ohne Levitronplattform) hatte in der Schwebehöhe bei 0,28A einen Wert von etwa 0,14mT. Der ‚Perpetuator‘ (ebenfalls ohne Levitronplattform) hat in der Schwebehöhe ein Magnetfeld von etwa 0,12mT (Erdmagnetfeld \sim 48 μ T). Das war unsere Orientierung für die Einstellung der Stromstärke. Das lässt sich heutzutage mit vielen Smartphones noch messen. Das Magnetfeld der Levitronplattform in der Schwebehöhe des Kreisels betrug etwa 3mT (besser nicht mit Smartphone messen), d.h. das gepulste, horizontale Magnetfeld, das den Kreisel antreibt, ist etwa um den Faktor zwanzig schwächer als das statische vertikale Magnetfeld der Levitronplattform.

Die hier mitgeteilten Werte können nur als Näherung verstanden werden. Bei anderen Geräten wird man nicht um ein individuelles Probieren herum kommen.

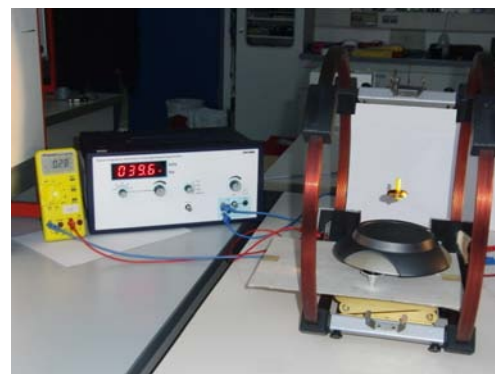


Abb.1: Helmholtzspulen mit Leistungsfrequenzgenerator, Amperemeter und dem schwebenden Levitron-Kreisel (Modell Platinum Pro).

[1] www.fascinations.com

[2] EP Patent 0817363 A2, Electromagnetic drive method and apparatus for driving a rotationally stabilized magnetically levitated object (1998)

[3] www.youtube.com/watch?v=Cd_lIIVq1eE

1) *Meinen Kollegen Dr. Karl Dressler und Sepp Kressierer von der Fakultät Physik der Technischen Universität München möchte ich für ihre Hilfe bei diesen Experimenten ausdrücklich danken.*

Non Stop Top

Leider sind Non-Stop-Tops nicht direkt in Deutschland erhältlich (Stand April 2014). Der im Artikel beschriebene Non-Stop Top ist laut Auskunft der amerikanischen Herstellerfirma ‚Can You Imagine‘ [1] nur in den USA zu bekommen.

Häufig kann man jedoch über Grossbritannien ‚Dauer-Kreisel‘ mit den im Artikel genannten Stichwörtern finden.

Das Video3_non_stop_top.avi zeigt den Non-Stop Top in einer high-speed-Aufnahme mit 420 Bildern/Sekunde. Mit geeigneten Video-Playern mit Einzelbildschaltung (z.B. VCL, Viana) ist sichtbar, dass die Spitze des rotierenden Kreisels auf dem konkaven Spiegel um weniger als einen Millimeter hin und her wandert.

[1] www.cyi.net