



Thema mit Variationen: Pendel

Impressum

PLUS LUCIS, Mitteilungsblatt des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts und des Fachausschusses Physik & Schule der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft (VZR: 668472729)
Erscheint vierteljährlich

Medieninhaber:

Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts
Adr.: AECC Physik Universität Wien,
Porzellangasse 4, Stiege 2, 1090 Wien
Web: <https://www.pluslucis.org>
E-Mail: schriftenleitung@pluslucis.org

Redaktion:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf

Verantwortliche Herausgeber:innen dieser Ausgabe:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf
Universität Wien, Didaktik der Physik
E-Mail: martin.hopf@univie.ac.at

Natasha Holmes, BSc. MSc. PhD.
Ann S. Bowers Associate Professor
Cornell University, Dept. of Physics
E-Mail: ngholmes@cornell.edu

Herausgeber:innenteam:

Univ.-Prof. Dr. Claudia Haagen-Schützenhöfer
Universität Graz, Physikdidaktik
E-Mail: claudia.haagen@uni-graz.at

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf
Universität Wien, Physikdidaktik
E-Mail: martin.hopf@univie.ac.at

Univ.-Prof. Dr. Anja Lembens
Universität Wien, Chemiedidaktik
E-Mail: anja.lembens@univie.ac.at

Univ.-Prof. Dr. Thomas Wilhelm
Universität Frankfurt, Physikdidaktik
E-Mail: wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Bezugshinweise:

Das Abonnement der Zeitschrift ist für Vereinsmitglieder im Mitgliedsbeitrag inkludiert.

Ein institutionelles Abonnement (z. B. für Bibliotheken) ist zum Bezugspreis von 40 Euro im Jahr möglich.

Offenlegung nach § 25 des Mediengesetzes Grundlegende Richtung: Fortbildung und fachliche Information für Physik- und Chemielehrer:innen, organisatorische Mitteilungen, Vereinsinterna.

Für die Inhalte der Artikel sind ausschließlich die namentlich genannten Autor:innen verantwortlich.

Titelbild (Umschlag):

Vindjammer
Copyright: Europa-Park

Inhalt

Kräfte am Pendel – anspruchsvoller als gedacht	4
<i>Thomas Wilhelm</i>	
Smartphone-Pendel mit elektronischer Messwerterfassung über die App „phyphox“	7
<i>Sebastian Staacks, Heidrun Heinke und Christoph Stampfer</i>	
Pendelbewegung außerhalb des Klassenzimmers.....	11
<i>Ann-Marie Pendrill</i>	
Ein Einstieg in die empirische Wissenschaft.....	17
<i>David Hammer</i>	
Eine Pendelsimulation verbessert die Lernergebnisse der Studierenden in einem Inquiry-Praktikum.....	22
<i>Doug Bonn, James Day und Joss Ives</i>	
Ein „einfaches“ Pendel-Experiment, das keines war	26
<i>Natasha G. Holmes und Brad J. Ramshaw</i>	
Das Siderische Pendel – Experimente und „Experimente“	28
<i>Wolfgang Hund</i>	
Beobachtungen des Kometen C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) aus Mexiko	31
<i>Eren Simsek</i>	

Editorial

Liebe Leser:innen,

Es ist mir eine Ehre, als Gastherausgeberin für diese Ausgabe von PlusLucis zu fungieren. Diese Artikelsammlung entstand aus meiner ständigen Besessenheit von Pendel-Experimenten, seit ich Doktorandin war. Mein Doktorvater, Doug Bonn (der auch einen Artikel zu dieser Sammlung beigesteuert hat), sagte einmal, dass er ein ganzes Praktikumsprogramm für ein vierjähriges Physikstudium entwerfen könnte, das sich um Pendelversuche dreht. Je mehr ich unterrichte und das Lernen im Labor untersuche, desto mehr stimme ich dieser Idee zu.

Das Pendel beinhaltet sowohl Ideen zu physikalischen Systemen als auch zu Systemen von Messungen, die in der gesamten Physik relevant sind. Daher kann ein Pendel für die Vermittlung einer Vielzahl unterschiedlicher Lernziele verwendet werden. So ist beispielsweise die einfache harmonische Bewegung von grundlegender Bedeutung für alle Arten von physikalischen Systemen, von der klassischen Mechanik über die Quantenmechanik bis hin zur Astrophysik. Die typische Gleichung, die man im Unterricht sieht, ist relativ einfach herzuleiten und regt die Schüler:innen zu tiefgreifenden Überlegungen über Mathematisierung, Modellierung und die diesen Prozessen innewohnenden Annahmen und Näherungen an. Ein einfaches Pendel kann mit Materialien aus dem Haushalt oder aus dem Physikraum aufgebaut werden. Die Messungen können mit der Stoppuhr oder den Sensoren Ihres Smartphones durchgeführt werden. Das Pendel hat auch nichts Verstecktes und ist auch keine Black Box – alles, was mit dem Prozess zu tun hat, ist für die Lernenden sichtbar. So können sie bewusst über Unsicherheiten, Systematik und Messungen nachdenken. Da keine ausgefallene Ausrüstung benötigt wird, sind die Schüler:innen auch weniger eingeschüchtert von dem Experiment und eher bereit, herumzuspielen.

Die Artikel in dieser Ausgabe beschreiben Unterrichtsaktivitäten und Ansätze, die sich auf ganz unterschiedliche Aspekte des Pendels fokussieren. In „Das Siderische Pendel“ verwendet Wolfgang Hund ein Pendel, um „Pseudowissenschaft“ zu diskutieren. Die Experimente der Schüler:innen führen zu widersprüchlichen oder ungültigen Ergebnissen, was eine Diskussion über unbewusste Voreingenommenheit und motivierende Doppelblindversuche erzwingt. Thomas Wilhelm übernimmt die fachliche Klärung. Er erläutert noch einmal die Physik des „einfachen“ Pendels. Wie sich herausstellt, ist das gar nicht ganz so einfach wie gedacht. In „Smartphone-



Natasha G. Holmes

Pendel mit elektronischer Messwerterfassung über die App „phyphox“ beschreiben die Autor:innen Staacks, Heinke und Stampfer die Möglichkeiten der App „phyphox“ zur Messung der Perioden eines Pendels mit einem Smartphone. Diese Aktivitäten können auch anspruchsvollere Überlegungen zu Kräften und Vektoren, die Analyse großer Datensätze und groß angelegte gemeinsame Untersuchungen mit Hunderten von Lernenden umfassen. David Hammer beschreibt in „A start to empirical science“ (Ein Einstieg in die empirische Wissenschaft) seine Arbeit mit dem Pendel, um Schüler:innen in offene Untersuchungen einzubinden und sie in authentische Praktiken und die Sinnstiftung in der experimentellen Physik einzuführen.

Ann-Marie Pendrill bringt das Pendel auf den Spielplatz und in den Vergnügungspark in „Pendelbewegung außerhalb des Klassenzimmers“. Sie gibt mehrere Beispiele für die Physik der Pendelbewegung in einer Reihe von unterhaltsamen und spielerischen Kontexten. Und abschließend beschreibe ich aus Frustration über die Voreingenommenheit der Schüler:innen gegenüber computerbasierten Messungen gegenüber einfachen menschgemachten Messungen einen gescheiterten Versuch, die Grenzen der Videoaufzeichnung der Pendelbewegung gegenüber der Verwendung einer Stoppuhr aufzuzeigen. Letztendlich war die Physik der Messungen und Wahrscheinlichkeiten viel komplizierter und nuancierter, als ich erwartet hatte, was zu einer langen Diskussion mit einem Kollegen über die Rolle wiederholter Messungen bei Systemen führte, die von Begrenzungen der instrumentellen Präzision dominiert werden.

Ich hoffe, dass Sie sich von diesen Beispielen inspirieren lassen, um die vielfältigen Möglichkeiten zu erkennen, die einfache Pendelversuche bieten, oder zumindest etwas Freude an der Faszination dieses schönen Systems finden.

Natasha G. Holmes

Kräfte am Pendel – anspruchsvoller als gedacht

Thomas Wilhelm

1. Das Pendel

Ein Fadenpendel besteht aus einem (kleinen) Körper an einem (längeren) Faden. Betrachtet man auch größere Auslenkungen, verwendet man besser ein Stabpendel mit einer näherungsweise masselosen Stange anstelle des Fadens.

Ein solches Pendel kann im Physikunterricht mehrfach vorkommen. Schon früh im Physikunterricht kann man es verwenden, um das systematische Experimentieren bzw. die Variablenkontrolle zu thematisieren. Bei nicht zu großen Auslenkungen φ_0 kann man dann feststellen, dass die Schwingungsdauer T von der Auslenkung φ_0 und der Masse m des Pendelkörpers unabhängig ist und nur von der Pendellänge l abhängt. Des Weiteren ist das Pendel ein häufiges Beispiel für Energieumwandlungen bzw. Energieerhaltung.

In der Oberstufe wendet man die Newton'schen Gesetze auf das Federpendel und/oder das Fadenpendel an und kommt so zu den Schwingungen. Zwei gekoppelte Stabpendel können dann der Übergang zu den mechanischen Wellen sein.

2. Energien am Pendel

Betrachtet man die Energien, legt man am besten den Bezugspunkt in den Pendelkörper, wenn dieser den tiefsten Punkt

(Nulldurchgang) durchläuft, so dass in diesem Falle die potenzielle Energie null ist. Für die maximale Auslenkung (Umkehrpunkt) erhält man damit (siehe Abbildung 1) die potenzielle Energie und Gesamtenergie

$$E_0 = mgl \cdot \Delta h = mgl \cdot (1 - \cos \varphi_0)$$

Am Punkt 1 der Abbildung 1 hat man auch eine kinetische Energie

$$E_{kin,1} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}ml^2\omega^2$$

Somit ist die Gesamtenergie am Punkt 1 gleich

$$E_1 = mgl(1 - \cos \varphi) + \frac{1}{2}ml^2\omega^2$$

Setzt man E_0 gleich E_1 , kann man die Gleichung umformen in

$$ml\omega^2 = 2mg(\cos \varphi - \cos \varphi_0) \quad (*)$$

Dies werden wir später noch brauchen.

3. Kräfte am Pendel

Aus der objektiven Sicht bei Beobachtung von außen gibt es genau zwei Kräfte, die auf den Pendelkörper wirken, d. h. zu denen man einen Wechselwirkungspartner angeben kann: Zum einen übt die Erde eine Anziehungskraft F_G aus, zum anderen übt der Aufhängehaken bzw. die Decke eine Seilkraft

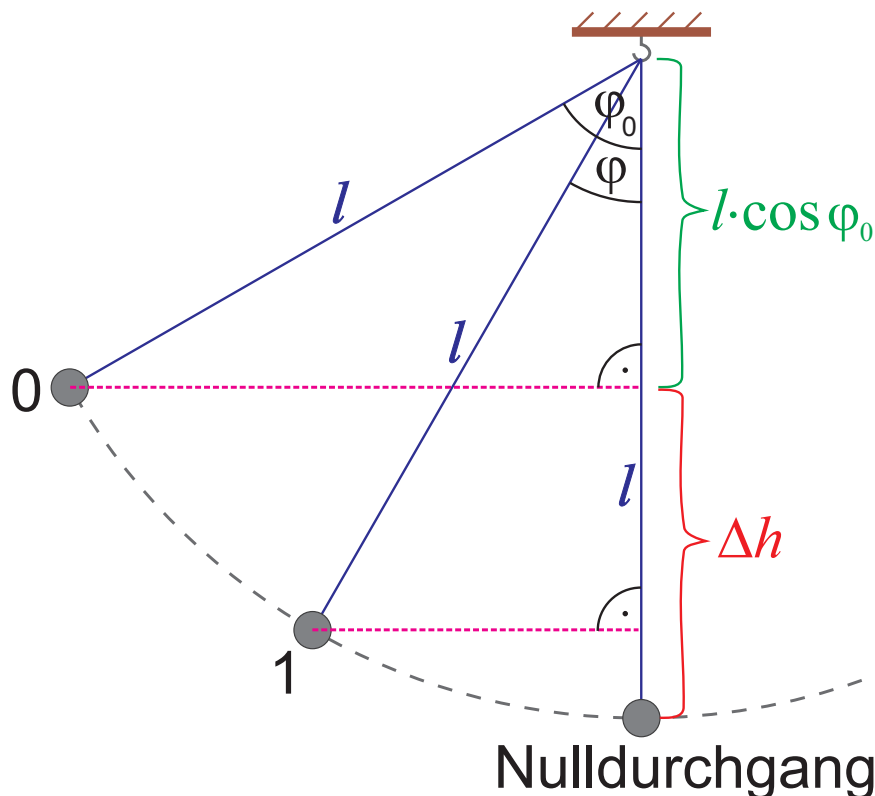


Abbildung 1: Ein Fadenpendel in verschiedenen Auslenkungen

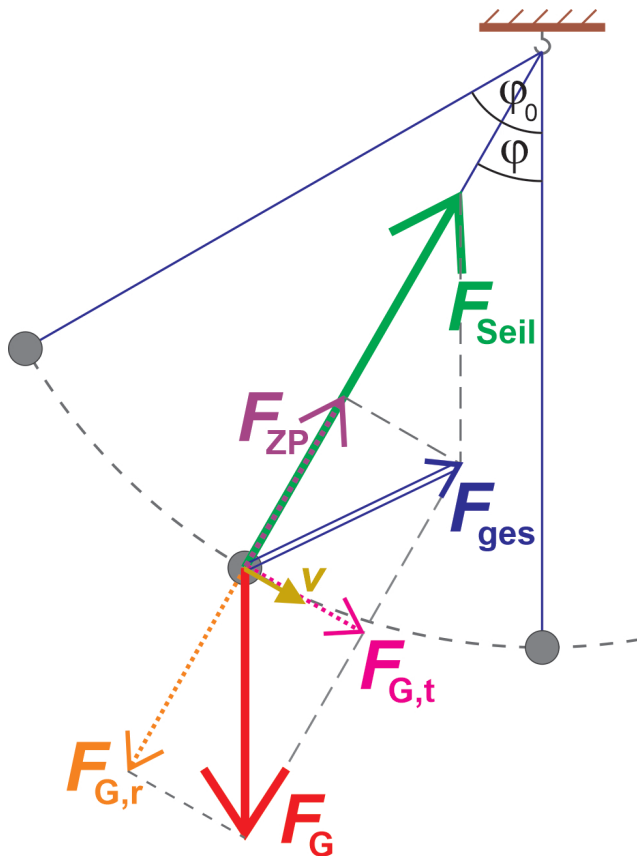


Abbildung 2: Kräfte beim Pendel, betrachtet bei $\varphi = 30^\circ$, wenn bei $\varphi_0 = 60^\circ$ gestartet wurde.

F_{Seil} aus (beide in Abbildung 2 mit durchgezogenen Pfeillinien gezeichnet).

Hierzu eine Nebenbemerkung: Wollte man sehr genau argumentieren, müsste man sagen, dass der Haken eine Kraft auf das Seil und das Seil eine Kraft auf den Pendelkörper ausübt. Da man aber in der Schulphysik von masselosen Seilen ausgeht, ist das nicht sinnvoll. Daher wurde zwar argumentiert, dass die Decke eine Kraft auf den Pendelkörper ausübt, aber trotzdem der Begriff Seilkraft beibehalten.

Immer wieder findet man die folgende falsche Argumentation. Die Gewichtskraft mit dem Betrag

$$F_G = m \cdot g$$

wird in einen tangentialen Anteil

$$F_{G,t} = mg \sin \varphi$$

und einen radialen Anteil

$$F_{G,r} = mg \cos \varphi$$

zerlegt (in Abbildung 2 mit gestrichelten Pfeillinien gezeichnet) und dann behauptet, der radiale Anteil wird durch eine Seilkraft kompensiert, so dass nur noch der tangentiale Anteil zu berücksichtigen ist. Tatsächlich erhält man auf diese Weise die richtige Differentialgleichung für die Bewegung, da nur der tangentiale Kraftanteil $F_{G,t}$ für die Tempoänderung verantwortlich ist. Allerdings hat man ignoriert, dass für die

Richtungsänderung ein Kraftanteil senkrecht zur Bewegungsrichtung nötig ist.

Addiert man korrekt die beiden wirkenden Kräfte \vec{F}_G und \vec{F}_{Seil} vektoriell, erhält man als vektorielle Summe die Gesamtkraft (= resultierende Kraft) \vec{F}_{ges} , die in Abbildung 2 mit einem Doppelpfeil gezeichnet wurde. Ihr radialer Anteil ist die für die Richtungsänderung nötige Zentripetalkraft \vec{F}_{ZP} . Mit obiger Gleichung (*) kann man deren Betrag ausrechnen:

$$F_{ZP} = \frac{mv^2}{l} = ml\omega^2 = 2mg(\cos \varphi - \cos \varphi_0)$$

Damit lässt sich auch der Betrag der Seilkraft berechnen:

$$F_{\text{Seil}} = F_{ZP} + F_{G,r} = mg(3 \cos \varphi - 2 \cos \varphi_0)$$

Bei dem Startwinkel $\varphi_0 = 60^\circ$ erhält man im Nulldurchgang $\varphi = 0^\circ$ die Werte $F_{ZP} = mg$ und $F_{\text{Seil}} = 2mg$. Bei einem Startwinkel von fast $\varphi_0 = 180^\circ$ erhält man im Nulldurchgang $F_{ZP} = 4mg$ und $F_{\text{Seil}} = 5mg$.

Die obige falsche Argumentation kommt aus einer Argumentation, die man häufig im Physikunterricht findet [1, S. 57 + 2, S. 7]: Man betrachtet nur tangentiale Anteile der Kräfte und der Beschleunigung, so dass

$$a_{\text{tang}} = F_{\text{ges,tang}}/m$$

gilt, womit eine mehrdimensionale Bewegung quasi auf eine eindimensionale Bewegung zurückgeführt wird und alle Größen nur als Zahlen statt als Vektoren erscheinen. Damit wird jedoch eine wesentliche Aussage der Newton'schen Mechanik nicht vermittelt: Für jede Geschwindigkeitsänderung ist eine (resultierende) Kraft erforderlich – sowohl für die Änderung des Geschwindigkeitsbetrages als auch für die Änderung der Geschwindigkeitsrichtung. Deshalb sollte man, bevor man die tangentialen Kräfte zur Beschreibung der Schwingung betrachtet, zuerst einmal qualitativ alle Kräfte richtig besprechen.

Interessiert nur die Auslenkung s , gemessen als die Länge des Kreisbogens $s = l \cdot \varphi$, ist der rücktreibende Kraftanteil

$$F_{\text{rück}} = -mg \sin \varphi = -mg \sin \frac{s}{l}$$

und damit nicht proportional zur Auslenkung s , so dass es sich um eine anharmonische Schwingung handelt. Nur für kleine Auslenkungen gilt näherungsweise $\sin \frac{s}{l} \approx \frac{s}{l}$ und damit

$$F_{\text{rück}} = -\frac{mg}{l} s = -D \cdot s$$

Möchte man mit einem Messwerterfassungssystem und geeigneten Sensoren oder in einer Simulation zeigen, dass bei sehr großen Winkeln (100° bis 179°) die Zeitgraphen der kinematischen Größen nicht durch trigonometrische Funktionen beschrieben werden können, dann sollte man jedoch nicht die Auslenkung betrachten, sondern den tangentialen Beschleunigungsanteil, an dem das am ehesten zu sehen ist.

Einfacher ist zu zeigen, dass die Schwingungsdauer dann größer ist als bei kleinen Auslenkungen.

4. Videoanalyse eines Pendels

Eine kinematische Analyse des Pendels ist mit einem Videoanalyseprogramm möglich. Dazu wird ein Körper an einer Schnur aufgehängt, ausgelenkt und die entstehende Bewegung gefilmt. Aufgrund der schnellen Bewegung sollte man eine Kamera nehmen, die Vollbilder anstelle von Halbbildern aufnimmt und eine kurze Belichtungszeit einstellen. Videoanalyseprogramme wie Tracker [3] oder measure dynamics [4] können die aus den erfassten Orten berechneten Geschwindigkeiten und Beschleunigungen dann als Pfeile in das Video an den Pendelkörper einzeichnen, so dass sich diese Pfeile mit dem Pendelkörper mitbewegen. Abbildung 3 zeigt die Pfeile zu sieben verschiedenen Zeitpunkten (Stroboskopbild der Pfeile ohne die Kugel). Man sieht, dass die Geschwindigkeit stets tangential ist, die Beschleunigung aber seltsame Richtungen hat.

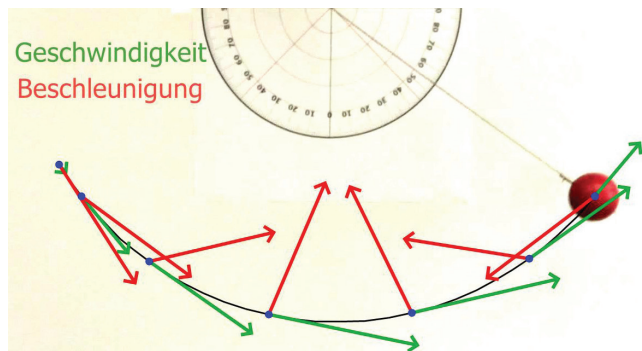


Abbildung 3: Gemessene Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Pendels, das bei $\varphi_0 = 60^\circ$ gestartet wurde, im Abstand von $\Delta t = 0,1$ s.

In measure dynamics kann man sich auch die Tangentialbeschleunigung und die Radialbeschleunigung berechnen und anzeigen lassen. Dann sieht man, dass die Tangentialbeschleunigung umso größer ist, je weiter man vom Nulldurchgang entfernt ist. Die Radialbeschleunigung ist dagegen umso größer, je schneller das Pendel ist.

Multipliziert man die Beschleunigung, die Tangentialbeschleunigung und die Radialbeschleunigung mit der Masse, erhält man die Gesamtkraft \vec{F}_{ges} , den Tangentialanteil der Gewichtskraft $\vec{F}_{G,t}$ und die Zentripetalkraft \vec{F}_{ZP} . Da sich dadurch nur die Länge der Pfeile, aber nicht ihre Richtung ändert, kann man darauf

auch verzichten und die Beschleunigungspfeile zu Kraftpfeilen uminterpretieren. Des Weiteren kann man die konstante Gewichtskraft \vec{F}_G einzeichnen lassen. Da $\vec{F}_{\text{ges}} = \vec{F}_G + \vec{F}_{\text{Seil}}$ ist, erhält man die Seilkraft aus $\vec{F}_{\text{Seil}} = \vec{F}_{\text{ges}} - \vec{F}_G$. Diese werden nun zu jedem Zeitpunkt an den Pendelkörper als Pfeile eingezeichnet. In der Abbildung 4 sind zu fünf Zeitpunkten die Gesamtkraft (dunkelblau), die Gewichtskraft (rot) und die Seilkraft (grün) eingestempelt. Der Tangentialanteil der Gewichtskraft und die Zentripetalkraft (die gleichzeitig die Komponenten der

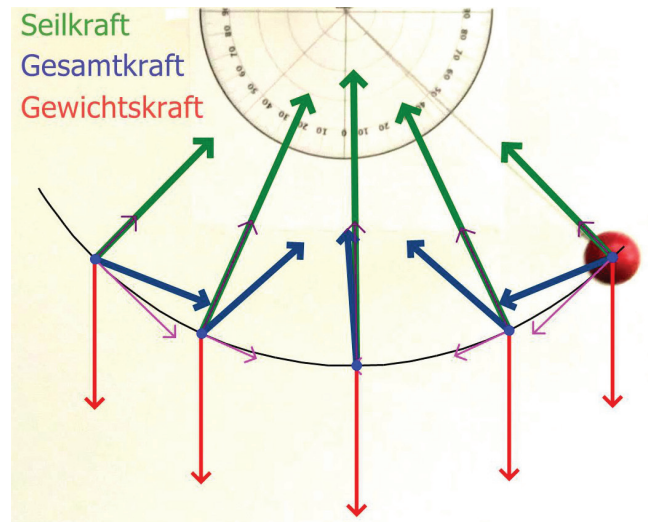


Abbildung 4: Gemessene Gesamtkraft mit Komponenten, Gewichtskraft und Seilkraft eines Pendels, das bei $\varphi_0 = 60^\circ$ gestartet wurde.

Gesamtkraft sind) sind nur dünn in lila und rosa angegeben.

5. Fazit

Will man im Unterricht die Kräfte am Pendelkörper besprechen und darüber zur Schwingung kommen, ist zwischen einer qualitativen und einer quantitativen Behandlung zu unterscheiden. Für eine qualitative Besprechung ist es wichtig, dass auf den Pendelkörper, der reibungsfrei schwingt, die Gewichtskraft und eine Seilkraft wirken, die zusammen für eine Tempoänderung und für eine Richtungsänderung verantwortlich sind. Für die Tempoänderung ist dagegen nur der tangentialer Anteil der Gesamtkraft relevant, der wiederum der tangentialer Anteil der Gewichtskraft ist.

Thomas Wilhelm Goethe-Universität Frankfurt
am Main, Institut für Didaktik der Physik

Literatur

- [1] Wilhelm, T. (2021). Unterrichtskonzeptionen zur Kinematik – In: Wilhelm, T.; Schecker, H.; Hopf, M. (Hrsg.). Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht, Springer-Spektrum, 2021, S. 51-80, https://doi.org/10.1007/978-3-662-63053-2_3
- [2] Wilhelm, T. (Hrsg.) (2018). Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen für fachgerechte Elementarisierungen, Seelze: Aulis/Friedrich, S. 27-30
- [3] <https://physlets.org/tracker/>
- [4] https://www.phywe.de/sensoren-software/mess-software-apps/software-measure-dynamics-einzellizenz_2259_3190/

Smartphone-Pendel mit elektronischer Messwerterfassung über die App „phyphox“

Sebastian Staacks, Heidrun Heinke und Christoph Stampfer

1. Einführung

Ein einfaches Fadenpendel lässt sich in jeder Physiksammlung und nahezu jedem Haushalt konstruieren. Dazu benötigt man den namensgebenden Faden sowie eine Masse, an der man diesen befestigen kann. Hierzu kann jeder Alltagsgegenstand genutzt werden, sofern er kompakt genug ist. Die erste Wahl des Messgeräts ist ebenso simpel. Eine Uhr zur Zeitmessung in Verbindung mit der Fähigkeit der experimentierenden Person, Schwingungsperioden zu zählen, genügt schon und kann bereits einen einfachen Zugang zum Experiment sowie der resultierenden Messgröße Frequenz bzw. Periodendauer bieten.

Aber auch die im heutigen Physikunterricht geforderte digitale Messwerterfassung und fortgeschrittene Datenauswertung sind ohne teures Messequipment am Fadenpendel gut zu realisieren. Hier dienen die Sensoren der allgegenwärtigen Smartphones als digitales Messgerät [1-5] und die Auswertung der Messwerte kann automatisiert auf dem Smartphone oder nach dem Export der Daten auf einem Rechner mit Software eigener Wahl erfolgen. Hierdurch können Lernende effizient systematische Messreihen aufnehmen, erste Erfahrungen mit digitaler Messwerterfassung sammeln oder kollaborativ die Ergebnisse verschiedener Messaufbauten zusammenführen.

2. Smartphone-Experiment mit Haushaltsmaterialien

Die Rolle der Masse übernimmt nun das Messgerät, also das Smartphone oder Tablet. Dabei sollten im Fall von Tablets aufgrund der höheren Masse und größeren Abmessung etwas größere Pendel geplant werden. Mit einer frei verfügbaren Mess-App wie „phyphox“ [6-8] ist das Experiment sowohl im Schulunterricht als auch in den Haushalten der Lernenden mit den eigenen Geräten durchführbar. Sollte die Verfügbarkeit eines Fadens als Hindernis angeführt werden, ist das leicht durch das vorherige Verteilen von Fadenabschnitten zu umgehen [9].

2.1 Pendel in Schaukelform

Statt eines einfachen Pendels, bei dem nur ein einzelner Faden an einem Gegenstand befestigt wird, sollten zur Aufhängung zwei oder gar vier Fäden genutzt und somit eher eine Schaukel konstruiert werden. Der Grund liegt darin, dass ein einzelner Faden der Pendelmasse den Freiheitsgrad der Rotation um die Fadenachse offenlässt. Dies würde dazu führen, dass sich die Achsen der Smartphone-Sensoren ständig gegenüber der

Schwingungsebene verdrehen, was eine Interpretation der Daten sehr anspruchsvoll macht.

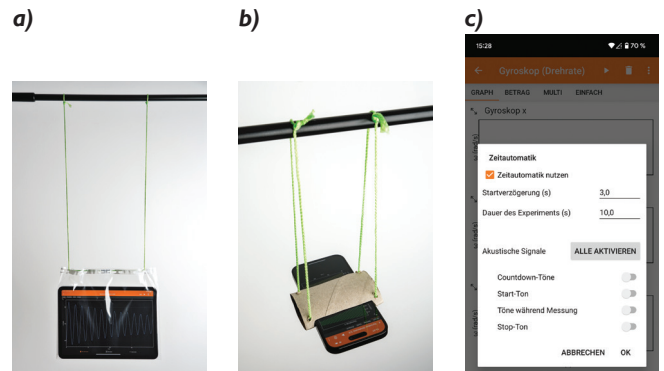


Abbildung 1: a) Tablet als Fadenpendel mit Aufhängung an zwei Fäden, realisiert durch eine DIN A4 Klarsichthülle mit einem langen Faden durch die Lochung der Hülle. b) Smartphone als Fadenpendel mit Aufhängung an vier Fäden, realisiert durch zwei Fäden, die durch eine Papprolle gefädelt wurden. c) Screenshot der Zeitautomatik-Funktion von phyphox (Android-Version).

Eine einfache Variante der Schaukel zeigt Abb. 1 a), bei der ein Tablet in eine Klarsichthülle gesteckt und ein Faden durch deren Lochung geführt wurde. Ein Umknicken des offenen Endes der Klarsichthülle und ein Klebestreifen verhindern, dass das Tablet seitlich herausrutschen kann. Ähnliches kann auch für kleinere Geräte mit einem handelsüblichen Gefrierbeutel umgesetzt werden. Der Vorteil einer transparenten Kunststoffhalterung ist hierbei, dass das Gerät weiter ohne Einschränkung abgelesen und in der Regel auch bedient werden kann. Die Rotation erfolgt in dieser Anordnung typischerweise um eine Achse parallel zur Längsachse des Geräts, was in den Gerätekoordinaten in der Regel der y-Achse entspricht.

Auch wenn die Anordnung mit zwei Fäden eine Rotation um die Achse parallel zum Faden (in Abb. 1 a) die x-Achse) schnell unterdrückt, kann bei nicht perfekter initialer Auslenkung dennoch eine Schwingung um diese Achse während der ersten Perioden auftreten. Dies kann durch eine Aufhängung an vier Fäden, wie in Abb. 1 b) gezeigt, nahezu vollständig verhindert werden. Hier wurde der Pappkern einer Toilettenpapierrolle flach gedrückt und die Seiten wurden so angeschnitten, dass das Smartphone hindurch geschoben werden kann. Zwei Fäden wurden durch seitliche Löcher zur Rückseite und durch benachbarte Löcher wieder zurückgeführt. Ein Nachteil dieser Aufhängung ist jedoch eine stärkere Dämpfung in diesem Aufbau. Zu beachten ist auch, dass bei diesem Aufbau die Rotation typischerweise um eine Achse parallel zur x-Achse des Geräts erfolgt.

2.2 Die Wahl des Sensors

Die Neigung eines Smartphones wird in den meisten Anwendungen über den Beschleunigungssensor gemessen, da dieser die Kraft auf eine interne Probemasse erfasst und dadurch vor allem die Stärke und Richtung der Erdbeschleunigung aufzeichnen kann. Was zunächst wie die ideale Methode zur Bestimmung des Auslenkungswinkels scheint, ist für Fadenpendel jedoch nicht geeignet. Da sowohl das Pendel, als auch das Smartphone und die interne Testmasse des Sensors der gleichen Erdbeschleunigung tangential zur Pendelbewegung unterliegen, wird die Testmasse in dieser Richtung nicht gegenüber dem Bezugssystem des Sensors ausgelenkt. Lediglich entlang der Fadenachse erfolgt eine Auslenkung, da der Faden eine Kraft auf das Smartphone ausübt, die nicht direkt auf die Testmasse wirkt. Da das Bezugssystem des Smartphones das Koordinatensystem der Messung definiert, liegt diese Fadenachse entlang einer festen Koordinatenachse, entlang der die gemessene Beschleunigung damit lediglich eine geringe Änderung des Betrags zeigt – nicht aber eine Änderung der Richtung.

Stattdessen empfiehlt es sich, das sogenannte Gyroskop des Smartphones zu verwenden. Da es sich nicht um ein Gyroskop im klassischen Sinne handelt, sondern eher um einen Drehratensensor, liefert dieses zwar nicht die momentane Auslenkung des Pendels, aber dafür eine erstaunlich empfindliche Messung der momentanen Winkelgeschwindigkeit in rad/s selbst bei sehr kleinen Auslenkungen. Hiermit ist es auch kein Problem, mit Amplituden innerhalb der Kleinwinkelnäherung zu arbeiten. Das Gyroskop ist üblicherweise zusammen mit dem Beschleunigungssensor in einem Chip verbaut und somit auf nahezu jedem Smartphone verfügbar.

2.3 Die App „phyphox“

Um das Gyroskop auszulesen bieten sich verschiedene Apps an. Die von den Autor:innen an der RWTH Aachen University entwickelte App „phyphox“ bietet einige Vorzüge, weil die App mit dem Fokus auf die Lehre entwickelt wurde. So ist die App kostenfrei unter Android und iOS nutzbar, quelloffen und im Hinblick auf den Datenschutz vollkommen unbedenklich. Wir legen Wert auf lange Kompatibilität zu alten Geräten und ändern die Bedienoberfläche nur, wenn der Mehrwert neuer Funktionen es rechtfertigt, dass durch eine solche Änderung Arbeitsmaterialien der Lehrkräfte aktualisiert werden müssten.

„Phyphox“ bietet sowohl den einfachen direkten Zugriff auf die Rohdaten der Sensoren als auch Experimentkonfigurationen mit integrierter Datenauswertung und auf bestimmte Experimente zugeschnittene Darstellungen. Diese können auch durch jede:n Nutzer:in mit einem externen Webeditor [10] angepasst und mittels QR-Codes an die Lernenden weitergegeben werden.

Für Experimente mit dem Fadenpendel sind zwei Funktionen der App besonders nützlich, da das Gerät selbst in der Version

des Aufbaus mit Klarsichthülle nur schwer während der Messung ablesbar ist:

- Der „Fernzugriff“ im Experimentmenü oben rechts neben dem Start-Button ermöglicht es, das Experiment von einem beliebigen zweiten Gerät über einen einfachen Webbrowser zu überwachen und zu steuern.
- Über die „Zeitautomatik“ im gleichen Menü können eine Vorlaufzeit vor Messbeginn sowie eine Messdauer eingestellt werden (Abb. 1 c)). So kann vermieden werden, dass der Einschwingvorgang oder das Anfassen des Geräts (z. B. beim Stoppen der Messung) mit aufgezeichnet werden.

Die App zeigt sich standardmäßig mit einer dunklen Oberfläche, bietet aber auch eine für Abbildungen in Printmedien besser geeignete helle Oberfläche, welche in den Abbildungen dieses Artikels genutzt wird. Die helle Oberfläche kann über die Einstellungen gewählt werden, die über den „i“-Button oberhalb der Listenansicht aller Experimente zu erreichen sind.

3. Datenauswertung

Die Vorteile einer digitalen Messwerterfassung können darin liegen, dass die Auswertung weiter vereinfacht bzw. von „phyphox“ übernommen wird, so dass sich die Lernenden auf die Durchführung einer Messreihe und deren physikalische Interpretation konzentrieren können. Alternativ bietet das einfache Experiment aber auch die Option, Lernende mit einem großen Datensatz eines Sensors zu konfrontieren, der mit einer Datenrate von bis zu 500 Hz in kürzester Zeit eine händische Auswertung unmöglich macht, so dass Fragestellungen der Datenverarbeitung motiviert werden.

3.1 Automatische Auswertung

Eine automatische Auswertung bietet „phyphox“, wenn in der Kategorie „Mechanik“ die Experimentkonfiguration „Fadenpendel“ gewählt wird. Während Rohdaten hier nur noch zur Kontrolle als Ausschnitt über zehn Sekunden im letzten Tab zur Verfügung stehen, führt „phyphox“ hier eigenständig eine Analyse der Pendelfrequenz durch (siehe Abb. 2 a).

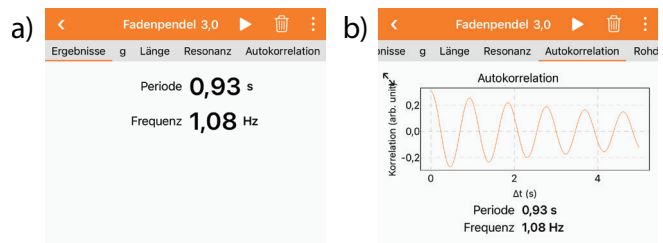


Abbildung 2: a) Über die Konfiguration „Fadenpendel“ gibt phyphox direkt Periodendauer und Frequenz der gemessenen Schwingung aus. b) Dieser Auswertung liegt eine Autokorrelationsanalyse zugrunde.

Die Lernenden erhalten auf diese Weise innerhalb weniger Schwingungsperioden die Periodendauer und Frequenz des Pendels. Hierbei stehen auch Ansichten zur Verfügung, bei denen über die Angabe der Fadenlänge die Erdbeschleunigung

bestimmt werden kann oder „phyphox“ die zur ermittelten Frequenz passende Fadenlänge ausgibt.

Die zugrunde liegende Autokorrelationsanalyse der Rohdaten kann von den Lernenden zwar eingesehen werden (siehe Abb. 2 b)), wird jedoch keineswegs zur Nutzung benötigt. Statt dessen liegt der Fokus dieser Konfiguration auf einer schnellen Erfassung der Pendelfrequenz, um Lernende beim Erstellen von Messreihen wie beispielsweise bei der Variation der Fadenlänge zu unterstützen.

3.2 Externe Auswertung der Rohdaten

Im Gegensatz dazu kann der Fokus auch auf die Datenauswertung selbst gelegt werden, indem die Schwingung direkt über die Konfiguration „Gyroskop (Drehrate)“ aufgezeichnet wird. Hier erhalten die Lernenden die Rohdaten aller drei Achsen des Sensors, wie sie vom Betriebssystem an „phyphox“ geliefert werden.

In „phyphox“ selbst gibt es einerseits durch Antippen des jeweiligen Graphen, die Auswahl der Option „Punkte wählen“ am unteren Bildschirmrand und das anschließende Ziehen zwischen zwei Datenpunkten eine bequeme Möglichkeit, Zeitdifferenzen zwischen ausgewählten Datenpunkten abzulesen und damit die Periodenlänge zu bestimmen. Andererseits eröffnen die zugrundeliegenden Messdaten aber auch ein weiterführendes Potential, um Lernende an die Datenverarbeitung heranzuführen. Zusammen mit dem Zeitstempel der Sensoreignisse entsteht ein Datensatz aus vier Spalten mit je 100 bis 500 Werten pro Sekunde, so dass eine weitere digitale Verarbeitung naheliegend ist.

Hierzu bietet „phyphox“ verschiedene Möglichkeiten des Datenexports, der ein Excel-kompatibles Format sowie verschiedene Varianten des in allen Programmiersprachen leicht lesbaren Textformats CSV umfasst. Die Datei im jeweiligen Format wird über den für das jeweilige Betriebssystem (Android oder iOS) üblichen Dialog zum Teilen von Daten angeboten. Hierüber kann beispielsweise je nach installierten Drittanbieter-Apps die Datei lokal gespeichert, über Mail oder Messenger-Dienste verschickt oder über Cloud-Speicher direkt auf das Zielgerät synchronisiert werden.

Eine interessante Variante stellt hier auch die „Fernzugriff“-Funktion von „phyphox“ dar: Befindet sich der Zielrechner, auf dem die weitere Auswertung erfolgen soll, in dem gleichen lokalen Netzwerk wie das Smartphone, kann nicht nur das Experiment bequem aus dem Browser des Rechners gesteuert werden, sondern man kann auch direkt die Messdaten vom Smartphone herunterladen.

Die weitere Auswertung erfolgt im Anschluss gemäß der Fähigkeiten der Lernenden. Möglich ist beispielsweise das manuelle Suchen der Extrema in einer Tabellenkalkulation, das Anpassen von Funktionen auf diese Extrema oder eine Auswertung in

einer Programmiersprache, gegebenenfalls in Anknüpfung an einen Informatikkurs. Abbildung 3 zeigt exemplarisch einen Fit einer gedämpften Schwingung $A(t) = A_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi)$ an Messwerte des in Abbildung 1b) gezeigten Pendels mit Startamplitude A_0 , Dämpfung δ , Kreisfrequenz ω und Phase φ . Der Fit und die Abbildung wurden in der Programmiersprache „Python“ erstellt, was aufgrund der Periodizität des Signals vor allem eine Herausforderung an die Wahl der Startparameter des Fits darstellt. Der Vergleich der Messung mit dem Modell des mathematischen Pendels verdeutlicht die hohe Qualität der Messdaten. Er zeigt aber auch auf dem vergleichsweise kleinen Ausschnitt bereits erkennbare Abweichungen zwischen dem realen Pendel und dem Modell, insbesondere im Hinblick auf die abklingende Amplitude, so dass die Erwartungen an die Auswertung der Lernenden dem jeweiligen Aufbau angepasst werden sollten.

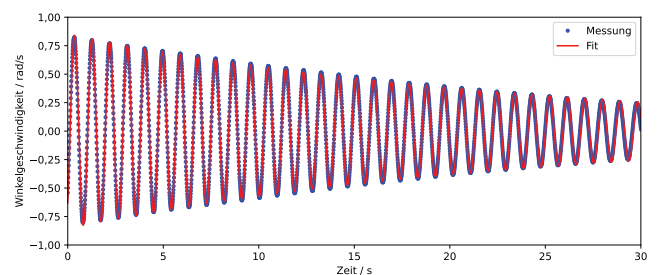


Abbildung 3: Auswertung über die Programmiersprache „Python“. Rohdaten der Winkelgeschwindigkeit um die x-Achse des in Abb. 1 b) gezeigten Pendels in blau sowie der Fit einer gedämpften Schwingung in rot.

4. Kollaborative Experimente

Ein Vorteil der digitalen Messwerterfassung liegt nicht nur in der automatisierten Auswertung oder dem Verarbeiten großer Datenmengen, sondern auch in der Möglichkeit, diese Daten effizient zu übertragen und zusammenzuführen. „Phyphox“ bietet hierzu auch eine Schnittstelle, die es ermöglicht, den Lernenden eine zugeschnittene Messkonfiguration mittels QR-Code anzubieten, die wiederum die Messergebnisse an einen Server im lokalen Netz oder im Internet übermittelt. Hierüber haben wir bereits mit mehreren Hundert Studierenden in einem Hörsaal eine kollaborative Messung von Federpendeln umgesetzt [11]. Diese Schnittstelle erfordert allerdings vergleichsweise umfangreiche Kenntnisse insbesondere im Betrieb des Servers, der die Daten empfangen soll.

Lehrende, für die sich eine Umsetzung der in [11] beschriebenen Variante nicht anbietet oder denen die Lösung unverhältnismäßig aufwändig erscheint, können dennoch kollaborative Experimente vergleichsweise leicht umsetzen, indem sie den Lernenden entsprechende Eingabemasken für Messdaten zur Verfügung stellen. In diese geben die Lernenden ihre Messwerte manuell ein, so dass der Lehrkraft ein gemeinsam erzeugter strukturierter Datensatz zur Verfügung steht, der weiter ausgewertet werden kann. Verbreitete Learning Management Systeme wie „Moodle“ oder „Ilias“ bieten gleich

mehrere Tools, um numerische Daten von Lernenden zu sammeln.

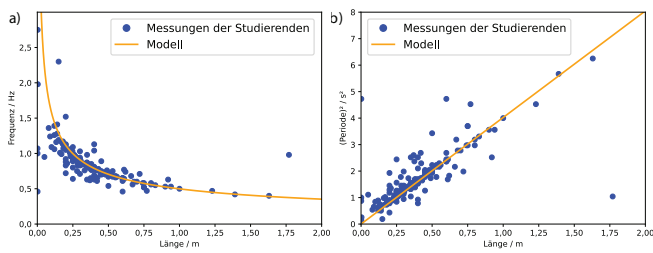


Abbildung 4: Übermittelte Wertepaare aus Fadenlänge und Frequenz, welche Studierende der RWTH Aachen University im Wintersemester 2023/2024 im Rahmen einer vorlesungsbegleitenden Übung gesammelt haben. Aufgetragen ist a) die Frequenz als Funktion der Länge und b) aus dem gleichen Datensatz das Quadrat der Periodendauer als Funktion der Länge.

Beispielsweise erhielten die Erstsemesterstudierenden des Bachelorstudiengangs Physik der RWTH Aachen University im Wintersemester 2023/2024 die Aufgabe, ein Pendel der in Abbildung 1 a) und b) gezeigten Art zu bauen und drei Wertepaare aus verschiedenen Fadenlängen und der jeweils ermittelten Frequenz in einer Eingabemaske zu übermitteln. Die Daten wurden anschließend von den Lehrenden ausgewertet und dienten als Vergleichsdaten bei der theoretischen Beschreibung des mathematischen Pendels in einer späteren Vorlesung.

Abbildungen 4 a) und b) zeigen diesen Datensatz in verschiedenen Auftragungen zusammen mit dem aus dem Modell des mathematischen Pendels zu erwartenden Zusammenhang

$$2\pi f = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

mit der Frequenz f , Fadenlänge l und Erdbeschleunigung g .

Man kann deutlich erkennen, wie die Messdaten insgesamt dem Modell folgen, aber einzelne Messpunkte teils erheblich abweichen können. Hier sind insbesondere die Werte nahe $l = 0$ auffällig, bei denen es sich sehr wahrscheinlich um Eingaben mit falscher Einheit handelt. Entsprechend sollten Eingabemasken für solche Datensätze möglichst eindeutig gekennzeichnet sein um derartige Fehler zu vermeiden.

5. Fazit

Experimente zu Fadenpendeln bestehen durch ihre Einfachheit sowohl im Materialbedarf als auch in der Nachvollziehbarkeit des Experiments durch die Lernenden. Dies ist eine ideale Grundlage für die Erweiterung des Experiments um eine digitale Messwerterfassung mittels „phyphox“. Durch die breite Verfügbarkeit von Smartphones und Tablets bleiben die Materialanforderungen weiterhin klein und zugleich bietet das leichte Verständnis des eigentlichen Experiments Raum, um die Möglichkeiten der digitalen Messwerterfassung zu erkunden. Dabei kann mit dem gewonnenen Datensatz der Fokus auf die Datenauswertung entweder reduziert oder deutlich erhöht werden, so dass der Versuch stärker auf verschiedene Lernziele zugeschnitten werden kann.

Sebastian Staacks II. Physikalisches Institut A,
RWTH Aachen University

Heidrun Heinke I. Physikalisches Institut A,
RWTH Aachen University

Christoph Stampfer II. Physikalisches Institut A,
RWTH Aachen University

Literatur

- [1] Vogt, P., Kuhn, J. & Müller, S. (2011). Experiments Using Cell Phones in Physics Classroom Education: The Computer-Aided g Determination. *Phys. Teach.* 49, 383
- [2] Pendrill, A.-M. & Rohlén, J. (2011). Acceleration and rotation in a pendulum ride, measured using an iPhone 4. *Phys. Educ.* 46, 676
- [3] Chevrier, J., Madani, L., Ledenmat, L. & Bsiesy, A. (2013). Teaching Classical Mechanics using Smartphones. *Phys. Teach.* 51, 376.
- [4] Vieyra, R., Vieyra, C., Jeanjacquot, P., Martí, A.-C. & Monteiro, M. (2015). Turn Your Smartphone Into a Science Laboratory. *Sci. Teach.* 082, 01
- [5] Monteiro, M. & Martí, A. C. (2022). Resource Letter MDS-1: Mobile devices and sensors for physics teaching. *Am. J. Phys.*, 90, 328
- [6] Staacks, S. (2018). Smartphone-Experimente mit der App „phyphox“. *Plus Lucis* 3, 40
- [7] Staacks, S., Hütz, S., Heinke, H. & Stampfer, C. (2018). Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. *Phys. Educ.* 53, 045009
- [8] Stampfer, C., Heinke, H. & Staacks, S. (2020). A lab in the pocket. *Nat. Rev. Mater.* 5 (3), 169
- [9] Hütz, S., Staacks, S., Stampfer, C. & Heinke, H. (2019). Kleiner Aufwand, großer Nutzen? - Experimentiersets zur Unterstützung experimenteller Übungsaufgaben mit Smartphones. *PhyDid B* 1, 273
- [10] Details unter <https://phyphox.org/editor>
- [11] Staacks, S., Dorsel, D., Hütz, S., Stallmach, F., Splith, T., Heinke, H. & Stampfer, C. (2022). Collaborative smartphone experiments for large audiences with phyphox. *Eur. J. Phys.* 43, 055702

Pendelbewegung außerhalb des Klassenzimmers

Ann-Marie Pendrill

1. Einleitung



Abbildung 1: Bewegung einer Nestschaukel

Haben Sie sich jemals gewünscht, dass in Ihrem Physikraum eine Bowlingkugel von der Decke hängen würde, um die (Beinahe-) Erhaltung der mechanischen Energie zu demonstrieren? Ich immer wieder. Eines Tages stellte ich aber auf einem Spielplatz fest, dass eine Schaukel auf die gleiche Weise verwendet werden kann (s. Abb. 1).

Obwohl Schaukeln häufig zur Veranschaulichung der Umwandlung zwischen potenzieller und kinetischer Energie verwendet werden, beschränkt sich die weitere Behandlung in den Lehrbüchern häufig auf die Ableitung der Periode im Kontext der harmonischen Bewegung: So steht die Winkelbeschleunigung im Mittelpunkt, und Radialkräfte werden, wenn überhaupt, nur kurz diskutiert. Dies führt dazu, dass die Schüler:innen nur ein unvollständiges Verständnis von Kräften und Beschleunigung bei einem Pendel haben. Das wurde durch physikdidaktische Forschung immer wieder empirisch bestätigt: Reif und Allen [1] beschreiben, dass selbst einige Expert:innen, die vor kurzem das Thema Beschleunigung unterrichtet hatten, falsche Antworten zur Beschleunigung bei einer Pendelbewegung gaben. Schaffer und McDermott [2] zeigen, dass nur eine kleine Minderheit von Lehrpersonen korrekte Freikörper-Diagramme für die Kräfte beim Nulldurchgang zeichnen. Die meisten gaben an, dass die Seilspannung gleich dem kombinierten Gewicht von Kind und Sitz sei. Schwartz [3] beschreibt, dass sie das Pendel schon so oft unterrichtet hatte und erst einige Zeit mit Simulationen in „Interactive Physics“ verbringen musste, um herauszufinden, dass ihre Denkweise über die Beschleunigung im untersten Punkt fehlerhaft war.

Im vorliegenden Beitrag werden viele weitere Möglichkeiten für den Einsatz von Schaukeln im Physikunterricht untersucht. Ziel ist es, das Verständnis der Newtonschen Gesetze bei Pendelbewegungen zu vertiefen.

2. Energie, Geschwindigkeit und Beschleunigung

Wenn die Schaukel losgelassen wird, beginnt sie sich immer schneller nach unten zu bewegen. Dabei wird potenzielle

Energie in kinetische Energie umgewandelt. Nachdem sie den tiefsten Punkt erreicht hat, geht sie auf der anderen Seite nach oben und wird dabei immer langsamer. Dabei wird die kinetische Energie in potenzielle Energie umgewandelt. Da durch den Luftwiderstand und die Reibung im Aufhängepunkt etwas Energie „verloren“ geht, erreicht die Schaukel nie ganz die ursprüngliche Höhe. Sie können gefahrlos in der gleichen Position bleiben, in der Sie die Schaukel losgelassen haben, auch wenn Sie vielleicht noch ein paar Mal üben müssen, um zu vermeiden, dass Sie zurückweichen, wenn sich die Schaukel Ihrem Kinn nähert.

Bei einem Winkel θ zur Senkrechten liegt die Höhe $L(1 - \cos \theta)$ über dem tiefsten Punkt – und $L(\cos \theta_0 - \cos \theta)$ unter dem höchsten Punkt (Abbildung 2). Behandelt man die Schaukel als Punktmasse und vernachlässigt die Masse der Ketten, ergibt sich die Geschwindigkeit v_0 im tiefsten Punkt aus der nahezu konstanten mechanischen Energie als $m v_0^2/2 = mgL(1 - \cos \theta_0)$. Nach dem tiefsten Punkt bewegt sich die Schaukel auf einem Kreisbogen weiter, immer langsamer, bis sie fast die ursprüngliche Höhe erreicht hat, und dann wieder zurück. Für einen beliebigen Winkel ist die Geschwindigkeit gegeben als $v^2(\theta) = 2gL(\cos \theta - \cos \theta_0)$. (1)

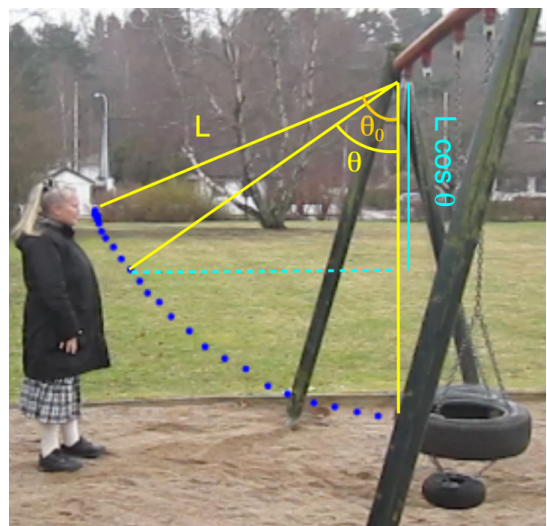


Abbildung 2: Wenn sich die Schaukel in einem Winkel θ zur Senkrechten befindet, ist sie $L(1 - \cos \theta)$ höher als der tiefste Punkt bei einer Kettenlänge L . Die Schaukel wird beim Winkel θ_0 losgelassen.

Obwohl die Geschwindigkeit im tiefsten Punkt am höchsten ist, bedeutet das nicht, dass die Beschleunigung gleich Null ist. Wenn Sie schwingen, sollten Sie bemerken, dass Sie sich im tiefsten Punkt schwerer als normal fühlen. Die Beschleunigung ist nicht eine zeitliche Ableitung des Tempos, sondern des *Geschwindigkeitsvektors*. Da sich die Schaukel entlang eines Kreisbogens mit dem Radius L bewegt, gibt es eine Zentripetal-

beschleunigung, die durch $a_c = v^2/L$ gegeben ist. Diese kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$a_c(\theta) = 2g(\cos \theta - \cos \theta_0) \quad (2)$$

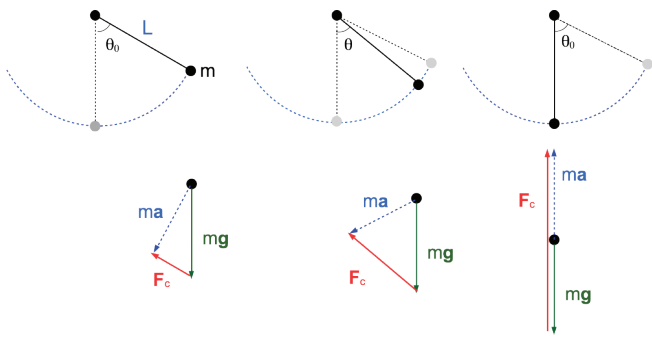


Abbildung 3: Freikörper-Diagramme für eine Schaukel im höchsten Punkt bei einem Winkel $\theta_0 = 60^\circ$, bei einem Zwischenwinkel θ und im tiefsten Punkt. (Für den speziellen Winkel θ in der Abbildung hat die Kraft der Kette denselben Betrag wie die Schwerkraft.)

Für einen Schwung bis 60° ergibt sich eine maximale Kraft von $2mg$ und eine minimale Kraft von $mg/2$. Die Abweichung von mg ist im tiefsten Punkt doppelt so groß wie im höchsten Punkt, und zwar mit umgekehrtem Vorzeichen. Es kann auch festgestellt werden, dass für $\cos \theta = 3 \cos \theta_0/2$ der Betrag der Kraft der Kette genau mg beträgt, während der Beschleunigungsvektor sowohl eine tangential als auch eine radiale Komponente enthält (s. Abb. 3).

Reif fand heraus, dass nur eine kleine Minderheit der Lernenden – und auch der Lehrpersonen – die richtigen Diagramme zur Darstellung der Beschleunigung in den verschiedenen Teilen einer Pendelbewegung identifizieren konnte.

3. Kräfte in einer Schaukel



Abbildung 4: Einfache Geräte zur Veranschaulichung der Kräfte während eines Schwungs. Das Jo-Jo an einer kurzen Schnur und die Flasche mit Flüssigkeit verdeutlichen, dass es keine tangential Komponente des Vektors $\mathbf{a} - \mathbf{g}$ gibt. Der Abstand zwischen den Spiralen im Slinky variiert mit der Kraft, die durch den Schwung auf die schaukelnde Person ausgeübt wird, was zur Veranschaulichung der Funktion eines MEMS-Trägheitsbeschleunigungssensors im Smartphone verwendet werden kann.

Erinnern Sie sich noch daran, wie es sich in einer Schaukel anfühlt? Viele Erwachsene haben es vergessen. Probieren Sie das Schaukeln noch einmal aus und achten Sie darauf, wie sich Ihr Körper verändert, ob er sich leichter oder schwerer als sonst anfühlt. Es kann helfen, die Augen zu schließen, um sich auf den Körper zu konzentrieren.

Sie können auch feststellen, dass die Kraft von der Schaukel im Wesentlichen immer in die Richtung zeigt, die von der Schaukel entlang der Wirbelsäule zum Aufhängepunkt hinaufführt. Dies kann auch für Beobachter:innen veranschaulicht werden, indem man z. B. ein Jo-Jo an einer kurzen Schnur in der Nähe des Sitzes hält und beobachtet, wie die Schnur im Wesentlichen gleich zur Kette ausgerichtet ist. Sie können auch eine halb gefüllte Flasche oder ein Glas auf die Schaukel stellen und die Bewegung der Flüssigkeit beobachten (s. Abb. 4).

Die einzigen Kräfte, die auf eine Schaukel wirken, sind die Schwerkraft und die Kraft der Ketten (s. Abb. 3). Im Umkehrpunkt, wo man sich leichter als normal fühlt, ist die Kraft der Kette durch $F_c = mg \cos \theta_0$ gegeben, wodurch die radiale Komponente der Gravitationskraft mg kompensiert wird. Wenn die Schaukel in Bewegung ist, muss die Kraft der Ketten auch die für die Zentripetalbeschleunigung erforderliche Kraft liefern:

$$F_c(\theta) = mg(3 \cos \theta - 2 \cos \theta_0) \quad (3)$$

Im tiefsten Punkt ($\theta = 0$) hingegen beträgt die Kraft $mg(3 - 2 \cos \theta_0)$.

3.1 Kräfte am eigenen Körper nutzen, um ein physikalisches Verständnis zu entwickeln.

Ein beschleunigter Mensch – zum Beispiel in einer Schaukel – ist offensichtlich ein Nicht-Inertialsystem. Dabei kann es verlockend sein, Trägheitskräfte, d. h. $-\mathbf{ma}$, einzuführen. Die Kraft, die zwischen der Schaukel und Ihrem Körper in der Schaukel wirkt, ist jedoch unabhängig von der Wahl der mathematischen Beschreibung. Auch wenn sie konzeptionell unterschiedlich sind, sind sie mathematisch äquivalent: Newtons zweites Gesetz $\mathbf{F} = \mathbf{ma}$ kann umgeschrieben werden, indem der Beschleunigungsterm auf die andere Seite verschoben wird, was $\mathbf{F} - \mathbf{ma} = 0$ ergibt. Die Kraft, die von der Kette auf die Schaukel wirkt, ist gegeben durch $\mathbf{F}_c = \mathbf{ma} - \mathbf{mg}$.

Ganz allgemein können wir einen Vektor einführen, der die „G-Kraft“ beschreibt

$$\mathbf{G} = \mathbf{a} - \mathbf{g}. \quad (4)$$

Der Vektor $m\mathbf{G}$ kann als operationale Definition des Gewichts [4, 5, 6] anstelle der gebräuchlicheren Gravitationsdefinition von $m\mathbf{g}$ angesehen werden. Diese operationale Definition ist eng mit dem Äquivalenzprinzip zwischen Trägheits- und Gravitationsmasse [7] verbunden. Sie stimmt mit der intuitiven Vorstellung von Schwere/Leichtigkeit bei verschiedenen Arten von Bewegung überein. Dieser Ansatz erkennt die Kräfte an, die der menschliche Körper erfährt, und wurde erfolgreich eingesetzt, um Lernenden der Sek. I beschleunigte Bewegungen zu vermitteln [8]. Wenn die Schüler:innen erkennen, dass die von ihnen empfundenen Kräfte mit der Beschleunigung zusammenhängen, ist die Wahrscheinlichkeit geringer, dass sie behaupten, die Beschleunigung sei am tiefsten Punkt gleich null [9].

3.2 Smartphone-Messungen

Die Kräfte, die Ihr Körper erfährt, können auch gemessen werden, z. B. mit einem Smartphone-Beschleunigungsmesser. Wie alle Trägheitsbeschleunigungsmesser misst er den Vektor $\mathbf{G} = \mathbf{a} - \mathbf{g}$ in seinem eigenen Koordinatensystem. Für den freien Fall ergibt er den Wert Null. Dies kann auch als die Summe aller äußeren Kräfte (außer der Schwerkraft) interpretiert werden, die auf ein Objekt wirken, geteilt durch die Masse des Objekts. (Das Smartphone kann den Beschleunigungsvektor auch in einem festen Koordinatensystem anzeigen. Dies erfordert jedoch auch die Verwendung von 3D-Rotationssensoren und einen beträchtlichen mathematischen Aufwand und führt in der Regel zu einem Genauigkeitsverlust).

Bei der Schaukel misst ein Trägheitsbeschleunigungsmesser die von den Ketten ausgehende Kraft geteilt durch die von den Ketten getragene Masse – oder die auf das Smartphone wirkende Kraft geteilt durch seine Masse. Ein Beispiel ist in Abb. 5 dargestellt. Eine etwas überraschende Beobachtung ist, dass die tangentielle Komponente von \mathbf{G} im Wesentlichen Null ist, da die tangentielle Beschleunigung eines mathematischen Pendels genau durch die tangentielle Komponente der Erdbeschleunigung gegeben ist (vgl. Abschnitt 4.2).

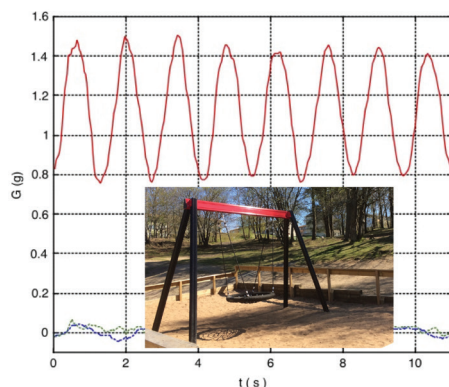


Abbildung 5: Beschleunigungsdaten eines Smartphones, das unten in der Schaukel auf dem Foto platziert ist. Beachten Sie, dass die Komponente in Richtung der Ketten, die in der roten Grafik dargestellt ist, viel größer ist als die anderen Komponenten.

3.3 Eigenschaften von Beschleunigungsgraphen

Unter Verwendung der Lösung des harmonischen Oszillators (8) können wir ein Diagramm zeichnen (s. Abb. 6), das zeigt, wie die G-Kraft über eine Periode variiert. Während etwa 40 % der Periode ist die Kraft aus dem Schwung kleiner als mg , und die maximale Kraft weicht doppelt so stark von mg ab wie die minimale Kraft – wie auch die Daten des Beschleunigungsmessers in Abb. 5 zeigen. Abweichungen zwischen den maximalen und minimalen radialen G-Kräften sind ein klares Indiz dafür, dass die Massenverteilung nicht gut durch ein Punktteilchen beschrieben wird (oder allgemeiner, dass der Sensor nicht am Radius der Drehung platziert ist).

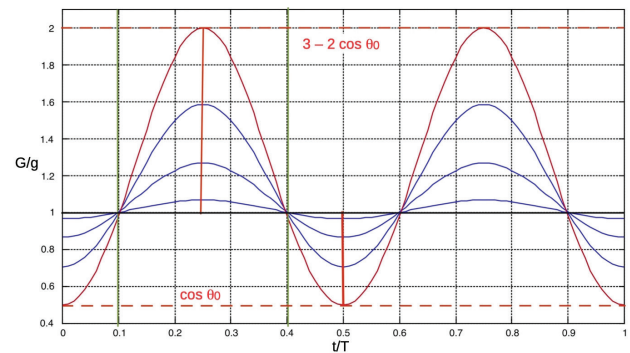


Abbildung 6: Dimensionsloses Diagramm der Veränderungen der Kräfte während einer Periode der Bewegung eines mathematischen Pendels für die Ausgangswinkel $\pi/12$, $\pi/6$, $\pi/4$ und $\pi/3$. Die senkrechten grünen Linien markieren die Zeiten während der ersten halben Periode, in denen die Seilspannung die Größe mg hat. Die senkrechten roten Linien markieren die Abweichung von mg für die maximalen und minimalen Werte der Spannung. (Aus [10], Abb. 1 unter CC-BY 3.0)

4. Die Periodendauer einer Schaukel

Als Elternteil muss man manchmal Kinder in einer Schaukel antauchen. Wenn Sie zwei Kinder haben, die angetaucht werden müssen, ist es hilfreich, wenn Sie beide gleichzeitig anschubsen können. Das setzt voraus, dass sie in Phase schwingen, mit ähnlichen Amplituden – und nicht zuletzt mit der gleichen Periode. Ich erzähle den Schüler:innen manchmal, wie ich die große Schwester in einer normalen Schaukel und den kleinen Bruder in einer Babyschaukel angetaucht habe, aber immer feststellen musste, dass sie nicht in Phase waren, da der kleine Bruder immer länger brauchte, um zurückzukommen. Ich frage die Schüler:innen dann, welche Variablen die Periode T beeinflussen könnten. Gemeinsam erstellen wir eine Liste an der Tafel. Normalerweise beginnt die Liste mit der Masse m und der Länge L des Pendels. Manchmal ist eine Frage über das Pendeln auf dem Mond nötig, damit die Erdbeschleunigung g vorgeschlagen wird. Ich lasse dann auch zwei Jo-Jos schwingen. Wenn man beide mit unterschiedlichen Abständen zur Seite bewegt, sieht man, dass die Periode im Wesentlichen unabhängig vom Auslenkungswinkel ist: Der von Galilei entdeckte Isochronismus.

4.1 Dimensionsanalyse und Untersuchungen auf dem Spielplatz

In einem nächsten Schritt machen wir einen Ansatz: $T = k m^a L^b g^c$, wobei k eine dimensionslose Konstante ist. Durch Einsetzen von Dimensionen (oder Einheiten) für alle Variablen erhalten wir dann eine Reihe von Gleichungen. Da die Masse die einzige Variable ist, die die Einheit Kilogramm enthält, muss die Periode unabhängig von der Masse sein, was $a = 0$ ergibt. Die Dimension Länge (Einheit m) geht sowohl in L als auch in g , aber nicht in T ein, also $b = -c$. In ähnlicher Weise ist die Dimension Zeit (Einheit Sekunde) nur in der Periode und in der Erdbeschleunigung (m/s^2) enthalten. So ergibt sich $c = -1/2$ und

$$T = k \sqrt{L/g} \quad (5)$$

Auf dem Spielplatz können die Schüler:innen versuchen, Seite an Seite mit einer leeren Schaukel zu schaukeln, um die Unabhängigkeit von der Masse zu beobachten. Möglicherweise müssen sie sich auf die Schaukel legen, damit es funktioniert. Im Stehen verkürzt sich die Periode deutlich, da die Pendellänge reduziert wird. Und der kleine Bruder, der tief in der Babyschaukel sitzt, hat eine längere Pendellänge.

4.2 Tangentialbeschleunigung und Pendelperiode

Die tangential Komponente $-mg \sin\theta$ der Gravitationskraft führt zu einer tangentialen Beschleunigung

$$a_t(\theta) = -g \sin\theta, \quad (6)$$

die im Wendepunkt am größten und im tiefsten Punkt null ist. Die tangential Komponente des Vektors \mathbf{G} verschwindet damit jedoch. Dies lässt sich auch beobachten, wenn man eine teilweise mit Flüssigkeit gefüllte Flasche hinstellt oder ein kleines Pendel beim Schwingen festhält (s. Abb. 4). Diese Beobachtung steht im Gegensatz zu typischen Lehrbuchabhandlungen, in denen oft nur die Gleichungen für die Tangentialbeschleunigung diskutiert werden, die zur Ableitung der Periode eines Pendels verwendet werden, indem festgestellt wird, dass $a_t = -Ld^2\theta/dt^2$. Daraus ergibt sich

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{g}{L} \sin\theta \approx -\frac{g}{L} \theta \quad (7)$$

Diese Differentialgleichung zweiter Ordnung hat die Lösung $\theta(t) = \theta_0 \cos \omega t$ (8)

mit $\omega^2 = g/L$, was zu einer Periode $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ führt (sofern Abweichungen von der Näherung $\sin\theta \approx \theta$ vernachlässigt werden können). Durch die Herleitung wurde der Wert $k = 2\pi$ für die dimensionslose Konstante in (5) ermittelt. Das Einsetzen von Zahlenwerten zeigt, dass ein Pendel mit einer Länge von einem Meter eine Halbperiodenlänge von annähernd einer Sekunde hat. Die Erinnerung an dieses Ergebnis erleichtert die schnelle Abschätzung der Periode für längere Pendel, wie man sie z. B. in Vergnügungsparks findet (s. Abb. 7).

4.3 Zwillingschaukeln - Periode, Amplitude und Phase

Kinder sprechen manchmal vom Zwillingschaukeln, wenn sie zusammen mit einem anderen Kind auf einer benachbarten Schaukel schwingen. Beim Zwillingschaukeln schwingen sie gleich hoch – bis zum gleichen maximalen Winkel, also mit der gleichen *Amplitude* – und erreichen gemeinsam den Umkehrpunkt. Im Gegensatz dazu bedeutet „Geschwisterschaukeln“, dass sich die beiden Schaukeln immer in entgegengesetzte Richtungen bewegen, also *phasenverschoben* sind. Um das Zwillingschaukeln aufrechtzuerhalten, ist es notwendig, dass beide Schwingungen die gleiche Periode haben. Die Konzepte von Periode, Amplitude und Phase können also schon für kleine Kinder sinnvoll sein.



Abbildung 7: Das Pendelfahrgeschäft Vindjammer im Europa-Park hat eine Pendellänge von etwa 13 m.

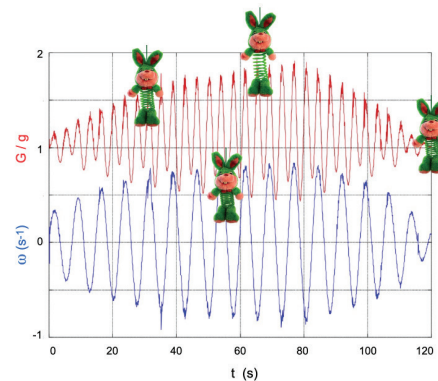


Abbildung 8: G-Kraft und Winkelgeschwindigkeit, gemessen mit dem Smartphone während einer Fahrt mit dem Piratenschiff Vindjammer im Europapark. Die unterschiedliche Länge des Slinky liefert eine visuelle Messung der G-Kraft.

5. Schaukeln in Vergnügungsparks

Wenn Sie das Glück haben, Ihre Schüler:innen in einen Vergnügungspark zu bringen, werden Sie vielleicht mehrere Fahrgeschäfte mit Pendelbewegungen entdecken. Die gängigsten sind wahrscheinlich die Piratenschiffe, die typischerweise etwa 13 m lang sind und bis zu 70° schwingen (z. B. Abb. 7).

Wie aus dem Beschleunigungsdiagramm in Abb. 8 für das Fahrgeschäft Vindjammer im Europark hervorgeht, ist der Ausdruck für ein mathematisches Pendel $T = k\sqrt{L/g}$ eine recht gute Annäherung an die Periode des Piratenschiffes, auch wenn der große Winkel und die Ausdehnung des Schiffes die Ergebnisse beeinflussen.

Solange sich das Pendel nicht über 90° hinaus bewegt – und vorherige Absprachen mit dem Park getroffen wurden – kann ein anschauliches Experiment mit einem Becher Wasser durchgeführt werden, der auf einem Sitz ruht. Die überraschenden Ergebnisse sind analog zu der in Abb. 4 gezeigten Flasche auf einer Schaukel.

Große Schaukeln in Vergnügungsparks haben starre Stützen anstelle von Ketten und können die:den Fahrer:in auch von der

Mitte wegdrücken, wie z. B. die 20 m lange Screaming Swing (Uppswinget) in Abb. 9.

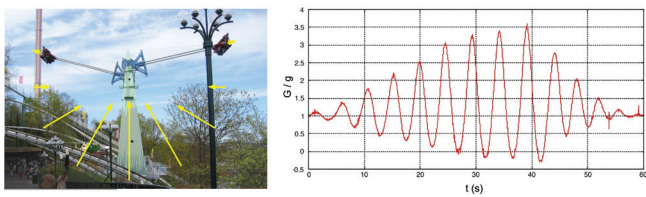


Abbildung 9: Das Uppswinget-Fahrgeschäft bewegt sich über 90° hinaus. Am Umkehrpunkt drückt das Fahrgeschäft die Fahrgäste von der Mitte weg („negative Gs“), während am tiefsten Punkt die Kraft vom Fahrgeschäft zur Mitte hin größer als $3mg$ ist, wie aus Gleichung (3) und dem Beschleunigungsdiagramm hervorgeht.

5.1 Schienenwiegen und Kreiselschaukeln

In einer Schienenwiege bewegt sich die Gondel auf einem Kreisbogen, wobei sie sich auch um ihren Mittelpunkt dreht (Abb. 10). Die Bewegung ist analog zu einer Pendelbewegung und die Schüler:innen können ihre berechnete Periode mit den Ergebnissen der Messungen vor Ort vergleichen.

Wie bei einer gewöhnlichen Schaukel ist die Kraft zum Mittelpunkt des Kreises gerichtet, der nicht sichtbar ist, aber konstruiert werden kann (s. Abb. 10). Außerdem wirkt eine kleine Kraft auf den Mittelpunkt des kleinen rotierenden Bootes.

Diese Familienfahrgeschäfte eignen sich auch für die Messung und Analyse von Drehungen mit Hilfe der Sensoren in einem Smartphone [11].

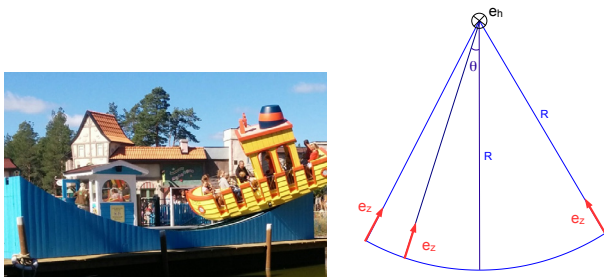


Abbildung 10: Die „Rockin‘ Tug“-Schienenwiege Viktoria in Kolmården und die Koordinaten für die Analyse der Bewegung

Die Bewegung in dieser kleinen Schienenwiege ist analog zu der Bewegung in den viel größeren Giant Gyro Swings, bei denen die Fahrgäste um einen großen Kreis am Ende des Pendels sitzen (s. Abb. 11). Die Drehung des Kreises führt zu bemerkenswerten Coriolis-Effekten, die je nach Position erhebliche Unterschiede der auf eine Person wirkenden Kraft verursachen [12].

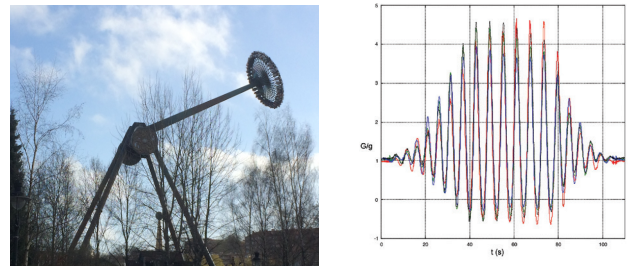


Abbildung 11: Die Intamin Giant Gyro Swing Loke in Liseberg, zusammen mit Beschleunigungsdaten in vier verschiedenen Positionen. Die roten und blauen Graphen beziehen sich auf Personen auf gegenüberliegenden Seiten des Kreises (siehe auch [12]).

5.3 Kettenkarussell



Abbildung 12: Drei StarFlyer-Fahrten: Himmelskibet in Tivoli Gardens, Kopenhagen, Eclipse in Gröna Lund, Stockholm und der Pratersturm in Wien. (aus [13], Abb. 1 unter CC-BY 3.0)

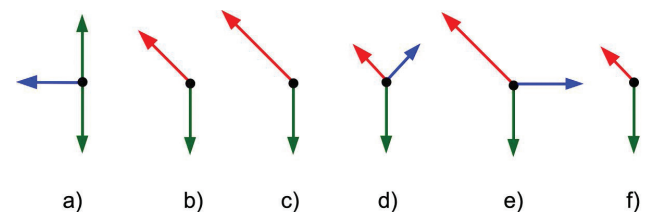


Abbildung 13: Welches Freikörper-Diagramm beschreibt die Kräfte, die auf eine Person in einer Schaukel in einem Kettenflieger wirken, am besten? Welches Diagramm beschreibt die Kräfte in einer Spielplatzschaukel (oder einem großen Fahrgeschäft) im höchsten Punkt am besten? (Für den Fall, dass sich der Fahrer rechts vom Aufhängepunkt der Kette befindet).

Eine andere Art von Schaukeln in Vergnügungsparks findet sich in Kettenkarussells, bei denen die Schaukeln in einem Kreis aufgehängt sind (s. Abb. 12). Wenn sich das gesamte Fahrgeschäft dreht, bilden die Schaukeln einen Winkel zur Vertikalen, so dass die Ketten, die für die Zentripetalbeschleunigung erforderliche Kraft aufbringen können. Diese Fahrgeschäfte sind schöne Beispiele für das Äquivalenzprinzip, da Schaukeln mit und ohne Fahrgäste den gleichen Winkel zur Senkrechten bilden. Bei vielen Fahrgeschäften neigt sich das Dach, was zu einer wellenförmigen Bewegung führt, während sich die Schaukel bewegt. Bei Star Flyer-Fahrgeschäften, wie dem Pratersturm, bewegt sich der Kreis der Schaukeln auch den hohen Turm hinauf und bietet den Fahrgästen eine berauschende Aussicht.

In [13] wurde eine große Anzahl von Übungen zum Thema Kettenflieger vorgestellt. Ergänzend dazu zeigen wir in Abb. 13

eine Reihe von möglichen Freikörper-Diagrammen. Welches davon würden Sie für ein Piratenschiff – oder eine Spielplatzschaukel – im Umkehrpunkt wählen, und welches der Diagramme würden Sie wählen, um die Kräfte bei einer Kettenkarussellfahrt zu beschreiben? Welche Diagramme werden Ihre Schüler:innen wohl wählen? Sie werden feststellen, dass die Lernenden in verschiedenen Situationen unterschiedliche Strategien für die Konstruktion von Freikörper-Diagrammen verwenden [14, 15, 16].

6. Diskussion

In diesem Beitrag wird anhand von Beispielen gezeigt, wie Schaukeln – selbst einfache Spielplatzschaukeln – in vielen verschiedenen Bereichen des klassischen Mechanikunterrichts eingesetzt werden können und ein tieferes Verständnis für die Beziehung zwischen den mathematischen Beschreibungen und den Erfahrungen des Körpers vermitteln können. Weitere Beispiele finden sich in [17] und den Kapiteln 7 und 11 von [18].

Ann-Marie Pendrill *Physik, Universität Göteborg*

Literatur

- [1] Reif, F. & Allen, S. (1992). Cognition for interpreting scientific concepts: A study of acceleration. *Cognition and instruction*, 9(1), 1-44.
- [2] McDermott, L. C., Shaffer, P. S. & Somers, M. D. (1994). Research as a guide for teaching introductory mechanics: An illustration. *Am. J. Phys.*, 62(1), 1.
- [3] Schwarz, C. (1995). The not-so-simple pendulum. *The Physics Teacher*, 33(4), 225-228.
- [4] Taibu, R. (2017). Terms vs. concepts—the case of weight. *The Physics Teacher*, 55(1), 34-35.
- [5] Taibu, R., Rudge, D. & Schuster, D. (2015). Textbook presentations of weight: Conceptual difficulties and language ambiguities. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 11(1), 010117.
- [6] Taibu, R., Schuster, D., & Rudge, D. (2017). Teaching weight to explicitly address language ambiguities and conceptual difficulties. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010130.
- [7] Einstein, A. (1916). Die Gleichheit der trägen und schweren Masse als Argument für das allgemeine Relativitätspostulat. Kap. 20 des Buchs „Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie“
- [8] Galili, I. (2001). Weight versus gravitational force: Historical and educational perspectives. *International Journal of Science Education*, 23(10), 1073-1093.
- [9] Pendrill, A.-M. (2023). Serious Physics on a Playground Swing – With Toys, Your Own Body, and a Smartphone. *The Physics Teacher*, 61(5), 355-359.
- [10] Pendrill, A.-M. (2023). Comment on 'pendulum: the partial and global approach'. *Physics Education*, 58(1), 018001.
- [11] Pendrill, A.-M. & Rohlén, J. (2011). Acceleration and rotation in a pendulum ride, measured using an iPhone 4. *Physics Education*, 46(6), 676.
- [12] Pendrill, A.-M. & Modig, C. (2018). Pendulum rides, rotations and the Coriolis Effect. *Physics Education*, 53(4), 025017.
- [13] Pendrill, A.-M. (2016). Rotating swings - a theme with variations. *Physics Education*, 51(1), 15014.
- [14] Pendrill, A.-M. (2020). Forces in circular motion: discerning student strategies. *Physics Education*, 55(4), 045006.
- [15] Pendrill, A.-M. (2022). Teacher interventions and student strategies for circular motion problems: A matrix representation. *Physics Education*, 57.
- [16] Pendrill, A.-M., Eriksson, M., Eriksson, U. & Linder, C. (2023). Round and round in circles – shifting relevance structures as students discuss acceleration and forces during circular motion in a vertical plane. *European Journal of Physics*, 44(5), 055008.
- [17] Schilder, J. P. & Pendrill, A.-M. (2024). The Coriolis effect and coupled oscillations in a rotating swings amusement ride, *European Journal of Physics* 45(2), 025002.
- [18] Mårtensson-Pendrill, A.-M. (2021). *Physics for the whole body – in playgrounds and amusement parks*. AIP Publishing LLC.

Liebe Vereinsmitglieder, sehr geehrte Kolleginnen und Kollegen,

nach einem ereignisreichen Jahr freue ich mich, Sie wieder zur Fortbildungswoche nach Wien einladen zu dürfen. Der Lehrplan für die Sekundarstufe I ist im Regelbetrieb gestartet und ich hoffe, Sie machen damit so gute Erfahrungen, wie wir erhofft haben. Es gibt zwei verschiedene MOOCs, mit deren Unterstützung Sie die wesentlichen Themen zum Lehrplan und zu den fachdidaktischen Hintergründen vertiefen können. Und der Gesetzgeber hat das Lehramtsstudium verkürzt und dabei nicht auf die Erkenntnisse der Wissenschaft geachtet. Wir werden sehen, welche Auswirkungen das mittel- und langfristig haben wird.

Aber lassen Sie sich davon nicht abhalten, das Programm der 79. Fortbildungswoche zu studieren. Es enthält – wie immer – ein reichhaltiges und qualitätsvolles Angebot. Besonders freut mich, dass die Zahl der Vorträge und Workshops, die auf den Forschungsarbeiten der Physik- und Chemiedidaktik in Österreich beruhen, stetig zunimmt.

Ein herzlicher Dank gilt allen Unterstützer:innen: Fakultäten für Physik und Chemie der Universität Wien, PH Wien, KPH Wien/Niederösterreich, die ARGes der Region sowie den Mitarbeiter:innen der AECCs Chemie und Physik.

Viel Spaß auf der Fortbildungswoche

Martin Hopf, Obmann

Anmeldung zur Fortbildungswoche

In bewährter Weise erfolgt die Anmeldung für die 79. Fortbildungswoche mit dem Buchungssystem eveeno. Abgewickelt wird die Anmeldung über folgende Homepage:
<https://eveeno.com/PlusLucis>.

Bei Problemen bitten wir um eine Mail an die folgende Adresse: vorstand@pluslucis.org

Den obigen Link finden Sie auch auf der Vereinshomepage, wo Sie zudem eine Langform des Programms sowie die Abstracts für die Vorträge, Workshops und Exkursionen finden.

Die Anmeldung für Vereinsmitglieder ist mittels Anmeldecode (findet sich auf der Rückseite dieser Plus Lucis Ausgabe) ab 3.1.2025 möglich. Alle anderen können sich ab 10.1.2025 für die Fortbildungswoche anmelden.

Wir freuen uns auf Ihr Kommen im Februar.

Der Vorstand

Vorträge
ORT: Lise-Meitner-Hörsaal, Boltzmann-gasse 5, 1. Stock, 1090 Wien

9:15-10:00	Begrüßung und Eröffnung Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf, Obmann
10:00-11:00	Carbon Capture, Utilization, and Storage: Schlüsseltechnologien für eine klimaneutrale Industrie Dr. Gerwin Drexler-Schmid, Austrian Institute of Technology
11:30-12:30	Lehren und Lernen mit und über digitale(n) Medien im Naturwissenschaftsunterricht Dr. ⁱⁿ Angelika Bernsteiner, Universität Graz

Vorträge
*ORT: Lise-Meitner-Hörsaal,
Boltzmann-gasse 5, 1. Stock, 1090 Wien*

Workshops

14:00-15:00	Magnetische Weiche Materie und ihre Anwendungen Univ.-Prof. Dr. ⁱⁿ Sofia Kantorovich, Universität Wien	14:00-17:00	Chemikalien im Alltag – wo viel Licht ist, da ist auch viel Schatten Dr. ⁱⁿ Susanne Stark, Verein für Konsumenteninformation (VKI) Wien <i>Multifunktionsraum (Porzellangasse 4, 3. Stock)</i> Mein Buddy ist eine KI – kritischer und reflektierter Einsatz generativer KI als Chance für Naturwissenschaftslehrende und den naturwissenschaftlichen Unterricht Dr. Sebastian Tassoti, Universität Graz <i>Seminarraum AECCs (Porzellangasse 4, 3. Stock)</i> Wie unterrichten? – Unterrichtsmaterialien für den neuen Lehrplan Mag. Markus Obczovsky <i>Schulversuchspraktikum (Porzellangasse 4, E1 Zwischengeschoß)</i> Klimawandel unterrichten in der Sek. I Ass.-Prof. Thomas Schubatzky, PhD & Mag.a Sarah Wildbichler, Universität Innsbruck <i>Josef-Stefan-Hörsaal (Boltzmann-gasse 5, 3. Stock, Raumnr. 3329)</i> Schüler:innen gegen Desinformationen in sozialen Medien stärken Dr. ⁱⁿ Angelika Bernsteiner, Universität Graz <i>Kurt-Gödel-Hörsaal (Boltzmann-gasse 5, EG)</i> Forschendes Lernen durch ISLE DI ⁱⁿ Elisabeth Rogl, JKU Linz & DI Dr. Wolfgang Aschauer, PH Oberösterreich <i>Erwin-Schrödinger-Hörsaal (Boltzmann-gasse 5, 5. Stock, Raumnr. 3500)</i> Wie kann man im Physikunterricht S-Kompetenz beurteilen? Dr. ⁱⁿ Marianne Korner & Denise Gstall BEd, Universität Wien <i>Zimmer 55 (Boltzmann-gasse 5, 1. Stock, Raumnr. 3114)</i>
15:00-16:00	Dunkle Materie beleuchtet Assoz. Prof. Dr. Josef Pradler, Universität Wien		
16:30-17:30	Energie besser verstehen – Energieunterricht mit dem Energie-Feld-Ansatz Dr. Manuel Becker		
17:45-18:45	All Inclusive: Ein Rollstuhlfahrer im simulierten Mondhabitat Tomáš Dučai, BSc, Universität Wien		

danach	Brötchen und Getränke
--------	------------------------------

Vorträge Physik
*ORT: Lise-Meitner-Hörsaal,
Boltzmann-gasse 5, 1. Stock, 1090 Wien*

Vorträge Chemie
*ORT: Christian-Doppler-Hörsaal,
Boltzmann-gasse 5, 3. Stock, 1090 Wien*

9:00-10:00	Laborino – das Hosentaschenlabor für Schule und Universität Prof. Dr. Dietmar Block, Universität Kiel	9:00-9:55	Fakten, Fake News, Falsche Argumente – Informationen im naturwissenschaftlichen Unterricht bewerten lernen Prof. Dr. ⁱⁿ Annette Marohn, Universität Münster
10:00-11:00	Ein Unterrichtskonzept zu elektromagnetischer Strahlung für die Sek. I Mag. ^a Sarah Zloklikovits, GRG3	10:00-10:55	Adaptives Erklären im Chemieunterricht Prof. Dr. Oliver Tepner, Universität Regensburg
11:30-12:30	Kristallstrukturen - Ein neuer Zugang zum Teilchenmodell für die Sek. I Dr. Florian Budimaier, Universität Wien	11:30-12:30	Moleküle „sichtbar“ machen Dr. ⁱⁿ Rita Krebs, BA, PH Niederösterreich

Workshops nach dem Mittagessen		Exkursionen	
13:15-16:15	Förderung der Erklärkompetenz von Chemielehrkräften Prof. Dr. Oliver Tepner, Universität Regensburg <i>Seminarraum AECCs (Porzellangasse 4, 3. Stock)</i> Energie besser verstehen – Energieunterricht mit dem Energie-Feld-Ansatz Dr. Manuel Becker, Universität Wien <i>Zimmer 55 (Boltzmannngasse 5, 1. Stock, Raumnr. 3114)</i>	ab 14:30	Dialog im Dunkeln alle 15 Minuten beginnt eine Tour Kosten: 19,90€ pro Person, vor Ort zu bezahlen <i>Barbara-Prammer-Allee 13/1/4, 1220 Wien</i>
14:00-17:00	Informationen bewerten lernen – zwei Ansätze für den naturwissenschaftlichen Unterricht Prof. Dr. ⁱⁿ Annette Marohn, Universität Münster <i>Multifunktionsraum (Porzellangasse 4, 3. Stock)</i> Producing comics in physics without being a great artist Eman Sharaf MEd, Universität Wien <i>Seminarraum Theoretische Physik, (Boltzmannngasse 5, 5. Stock)</i> Buzz Lightyear and the Physics classroom: in-class discussion of time dilation Dr. ⁱⁿ Esmeralda Campos, Universität Wien <i>Besprechungsraum AECCs (Porzellangasse 4, 2. Stock)</i> Laborino – eine praktische Einführung Prof. Dr. Dietmar Block, Universität Kiel <i>Schulversuchspraktikum (Porzellangasse 4, E1 Zwischengeschoß)</i> Einfache Schul-Experimente zu zentralen E-Kompetenzen wie der Vertrauenswürdigkeit von Messdaten Dr. Clemens Nagel, Universität Wien <i>Anfängerpraktikum (Boltzmannngasse 5, Erdgeschoß)</i> Unterrichtsplanung mit KI Mag. ^a Anna Reumann-Buczolich, PH Burgenland <i>Josef-Stefan-Hörsaal (Boltzmannngasse 5, 3. Stock, Raumnr. 3329)</i> Kritisches Denken fördern: Klimawandel im Physikunterricht Mag. ^a Magdalena Micoloi, TU Dresden & Univ.-Prof. ⁱⁿ Dr. ⁱⁿ Lana Ivanjek, Universität Linz <i>Erwin-Schrödinger-Hörsaal (Boltzmannngasse 5, 5. Stock, Raumnr. 3500)</i> Kristallstrukturen - Ein neuer Zugang zum Teilchenmodell für die Sek. I Dr. Florian Budimaier, Universität Wien <i>Kurt-Gödel-Hörsaal (Boltzmannngasse 5, EG)</i>		
17:30-19:00	Pub Quiz Judith Freytag, Florian Budimaier und das Team der Fortbildungswoche <i>Christian-Doppler-Hörsaal (Boltzmannngasse 5, 3. Stock)</i>		

Mittwoch, 26.2.2025

Workshops		Exkursionen	
9:00-12:00	Elektromagnetische Strahlung verständlich unterrichten Mag. ^a Sarah Zloklikovits, GRG 3 Haagenmüllergasse <i>Schulversuchspraktikum (Porzellangasse 4, E1 Zwischengeschoß)</i> Alles nur Schall und Rauch? Schüler:innenexperimente zu Akustik und Optik in der Sekundarstufe I Dr. ⁱⁿ Christina Adorjan, PH Niederösterreich <i>Multifunktionsraum (Porzellangasse 4, 3. Stock)</i>	9:00-11:00	Müllverbrennungsanlage Spittelau <i>Spittelauer Lände 45, 1090 Wien</i>
		9:00-12:15	Rasterelektronenmikroskopie <i>Boltzmannngasse 5, 1090 Wien</i>
		10:00-11:30	Klima-Wind-Kanal Rail Tec Arsenal <i>Paukerwerkstraße 3, 1210 Wien</i>
		14:00-15:30	Grüner Wasserstoff aus Wien <i>Wien Energie, Erdbergstraße 238 / Schwerlaststraße, 1110 Wien</i>
		14:30-16:30	FOTEC Forschungs- und Technologietransfer <i>Viktor Kaplan-Straße 2, 2700 Wiener Neustadt</i>
		15:00-16:30	IQOQI Vienna – Institut für Quantenoptik und Quanteninformation <i>Boltzmannngasse 3, 1090 Wien</i>

Fokus Sachunterricht 2025: Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit

ORT: KPH Wien/Krems, Campus Wien-Strebersdorf, Mayerweckstr. 1, 1210 Wien

Donnerstag, 27.2.2025, 14:00-18:00

Im Großen wie im Kleinen gilt es zu überlegen, wie wir von der Wegwerfgesellschaft hin zu einer Kreislaufwirtschaft kommen – um Ressourcen zu schonen, Abfälle zu vermeiden und Energie zu sparen. So gelingt es im Unterricht zu vermitteln, inwiefern sich durch verantwortungsvolles Handeln ein Beitrag zur Nachhaltigkeit leisten lässt.

Nach einem Impulsvortrag können Sie in zwei Workshop-Runden in die Welt von Farbe, Licht und Schatten eintauchen, Materialien selbst ausprobieren und Ihre eigene Expertise zum Thema erweitern.

Die Anmeldung für die Workshops ist bei der Registrierung vor Ort möglich. In der Pause ist Zeit zum Austausch bei Kaffee und Kuchen, zum Schmökern in Literatur und zum Besuch der Informationsstände.

HAUPTVORTRAG: Wie wird man zum Role Model der Kreislaufwirtschaft?

WORKSHOPS

- Die Wurmbox
- Nachhaltig in die Zukunft mit Molecool-lino
- Forschendes Lernen zum Thema Handy
- Von einer linearen zu einer zirkulären Wissensvermittlung
- Licht bei Nacht
- Textile Kette am Beispiel der Jeans

Mehr Informationen: www.kphvie.ac.at/fokus-sachunterricht

Hinweise für die Teilnehmerinnen und Teilnehmer:

- Für alle Veranstaltungen ist wegen beschränkter Teilnehmer:innenzahl eine vorherige Anmeldung notwendig. Die Anmeldung erfolgt ausschließlich über das Internet unter <https://www.pluslucis.org/>. Dort sind weitere Informationen zu finden. Sollte später Ihre Teilnahme unmöglich werden, ersuchen wir Sie dringend, sich im Anmeldesystem selbst wieder abzumelden, damit andere Personen den Platz nutzen können. Anmeldeschluss: 18.2.2025
- Zur dienstrechtlichen Absicherung Ihrer Teilnahme ist die Inskription an der Pädagogischen Hochschule Wien notwendig. Informationen dazu sind auf unserer Homepage abrufbar.
- Die Teilnahme ist für Mitglieder des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts frei. Von Nichtmitgliedern wird für die Anmeldung ein Beitrag zu den Organisationsspesen in der Höhe von Euro 20,- eingehoben.
- Alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer werden darauf aufmerksam gemacht, dass sie Labors, Betriebsstätten und sonstige Teile von Fabriks- oder anderen Anlagen auf eigene Gefahr besuchen und dass weder das Unternehmen noch der Verein für Unglücksfälle und sonstige wie auch immer geartete Schadensfälle, die sich – gleichgültig ob durch eigenes oder fremdes Verschulden, Zufall oder anders – während oder anlässlich des Besuches ereignen, haftbar oder schadenersatzpflichtig sind.
- Es wird darauf hingewiesen, dass am Veranstaltungsort Fotos angefertigt werden und zu Zwecken der Dokumentation der Veranstaltung veröffentlicht werden können.
- Die Workshops werden unterstützt durch die Pädagogische Hochschule Wien.
- Mit der Anmeldung zur Fortbildungswoche stimmen ich ausdrücklich zu, dass die von mir angegebenen Daten für Veranstaltungszwecke verarbeitet werden dürfen. Die Datenschutzerklärung für diese Anwendung finden Sie unter https://www.pluslucis.org/Dateien/Datenschutzerklaerung_Verein.pdf.
- Mir ist bekannt, dass ich meine Einwilligung jederzeit durch Übersendung eines Schreibens an den Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts, +43-1-4277-60330, vorstand@pluslucis.org, Martin Hopf widerrufen kann.

Ein Einstieg in die empirische Wissenschaft

David Hammer

1. Einleitung

Es ist etwas mehr als 40 Jahre her, dass ich zum ersten Mal Schüler:innen die Periode eines Pendels messen ließ. Das Curriculum und ich leiteten die Lernenden an, 10 Pendelausschläge zu messen, um den Fehler pro Periode zu verringern, wobei die Zeitmessung von Hand mit mechanischen Stoppuhren erfolgte. Es funktionierte gut genug, dass die Ergebnisse eine kleine Variation mit der Amplitude, aber nicht mit der Masse zeigten.

Die Unabhängigkeit von der Masse stimmte mit dem überein, was wir über den freien Fall gesehen und diskutiert hatten, und bestätigte, was Galileo entdeckt hatte. Aber er hatte auch entdeckt, dass die Periode unabhängig von der Amplitude ist, was unsere Ergebnisse nicht bestätigten. Das war es, was das Labor so interessant machte: Mit einem ganz einfachen Experiment konnten wir einer maßgeblichen Quelle widersprechen. Es war eine Gelegenheit, über die Erkenntnistheorie der Naturwissenschaft zu sprechen und darüber, wie Galileo selbst den Vorrang von Beweisen und „bescheidenen Überlegungen“ gegenüber „der Autorität von Tausenden“ betonte.

Einige Jahre später erfuhr ich von al-Hasan ibn al-Haytham, der Hunderte von Jahren zuvor geschrieben hatte: „[D]er Wahrheitssuchende ist nicht derjenige, der die Schriften der Alten studiert und, seiner natürlichen Veranlagung folgend, ihnen vertraut, sondern derjenige, der ihnen misstraut und hinterfragt, was er aus ihnen entnimmt, derjenige, der sich dem Argument und dem Beweis unterwirft und nicht den Aussagen eines Menschen, dessen Natur mit allen Arten von Unvollkommenheit und Mängeln behaftet ist.“ [1, S. 54].

Es ist eine der Schönheiten der Naturwissenschaft als Disziplin, sich mit der eigenen Sinnstiftung auf der Grundlage von Nachdenken und Belegen, „Argumenten und Demonstrationen“ zu befassen, anstatt einfach die Autorität von „Alten“ oder „Tausenden“ zu akzeptieren. Das heißt natürlich nicht, dass man das, was andere gesagt haben, ignorieren soll, sondern dass man bereit sein muss, auch andere Möglichkeiten in Betracht zu ziehen. Ideen, die sich im Laufe der Zeit bewährt haben, sind zuverlässiger, weil sie Herausforderungen überstanden haben, und manchmal eröffnen die Herausforderungen ganz neue Denkrichtungen.

Im Laufe der Jahre hat sich mein Verständnis von Schüler:innen und Lernen weiterentwickelt und verändert, und mit ihm auch meine Ziele und Ansätze für die Experimente zum Pendel. Die Studierenden sind anders, zum einen, weil ich jetzt an einem ausgewählten privaten College und nicht mehr an einer öffentlichen High School unterrichte, und zum anderen, weil

sie in einer ganz anderen Welt aufgewachsen sind, vor allem in Bezug auf das Wissen. Als ich 1982 mit dem Unterrichten begann, gab es noch keine Handys und kein World Wide Web. Die Lernenden, die ich heute unterrichte, sind mit dem allgegenwärtigen Zugang zu vielen Petabytes an Informationen (einschließlich Fehlinformationen) aufgewachsen, die einen bedeutenden Teil des gesellschaftlichen Wissens ausmachen, ebenso wie Kommunikation und Computertechnik.

2. Sinnstiftung bei den Lernenden als Priorität

Als ich mit dem Unterrichten begann, ging ich davon aus, dass die Lernenden sich mit der Sinnstiftung beschäftigen würden. Das war eine stillschweigende Annahme, denn ich konzentrierte mich (wie auch das Curriculum) auf die grundlegende Strategie zur Verringerung des Fehlers bei der Messung einer Periode und darauf, dass die Schüler:innen den Zusammenhang zwischen der Masse und dem freien Fall oder der Periode eines Pendels erkennen. Nachdem ich Erfahrungen gemacht hatte, schließlich Daten sammelte und untersuchte, was passierte, stellte ich fest, dass viele Schüler:innen eher lernen, „Schule zu betreiben“ als „Naturwissenschaft zu betreiben“ [2]. Die Schüler:innen gaben Antworten auf physikalische Fragen, die völlig unplausibel waren, wenn sie sie mit ihren Erfahrungen vergleichen wollten. Immer wieder fand ich Belege dafür, dass die Lernenden ihr Wissen über die Welt außer Kraft setzten und stattdessen das befolgten, was sie als meine Vorschriften für korrektes Denken ansahen.

Ein Beispiel: Ein Schüler, der die Geschwindigkeiten von zwei Projektilen verglich, schrieb eine sorgfältige Erklärung, dass sich das eine mit geringerer Geschwindigkeit bewegte, weil es ein weiter entferntes Ziel in kürzerer Zeit erreichte [3]. Es ist unwahrscheinlich, dass der Schüler in der Situation, in der er beispielsweise kleine Steine in einen Teich wirft, auf diesen Gedanken gekommen wäre. Aber für viele Lernende richtet sich die Aufmerksamkeit im Physikunterricht ganz auf die Formeln; der gesunde Menschenverstand ist irrelevant oder, schlimmer noch, er kann in die Irre führen.

Wenn die Schüler:innen das im Unterricht tun, haben sie keine Physik gemacht. „Die gesamte Naturwissenschaft ist nichts anderes als eine Verfeinerung des alltäglichen Denkens“, wie Einstein es ausdrückte. Die erste Priorität muss also sein, dass die Schüler:innen lernen, Physik zu betreiben.

Ich gehe davon aus, dass die Lernenden mit wertvollen Kenntnissen und Erfahrungen, also mit intellektuellen Ressourcen für das Erlernen der Physik in meinen Kurs kommen [4]. Sie

wissen sehr viel über die physikalische Welt – wie es ist, kleine Steine zu werfen oder große zu treten, wie es sich anfühlt, im Wasser zu schwimmen, in der Luft zu springen, Treppen zu steigen und so weiter und so fort – ein Wissen, das meistens funktioniert, sonst könnten sie ihren Alltag nicht bewältigen. Sie wissen auch viel über das Wissen selbst und das Lernen – wie es ist, etwas herauszufinden oder gesagt zu bekommen, zu raten, zu hinterfragen, sich verwirrt zu fühlen – sowie über die Gesellschaft und soziale Situationen, die Institution Schule, emotionale Zustände.

Physik zu betreiben, was natürlich auch bedeutet, Physik zu lernen, bedeutet, auf Vorwissen zurückzugreifen und es zu verfeinern. Es ist ein chaotisches „Durcheinander“ [5], bei dem es darum geht, alles zu sortieren, Verbindungen oder Konflikte mit neuen Ideen und Belegen zu finden, Lücken oder Ungereimtheiten zu erkennen und zu formulieren [6]. Ein Teil des Physikunterrichts besteht darin, dass man lernt, mit Verwirrung umzugehen, etwa wenn Berechnungen zu Ergebnissen führen, die dem gesunden Menschenverstand widersprechen, oder wenn die Messungen im Labor nicht mit den theoretischen Vorhersagen übereinstimmen. Eine Herausforderung für den Unterricht besteht darin, dass viele Schüler:innen aufgrund früherer Erfahrungen in der Schule gelernt haben, dass Verwirrung etwas Schlechtes, Peinliches ist, etwas, das man vermeiden oder beseitigen muss.

Es ist eine schwierige, heikle Aufgabe, die Erwartungen der Schüler:innen an den Erfolg im Unterricht zu verändern. Die meisten sind so sehr daran gewöhnt, Schule zu betreiben, das Spiel, Informationen von der Lehrkraft oder aus dem Buch zu erhalten und deren Anwendung zu üben, um Fragen richtig zu beantworten. Die Vorstellung, dass Verwirrung produktiv und gut ist, ist neu und fremd. Das heißt, sie ist im schulischen Kontext befremdlich; in anderen Kontexten haben die Schüler:innen vielleicht Spaß am Rätseln, z. B. wenn sie versuchen, Knobelaufgaben oder Escape Rooms, Sudoku oder Kreuzworträtsel zu lösen. Ich versuche, sie mit Analogien (z. B. „Verwirrung ist für das Lernen wie richtiges Atmen beim Training“) und mit Beispielen aus der historischen und aktuellen Physik davon zu überzeugen, dass Verwirrung für das naturwissenschaftliche Arbeiten unerlässlich ist: Bei der Arbeit von Physiker:innen geht es darum, Probleme zu finden, zu artikulieren und sich mit ihnen auseinanderzusetzen.

Dennoch haben ihre früheren Erfahrungen eine starke Anziehungskraft, emotional, epistemologisch und sozial. Die Herausforderung für mich besteht darin, auf eine Art und Weise zu unterrichten, die konsequent und beharrlich dazu ermutigt, eine andere Vorstellung davon zu entwickeln, was es bedeutet, an der Schule teilzunehmen.

3. Messung der Periode eines Pendels

In meiner Position an der Tufts University, an der ich seit 2010 tätig bin, ist einer meiner regulären Kurse eine Hauptfach-Einführungsveranstaltung in Mechanik. Sie ist eine Voraussetzung für Studierende der Ingenieurwissenschaften, die etwas mehr als die Hälfte meiner Studierenden ausmachen. Ich unterrichte sie in der Regel im Frühjahrssemester, um sie mit meiner Lehrtätigkeit in der Fachdidaktik zu koordinieren; andere Fakultätsmitglieder unterrichten sie im Herbstsemester.

Bis 2020 bestand mein Ansatz für den Laborteil des Kurses darin, überhaupt keine schriftlichen Anweisungen zu geben. Die Studierenden sahen zu Beginn des Praktikums eine kurze Präsentation mit einer Aufgabe, einer kurzen Übersicht über die ihnen zur Verfügung stehenden Materialien und allen relevanten Regeln und Sicherheitshinweisen.

Der Verzicht auf schriftliche Unterlagen schien den Lernenden zu helfen, zu verstehen, dass es ihre Aufgabe ist, ihren Ansatz und ihre Methoden zu entwickeln und zu verfeinern.

Die Nachteile dieses Ansatzes lagen auf der Hand: Die Präsentationen der Dozierenden variierten, und die Mund-zu-Mund-Propaganda war kein wirksames Mittel, um den Ansatz mit anderen Lehrenden zu teilen. Deshalb hat sich vor einigen Jahren eine Gruppe von uns zusammengetan, um Dokumente zu erstellen. Wir lassen Überarbeitungen zu: Unsere derzeitige Praxis besteht darin, Aufzeichnungen über die Praktikumsaufgaben von Jahr zu Jahr zu führen, und jede:r Dozierende hat das Vorrecht, sie zu überarbeiten. Wenn ich unterrichte, versuche ich, die Aufgabenstellung so einfach wie möglich zu halten, um die Herausforderung zum Ausdruck zu bringen und alles zu vermeiden, was bei den Lernenden Erwartungen hinsichtlich richtiger Antworten und Befolgung der Anweisungen wecken könnte.

Ein Teil meines Unterrichts ist immer noch nicht schriftlich fixiert – eine kurze Einführung in das Thema Messen, die ich in der Vorlesung gebe. Ich zeige ein 10-Sekunden-Video von einer Badezimmerwaage, auf der ich stehe, mit Markierungen in Pfund und halben Pfund. Auf dem Video ist zu sehen, wie die Nadel etwa einmal pro Sekunde leicht zwischen der Markierung bei 165 und knapp über der Markierung bei 165,5 lbs hin- und herspringt. Wie ist diese Messung zu werten? Wie sehr sollte man ihr vertrauen? Die Lernenden wundern sich über das Springen der Nadel und entwickeln Ideen, warum das passiert und wie genau die Waage ist; sie erwähnen, dass die Messung davon abhängt, was ich trage (ich bin im Video nicht zu sehen) und dass mein Gewicht von meinem Flüssigkeitsstand abhängt. [7] Ich reflektiere ihre Ideen, um zu verdeutlichen, dass es bei einigen um Abweichungen bei der Messung und

bei anderen um Abweichungen beim Phänomen, in diesem Fall meinem Gewicht, geht. Noch wichtiger ist mir, dass sie auf ihr Alltagswissen und ihre Fähigkeiten zurückgreifen, um zu betonen, dass ich hoffe, dass sie genau das tun werden, wenn sie sich der Messaufgabe beim ersten Termin stellen.

3.1 Erste Einheit: Wie genau kann man die Periode eines Pendels messen?

Dies ist das erste Praktikum des Semesters, und es beginnt im ersten Teil mit der Aufgabe, dass die Lernenden einen Weg finden sollen, die Periode eines Pendels so genau wie möglich zu messen. In ihrem kurzen Bericht, der am Ende der 2,5 Stunden fällig ist, sollten sie ihre Technik und die von ihnen ermittelte Genauigkeit erläutern, z. B. auf 0,2 Sekunden oder 0,1 s oder 0,0000001 s genau ...

Für viele Lernende ist es das erste Mal, dass sie selbst entscheiden können, was sie im Labor machen wollen, aber sie sind fast alle in der Lage, loszulegen und gute Arbeit zu leisten. Sie gehen die Herausforderung auf unterschiedliche Weise an. Viele machen wiederholte Versuche und messen einfach mit einer Stoppuhr (elektronisch, manchmal auch mit dem Handy). Einige lassen das Pendel mehrmals schwingen, um den Fehler des Klickens der Stoppuhr zu verringern. Einige diskutieren darüber, wie wichtig es ist, dass das Pendel ein wenig langsamer schwingt, was oft zu Experimenten führt, bei denen der Startwinkel variiert wird. Einige nehmen einzelne Schwünge mit der Zeitlupenfunktion ihres Smartphones auf, wobei ein Timer im Video angezeigt wird; andere zählen die Bilder des Videos selbst, da sie die Bildrate kennen. Sie experimentieren damit, die Zeit zwischen den Endpunkten oder der Nulldurchgänge zu messen; sie probieren verschiedene Auslösemechanismen aus.

Wenn es darum geht, ihre Genauigkeit zu quantifizieren, geben viele Lernende die Daten aus mehreren Versuchen in einen Taschenrechner oder eine Tabellenkalkulation ein und lassen die Standardabweichung ermitteln. Wir fragen die Lernenden, die diese Formulierung verwenden, was sie bedeutet, aber nur sehr wenige können eine klare, vernünftige Erklärung geben, und wenn sie das nicht können, raten wir von der Verwendung dieser Formulierung ab. Die Lernenden finden andere Möglichkeiten, z. B. die Hälfte des Bereichs oder den Durchschnitt der Abweichungen vom Mittelwert. Die von den Lernenden angegebene Genauigkeit liegt in der Regel bei +/- 0,05 bis 0,1 Sekunden, obwohl es Gruppen gibt, die viel kleinere, unrealistisch genaue Werte angeben. Im Idealfall endet die Unterrichtseinheit damit, dass alle Gruppen ihre Verfahren und ihre Genauigkeit diskutieren und vergleichen.

3.2 Zweite Einheit: Testen von Vermutungen.

Im Laufe der ersten Einheit kommen zumindest in einigen Kursabschnitten die Vermutungen zur Sprache, ob die Periode von (1) der Masse des Pendelkörpers oder (2) der Amplitude

der Schwingung abhängt. Die zweite Einheit wiederholt diese Vermutungen und fügt hinzu, dass Galileo „behauptete, die Periode eines Pendels hänge weder von der Amplitude noch von der Masse des Gewichts (genannt ‚Bob‘) ab.“

Die Herausforderung besteht heute darin, diese Fragen zu untersuchen: Beeinflusst die Amplitude (der Winkel) die Periode mit der Genauigkeit, die Sie messen können? Hat die Masse des Bobs einen Einfluss?

Vor einigen Jahren berichteten mehr als zwei Drittel der Klasse, dass sie Galileis Behauptungen bestätigen konnten, obwohl viele von ihnen über Daten verfügten, die eine eindeutige Abhängigkeit, meist von der Amplitude, manchmal aber auch von der Masse, zeigten.

Die Lernenden neigen dazu anzunehmen, dass Galilei Recht hatte, was eine vernünftige Annahme ist, die auf all ihren früheren Erfahrungen im Labor beruht, aber sie scheint im Widerspruch zu den Praktiken der empirischen Wissenschaft zu stehen [8]. In einigen Fällen revidieren die Lernenden ihre früheren Behauptungen über die Genauigkeit ihrer Messungen, in anderen Fällen ignorieren sie einfach, was sie herausgefunden hatten.

Vor ein paar Jahren habe ich die Anweisungen um Folgendes ergänzt:

Achten Sie bitte darauf, dass Sie Ihre Daten und Ihre Ergebnisse ehrlich darstellen! Was sagen Ihre Daten aus, wenn man die Genauigkeit berücksichtigt, die Sie erzielen konnten?

Der Anteil der Lernenden, die Galileis Behauptungen bestätigten, sank auf etwa die Hälfte.

Um es klar zu sagen: Das Ziel ist nicht, dass die Lernenden die uns bekannten richtigen Antworten erhalten – das kann nicht sein, wenn unsere Hoffnung ist, die Erwartung zu zerstören, dass Erfolg im Labor bedeutet, die vom Lehrenden gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Das Ziel ist vielmehr, dass sie lernen, durch empirische Untersuchungen etwas über die Welt zu lernen – und zwar ganz einfach! Wir müssen evaluieren und Feedback geben, basierend auf unserem Gefühl dafür, was einen produktiven Anfang ausmacht. Zu diesem Zweck versuchen wir, unser Wissen darüber, was „wirklich“ passiert, zurückzustellen und uns darauf zu konzentrieren, was das Experiment der Lernenden zeigt.

Manchmal kommt es vor, dass Lernende nicht bemerken, dass sich durch die Veränderung der Masse die effektive Länge des Pendels verändert hat, und ihre Daten daher eine Abhängigkeit zeigen. Für jemanden, der nicht bereits weiß, was passieren sollte, ist das vielleicht nicht leicht zu erkennen. Wenn Lernende berichten, dass sie eine Abhängigkeit gefunden haben – und bereit sind, Galileis Behauptung zu bestreiten –, spiegelt dies Werte wider, die wir kultivieren wollen. Anstatt abschätzig zu kommentieren, dass sie etwas übersehen haben, würden wir

unterstützend kommentieren und zustimmen, dass auch wir eine Abhängigkeit sehen.

Beim Lesen und Kommentieren und natürlich bei der Benotung achten wir in erster Linie auf Anzeichen für das Engagement der Lernenden bei der Sinnstiftung. Dazu könnte die Arbeit von Lernenden gehören, die in der Annahme, dass Galilei richtig lag, ihr Experiment und ihre Analyse überprüfen, um zu verstehen, warum ihre Ergebnisse anders ausfielen [9]. Dazu könnte auch gehören, dass die Lernenden ihr Urteil zurückhalten, indem sie erkennen, dass ihre Daten keine Bestätigung liefern, aber Vorsicht walten lassen, bevor sie eine eindeutige Schlussfolgerung ziehen, dass Galilei falsch lag.

Eine wichtige Entscheidung bei der Gestaltung dieser Einheiten besteht darin, dass die Lernenden die statistische Analyse von Fehlern erst später lernen sollen. Das bedeutet, dass sie in den meisten Fällen nicht über Analysetechniken (wie die „3 σ -Regel“) verfügen, um quantitative Feststellungen zu treffen. Diejenigen, die über diese Techniken verfügen, können sie natürlich anwenden und den anderen erklären, was sie tun. Aber angesichts der im Labor zur Verfügung stehenden Zeit und weil ich weiß, wie einfach es ist, die Lernenden zurück in den „Schule betreiben“-Modus zu bringen, ermutige ich die Lernenden, ihre Urteile auf eine Weise zu fällen, die für sie Sinn macht.

Hier sind zum Beispiel die Daten einer Gruppe aus diesem Frühjahr, die die Abhängigkeit vom Winkel getestet hat:

Tabelle 1: Messung von Studierenden

Winkel °	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Durchschnitt
20°	1.28s	1.24	1.23	1.25s
50°	1.34s	1.43s	1.35	1.37s
80°	1.53s	1.39s	1.46s	1.46s

In ihrer schriftlichen Ausarbeitung merkten sie an, dass sie sich nicht sicher seien, ob es einen Unterschied in den Zeiten zwischen 20° und 50° oder zwischen 50° und 80° gebe, aber sie seien sich sicher, dass es einen Unterschied zwischen 20° und 80° gebe. Aus meiner Sicht ist das eine vernünftige qualitative Einschätzung, und ich ziehe sie einer Analyse vor, die statistisch strenger, aber für sie weniger greifbar ist.

3.3 Dritte Einheit: Austausch, Diskussion und Reflexion der Ergebnisse

Seit mehreren Jahren gibt es eine dritte Einheit, in der sich die Gruppen treffen, um ihre Ergebnisse zu besprechen und ihre Reaktionen auf die Einheiten zu diskutieren. Die Lernenden haben vor dieser Woche Entwürfe ihrer Laborberichte eingereicht, die nach dem Treffen noch einmal überarbeitet werden können. Für die Aufgabe dieser Woche habe ich das Zitat von Ibn al-Haytham aufgenommen, um hervorzuheben, wie er zum Ausdruck gebracht hat, was nach wie vor die Grundwerte

der Wissenschaft sind, nämlich die Suche nach der Wahrheit durch „Argumente und Demonstrationen“, Nachdenken und empirische Belege, und das kann bedeuten, dass man mit den Aussagen der Autoritäten oder mit dem, was scheinbar jeder glaubt, nicht einverstanden ist.

Ich gehe auch in der Vorlesung darauf ein: Dazu gehört, die empirischen Ergebnisse (die Masse des Pendels hat keinen Einfluss auf die Schwingungsdauer), mit den Newtonschen Gesetzen zu verbinden, die sie parallel zu ihren Pendelversuchen gelernt haben. Für die meisten Gruppen stimmen die empirischen Ergebnisse nicht nur mit den Behauptungen von Galilei überein, sondern auch mit der theoretischen Analyse, und diese Übereinstimmung ist eine Grundlage für das Vertrauen in das Ergebnis.

Es ist noch zu früh in ihren Studien, um einer Newtonschen Berechnung der Periode eines Pendels zu folgen, daher bleibt die Frage, wie die Periode vom Winkel abhängt, vorerst rein empirisch. Die Daten der meisten ihrer Experimente zeigen jedoch eine Abhängigkeit, und ich habe diese Feststellung bestätigt, wobei ich feststelle, dass die Diskrepanz bei größeren Winkeln größer wird. Wir müssen Galilei nicht glauben, und die Lernenden müssen mir natürlich auch nicht glauben.

4. Nächstes Jahr wird es anders sein!

Ich verwende seit mehr als 40 Jahren immer wieder Pendel in meinem Unterricht, und ich ändere ständig etwas. Einiges davon ist Teil des „responsiven Unterrichts“ [10]: Jedes Jahr sagen und tun die Studierenden etwas anderes, und wenn der:die Dozent:in den Gedanken der Lernenden wirklich zuhört und sich auf sie einlässt, wird sich der Kurs anders entwickeln.

Aber meine Veränderungen sind nicht nur eine Reaktion auf das, was im Moment passiert. Sie spiegeln auch wider, dass ich neue Ideen habe und zu neuen Erkenntnissen komme. Ich hatte nie das Gefühl, dass mein Verständnis von Schüler:innen und Lernen so vollständig und zuverlässig ist wie das Verständnis, das ich von physikalischen Phänomenen – einschließlich Pendeln – entwickeln konnte. Das liegt zum Teil daran, dass die Phänomene des Lernens und der Kognition wesentlich komplexer sind. Zum anderen verändern sich diese Phänomene: Wenn man ein Pendel schwingt oder Steine in einen Teich wirft, ist das Phänomen genau das, was es vor 300, 1000 oder 5000 Jahren war. Aber die Lernenden, die dieses Jahr in meine Klasse kommen, sind nicht mehr dieselben wie zu Beginn meines Studiums, und die Schüler:innen, die in 10 Jahren in die Klasse kommen, werden nicht mehr dieselben sein wie heute. Ich denke, dass diese Unterrichtseinheit, wie alles andere auch, immer Work in Progress sein wird.

5. Danksagung

Ich bin Paul Wagoner, der die Labore für die Abteilung koordiniert und ein wunderbarer Mitarbeiter und Denkpartner

war, sehr dankbar. Ich bin auch meinen wunderbaren Kollegen Roger Tobin, Hugh Gallagher und Tim Atherton dankbar für ihre führende Rolle bei der Entwicklung schriftlicher Aufgaben. Und nicht zuletzt bin ich den vielen Lehrassistent:innen dankbar, die mit mir unterrichtet haben und mir bei der Erfindung und

Überarbeitung von Laboraktivitäten, einschließlich dieser, geholfen haben.

David Hammer *Tufts University*

Literatur

- [1] Sabra, A. I. (2003). Ibn al-Haytham: Brief life of an Arab mathematician. *Harvard Magazine*, September-October, 54-55.
- [2] Jiménez-Aleixandre, M. P., Rodríguez, A. B. & Duschl, R. A. (2000). „Doing the lesson“ or „doing science“: Argument in high school genetics. *Science Education*, 84(6), 757-792 und Hutchison, P. & Hammer, D. (2010). Attending to Student Epistemological Framing in a Science Classroom. *Science Education*, 94(3), 506-524. <https://doi.org/10.1002/sce.20373>
- [3] Radoff, J., Jaber, L. Z. & Hammer, D. (2019). „It's Scary but It's Also Exciting“: Evidence of Meta-Affective Learning in Science. *Cognition and Instruction*, 37(1), 73-92. <https://doi.org/10.1080/07370008.2018.1539737>
- [4] Hammer, D. (2000). Student resources for learning introductory physics. *American Journal of Physics*, *Physics Education Research Supplement*, 68(S1), S52-59.
- [5] Pickering, A. (1993). The mangle of practice: Agency and emergence in the sociology of science. *The American Journal of Sociology*, 99(3), 559-589 und Manz, E. (2015). Resistance and the development of scientific practice: Designing the mangle into science instruction. *Cognition and Instruction*, 33(2), 89-124.
- [6] Phillips, A. M., Watkins, J. & Hammer, D. (2017). Problematicizing as a scientific endeavor. *Physical Review Physics Education Research*, 13(2), 020107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.020107>
- [7] Viele Schüler:innen wissen sehr viel über dieses Thema. In einem Jahr beschwerte sich eine Person darüber, dass diese Aktivität Angst über ihr Gewicht hervorrufe. Seither versuche ich behutsam anzusprechen, dass diese Möglichkeit besteht.
- [8] Phillips, A. M., Sundstrom, M., Wu, D. G. & Holmes, N. G. (2021). Not engaging with problems in the lab: Students' navigation of conflicting data and models [Article]. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2), 24, Article 020112. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.020112>
- [9] Descamps, I., Jeon, S., Holmes, N. G., Scherr, R. E. & Hammer, D. (to appear). Dynamics of productive confirmation framing in an introductory lab. *Physical Review Physics Education Research*.
- [10] Robertson, A. D., Scherr, R. E. & Hammer, D. (2016). *Responsive teaching in science and mathematics*. Routledge, Taylor & Francis Group.

Eine Pendelsimulation verbessert die Lernergebnisse der Studierenden in einem Inquiry-Praktikum

Doug Bonn, James Day und Joss Ives

1. Einführung

Ein Pendel bietet eine Plattform für eine Vielzahl von physikalischen Experimenten, die im Physikunterricht auf Schul- und Hochschulebene eingesetzt werden können. Mehrere Merkmale machen es attraktiv: Der Aufbau ist einfach und es ist unkompliziert, ein Pendel mit nahezu idealen Eigenschaften zu bauen. Die Messungen sind einfach; die Periode wird durch das Abzählen von Zyklen in einem gewissen Zeitraum gemessen. Daraus ergibt sich eine breite Palette von Experimenten, die die Variablen untersuchen, die die Periode beeinflussen könnten. Man kann auch leicht Simulationen anstelle von realen Aufbauten einsetzen, was das Pendel für das Remote Learning prädestiniert.

Im folgenden Beitrag werden wir die Verwendung eines Pendels in einer Reihe von Praktikumsexperimenten im ersten Jahr des Studiums vorstellen. Diese zielen darauf ab, die Entwicklung von Kompetenzen im Umgang mit quantitativen Daten der Studierenden zu fördern. Wir beginnen mit einer detaillierten Beschreibung dieser Praktikumsserie und den vielen Stellen, an denen das Pendel eine Rolle spielen kann. Danach konzentrieren wir uns auf eine bestimmte Implementierung, bei der das Pendel in einem „Modell-Fail“-Labor verwendet wird. Hier geht es darum, das Versagen der Kleinwinkelnäherung zu untersuchen, die sehr oft dazu verwendet wird, um das Pendelproblem auf einen einfachen harmonischen Oszillator zu reduzieren. Wir schließen mit einer Beschreibung der Verwendung einer Simulation für das Experiment ab und heben einige Vorteile hervor, die durch die Arbeit mit einer Simulation erzielt werden können.

2. Beschreibung von quantitativen Inquiry-Praktika

Die von uns entwickelte Praktikumsserie dient zwei allgemeinen Zielen [1]. Das Erste ist das Erlernen eines Satzes von statistischen Werkzeugen, einschließlich: Schätzung der Unsicherheit, Statistik wiederholter Samples, Verwendung relativer Unsicherheit, Vergleich von zwei gemessenen Größen mit Unsicherheit, grafische Darstellungen (Streudiagramme, logarithmische und doppelt-logarithmische Diagramme), Kennenlernen eines Satzes von statistischen Werkzeugen und Vergleich mit Modellen unter Verwendung der Anpassung mit Residuen bzw. mit gewichteten kleinsten Quadraten. Das Pendel kann als experimenteller Kontext für fast alle diese Werkzeuge verwendet werden. Wir haben es als Ausgangspunkt für das Lernen über Daten mit zufälliger Unsicherheit verwendet, da die Verwendung einer Stoppuhr eine individuelle Zeitunsicherheit

beinhaltet. Hypothesentests und Vergleiche mit Modellen können den Vergleich der Periode mit der Erwartung aus der einfachen Gleichung, die das Pendel auf einen harmonischen Oszillator reduziert, beinhalten. Eine solche Messung kann mit ausreichender Präzision durchgeführt werden, dass man aus der Messung der Erdbeschleunigung Unterschiede aufgrund der Lage auf dem Globus erkennen kann. Komplexere Datensätze können verwendet werden, um die Längenabhängigkeit der Periode zu plotten und zu testen oder das Fehlen einer Abhängigkeit von der Masse zu betrachten.

Wir gehen jedoch einen anderen Weg, weil das andere entscheidende Ziel unserer Praktikumsserie die Entwicklung des kritischen Denkens der Studierenden ist. Um dies zu erreichen, vermeiden wir weitgehend Bestätigungsexperimente, also Praktika, in denen die Studierenden ein Ergebnis bestätigen, das ihnen bereits durch Vorlesungen oder anderes Vorwissen bekannt ist [2].

Die Praktikumsstruktur, die wir zur Entwicklung der Denkfähigkeiten verwenden, beinhaltet eine iterative Sequenz, bei der die Studierenden Messungen durchführen, die in irgendeiner Form für einen Vergleich verwendet werden [1]. Sie reflektieren dann über die Ergebnisse und die Bedeutung des Vergleichs und werden anschließend aufgefordert, eine Möglichkeit zur Verbesserung ihrer experimentellen Daten oder ihres Modells unter Berücksichtigung ihrer Ergebnisse zu entwerfen. Sie führen ihren verbesserten Plan aus, vergleichen erneut und wiederholen den Prozess so oft wie die Zeit es erlaubt. Dieser iterative Prozess erhöht die Chancen, gute Daten zu sammeln, und zwingt die Studierenden, sich mit Problemen auseinanderzusetzen und sie zu lösen. Die Reflexion entwickelt ihr quantitatives Denkvermögen. Der Zyklus der Verbesserung trägt zu ihrem Vertrauen und ihrer Selbstwirksamkeitserwartung bei. Das ideale Ergebnis jedes Praktikums ist es, dass sie ein neues statistisches Werkzeug lernen, einen hochwertigen Datensatz sammeln, einen sinnvollen Vergleich durchführen und dies durch Zyklen von Iteration und Verbesserung tun.

Zwei wesentliche Merkmale des Designs sind, dass wir ihnen genügend Zeit geben, um gute Arbeit zu leisten, und dass wir ihnen Raum geben, eigene Entscheidungen zu treffen. Dies bedeutet, dass die Experimente einfach genug sein müssen, um in relativ kurzer Zeit durchgeführt zu werden, so dass genügend Raum bleibt, um das Experiment mindestens zweimal, aber idealerweise drei oder mehr Mal durchzuführen, einschließlich aller Analysen und Reflexionen. Es muss sehr sorgfältig auf die kognitive Belastung geachtet werden; wenn

sie aufgefordert werden, in einer einzigen Praktikumsperiode zu viele Dinge zu lernen und zu tun, kann man vom Lernen der wesentlichen Dinge abgelenkt werden und die Möglichkeit für Verbesserungen geht verloren. Das Pendelpraktikum funktioniert in dieser Hinsicht gut, da die Einfachheit der Messungen genügend Zeit für Reflexion und Verbesserung lässt.

3. Das Pendel als Modell-Fail-Labor

Unser erfolgreichstes – und am meisten untersuchtes – Pendelpraktikum nutzt die Kleinwinkelnäherung, um die Studierenden mit einem “Modell-Fail-Praktikum” in Berührung zu bringen. Sie werden gebeten, die Periode eines Pendels, das mit einer Amplitude von 10 Grad gestartet wird, mit der eines Pendels zu vergleichen, das mit 20 Grad gestartet wird. Eine grobe Messung (1 % Präzision oder schlechter) ergibt keinen Unterschied, aber eine Präzision von 0,1 % ist leicht erreichbar und wird die Abweichung von der Formel aufdecken, die mit der Kleinwinkelnäherung abgeleitet wurde. Wir stellen ihnen das Modell jedoch nicht explizit als Versagen vor. Stattdessen wird die Frage als Untersuchung präsentiert, eine Gelegenheit für sie, etwas unabhängig zu entdecken. Unser Hauptziel ist, dass die Studierenden etwas für sich selbst entdecken, indem sie eine hochpräzise Messung durchführen. In diesem Kontext können die Studierenden bereits von ihren Ergebnissen überrascht sein, auch schon mit einem Level ungenauerer Messungen, da sie vielleicht denken, dass die Periode bei 20 Grad länger sein wird wegen der größeren Weglänge. Oder sie erwarten, dass die Perioden gleich sind und finden eine erste Bestätigung dafür, nur um diese durch nachfolgende, verbesserte Messungen in Frage zu stellen. Oder sie haben überhaupt keine Erwartung und sind verwirrt darüber, dass eine grobe Messung eine Übereinstimmung nahelegt und eine genauere Messung einen Unterschied nahelegt. Es gibt unzählige Wege, die das Denken eines:r Studierenden in diesem Experiment nehmen kann. Seine Stärke liegt in einer Gelegenheit für sie, an einem Problem zu arbeiten und darüber nachzudenken [3], auf eine Schwierigkeit oder ein unerwartetes Ergebnis zu stoßen und dann das Problem durch Verbesserung der Qualität ihres Experiments zu lösen.

Um ihre Vergleiche in diesem Experiment zu quantifizieren, führen wir die Studierenden in eine Größe ein, die misst, wie unterschiedlich zwei Messungen (A und B) im Verhältnis zur kombinierten Unsicherheit in den beiden Messungen (δA und δB) sind.

$$t' = \frac{A - B}{\sqrt{(\delta A)^2 + (\delta B)^2}}$$

Diese t' -Größe ähnelt in diesem Kontext der t-Statistik, aber wir gehen nicht so weit, ihnen die statistischen Formalitäten eines t-Tests beizubringen. Sie soll einfach als kontinuierliche Skala dienen, bei der $t' \sim 1$ keine Hinweise auf einen Unterschied zwischen den Messungen liefert und $t' \sim 3$ oder höher Hinweise darauf gibt, dass ein Unterschied vorliegt. Ein Hauptproblem ist jedoch die Möglichkeit, dass die

Studierenden zu einem unklaren Ergebnis kommen, wobei t' irgendwo zwischen 1 und 3 liegt. Obwohl ein unklarer Befund Teil der professionellen Naturwissenschaft ist, könnten sie ihn als Feststecken mit einem Nicht-Ergebnis ansehen, und sicherlich ist es frustrierend, das Praktikum so zu beenden. Selbst praktizierende Wissenschaftler:innen finden einen unklaren Befund unbefriedigend und würden vermutlich weitere Ressourcen in die Lösung des Problems stecken.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, den Studierenden weitere Ressourcen zur Verfügung zu stellen, um sicherzustellen, dass sie zu einem klaren Abschluss kommen. Man kann zusätzliche Zeit anbieten. Dies kann für alle produktiv gestaltet werden, indem man neue Werkzeuge einführt, wie zum Beispiel die Verwendung eines Streudiagramms, um die Periode im Vergleich zum Startwinkel zu zeigen, einschließlich höherer Winkel, bei denen die Abhängigkeit offensichtlicher wird. Man kann sie auch auf die zwei häufigsten systematischen Fehler und Taktiken zu deren Vermeidung hinweisen. Der erste dieser systematischen Fehler ist einfach das falsche Zählen der Anzahl der Zyklen, was auf verschiedene Weise gemildert werden kann, wie zum Beispiel, dass beide Partner:innen Schwingungen zählen. Der zweite, subtilere systematische Fehler ist, dass viele Gruppen versuchen, den Start des Pendels mit dem Start des Timers zu synchronisieren. Die Reaktionszeit dabei ist langsamer und fehleranfälliger, als wenn man das Pendel loslässt und dann den Start der Zeitmessung und das Zählen synchronisiert, wenn das Pendel unten bei seiner maximalen Geschwindigkeit im Zyklus ist. Darüber hinaus führt der Versuch, beim Loslassen zu synchronisieren zu einer größeren Varianz in den Daten und hat mehr Potenzial für systematische Fehler. Wir haben auch festgestellt, dass viele Studierende in eine unproduktive Falle geraten, und Zeit damit vergeuden, die Synchronisation der Pendelfreigabe mit dem Start des Timers zu verbessern.

4. Bessere Ergebnisse der Studierenden mit einer Simulation

In einem Praktikumskurs besteht ein entscheidender Weg zur Verbesserung der Ergebnisse der Studierenden darin, sie in die Lage zu versetzen, bessere Experimente durchzuführen. In einem Inquiry-orientierten Praktikum wollen wir dies jedoch tun, ohne zu viel Anleitung zu geben. Vor diesem Hintergrund hatten wir uns vorgenommen, die Auswirkungen der Verwendung einer Simulation anstelle eines physikalischen Pendels als Versuchsgesetz zu untersuchen. Zu diesem Zweck passte das PhET-Team seine Pendelsimulation so an, dass sie dem Verhalten unseres physischen Geräts sehr nahe kam: geringe, feste Dämpfung und gleiche Pendelperiode. Damit die gemessenen Zeiten zwischen den Computern der Studierenden übereinstimmen, baten wir sie, den internen Timer der PhET-Simulation zu verwenden. Damit gaben wir ihnen auch eine Vorgabe, die ihnen half, einen der oben erwähnten systematischen Fehler zu vermeiden. Da sie das Pendel und den Timer mit der Maus starten mussten, wurde ihnen schnell

klar, dass sie bei ihren Messungen zuerst das Pendel starten und dann die Zykluszahl mit dem Starten und Stoppen des Timers synchronisieren mussten.

Der Vorteil dieser Einschränkung wurde in einer Studie deutlich, in der wir eine Klasse in eine Gruppe, die reale Geräte benutzten, und eine Gruppe, die die PhET-Simulation verwendeten, aufteilten. Die Studierenden der beiden Gruppen arbeiteten während eines Praktikumsstermins nebeneinander. In Abb. 1 ist die Entwicklung der von den Studierenden gefundenen Werte für t' im Laufe des Praktikums und der aufeinander folgenden Verbesserungsrounds dargestellt. Die Studierenden, die eine Simulation verwenden, beginnen mit höheren Werten für t' in der ersten Runde und erzielen in den folgenden Runden größere Verbesserungen, so dass die meisten von ihnen in den Bereich kommen, in dem die Differenz zwischen den Perioden eindeutig viel größer ist als die Unsicherheit der Messungen.

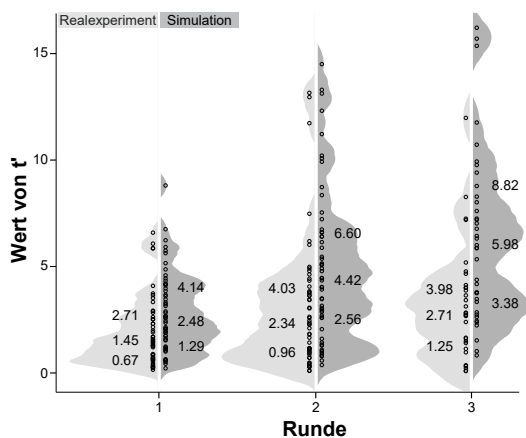


Abbildung 1: t' ist ein Maß dafür, inwieweit die Lernenden über die Daten verfügen, um einen Unterschied zwischen der Pendelperiode bei 10 und 20 Grad zu erkennen, wobei t' von 3 oder mehr ein Beleg für einen Unterschied ist. Die Daten werden als Beanplots dargestellt, die die einzelnen Daten als Punkte zeigen und mit einer gleichmäßigen Verteilung überlagert sind. Median- und Quartilwerte sind angegeben. Im Laufe der drei Datenerhebungsrounds neigten die Lernenden, die eine Simulation verwendeten, dazu, mit höheren t' -Werten zu beginnen, und in Runde 3 hatte die Mehrheit derjenigen, die eine Simulation verwendeten, genügend Daten, um die fehlende Übereinstimmung zu erkennen.

Ihre Messunsicherheit wird durch drei Faktoren beeinflusst: die Wahl der Anzahl der zu messenden Zyklen M , die Anzahl der Versuche, aus denen sie den Mittelwert N bilden, und die Standardabweichung ihrer Zeitmessungen $\sigma(t)$, wobei t die für M Zyklen gemessene Gesamtzeit ist. Die daraus resultierende Unsicherheit der Periode ist

$$\delta T = \frac{\sigma(t)}{M\sqrt{N}}$$

Wir stellen fest, dass der Hauptunterschied zwischen den beiden Bedingungen darin besteht, dass die Studierenden, die die Simulation verwenden, bereits bei der ersten Datenerfassung

eine deutlich geringere Varianz in ihren Zeitmessungen aufweisen. Während sich beide Gruppen im Laufe der aufeinanderfolgenden Datenerhebungsrounds verbessern, beginnen die Studierenden, die das physikalische Pendel verwenden, mit einer viel höheren Varianz und erreichen selbst am Ende des Praktikums nicht das Präzisionsniveau, das die Studierenden, die die Simulation verwenden, zu Beginn des Praktikums haben. Dieser Vorteil wird durch einen kleineren Effekt verstärkt: Die Studierenden, die die Simulation verwenden, neigen dazu, auch mit etwas höheren Werten von $M\sqrt{N}$ zu enden, was die Unsicherheit in der Periode weiter verringert.

Tabelle I: Die Ergebnisse einer Umfrage nach dem Praktikum bestätigen, dass ein größerer Anteil der Studierenden, die eine Simulation verwenden, die Messungen durchführen, die erforderlich sind, um eine Unstimmigkeit in den Zeiträumen festzustellen. Folglich kommen mehr Lernende, die die Simulation nutzen, zu dem Schluss, dass die Zeiträume nicht übereinstimmen.

Gruppe	Berichtet t' im Protokoll	Berichtet $t' > 3$	$t' > 3$ und schließt daraus eine Nicht-Übereinstimmung
Realgerät	66 %	35 %	26 %
Simulation	75 %	56 %	41 %

Die Folgen der qualitativ besseren Messungen sind wichtig. In Abb. 1 kommen nur 53 % der Studierenden, die das Realgerät benutzen, auf einen t' -Wert von 3 oder mehr, während 72 % der Studierenden, die eine Simulation benutzen, diesen Wert erreichen. Um herauszufinden, inwieweit dies ihre Schlussfolgerungen beeinflusst, wurde nach dem Labor eine Umfrage durchgeführt, in der die Schüler gebeten wurden, ihren endgültigen Wert für t' anzugeben und anzugeben, ob es ihrer Meinung nach eine Abweichung zwischen den beiden Zeiträumen gab. Tabelle I zeigt, dass von den Studierenden, die in der Umfrage einen t' -Wert angaben, 75 % derjenigen, die die Simulation benutzten, einen Wert von 3 oder mehr angaben, aber nur 53 % der Studierenden am Realgerät diese Schwelle überschritten. Obwohl dies die Studierenden, die die Simulation benutzen, in eine bessere Position bringt, geben nicht alle mit einem t' -Wert über 3 eine Nicht-Übereinstimmung an. Bei beiden Bedingungen kommt etwa ein Viertel der Studierenden mit einem t' von 3 oder mehr nicht zu dem Schluss, dass eine Unstimmigkeit vorliegt. Die Studierenden an der Simulation kommen mit größerer Wahrscheinlichkeit zu dem Schluss, dass sie nicht einverstanden sind, aber unter beiden Bedingungen gibt es einen ähnlichen Anteil von Lernenden, die diese Schlussfolgerung nicht ziehen, obwohl es dafür Belege gibt. Diese Abneigung, aufgrund eines kleinen, aber messbaren absoluten Unterschieds zu einem anderen Schluss zu kommen, ist eine der verbleibenden Hürden für viele Studierende.

Seit zwei Jahrzehnten experimentieren wir mit dieser Praktikumssequenz. Dabei untersuchen wir dieses Modell-Fail-Labor. Wir arbeiten weiterhin damit, weil es für die Lernenden eine Schlüsselerfahrung ist. Sie erhalten die Freiheit und die Zeit, etwas zu erforschen, was sie noch nicht kennen, und sie müssen

sich Herausforderungen, Überraschungen und ihren eigenen Vorannahmen stellen. Simulationsbasierte Praktika bieten die Möglichkeit, ihre Erfahrungen etwas genauer zu lenken, ohne sie offen zu dirigieren. So gelingt ein ausgewogenes Gleichgewicht zwischen ihrer Freiheit zu forschen und unserem Wunsch, dass sie einen produktiven Weg zum Ziel finden. Zumindest für einige Praktika ist der Einsatz einer Simulation eine gute fachdidaktische Wahl, vorausgesetzt, dass diese einige reale Probleme wie Rauschen und andere Formen der

Unsicherheit aufweist. Für eine ganze Praktikumssequenz öffnet sie die Tür zu einer vollständigen Online-Version eines Inquiry-Praktikums, wie wir während der globalen Pandemie herausfanden.

Doug Bonn *University of British Columbia*

James Day *University of British Columbia*

Joss Ives *University of British Columbia*

Literatur

- [1] Holmes, N.G. & Bonn, D.A. (2015). Quantitative Comparisons to Promote Inquiry in the Introductory Physics Lab. *The Physics Teacher* 53, 352.
- [2] Descamps, I. et al. (2024). Dynamics of Productive Confirmation Framing in an Introductory Lab. *arXiv:2404.14526*.
- [3] McLean Phillips, A., Watkins, J. & Hammer, D. (2017). Problematising as a scientific endeavor. *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* 13, 020107.

Ein „einfaches“ Pendel-Experiment, das keines war

Natasha G. Holmes und Brad J. Ramshaw

1. Einführung

In unseren einführenden Physikpraktika führen wir ein Pendel-Experiment durch, bei dem die Lernenden immer präzisere Messungen der Pendelperiode vornehmen, um die Winkelabhängigkeit der Periode zu testen. Diese Aktivität ähnelt der von Bonn, Day und Ives in dieser Ausgabe besprochenen (und auch in [1, 2] vorgestellten). Durch Verbesserung der Messgenauigkeit können die Lernenden die Perioden des Pendels unterscheiden, wenn es mit verschiedenen Ausgangswinkeln gestartet wird, was auf den Zusammenbruch der Kleinwinkelnäherung hindeutet. Dieser Prozess führt zu einer Diskussion über die Modellierung und darüber, wie die Genauigkeit ihrer Messungen mit der Tiefe der Physik zusammenhängt, die sie erkennen können: Was als „kleiner“ Winkel zählt, hängt von der Genauigkeit ab.

Wir lassen die Lernende absichtlich mit Stoppuhren messen, damit es keine „Blackbox“ gibt, aber sie haben dann die Freiheit, ihre eigenen Methoden zur Verringerung der Unsicherheit zu entwickeln. Dies führt zu kreativen Lösungen, wie z. B. langen Pendeln, die an der Decke befestigt werden, damit die Unsicherheit der Reaktionszeit im Verhältnis zur Länge der Periode gering ist. In der Regel leiten wir sie dazu an, die Rolle von wiederholten Versuchen gegenüber der Messung von mehr Pendelausschlägen pro Versuch als wichtige Möglichkeiten zur Verringerung der Unsicherheit zu untersuchen.

2. Unsicherheiten

Die Lernenden schlagen regelmäßig vor, die Unsicherheit zu verringern, indem sie die Periode mit einer Videoaufzeichnung der Pendelbewegung messen. Sie argumentieren, dass dadurch „menschliche Fehler“ ausgeschlossen werden und eine genauere Messung als mit einer Stoppuhr möglich ist. Eine typische Handykamera hat eine Bildrate von 30 Bildern pro Sekunde. Dies entspricht einer instrumentellen Präzision von etwa 0,03 s. Die typische Reaktionszeit einer von Menschen ausgelösten Stoppuhr beträgt 0,1 s. Die Kamera ist also etwa dreimal so genau wie eine Stoppuhr. Besser, aber nicht die monumentale „Beseitigung des menschlichen Fehlers“, die die Studierenden erwarten. Nachdem ich diesen Vorschlag jahrelang gehört hatte, beschloss ich (NGH), ihn zu einer expliziten Aktivität für die Lernenden zu machen, damit sie ihre Behauptung empirisch überprüfen konnten.

Die Studierenden sollten ein Experiment entwerfen und durchführen, um herauszufinden, wie genau sie die Pendelzeiten mit einer Handykamera messen können. Die Fragen und Anweisungen, die wir ihnen gaben, sind in Kasten 1 dargestellt. Anstatt sich jedoch ausschließlich auf die instrumentelle

Präzision als Maß für die Unsicherheit zu verlassen, entschieden sich viele Lernende für wiederholte Messungen der Periode (T_i) und die Berechnung des Mittelwerts ($\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N}$), der Standardabweichung ($\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}{N-1}}$) und der Unsicherheit des Mittelwerts ($\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$).

Nach dem Leitfaden für den Ausdruck von Mess- und Unsicherheitsangaben GUM [3] ist dieses Vorgehen etwas zweifelhaft. Üblicherweise werden zwei Arten von Unsicherheit betrachtet: die statistische Unsicherheit, die mit der Variabilität zwischen wiederholten Messversuchen zusammenhängt, und die instrumentelle Unsicherheit, die mit der begrenzten Präzision eines Messgeräts zusammenhängt [4]. Im Fall der Stoppuhr ist die größte Unsicherheit die statistische Unsicherheit: Jede Messung unterscheidet sich geringfügig von den anderen aufgrund der Variabilität eines Menschen, der eine Stoppuhr auslöst. Wir quantifizieren diese Unsicherheit mit einem Mittelwert, einer Standardabweichung und einer Standardunsicherheit im Mittelwert, wie oben beschrieben. Im Falle der Kamera ist die größte Unsicherheit die Präzision des Geräts: Wiederholte Messungen sind oft innerhalb der vorgegebenen Präzision identisch. Wir quantifizieren diese Unsicherheit durch die Bildrate der Kamera (d. h. die instrumentelle Präzision). Anstatt die instrumentelle Genauigkeit zu verwenden, haben die Lernenden die Unsicherheit der Kameramessung als statistische Unsicherheit behandelt.

Kasten 1: Praktikumsanleitung, die den Lernenden gegeben wurden, um die Wirksamkeit der Messung von Pendelperioden mit einer Handykamera zu testen

Einsatz von Geräten mit höherer Präzision

1. Warum sollte die Aufzeichnung der Periode eines Pendels mit einer Handykamera eine bessere Präzision haben als die Messung mit einer Stoppuhr?
2. Angenommen, die Kamera kann keine unendliche Genauigkeit liefern: Geben Sie einige Faktoren an, die die Präzision einer Kameraaufzeichnung einschränken.
3. Planen sie eine *schnelle* Untersuchung, um die Genauigkeit zu bestimmen, mit der die Präzision der Messung von Pendelperioden mit einer Handykamera gemessen werden kann. Führen Sie die Untersuchung durch, dokumentieren Sie Ihre Untersuchung und die Ergebnisse.
 - Werten Sie Ihre Ergebnisse aus, indem Sie auf Folgendes eingehen: Wie groß war die gemessene Unsicherheit bei der Aufzeichnung von Pendelperioden mit einer Kamera?
 - Wie lange haben Sie gebraucht, um die beste Präzision zu erreichen?
 - Wie groß war die Unsicherheit durch die Kameraaufzeichnung im Vergleich zur Messung mit einer Stoppuhr? Und
 - Was ist die beste Methode zur Messung von Pendelzeiten, die eine verbesserte Unsicherheit, die Effizienz und die Genauigkeit ausbalanciert.

Um das Problem zu verdeutlichen, stellen Sie sich vor, Sie legen einzeln 1-Gramm-Büroklammern auf eine Waage, die auf das nächste Gramm genau misst. Sie würden immer wieder denselben Wert messen: 1 Gramm. Das bedeutet nicht, dass Sie die Masse der Büroklammern mit unendlicher Genauigkeit kennen. Vielmehr wissen Sie, dass die Masse 1 g beträgt, und zwar innerhalb der Grenzen der Waage, d. h. $1\text{ g} \pm 0,5\text{ g}$. Die Messung ist letztlich durch die Genauigkeit des Instruments begrenzt, und wiederholte Versuche verringern die Unsicherheit nicht.

3. Instrumentelle Präzision und Messwiederholungen

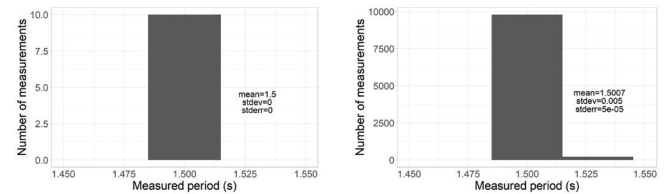
Die Lernenden reagierten auf dieses Beispiel mit einem wichtigen Anliegen: Warum können wiederholte Versuche einer Messung mit einer Stoppuhr die instrumentelle Präzision „schlagen“? Das heißt, wenn sie wiederholte Versuche mit einer Stoppuhr sammelten und den Mittelwert und die Unsicherheit des Mittelwerts berechneten, könnten sie eine Unsicherheit erhalten, die viel kleiner ist als die Rundungsgrenze der Stoppuhr (normalerweise 0,005 s).

Ich konsultierte einen anderen Experimentalphysiker (BJR), um das Problem zu besprechen. Über mehrere Stunden hinweg diskutierten wir die Gültigkeit beider Ansätze. Wir simulierten Daten und kamen zu dem Schluss, dass Messungen, die von der instrumentellen Präzision dominiert werden, dennoch von wiederholten Messungen profitieren können. In dem Beispiel mit der Büroklammer zeigt eine Digitalwaage einige Male 0 Gramm und 2 Gramm an. Die Häufigkeit, mit der dies geschieht, sagt etwas darüber aus, ob die Masse einer Büroklammer größer oder kleiner als 1 g ist. Schließlich kann man durch die quantitativen Ansätze, die mit der statistischen Unsicherheit verbunden sind, sehr viel Vertrauen in das Messergebnis gewinnen.

Nehmen wir ein Standard-Laborpendel mit einer Periode von 1,5009 s. Wir lassen es wiederholt mit einer Amplitude von etwa 10° schwingen. Mit einem Standard-Winkelmesser (und einer recht dünnen Schnur) variiert der Anfangswinkel jedes Mal um $\pm 0,5^\circ$. Variable Reibung und Luftwiderstand tragen beispielsweise zu einer weiteren Unsicherheit bei, so dass die Pendeldauer (vor der Messung) um etwa $\pm 0,0003\text{ s}$ schwanken kann.

Nun messen wir die Pendelperiode mit einer Kamera mit einer instrumentellen Genauigkeit von 0,033 s aufgrund der endlichen Bildrate. Die meiste Zeit werden wir 1,500 s messen. In Abb. 1a zeigen wir ein Histogramm von 10 simulierten Messungen

dieses Pendels. Auf der Grundlage der instrumentellen Präzision würden wir die Periode mit $1,500 \pm 0,003\text{ s}$ angeben. Auf der Grundlage der statistischen Unsicherheit würden wir die Periode als $1,500 \pm 0,000\text{ s}$ angeben. In diesem Fall ist das Argument für wiederholte Versuche fragwürdig – es suggeriert, dass wir die Periode unendlich genau kennen.



(a) Zehn wiederholte Versuche

(b) Zehntausend wiederholte Versuche

Abbildung 1: Histogramme für Messungen eines simulierten Pendels mit einer Periode von 1,5009 s und einer zugrundeliegenden Variabilität von 0,0003 s. Die simulierten Messungen wurden mit einer Handykamera durchgeführt, die eine endliche Bildrate von 30 Bildern pro Sekunde hat. Die berechneten Mittelwerte, Standardabweichungen (stdev) und die Standardunsicherheit des Mittelwerts (stderr) werden für jedes Histogramm angegeben.

In Abb. 1b zeigen wir dagegen ein Histogramm von 10000 simulierten Messungen dieses Pendels. Jetzt sehen wir gerade genug Fluktuationen außerhalb der 1,500-Sekunden-Grenze, um etwas Sinnvolles über die wiederholten Messungen zu sagen. Auf der Grundlage der instrumentellen Präzision würden wir die Periode als $1,501 \pm 0,003\text{ s}$ angeben. Auf der Grundlage der Statistik der zufälligen Unsicherheit würden wir die Periode als $1,5007 \pm 0,00005\text{ s}$ angeben. Das Problem ist, dass man eine sehr große Anzahl von Messungen benötigt, um eine genaue Darstellung der Verteilung dieser Schwankungen um den Modus zu erhalten.

Letztendlich kommen wir zu dem Schluss, dass das, was intuitiv wie eine einfache Aktivität über den Vergleich von Unsicherheiten durch computer- bzw. menschengemachte Messung aussah, stattdessen eine tiefgreifende Untersuchung der Wahrscheinlichkeit und Statistik erfordert. Wieder einmal bietet das Pendel eine unglaubliche Gelegenheit für eine reichhaltige Diskussion und zum Lernen – wenn auch eine Diskussion, die mehrere Stunden zwischen einer Physikerin und einem Physiker benötigte, und nicht eine zweistündige einführende Praktikumseinheit. Es überrascht daher nicht, dass wir diese Aktivität inzwischen aus unseren Praktika entfernt haben.

N. G. Holmes *Cornell University*

B. J. Ramshaw *Cornell University*

Literatur

- [1] Holmes, N. G. & Bonn, D. A. (2015). Quantitative Comparisons to Promote Inquiry in the Introductory Physics Lab. *The Physics Teacher* 53(6), 352-355. doi: 10.1119/1.4928350.
- [2] Scherr, R. E. & Holmes, N. G. (2023). Quantifying Uncertainty and Distinguishing Data Sets in Introductory Physics. *CourseSource* 10. doi: 10.24918/cs.2023.44.
- [3] Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology (2008). Guide to the expression of uncertainty in measurement. Tech. rep. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML.
- [4] Buffler, A., Allie, S. & Lubben, F. (2008). Teaching Measurement and Uncertainty the GUM Way. *The Physics Teacher* 46(9), 539-539. doi: 10.1119/1.3023655.

Das Siderische Pendel – Experimente und „Experimente“

Wolfgang Hund

1. Behauptungen:

Das Pendel – als okkultes Gerät – soll feststellen können (unvollständige Aufzählung aus esoterischer / okkultur Literatur): lebend oder tot – Krankheitsherde im Körper – Geschlecht ungeborener Kinder – echten Schmuck – Ort vermisster Personen – passende Medikamente – passende Partner:innen – Ort verlorener Gegenstände / untergegangener Schiffe – eigenes Todesdatum – Täter:innen bei einem Verbrechen – Bodenschätze aller Arten – passende Berufe und Urlaubsziele – künftige Ereignisse jeder Art – ...

Daneben gibt es den rein spiritistischen Gebrauch, bei dem das Pendel als Hilfsmittel zur Kontaktaufnahme mit „feinstofflichen Wesenheiten“ (vulgär: Geistern) verwendet wird.

2. Das Gerät:

Beim Pendeln wird ein Gegenstand an einem Faden zum Schwingen gebracht, der von einer Person ruhig zwischen Daumen und Zeigefinger gehalten wird. Unerheblich dabei ist das Material / das Aussehen des Gewichts und die Länge der Aufhängung. Es genügt also ein Ring (oder eine Schraubenmutter), der an einem ca. 20 langen Faden befestigt ist. Die Suggestionskraft (und damit die Wahrscheinlichkeit des „Erfolgs“) ist allerdings bei einem „richtigen“ / magischen / esoterischen / siderischen“ Pendel erheblich höher. Es gibt im Esoterikhandel eine Vielzahl verschiedener Pendel mit zum Teil sehr hohen Preisen, je nach beabsichtigtem Verwendungszweck. Manche Modelle kann man vor der Verwendung öffnen und z. B. das zu suchende Material (oder auch Haare o. Ä. der vermissten Person) hineingeben.

3. Der Pendelvorgang:

Der:die Pendler:in sitzt „entspannt“ an einem Tisch, Ellbogen aufgestützt und hält das Pendel ruhig zwischen Daumen und Zeigefinger so, dass es dicht über der Tischplatte kreisen kann. Zum Befragen werden die beiden grundsätzlichen Bewegungsarten verwendet: Kreis und Hin- und Herbewegung. Damit kann das Pendel sowohl mit Ja und Nein antworten, als auch in Wörtern oder ganzen Sätzen. Dazu wird ein Buchstabenkreis benötigt, über dem das Pendel schwingen kann („Ouija-board“). Unter dem Pendel liegt meist etwas Persönliches, das mit der gestellten Frage zu tun hat. Dazu gibt es im Handel Sammlungen von Pendelkarten, die bereits Auswahlmöglichkeiten anbieten

(homöopathische Medikamente, Urlaubsziele, Berufsbezeichnungen usw.). Briefe, Fotos, Haarlocken oder ähnlich spezielle Gegenstände sind ebenso möglich, wenn sie als psychometrische Hilfen dienen sollen.

4. Experimente:

Um festzustellen, ob tatsächlich paranormale Annahmen notwendig sind, können bestimmte Behauptungen experimentell mit einfachen Mitteln überprüft werden – auch in der Alltagsumgebung.

1. Beispiel: Weit verbreitet ist die Meinung, dass man mit Hilfe eines Pendels sehr sicher das Geschlecht eines ungeborenen Kindes feststellen könne, weil das Pendel über „männlich“ anders kreisen würde als über „weiblich“. Dies sei allgemein so (wie die entsprechende Pendelliteratur angibt), weil „bekanntlich“ (?) die „Energiekreisläufe bei männlichen/ weiblichen Wesen entgegengesetzt polarisiert sind“. Das Pendel (als Gerät) nehme dies wahr und zeige dies durch Kreis- oder Hin- und Herbewegungen.

Vorgehen: Teilen Sie an zwei (oder mehr) Personen je ein Pendel und je zwei Karten aus, auf denen eine Frau bzw. ein Mann abgebildet ist (Fotos wirken realistischer) (Abb. 1). Aufschrift: Auf einem Kartenpaar „Bei FRAUEN bewegt sich das Pendel im Kreis“ – „Bei MÄNNERN bewegt sich das Pendel hin und her“. Beim zweiten Kartenpaar sind die Angaben genau umgekehrt (Abb. 1. Vgl. [1]). Zeichnen Sie jeweils noch dick die entsprechenden Bewegungsrichtungen dazu. Beim Pendeln sollten die verschiedenen Gruppen nicht zu dicht nebeneinander sitzen (sonst könnte entdeckt werden, dass ...).

Lassen Sie das Pendel (wie oben beschrieben) über die Karten halten. Notfalls können Sie leise die entsprechenden Anweisungen akustisch zusätzlich geben. Meist funktioniert es auf Anhieb. Danach können selbstverständlich eigene Fotos z. B. der Familie verwendet werden (die Bewegungsrichtungen sind ja jetzt bekannt). Auch über die Köpfe von realen Personen kann das Pendel gehalten werden.

Nach einiger Zeit des Experimentierens werden die verschiedenen Kartensätze gezeigt.

2. Beispiel: Fertigen Sie sich ein Blatt an, auf dem alle Horoskop-Sternzeichen gut erkennbar (mit Namen) abgebildet sind. Lassen Sie

- a) das eigene Sternzeichen auspendeln (klappt so gut wie immer);
- b) das Sternzeichen einer Person auspendeln, von der das Geburtsdatum nicht bekannt ist. Dazu wird vorher das Pendel über dem Kopf dieser Person eine Minute lang „aufgeladen“. Hier stimmt es meist nicht. Was ist daraus zu folgern? Achtung: Es könnte bereits unbewusst das ungefähre Geburtsdatum gespeichert sein, wenn es sich um Bekannte handelt!

3. Beispiel: Stellen Sie eine Pendelkette her: Eine Person nimmt stehend das Pendel in die Hand – es schlägt „geschlechtsspezifisch“ aus (nämlich so, wie Sie es vorher bekannt geben). Dann soll (während weiter gependelt wird) eine Person des anderen Geschlechts das freie Handgelenk des Pendlers ergreifen – sofort schlägt die Pendelrichtung um. Dann wieder eine Person des anderen Geschlechts usw.; jedesmal reagiert das Pendel sofort umgekehrt.

Überlegenswert ist, wie man hier einen einfachen Blindversuch konzipieren könnte (undurchsichtige Papiertüte über dem Kopf des Pendlers, Schuhe ausziehen lassen, über dem Kleidungsstück anfassen lassen ...)

5. Erklärung:

Man muss unterscheiden zwischen zwei Ursachengruppen (die sich auch auf das „Phänomen“ des Gläserrückens, das Schreibende Tischchen (Planchette) und die Wünschelrute übertragen lassen):

5.1 Warum bewegt sich das Pendel überhaupt?

Es handelt sich dabei um Geräte in einem labilen Gleichgewichtszustand, d. h. kleine Bewegungsimpulse bewirken eine deutliche Bewegung; ein völlig ruhiges Halten ist aufgrund der dabei immer angespannten Muskulatur unmöglich; auf-

grund der Resonanz schaukelt sich das Pendel auf; die Puls- wellen, die auch im Finger vorhanden sind geben ebenso Bewegungsimpulse hinzu wie die Atmung; Emotionen, die Erwartungshaltung, Spannungen aufgrund der Atmosphäre wirken autosuggestiv verstärkend.

5.2 Warum bewegt sich das Pendel „magisch“ und beantwortet Fragen, die außerhalb rationaler Erkenntnis liegen sollen?

Hier tritt der sog. Carpenter-Effekt, das Ideomotorische Gesetz hinzu, nach dem bereits eine nur vorgestellte Bewegung sich in eine deutlich erkennbare Bewegung umsetzt. Dies ist im Alltag überall zu finden: Bei der Beschreibung einer Wendeltreppe wird eine entsprechende Bewegung mit der Hand ausgeführt; Hellscher:innen führen sog. Muskellesen durch, mit dem sie bejahende oder verneinende Antworten aus der Mimik erkennen; „Unfälle“ ziehen Unfälle „magisch“ an, weil sie sich vorstellen, ...; im Straßenverkehr oder bei bestimmten Sportarten fährt man geradezu „angezogen“ auf bestimmte Punkte zu, die man eigentlich vermeiden wollte; beim Fernsehen „fährt man mit“ bei realistisch gefilmten Autoverfolgungsjagden usw.

Festzuhalten ist also, dass die Pendelbewegung zunächst durch Fremdsuggestion begonnen und dann durch Autosuggestion weiter in Gang gehalten wird. Das unbewusste (erhoffte, befürchtete) Wissen steuert die Bewegung, weil sich der:die Pendler:in nur gedanklich vorstellt, wie sich das Pendel bewegen möge. Es versagt dort, wo ein objektives Wissen nicht vorhanden ist (sein kann). Dies ist experimentell einfach zu belegen in Doppelblindversuchen.

Die Übertragung auf andere Geräte (Gläserücken: hier kommen noch gruppendynamische Prozesse hinzu; Wünschelrute: je nach beabsichtigter Anwendung sind weitere Faktoren zu berücksichtigen) kann zumindest teilweise gut vorgenommen werden.

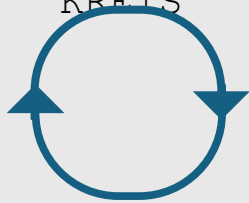
Wolfgang Hund www.hund-hersbruck.de

Literatur

- [1] Hund, W. (1996). Okkultismus: Materialien zur kritischen Auseinandersetzung. Mülheim und Hund, W. (1998). Das gibt's doch gar nicht! Okkultismus im Experiment. Mülheim



Bei FRAUEN bewegt
sich das Pendel im
KREIS



Bei MÄNNERN bewegt
sich das Pendel HIN
UND HER



Bei FRAUEN bewegt
sich das Pendel HIN
UND HER



Bei MÄNNERN bewegt
sich das Pendel im
KREIS

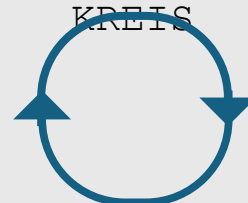


Abbildung 1: Kopiervorlage zum Pendelexperiment

Beobachtungen des Kometen C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) aus Mexiko

Eren Simsek

Eine Besonderheit, die unsere Beobachtungen auszeichnet, ist, dass wir vor Sonnenuntergang einen blauen Bereich sehen können, der genau in der Flugbahn des Kometen liegt (siehe die Abbildungen). Man könnte annehmen, es handle sich um den „Schatten einer Wolke“, doch sprechen einige Argumente gegen diese Annahme:

Es ist bekannt, dass dieser Komet – wie viele andere auch (siehe: <https://www.starobserver.org/ap200722/>) – einen blauen Ionenschweif besitzt. Die Richtung des blauen Streifens stimmt gut mit der Flugbahn des Kometen überein.

Der blaue Schweif war an mehreren Tagen deutlich sichtbar, sogar an wolkenlosen Tagen. Mein Kollege nutzt diese Beobachtungen mittlerweile, um vorherzusagen, wo der Komet nach Sonnenuntergang ungefähr zu sehen sein wird.



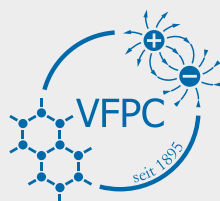
Abbildung 1: Kometen C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) (13. Oktober 2024, 19:04), Foto: Eren Simsek



Abbildung 2: Ionenschweif des Kometen (13. Oktober 2024, 18:39), Foto: Eren Simsek

Möglicherweise können wir ihn besser beobachten als andere, weil wir näher am Äquator sind, in 1.800 m Höhe liegen und der Komet fast genau im Westen untergeht?

Eren Simsek Colegio Austriaco, Mexico City



Neues aus dem Verein

Einladung zur Generalversammlung 2024

Zeit: Dienstag, 10. Dezember 2024, 18:30 Uhr

Ort: ZOOM

<https://univienne.zoom.us/j/64165942741?pwd=vpAP5VppODli1B7mk3Xv1eLAPp3jGQ.1>

Tagesordnung:

1. Begrüßung, Beschlussfassung der Tagesordnung
2. Bericht des Obmanns
3. Bericht der Kassierin
4. Bericht der Rechnungsprüfer:innen, Entlastung des Vorstands
5. Wahl des Vorstands und der Kassaprüfer:innen für das Vereinsjahr 2024/25
6. Festsetzung des Mitgliedsbeitrags 2024/25
7. Fortbildungswoche 2025
8. Allfälliges

Um zahlreichen Besuch ersucht der Vorstand!

Lehrpläne BMHS

Wie wir erfahren haben, sollen in den neuen Lehrplänen für die BMHS z. T. erhebliche Änderungen vorgenommen werden. Uns liegen aber nur bruchstückhafte Informationen vor. Wir freuen uns über Rückmeldungen und bieten Unterstützung an. Bitte Infos an martin.hopf@univie.ac.at

Anmeldung Fortbildungswoche

Der Vereinsmitglieder-Code zur Anmeldung für die Workshops auf eveeno.com/pluslucis lautet
FBW2025



Österreichische Post AG
SM 17Z041123 S

Verein zur Förderung des physikalischen
und chemischen Unterrichts,
Porzellangasse 4, Stiege 2, 1090 Wien
DVR 0558567
VRN 668472729