

Ein permanent schwingendes Foucault-Pendel für Schulen

Roland Szostak

Ein Foucault-Pendel, das den ganzen Tag läuft und anschaulich die Erdrotation erlebbar macht, ist ein ideales Mittel, um als eine Art Gesprächscenter an einem Tag der Offenen Tür allgemeines Interesse an Physik zu wecken und zugleich mit den Eltern der Schüler über das Lehren von Physik ins Gespräch zu kommen. Die Fragestellung, die das Foucault-Pendel experimentell in anschaulicher Weise beantwortet, wird im Grundsatz sehr schnell verstanden. Ein solches Pendel muss gemeinsam mit den Schülern leicht installierbar sein und zuverlässig laufen. Ein schulgerechtes Pendel, das diese Bedingungen erfüllt und bei normaler Zimmerhöhe arbeitet, wird hier im Folgenden beschrieben.

1. Ein Experiment von historischem Rang

Kulturgeschichtlich kommt dem Foucault-Pendel eine bedeutende Rolle zu, weil sich erst nach dem historischen Versuch im Pantheon in Paris das heliozentrische Weltverständnis endgültig durchsetzte. Denn trotz der Leistungen eines Kopernikus, Galilei und Kepler sowie der überzeugenden Berechnung der Bewegungen der Himmelskörper durch die Newtonsche Mechanik brauchte es Jahrhunderte, bis ein unabhängiger Beweis für das heliozentrische System gelang. Erst 1837 konnte Bessel mit der Messung der Fixsternparallaxe dieses missing link präsentieren. Dies war allerdings nur unter Aufbietung der besten Hightec-Kunst seiner Zeit möglich und insofern nur wissenschaftsintern verfügbar.

Um diese Zeit war die Newtonsche Mechanik mit der Formulierung der Coriolis-Kraft gerade bis zur Beschreibung von Kräften in rotierenden Systemen herangereift. Poisson, bei dem Coriolis seine Dissertation verfasst hatte, stellte auf dieser Grundlage erste Überlegungen zum Nachweis der Erdrotation durch ein Pendel an, schätzte die Aussichten wegen des kleinen Effektes aber als schlecht ein. In Kenntnis der Überlegungen von Poisson führte Foucault 1851 seinen Versuch dennoch erfolgreich durch. Dieser wird in der Öffentlichkeit stark beachtet und schließt damit die Beweiskette zugunsten des heliozentrischen Systems. Im Pantheon zu Rom wiederholt Pater Secci das Experiment, worauf auch der Vatikan die Erdrotation anerkennt.

2. Hürden für die Realisierung in der Schule

Trotz dieses kulturhistorischen Stellenwertes und der prinzipiellen Einfachheit des Versuchs wird das Foucault-Pendel nur

Prof. Dr. Roland Szostak, Am Roggenkamp 23, 48165 Münster, ist emeritierter Hochschullehrer am Institut für Didaktik der Physik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. Er leitet den Arbeitskreis "Astronomie und Astrophysik in der Schule" der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, vertritt als National Representative die deutsche Sektion der EAAE (European Association for Astronomical Education) und ist Mitglied der Commission for Teaching Astronomy der IAU (International Astronomical Union). Nachdruck aus MNU 55 (2002), Heft 2, 74 - 79, mit frdl. Genehmigung des Verf.

vergleichsweise selten in den Schulen aufgebaut. Aus gutem Grund, denn in vielen Fällen halten die Pendel keine saubere Schwingungsebene ein, sondern bewegen sich elliptisch. Manche Pendel drehen dabei sogar rückwärts. Als weitere Hürde erweist sich die Meinung, dass ein solches Pendel möglichst lang sein müsste. Ein solcher Platz mag sich in etlichen Fällen in einem hohen Treppenhaus finden. Aber die Montage in schwindeliger Höhe ist mit einigen Gefahren verbunden.

Da die elliptische Bewegung erst einige Zeit nach dem Start manifest wird, werden Pendel ohne Antrieb im Unterricht bevorzugt. Pendel mit permanentem Antrieb sind im Handel auch kaum erhältlich. Die Entwicklung eines Antriebs in eigener Regie ist zudem mit erheblichem Aufwand verbunden. Für den eingangs beschriebenen Zweck brauchen wir jedoch ein permanent angetriebenes Pendel. Daher müssen dessen Probleme etwas näher diskutiert werden.

3. Bekämpfung der elliptischen Schwingung

Für ein permanent angetriebenes Pendel ist es unerlässlich, das Entstehen der elliptischen Bewegung zu verhindern. Diese entsteht zwangsläufig: Ein Fadenpendel besitzt zwei Schwingungsfreiheitsgrade, und diese sind miteinander gekoppelt, weil die Bewegung an eine Kugelfläche gebunden ist. Diese Kopplung ist umso stärker, je stärker die Krümmung der Kugelfläche, also je kürzer das Pendel ist. Deswegen überträgt sich die Schwingungsenergie der einen Komponente auf die andere bei kurzen Pendeln schneller. Das macht kurze Pendel so delikate.

Solange streng nur einer der beiden Schwingungsfreiheitsgrade angeregt ist, tritt die Kopplung nicht in Erscheinung. Darum bemühen sich entsprechende Starttechniken, z. B. durch Abbrennen eines Zwirnsfadens. Sobald die Querkomponente aber auch existiert – und diese entsteht, wenn nicht beim Start so doch unvermeidbar durch leichteste Störungen –, kommt es zur Kopplung dieser Schwingungen, wobei sich eine immer deutlichere Ellipse aufbaut.

Schon Viviani, ein Schüler Galileis, hatte 1661 beobachtet, dass sich ein Fadenpendel zunehmend in einer spiraligen Bahn dem Ruhepunkt nähert. Foucault hat offenbar diese Erfahrung auch gemacht. Denn bei seinen ersten Versuchen mit einem 2 m langen Pendel im eigenen Keller ändert er aus Gründen, die er nicht erklärt, sein Konzept und verkürzt die Messintervalle. Erst das längere Pendel mit 11 m im Observatoire de Paris ergab gute Resultate und führte zu dem großen Schritt in die Öffentlichkeit mit dem 67 m langen Pendel im Pantheon. Bei dieser Länge ist diese Kopplung dann so gering und das Aufkommen der elliptischen Schwingung so langsam, dass sie keine Rolle spielte.

Bei kurzen Pendeln, die wir bei normaler Raumhöhe aufhängen, ist die Kopplung indessen so stark, dass wir in kurzer Zeit

mit der elliptischen Bewegung konfrontiert sind. Wir müssen sie also bekämpfen. Eine gute Methode ist die Verwendung eines Charron-Ringes [1]. Dabei läuft das Seil etwa 10% unterhalb der Aufhängung durch einen Ring, an den es bei jeder Schwingung leicht anstößt. Bei diesem Anstoßen wird die unerwünschte Querkomponente durch Reibung jeweils bereits im Ansatz vernichtet. Der Durchmesser des Charron-Ringes wird zweckmäßig so gewählt, dass das Seil während der letzten 10 bis 20% seiner Auslenkung anstößt. Dieser Bereich erfasst den maßgeblichen Teil der Querbewegung, die ausgelöscht werden soll.

Andere Verfahren sind diesbezüglich schwieriger zu handhaben. Man könnte die Pendelkugel beispielsweise in einen weichen Schaumstoffring hineinschwingen lassen [2]. Dieses schöne und in seiner Funktion so einfache Verfahren eignet sich jedoch nicht für den schnellen Aufbau in der Schule, sondern eher für eine feste Installation z. B. in einem Museum oder Planetarium, weil der Schaumstoffwall axial gut einjustiert und auch die Amplitude entsprechend genau eingestellt werden muss. In einem anderen Verfahren wird die unerwünschte Querkomponente durch Wirbelströme in einem Kupferblech unterdrückt [3], über das die Pendelkugel an ihren Umkehrpunkten mit einem Magneten hinwegschwingt. Ein solches kreisring- bzw. konusförmiges Kupferblech ringsherum in recht genauem Abstand anzuordnen, ist eine aufwendige Justierarbeit, so dass dieses physikalisch sehr interessante Verfahren für die Schule auch ausscheidet.

4. Der Charron-Ring

Der Charron-Ring hat sich als eine einfache und unkritische Maßnahme bewährt. In unserer bewusst schulbezogenen Ausführung wird dieser Charron-Ring mit einem Wassereimer realisiert, der aufrecht an der Decke montiert wird und in dessen Boden wir ein kreisrundes Loch geschnitten haben (Abb. 1). Dieser Charron-Ring befindet sich bei einem raumhohen Pendel gerade in der richtigen Höhe mit etwa 10% der Pendellänge. Es muss nur darauf geachtet werden, dass sich das Seil bei ruhendem Pendel mittig in der Öffnung befindet. Natürlich darf der Eimer nicht wackeln. Dieser Charron-Ring dämpft die Elliptizität so gut dass wir keine besonderen Startvorkehrungen brauchen: Kugel mit beiden Händen etwa im äquatorialen Bereich fassen, auslenken und loslassen. Das ist alles. Die leichten Störungen beruhigen sich nach kurzer Zeit.

Versuche mit Charron-Ringen, die aufwendig in Werkstätten mit einem polierten Stahlring hergestellt sind, scheitern indes eher. Als Aufhängung dient zumeist auch ein Stahlseil. Bei der geringen Reibung dieser Materialien rutscht das Seil eher, als dass es durch Reibung gehemmt wird. Diese ist aber die Voraussetzung für das Funktionieren des Charron-Ringes. Ein Charron-Ring wie bei unserem Schulpendel funktioniert da besser. Diese Kräfte sind so klein, dass selbst Pappe dadurch nicht verschleißt.

Charron-Ringe versagen bei sehr langen Pendeln zudem auch, wenn bei ihnen der prozentuale Abstand vom Aufhängepunkt zu klein ist, so dass sich die Bewegungshemmung des Seils nicht hinreichend auf die seitliche Bewegung der Pendelmasse überträgt. Ein Charron-Ring in hinreichendem Abstand ergäbe eine aufwändigere Konstruktion. Es spricht insofern auch eini-

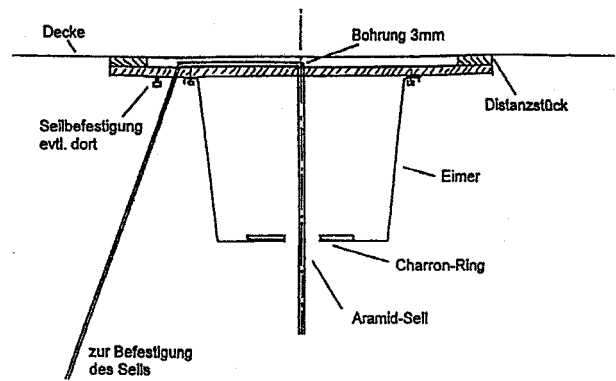


Abb. 1: Aufhängevorrichtung des Pendels an der Decke

ges dafür, ein Foucault-Pendel mit einem Wassereimer bei normaler Zimmerhöhe aufzuhängen.

5. Das Seil

Traditionell wird Klavierdraht für die Aufhängung empfohlen. Dieses sperrige Material ist einerseits unhandlich und besitzt zudem eine leichte eigene Krümmung, welche die so wichtige Axialsymmetrie der Aufhängung stört. Man könnte auf Stahllitze ausweichen. Diese benötigt jedoch beim Installieren des Pendels eine lange Entdrillungsphase, bei der es sich außerdem erheblich verlängert. Das könnte zwar durch eine mehrmalige nachträgliche Höheneinstellung behoben werden, wobei die Pendelkugel jeweils angehoben werden muss. Dabei aber verknäult sich die Stahllitze zu unauflösbaren Knoten. Und das macht die Katastrophe perfekt.

In unserer Schulversion wird ein bequem handhabbares Kunststoffseil verwendet. Kunststoffseile sind zwar reißfest, zeigen jedoch zumeist eine erhebliche Dehnung und eine sehr störende Nachdehnung. Neuerdings gibt es indes spezielle hochflexible, praktisch dehnungsfreie Kunststoffseile, die in der künftigen Fördertechnik, vom Fahrstuhl bis zum Bergwerk, Anwendung finden werden ([4], [5]). Ein solches, praktisch dehnungsfreies Aramidseil hat unser Schulpendel erst möglich gemacht.

Die Befestigung dieses Seils ist ebenso einfach wie banal: Es wird lediglich durch ein passgerechtes Loch in dem Brett hindurchgeführt (Abb. 1), an dem sich der Eimer mit der Charron-Öffnung befindet und mit dem dieser an der Decke befestigt wird. Es genügt, dieses Seil mit einem einfachen Knoten über dem Loch zu arretieren. Um auch die Höhenjustierung der Pendelkugel über dem Boden bequemer durchführen zu können, ist es zweckmäßig, das Seil ohne Knoten oben über das Brett seitlich herauszuführen und an einem Haken an der Wand zu befestigen. Wenn man die Kugel dabei leicht anhebt, kann die Höhenjustierung leicht und genau durchgeführt werden.

6. Die Pendelkugel

Bei unserem Schulpendel ist die Pendelkugel eine goldene Weihnachtsbaumkugel von 20 cm Durchmesser, die mit Sand gefüllt wird. In diese Kugel (Abb. 2) ist längs der vertikalen Achse ein Rohr eingelassen, an dessen oberem Ende das Seil befestigt ist und in dessen unterem Ende sich ein zylindrischer Permanentmagnet für den Antrieb befindet, der in seiner Höhe

einstellbar ist. Man kann die ganze Aktion im nächsten Jahr fast ohne Zeitaufwand wiederholen. Dazu braucht man nur die Kugel zu entleeren und hochzuziehen. Damit ist sie ohne Gefahr aus dem Verkehr gezogen. Um das Experiment dann wieder in Gang zu setzen, braucht man die Kugel nur herabzulassen und wieder mit Sand zu füllen. Alle weiteren Montage- und Justierarbeiten entfallen.

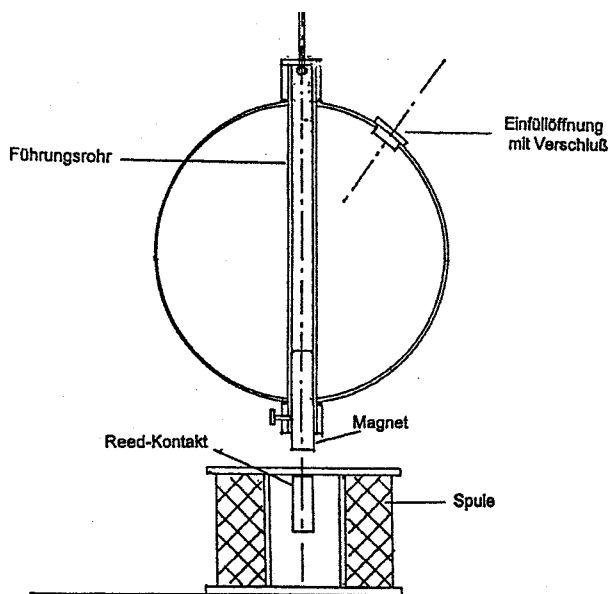


Abb. 2: Pendelkugel über der Antriebsspule

7. Der Antrieb

Für den Antrieb wird unter die Pendelkugel eine Spule auf den Boden gelegt, die sich bei jedem Pendeldurchgang kurzzeitig einschaltet (Abb. 2). Das Magnetfeld dieser Spule kann entweder die Kugel nach ihrem Nulldurchgang abstoßen oder bei ihrer Annäherung anziehen. Man kann auch beides kombinieren.

Elektronisch ist der erste Modus am einfachsten zu realisieren: Ein Detektor nimmt den Nulldurchgang wahr und schaltet den Spulenstrom ein, der sich wieder ausschaltet, wenn die Kugel den Bereich des Magnetfeldes der Spule verlassen hat. Das geschieht mit Hilfe einer Zeitkonstante, die ziemlich unkritisch ist. Im Falle des zweiten, des anziehenden Modus, muss der Spulenstrom rechtzeitig bei Annäherung der Kugel eingeschaltet und beim Nulldurchgang ausgeschaltet werden. Das Einschalten kann ebenso über eine Zeitkonstante geschehen, die aber genauer eingestellt sein muss und wegen der Schwingungsdauer von der Pendellänge abhängt.

Dem abstoßenden Modus ist aber der Vorzug auch deswegen zu geben, weil er die elliptische Bewegung zusätzlich dämpft: Wie Abb. 3 [3] zeigt, wird in seinem Fall die Bahnkrümmung einer elliptischen Bewegung verringert und die Ellipse abgebaut, während sich bei anziehendem Modus die Bahnkrümmung der elliptischen Bewegung und damit deren Bauchigkeit erhöht. Der abstoßende Modus ist außerdem vorteilhaft, weil er durch seine rückwärts drehende Tendenz die vorwärts gerichtete Präzession des "area-Effektes" (s.u.) abbaut, die ihre Ursache selbst in der Elliptizität hat.

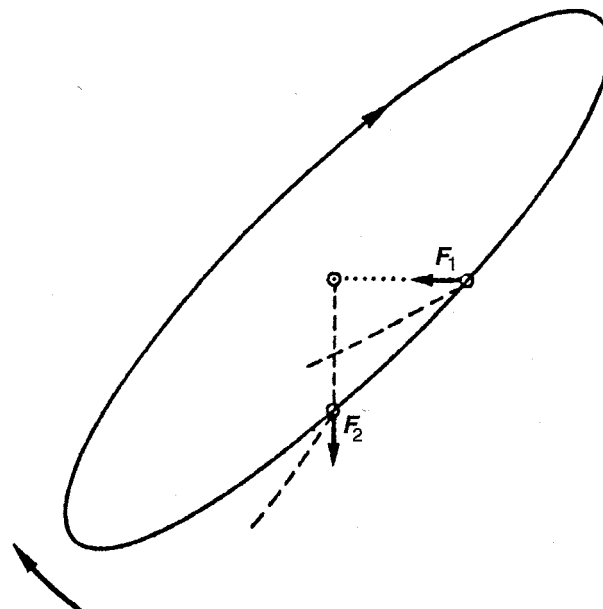


Abb. 3: Einfluss des anziehenden bzw. abstoßenden Antriebsmodus auf die elliptische Bewegung (aus [3])

8. Die Taktung

Der Antrieb benötigt ein Signal, das den Nulldurchgang des Pendels angibt. Ich habe ursprünglich eine Reflexionslichtschranke als Sensor verwendet, weil sich das von der Anschaulichkeit her nahe legt. Als nachteilig erwies sich dabei jedoch eine starke Abstandsempfindlichkeit. Das verlangte für die Höhenjustierung der Kugel eine Toleranz von wenigen Millimetern über der Spule. Außerdem spricht dieser Detektor nicht mehr an, wenn eine elliptische Komponente mit einer Queramplitude von mehr als 5 mm vorliegt, was bei einem nicht perfekten Start vorkommen kann. Außerdem kann es Störungen durch intensives Tageslicht geben. Man könnte auch die Signale einer Induktionsspule zur Taktung verwenden. Dann aber müsste den Schülern das Phänomen der Induktion bereits gut bekannt sein. Auch die Signalaufbereitung verlangt einige Kenntnisse über Verstärker.

Problemlos und zugleich sehr anschaulich ist indessen die Verwendung eines Reed-Kontaktes. Der Vorgang, wie sich zwei magnetische Zungen zu einem Kontakt schließen, wenn sie durch die Annäherung eines Magneten magnetisiert werden, wird sehr leicht eingesehen. Vorteilhaft kommt hinzu, dass der auf der Spulenchse angeordnete Reed-Kontakt in einem halbkugelförmigen Bereich von 2,5 cm Radius über der Spule anspricht. Insofern genügt es, den an der Kugel befindlichen Magneten auf einen Abstand etwa 1 bis 2 cm über der Spule einzustellen. Das ist eine bequem handhabbare Toleranz für die Höheneinstellung. Auch falls der Magnet anfänglich etwas seitlich vorbeischiebt, spricht der Reed-Kontakt verlässlich an.

9. Die Elektronik

Der Reed-Kontakt schaltet zunächst ein Relais ein, das die 2 A des Spulenstromes einzuschalten vermag. Durch ein RC-Glied wird dieser Strom nach etwa 0,2 Sekunden abgeschaltet. Dann etwa hat der vorbeischiebende Magnet den Bereich der

Spule verlassen. Schaltungstechnisch muss noch dafür gesorgt werden, dass der Kondensator anschließend entladen wird, um für die nächste Taktung bereit zu sein.

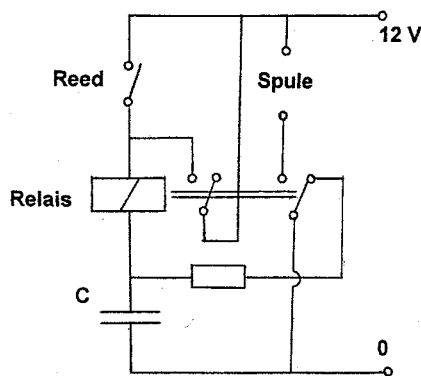


Abb. 4. Schaltbild des elektrischen Antriebs

Die Schaltung muss auch noch auf folgendes Rücksicht nehmen: Der Reed-Kontakt befindet sich notwendigerweise innerhalb der Spule. Durch den herannahenden Magneten wird er zunächst in der Richtung magnetisiert, die dieser Magnet besitzt. Das Magnetfeld des Spulenstroms ist jedoch entgegengesetzt dazu ausgerichtet, weil es die Kugel abstoßen soll. Dadurch wird der Reed-Kontakt zwangsläufig umgepoliert. Dieser öffnet sich dabei kurzzeitig und klappert. Das muss schaltungstechnisch beseitigt werden. Die Schaltung in Abb. 4 erfüllt all diese Eigenschaften.

Für einen besonders handlichen Aufbau in der Schule ist es vorteilhaft, wenn die gesamte Steuerelektronik in die Spule integriert ist, so dass eine zusätzliche äußere Leitungsführung entfällt. Das ist bei der speziell für dieses Pendel entwickelten Spule der Fall.

10. Beobachtung der Drehung der Pendelebene

Mit sorgfältigem Peilen lässt sich die momentane Schwingungsebene feststellen. Diese kann man im einfachsten Fall mit Kreide auf dem Boden markieren. Beliebiger ist vor allem das Umwerfen von Klötzchen. Man muss dabei allerdings u. U. mit gewissen Störungen rechnen. Denn der stiftförmige Teil unter der Kugel wird diese Klötzchen nie zentral sondern immer nur tangential stoßen. Ein solches Klötzchen fällt auch nicht immer beim ersten Anstoß um. Die dabei ausgetauschten Kräfte wirken in Richtung der Coriolis-Kraft, stören also gerade das, was wir beobachten wollen. Die Coriolis-Kraft entspricht aber in unserem Fall nur etwa dem Gewicht einer Briefmarke. Man wird dieses Verfahren also mit Vorsicht betrachten.

Ein berührungsloses und praktisch rückwirkungsfreies Verfahren bieten Reed-Kontakte, die als Sensoren im Bereich der Umkehrpunkte des Pendels aufgestellt werden. Durch das darüber schwingende Pendel wird eine jeweils zugeordnete Leuchtdiode eingeschaltet. Auf diese Weise wird das Fortschreiten der Pendelebene angezeigt. Wenn z. B. alle sechs Minuten die nächste Leuchtdiode eingeschaltet wird, leuchten nach einer Stunde etwa zehn solcher Leuchtdioden. Man kann, wenn man will, auch daraus überschlägig die Drehgeschwindigkeit ermitteln. Diese Art der Anzeige eignet sich besonders

für die Präsentation bei regem Publikumsverkehr, bei dem man sich während der Gespräche mit den Eltern nicht durch Messverrichtungen in Labormanier ablenken lassen muss. Wenn man Klötzchen umfallen ließe, müsste man außerdem jeweils etwa 30 Minuten bis zum nächsten Ereignis warten, weil sie nicht enger stehen können, ohne sich gegenseitig umzureißen.

Vollständigkeitshalber sei noch erwähnt, dass die Drehgeschwindigkeit der Pendelebene mit $\sin\varphi$ vom Breitengrad φ abhängt. In Deutschland ist $\sin\varphi = 0,75$ bis $0,8$. Die Pendelebene dreht dort um 360° also nicht in 24 Stunden, sondern in gut 30 Stunden. Das sind knapp 40% der Winkelgeschwindigkeit eines Stundenzeigers. Man muss also etwas Geduld aufbringen, um die Drehung der Pendelebene ohne diese Mittel zu verfolgen.

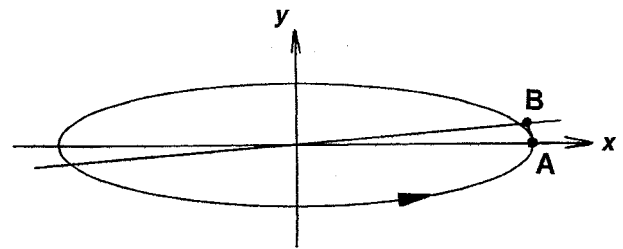


Abb. 5: Entstehung der Präzession durch unterschiedliche Schwingungsdauer der beiden Komponenten

11. Warum drehen manche Pendel rückwärts?

Verantwortlich dafür ist die elliptische Bewegung des Pendels. Man stelle sich zum Verständnis dessen eine elliptische Bewegung – von oben betrachtet wie in Abb. 5 – vor und betrachte den Beginn dieser Bewegung in A: Da die Schwingungsdauer T eines Pendels, wenn auch nur geringfügig, mit der Winkelamplitude φ_0 gemäß $T = T_0 (1 + 1/4 \sin^2(\varphi_0/2) + \dots)$ zunimmt, benötigt die Schwingung längs der x-Achse für eine volle Periode etwas mehr Zeit als die y-Komponente mit der kleinen Amplitude. Nach einer vollen Periode T der Hauptschwingung ist die Nebenschwingung also schon über ihr Periodenende T_0 etwas hinaus gelangt, d. h. die nächste Hauptschwingung beginnt im Punkt B. Die Ellipse hat sich somit in ihrer Achslage etwas gedreht, und zwar in Vorwärtsrichtung. In diesem Zusammenhang zeigt der Charron-Ring eine zusätzliche günstige Eigenschaft: Während das Seil an dem Charron-Ring anliegt, wird die Pendellänge verkürzt. Dadurch verringert sich anteilig die Periodendauer der Hauptkomponente und damit auch diese Präzession.

Diese Drehung hat also ihre Ursache in der genannten Nichtlinearität als einer inhärenten Eigenschaft des Fadenpendels und ist unabhängig davon, ob die Erde sich dreht oder nicht. Da die Ellipse aus kleinen zufälligen Störungen heraus entsteht, entwickelt sich der Drehsinn dieser Ellipse ebenso zufällig entweder rechts- oder linksherum. Diese Präzession überlagert sich der Drehung der Pendelebene, die durch die Erdrotation erzeugt wird, entweder verstärkend oder entgegengesetzt. Im zweiten Fall kann dies dazu führen, dass die resultierende Drehung sogar rückwärts verläuft, wenn die Präzession größer ist als die Drehung durch die Erdrotation.

Hierzu eine größenordnungsmäßige Abschätzung: Diese Präzession beträgt $\Omega = 3ab\pi/4l^2T$ ([6], [7]) und wird wegen der

Proportionalität zu $ab\pi$ mit den Ellipsenachsen a und b als "area-Effekt" bezeichnet (l : Pendellänge).

Sie ergibt sich unmittelbar aus der oben beschriebenen nichtlinearen Zunahme der Periodendauer mit der Amplitude. Da die Präzession proportional zu $1/l^2$ ist, muss sie bei kurzen Pendeln besonders beachtet werden. Wegen $T \sim 1/l^2$ erhöht sich diese Empfindlichkeit auf $\Omega \sim l^{-5/2}$. Verglichen zu einem 20 m langen Pendel ist also ein 3 m langes Pendel bei gleicher Amplitude a etwa hundertmal anfälliger für diese Störung.

Für ein Pendel von 3 m Länge und einer Amplitude von 0,5 m ist diese Präzession bereits ebenso groß wie die durch die Erdrotation auf unserem Breitengrad, wenn die kleine Ellipsenachse einen Wert von nur 1,5 mm (!) hat. Das vermittelt eine Vorstellung davon, wie wichtig es ist, die elliptische Bewegung erfolgreich zu unterdrücken.

12. Das Foucault-Pendel ist kein Messinstrument

Wenn man bei diesem Pendel allein den Einfluss des area-Effektes auf 10% begrenzen will, dann darf die kleine Halbachse der Ellipse nicht mehr als 0,15 mm betragen! Weitergehende Maßnahmen zur Eindämmung des area-Effektes bei besonders kurzen Pendel hat R. Crane eingehend diskutiert [6], deren Anwendung aber den Rahmen eines praktikablen Schulpendels übersteigt.

Ungleichmäßigkeiten im Lauf des Tages müssen in diese Problematik eingeordnet werden. Diese treten insbesondere auf, wenn die axiale Justierung nicht genügend genau vorgenommen wurde. Hacker weist darauf hin [8], dass eine seitlich ablenkende Kraftkomponente entsteht, wenn der Pendelmagnet infolge dieser ungenauen Justierung nicht symmetrisch durch das Magnetfeld hindurchschwingt. Entsprechend den Überlegungen zu Abb. 3 wird dadurch eine Artefaktdrehung der Pendelebene hervorgerufen. Dieser Effekt verschwindet, wenn die Pendelebene im Laufe des Tages soweit gewandert ist, dass der Pendelmagnet symmetrisch durch das Magnetfeld hindurchschwingt, und baut sich danach wieder allmählich auf. So kommt es zu einem ungleichmäßigen Fortschreiten der Pendelebene im Laufe des Tages. Eine sehr sorgfältige axiale Positionierung der Spule unter dem ruhenden Pendel ist also für den gleichmäßigen Gang eine wichtige Voraussetzung, für die man sich genügend Zeit nehmen muss.

Die genannten extremen Empfindlichkeiten machen deutlich, dass man die Genauigkeit eines Foucault-Pendels nicht überschätzen und nicht strapazieren darf. Auch die Kleinheit der Coriolis-Kraft im Vergleich zu vielen möglichen störenden Einwirkungen legt dies nahe. Man sollte also zufrieden sein, wenn die Drehung der Pendelebene auf 20% genau herauskommt. Weitere eventuelle Ungleichmäßigkeiten im Lauf des Tages müssen in diese Problematik eingeordnet werden. Entscheidend für unseren Zweck ist, dass das Phänomen der Erdrotation vor Augen geführt wird. Die Verwendung der beschriebenen Leuchtdiodenreihe erleichtert dies. Bei Interesse für weitere technische Einzelheiten wende man sich an den Autor.

13. Noch ein Tipp zur Präsentation

An einem Tag der offenen Tür herrscht viel Trubel und manchmal Gedränge. Um zu vermeiden, dass Schüler versehentlich

in das Pendel hineinlaufen, hat es sich überzeugend gut bewährt, das Pendel über einer Platte als einer Art Podest schwingen zu lassen. Dort lassen sich auch gut erklärende Texte anbringen. Übrigens: Wenn die Schüler das Pendel selbst installiert haben, werden sie es außerdem vehement gegen Eingriffe und Beschädigungen schützen.

Literatur

- [1] F. Charron: Sur un perfectionnement du pendule de Foucault et sur l'entretien des oscillations. *Astronomie (Bull. Soc. Astron. Fr.)* 45 (1931) 457.
- [2] C. A. Schwengeler. Univ. Bern, priv. Mitteilung.
- [3] G. Mastner et al. : Foucault pendulum with eddy-current damping of the elliptical motion. *Rev. Sci. Instrum.* 55 (1984) 1533.
- [4] J. W. Paelke: Pocketlift - With 208 m (682') Vertical Lift. *Bulk Solid Handling, Intern. Journ.* 3 (2000) 331.
- [5] K. Mrusek: Nach gut hundert Jahren löst sich der Lift vom Stahlseil. *FAZ* 6. Mai 2000.
- [6] R. Crane: Short Foucault pendulum: A way to eliminate the precession due to the ellipticity. *Am J. Phys.* 49 (1981) 1004.
- [7] M. G. Olsson: Spherical pendulum revisited. *Am. J. Phys.* 49 (1981) 531.
- [8] G. Hacker: Das Foucault-Pendel als Schaukastenexperiment. *MNU* 59 (1997) 471.