

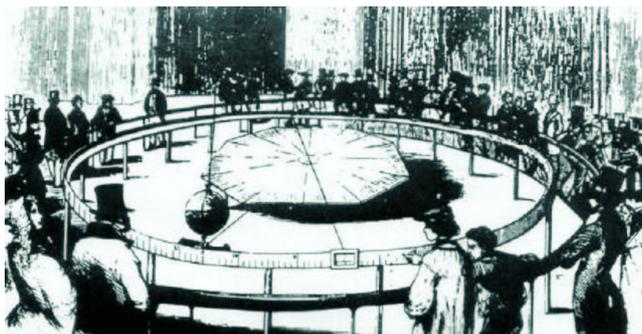
Das Foucault-Pendel im Dom zu Magdeburg

Dr. Peter Streitenberger und Dr. Eckard Specht

*Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Experimentelle Physik*

Idee und Initiatoren

Als im Jahre 1851 der französische Physiker Jean Bernard Léon Foucault (1819–1868) im Pariser Panthéon mit Hilfe eines 67 m langen und 27,4 kg schweren Pendels die Erdrotation nachwies, bezweifelten schon lange nicht mehr, dass sich die Erde um ihre Achse dreht. Mit diesem Experiment, bei dem die Schwingungsebene des Pendels gegenüber dem Erdboden eine langsame Drehung vollführt, hatte Foucault jedoch eine einfache und anschauliche Darstellung des lange gesuchten Einflusses der Erdrotation auf irdische Bewegungsabläufe gefunden. Seitdem hängen ähnliche Pendel weltweit in öffentlichen Gebäuden, Museen, Schulen und Universitäten und



Pendelversuch von Foucault im Pariser Panthéon 1851

ermöglichen es dem Besucher, jederzeit die Erddrehung zu beobachten, ihre Winkelgeschwindigkeit zu ermitteln sowie Betrachtungen über die Grundlagen der Physik und unsere Anschauung von Raum und Zeit anzustellen. Die auch heute noch anhaltende Popularität des Pendelversuchs und sein Bezug zu grundlegenden Fragen der klassischen Physik und der Stellung des Menschen im Kosmos bewog die drei Initiatoren, die Evangelische Domgemeinde, der Förderverein Dom zu Magdeburg e. V. sowie das Institut für Experimentelle Physik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, in einer gemeinsamen Aktion dieses Experiment anlässlich des 400. Geburtstages von Otto von Guericke im Jahre 2002 im Magdeburger Dom zu wiederholen.

Eine Arbeitsgruppe bestehend aus Domprediger Giseler Quast, Herrn Manfred Fiek und Herrn Rolf Schrader von der Domgemeinde, Frau Ursula Klinger und Herrn Stephen Gerhard Stehli vom Dom-Förderverein sowie Dr. Wolfram Knapp und Dr. Peter Streitenberger vom Institut für Experimentelle

Physik der Otto-von-Guericke-Universität übernahm die konzeptionelle, planerische und organisatorisch-technische Vorbereitung. Für die technische Realisierung der Pendelkonstruktion konnte Herr Prof. Dr. Lutz Schön vom Lehrstuhl für Didaktik der Physik der Humboldt-Universität zu Berlin gewonnen werden, der über umfangreiche Erfahrungen beim Bau langer Foucault-Pendel verfügt. Dank der finanziellen und materiellen Unterstützung durch die beteiligten Institutionen sowie zahlreiche Sponsoren konnte das Pendel schließlich am 23. Juli 2002 erfolgreich im Dom im westlichsten Joch des Langhauses installiert und am 1. August 2002 im Rahmen einer festlichen Veranstaltung der Öffentlichkeit übergeben werden.



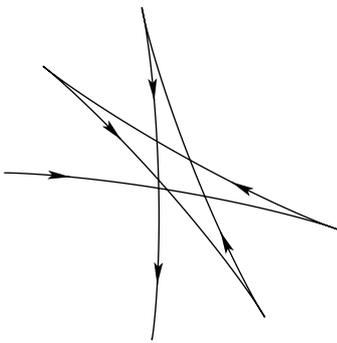
Foto: Ulrich Arendt

Die ersten Schwingungen des Foucault-Pendels im Dom

Der Foucault-Effekt

Der Bewegungsablauf fallender oder geworfener Körper auf der Erdoberfläche erfolgt nicht nur unter dem Einfluss der Schwerkraft, sondern unter der zusätzlichen Wirkung von Trägheitskräften, insbesondere der Coriolis-Kraft. Diese Trägheitskräfte sind eine Folge der Tatsache, dass die Erde kein Inertialsystem, sondern ein beschleunigtes, speziell ein rotierendes Bezugssystem darstellt. Beim freien Fall zum Beispiel äußert sich die Erdrotation in der sogenannten Ostabweichung. Diese beträgt bei einer Fallhöhe von 100 m und Vernachlässigung der Luftreibung etwa 2 cm, d. h., ein aus dieser Höhe frei fallender Körper trifft 2 cm weiter östlich vom Lotpunkt auf. Ähnliches gilt für horizontal geworfene Körper, deren Bewegung infolge der Erdrotation nicht in einer Ebene bleibt, sondern wie schon 1837 der französische Physiker Poisson zeigte, je nach Wurfrichtung eine horizontale Abweichung aufweisen. Allerdings sind diese Effekte so gering, dass sie aufgrund von Umgebungsstörungen experimentell nur sehr schwer nachweisbar sind. Foucault erkannte, dass sich diese kleinen Abweichungen bei der periodischen Bewegung eines Fadenpendels akkumulieren und in der langsamen

Drehung der Schwingungsebene des Pendels sichtbar werden. Diese Drehung oder Foucault-Präzession eines Pendels ist somit der einfachste und anschaulichste lokale Beweis der Drehung und Krümmung der Erdoberfläche. Auf Grund des Trägheitsgesetzes verhält der Pendelkörper nämlich in einem Inertialsystem – das sind in diesem Fall die Fixsterne – in demselben Bewegungszustand, solange keine äußeren Kräfte quer zur Schwingungsrichtung auf ihn einwirken. Die Schwingungsebene hat dann relativ zum Fixsternhimmel eine feste Ausrichtung, während sich die Erde sozusagen unter dem Pendel hinwegdreht. Dabei beschreibt der Pendelkörper auf der Erdoberfläche



Rosettenförmige Bahn des Pendels auf dem Erdboden

eine rosettenförmige Bahn, die auf der Nordhalbkugel im Uhrzeigersinn durchlaufen wird. Am Nordpol würde ein vollständiger Durchlauf der Rosette einen Sterntag, also $23^{\text{h}} 56^{\text{m}} 04^{\text{s}}$ dauern, dementsprechend dreht sich dort für einen irdischen Beobachter die Schwingungsebene mit der Winkelgeschwindigkeit der Erde, die $\omega_E = 15,041^\circ/\text{h}$ beträgt. Entfernt man sich vom Pol, wird die Rosette immer langsamer durchlaufen; am Äquator dreht sich die Schwingungsebene relativ zur Erdoberfläche überhaupt nicht. Das liegt daran, dass an einem Ort der geographischen Breite φ die Vertikale gegenüber der Erdachse geneigt ist. Bei der Rundreise des Pendels (und des Domes) um die Erdachse bleibt die Ausrichtung der Schwingungsebene zu den Fixsternen erhalten, während der Erdboden unter dem Aufhängepunkt eine lokale Drehung um die Vertikale mit einer gegenüber ω_E verringerten Winkelschwindigkeit $\omega_F = \omega_E \sin\varphi$ vollführt. Mit $\varphi = 52^\circ 07' 35''$ für die geographische Breite von Magdeburg (Fußpunkt der nördlichen Domspitze) erhält man für die Drehung der Schwingungsebene $\omega_F = 11,873^\circ/\text{h}$. Die Rosette wird folglich im Dom unter idealen Bedingungen in der Zeit von $30^{\text{h}} 19^{\text{m}} 16^{\text{s}}$ einmal vollständig durchlaufen.

Voraussetzung dafür ist, dass die Bewegung des Körpers möglichst vollständig in einer Horizontalebene verläuft. Dies ist bei einem Pendel nur näherungsweise der Fall, aber um so besser erfüllt, je geringer

der Auslenkwinkel des Pendels ist und es somit harmonische Schwingungen vollführt. Andererseits ist für eine gute Beobachtbarkeit des Effektes eine nicht zu geringe horizontale Auslenkung wünschenswert. Beide Forderungen lassen sich nun um so besser vereinbaren, je länger das Pendelseil ist. Außerdem ist ein langes Pendel unempfindlicher gegenüber unvermeidlichen Fehlerquellen wie zum Beispiel geringfügige Asymmetrie in der Aufhängung. Zudem muss der Pendelkörper genügend schwer sein, um den Einfluss von Reibungskräften möglichst gering zu halten.

Technische Realisierung

Als Aufhängung wurde eine rotationssymmetrische feste Einspannung gewählt. Das Seil läuft durch eine Innenbohrung eines Zylinders und ist darin mit 6 Imbusschrauben fixiert. Der Pendelkörper, eine mit Blei und Sand gefüllte Messinghohlkugel von 40 cm Durchmesser und einer Gesamtmasse von 30 kg, macht also um eine durch das Seil vorgegebene Achse die Drehung der Erde mit. Ein markanter Punkt auf der Kugeloberfläche behält unabhängig

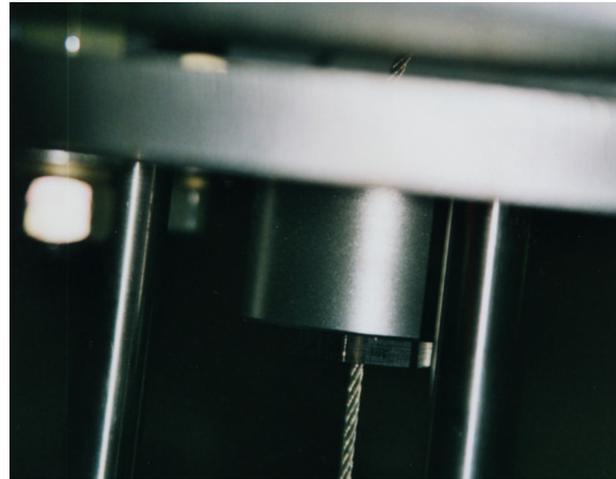


Foto: Eckard Specht

Einspannung des Pendelseils

von der Drehung der Schwingungsebene für einen irdischen Beobachter seine Ausrichtung bei. Das Pendelseil mit einer Länge von 35,89 m und einem Durchmesser von 2,6 mm besteht aus 7 Seelen, die ihrerseits aus 19 (Unter-)Seelen bestehen. Dieser filigrane Aufbau ist notwendig, um seine mechanischen Eigenschaften möglichst isotrop zu gestalten. Bei einem einfachen zylinderförmigen, gezogenen Draht bestünde die Gefahr, dass bereits durch vorhandene Materialtexturen oder Einknickungen an der Einspannstelle nach langer Biegebelastung richtungsabhängige Kräfte auftreten, die den Foucault-Effekt unterdrücken können. Der maximale Auslenkwinkel des Pendels beträgt ca. $1,7^\circ$.

1931 erfand Charron den nach ihm benannten Ring, der eine technische Neuerung darstellte. Dabei wird das Pendelseil ca. 50–100 cm unterhalb seines Aufhängepunktes durch einen exakt konzentrisch um die Ruhelage positionierten Ring geführt, an dessen leicht konisch geformter Innenseite es sich während jeder Schwingung zweimal anlegt. Die dadurch verursachte Reibung zwischen Seil und Ring unterdrückt wirksam Kräfte quer zur Schwingungsrichtung, die beispielsweise durch unsymmetrisches Anschwingen, Luftbewegungen (Zugluft vom Eingang des Doms) oder das Umstoßen der Messinghülsen entstehen. Diese störenden Kräfte würden sich letztendlich in einer ellipsenförmigen Bahn des Pendelkörpers bemerkbar machen, die sich ohne den Charron-Ring immer weiter einer Kreisbahn annähern und schließlich den Foucault-Effekt unsichtbar machen würde.



Blick von oben auf den Charron-Ring

Foto: Eckard Specht

Wer das Pendel im Dom gesehen hat, wird sich vielleicht zunächst gefragt haben: Warum schwingt es nicht wie jedes gewöhnliche Pendel aus? Denn die Reibungskräfte, die das sich bewegende Pendel in der umgebenden ruhenden Luft erfährt, müssen zwangsläufig irgendwann zum Stillstand führen. Die Antwort ist ganz einfach. Durch eine Spule, die sich unterhalb des Zentrums der Anordnung befindet, wird ein Magnetfeld erzeugt, das einen im Innern der Messingkugel befindlichen Eisenkern anzieht. Das passiert pro Schwingung zweimal und zwar immer dann, wenn sich der Pendelkörper von außen kommend auf den Mittelpunkt zubewegt. Ein Reflex-Optokoppler registriert dabei den Nulldurchgang des Pendels und ermöglicht so die Steuerung des Elektromagneten. Die infolge Luftreibung verloren gegangene Bewegungsenergie wird somit stets wieder zugeführt und die Schwingung in Gang gehalten. Dieses war selbstverständlich zu Foucaults Zeiten noch nicht möglich,

er musste sein Pendel nach einer gewissen Zeit stets aufs Neue anschwingen, der eigentlich zu beobachtende Effekt war damals dennoch zu sehen.



Gesamtansicht der Aufhängung des Pendels

Foto: Eckard Specht

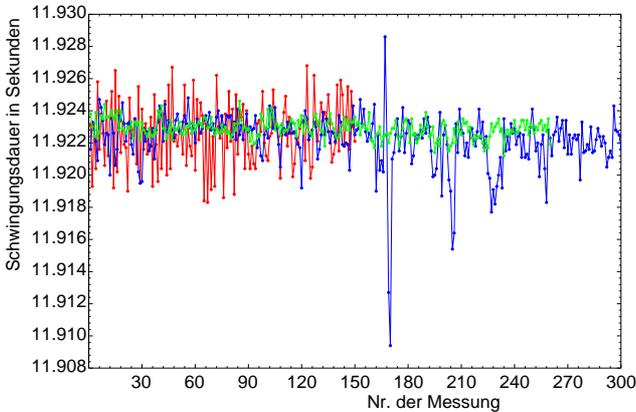
Als Anzeige der Drehung der Schwingungsebene dienen 81 Metallhülsen, die kreisförmig aufgestellt sind, so dass benachbarte Stifte in durchschnittlich $22^{\text{m}} 28^{\text{s}}$ umgestoßen werden.

Vergleich Theorie-Experiment

Interessant ist nun eine Untersuchung, ob sich das installierte Foucault-Pendel tatsächlich wie erwartet verhält. Im nächsten Bild sind dazu viele aufeinanderfolgende Schwingungsdauern – gemessen mittels einer elektronischen Lichtschranke – aufgetragen: die rote Kurve zeigt 150 Messungen am 2.8., die blaue Kurve 300 Messungen am 13.8. und die grüne Kurve 260 Messungen am 16.8.2002. Bei der roten Kurve wurde die Lichtschranke im Abstand von ca. 95 cm vom Mittelpunkt aufgestellt, bei der blauen in einem Abstand von ca. 15 cm; bei beiden herrschte reger Besucherandrang am DompPENDel. Es ist deutlich zu erkennen, dass für die jeweils ersten 150 Messungen die Standardabweichung der roten Kurve mit 0,0019 s größer ist als die der blauen Kurve mit

0,0010 s. Dies kann daran liegen, dass die Geschwindigkeit des Pendels beim Lichtschranken-Durchgang außen (rote Kurve) viel kleiner ist als in der Nähe des

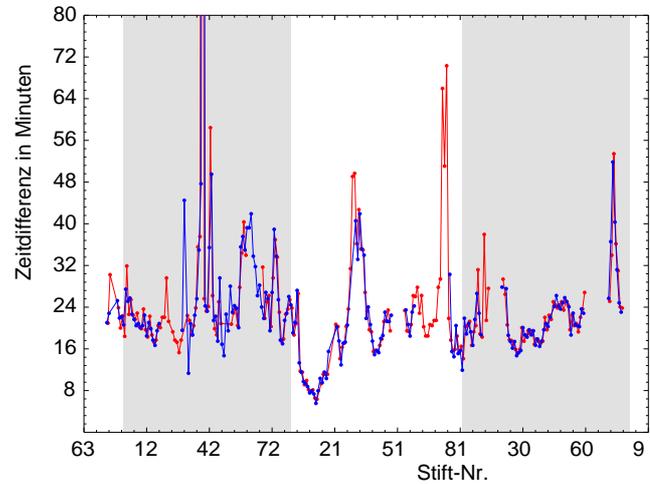
benötigte das Pendel 37,38 h, 29,60 h bzw. 31,29 h. Zumindest der Mittelwert der letzten beiden Umläufe



Fluktuationen in der Schwingungsdauer

Zentrums (blaue Kurve); bei letzterer machen sich Störungen weit weniger bemerkbar. In der zweiten Hälfte der blauen Kurve wurde untersucht, welchen Einfluss Luftströmungen von der Domeingangstür haben. Ab $n = 167$ wurde die Tür einige Minuten geöffnet, und das Pendel geriet an diesem sehr windigen Tag sofort in elliptische Schwingungen, die jedoch nach ca. 15 Minuten durch den Charron-Ring weitestgehend eliminiert wurden. Der Wind blies hierbei in Schwingungsrichtung, wodurch das Pendel zusätzlich angetrieben wurde (daher die etwas kleinere mittlere Schwingungsdauer). Die grüne Kurve wurde vor der Öffnungszeit des Doms gemessen, die Standardabweichung ist mit 0,0006 s deutlich geringer. Die Periodendauer beträgt somit 11,92289 s bei einer Standardabweichung von 0,00057 s; sie ist wegen der magnetischen Anziehungskraft ein wenig kleiner als die Schwingungsdauer eines frei schwingenden Pendels, die mit der bekannten Formel $T = 2 \pi \sqrt{l/g}$ (mit l als Seillänge und g als Schwerebeschleunigung) ermittelt wird.

Beobachtet man hingegen die Zeiten, in denen benachbarte Stifte umfallen über mehrere Tage, stellt man Erstaunliches fest. Es fällt auf, dass diese Zeiten stark schwanken: das Minimum betrug 5,5 Minuten und als Maximum wurden 4,5 Stunden(!) registriert. Im Bild entsprechen die schattierten Bereiche einer 360°-Drehung der Schwingungsebene, hierfür



Zeiten, in denen benachbarte Stifte umgefallen sind

liegt mit 30,45 h sehr nahe am theoretischen Wert von 30,32 h. Auffällig ist dabei, dass sich das Pendel mitunter länger in der Nähe der Stifte 70–80 aufhält, das entspricht der NNW-SSO-Richtung. Ursache für alle diese Abweichungen sind die schon genannten störenden Kräfte, die hauptsächlich durch Luftströmungen und eine mögliche geringfügige Asymmetrie in der Einspannung des Seils sowie des Magnetfeldes bedingt sein können.



Foto: Norbert Pernert

Umgestossene Stifte zeigen die Drehung der Schwingungsebene an