

Smartphone-Experimente zu harmonischen Pendelschwingungen mit der App *phyphox*

Benjamin Götze, Heidrun Heinke, Josef Riese,
Christoph Stampfer, Sebastian Kuhlen

RWTH Aachen University

benjamin.goetze@rwth-aachen.de, heinke@physik.rwth-aachen.de, riese@physik.rwth-aachen.de,
stampfer@physik.rwth-aachen.de, kuhlen@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Das Smartphone ist fester Bestandteil der alltäglichen Lebenswelt der heutigen Schülerinnen und Schüler. Aufgrund einer Ausstattung mit diversen Sensoren, die eine große Bandbreite physikalischer Daten erfassen können, sind die Einsatzmöglichkeiten des Messgeräts „Smartphone“ auch im schulischen Physikunterricht sehr vielfältig. Im Gegensatz zu den meisten auf dem Markt erhältlichen Apps kann die an der RWTH Aachen entwickelte, kosten- und werbefreie App *phyphox* verschiedene Sensoren des Smartphones auswerten und dem Kontext des Experiments entsprechend darstellen. Neben einer Reihe von vordefinierten Experimenten besteht mit einem Editor die Möglichkeit, eigene Experimente zu kreieren und bei Bedarf über einen Fernzugriff zu steuern. Exemplarisch wurden zwei Smartphone-Experimente zu harmonischen Schwingungen für die Sekundarstufe II entwickelt. Sie ermöglichen eine sehr kostengünstige Realisierung von Versuchen mit digitaler Messwerterfassung in dem Themenfeld und bieten die Möglichkeit, mit dem Editor gezielt auf die Rahmenbedingungen einzelner Lerngruppen einzugehen. Damit stellen sie eine attraktive Alternative zu aktuell in der Schulpraxis vorherrschenden Versuchsdurchführungen dar.

1. Einleitung

Das Smartphone ist aus dem alltäglichen Leben, besonders dem der heutigen Schülerinnen und Schüler (SuS), nicht mehr wegzudenken. Laut der aktuellen JIM-Studie [1] besitzen bereits 95 % der Jugendlichen zwischen 12 und 19 Jahren ein Smartphone mit Touchscreen. Die damit verbundenen vielfältigen technischen Möglichkeiten und die große Vertrautheit der SuS mit dem Gerät können den Unterricht somit durch einen gezielten Einsatz maßgeblich bereichern. Die hand(y)liche Größe und die Ausstattung mit diversen Sensoren verwandeln das Smartphone in „mobile Minilabore“ ([2], S. 4), die besonders für den Physikunterricht sehr interessant sind. Mit der am 2. Physikalischen Institut der RWTH Aachen University entwickelten Applikation (App) *phyphox* (physical phone experiments) (siehe auch [3]) können die meisten dieser Sensoren ausgelesen und ihre Messdaten graphisch dargestellt werden. Ergänzt durch eine Vielzahl weiterer innovativer Funktionen eignet sich *phyphox* sehr gut für den Einsatz in der Schule.

Im Folgenden soll ein gezielter Unterrichtseinsatz von Smartphone-Experimenten mit der App *phyphox* exemplarisch anhand zweier konkreter Beispiele vorgestellt werden.

2. Rahmenbedingungen und Voraussetzungen

Das theoretische Fundament der beiden hier behandelten Experimente bilden die mechanischen Schwingungen, explizit die harmonische Schwingung des

Feder- und des Fadenpendels. Im Physikunterricht werden Schwingungen im Inhaltsfeld der Mechanik behandelt und sind dort beispielsweise an Gymnasien in Nordrhein-Westfalen in der Jahrgangsstufe 10 vertortet [4].

Grundsätzlich kann die Einbettung der hier behandelten Experimente in den Unterricht an verschiedenen Stellen vorgenommen werden. Konzipiert ist der hier vorgestellte Einsatz jedoch während oder kurz nach der Einführungsphase zu den harmonischen Schwingungen. Die fachlichen Lernvoraussetzungen sollten demnach aus dem Verständnis über die grundlegenden Bewegungsabläufe eines schwingenden Körpers (Oszillators) und den dazugehörigen Begrifflichkeiten wie Periodendauer, Frequenz, Elongation und Amplitude bestehen. Die zu den Experimenten erstellten Arbeitsaufträge, auf die im Abschnitt 6 kurz eingegangen wird, setzen die Formeln der Schwingungsdauer der jeweiligen Pendel voraus, sodass diese ebenfalls aus dem Unterricht bekannt sein sollten. An dieser Stelle folgt diesbezüglich, in Anlehnung an die Lehrbücher von Demtröder [5] und Tipler [6], ein kurzer mathematischer Abriss der Zusammenhänge, um die Umsetzung der Experimente mit der App *phyphox* später besser nachvollziehen zu können.

3. Harmonische Schwingungsvorgänge

Von einer harmonischen Schwingung spricht man, wenn die rücktreibende Kraft, die den Oszillator zur Ruhelage hin beschleunigt, proportional zur Auslenkung ist. Der Betrag dieser Kraft F_r ist bekanntlich durch das Hookesche Gesetz gegeben:

$$F_r = -Dx \quad \{1\}$$

Der Proportionalitätsfaktor wird durch eine Rückstellkonstante D angegeben. Über die Synchronität der Bewegung eines Pendelkörpers zu der Projektion einer Kreisbewegung kann die zeitliche Abhängigkeit der Elongation einer harmonischen Schwingung mit Hilfe der Kreisfrequenz ω ausgedrückt werden:

$$x(t) = \hat{x} \sin(\omega t) \quad \{2\}$$

Durch Ableiten resultiert daraus unmittelbar das Beschleunigungsgesetz der harmonischen Schwingung:

$$a_x(t) = -\omega^2 x(t) \quad \{3\}$$

3.1. Das Federpendel

Bei einer ersten theoretischen Auseinandersetzung mit dem Federpendel (vgl. Abb. 1, links) im Unterricht wird zumeist die Annahme vorausgesetzt, dass die Pendelbewegung reibungsfrei vonstattengeht. Des Weiteren wird die Masse des Pendelkörpers als Punktmasse idealisiert und die Feder als masselos angesehen.

Befindet sich der Pendelkörper in seiner Ruhelage, so herrscht ein Kräftegleichgewicht zwischen der rücktreibenden Kraft F_r und der Gewichtskraft $F_G = mg$. Das Hookesche Gesetz (vgl. Gl. {1}) liefert unter Anwendung der Grundgleichung der Mechanik eine Proportionalität zwischen der Beschleunigung und der momentanen Auslenkung aus der Ruhelage:

$$a_x = -\frac{D}{m}x \quad \{4\}$$

Der Vergleich mit dem Beschleunigungsgesetz der harmonischen Schwingung (Gl. {3}) liefert den Ausdruck für die Schwingungsdauer eines Federpendels:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}} \quad \{5\}$$

In diesem Zusammenhang wird die Rückstellkonstante auch als Federkonstante bezeichnet.

3.2. Das Fadenpendel

Analog zum Federpendel wird in der mathematischen Betrachtung des Fadenpendels hier eine reibungsfreie Bewegung betrachtet und die Idealisierung eines mathematischen Pendels angesetzt. Abbildung 1 zeigt auf der rechten Seite die schematische Darstellung einer solchen Pendelbewegung mit ihren geometrischen Beziehungen und den wirkenden Kräften. Die Zerlegung der Bogenlänge $s = l \cdot \varphi$ liefert in Kombination mit der Grundgleichung der Mechanik folgenden Zusammenhang:

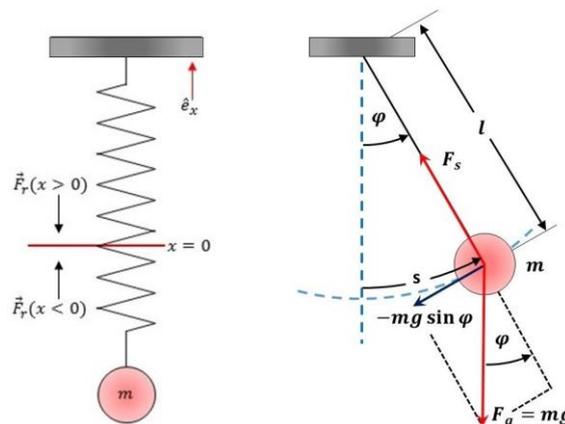


Abb. 1: Schematische Darstellung eines ungedämpften harmonischen Oszillators mit Ruhelage bei $x = 0$ (links) und einer Pendelschwingung mit den Kräften, die auf die Pendelmasse m wirken (rechts).

$$-mg \sin \varphi = m \frac{d^2 s}{dt^2} = m \cdot l \frac{d^2 \varphi}{dt^2} \quad \{6\}$$

Im Gegensatz zu der Betrachtung des Federpendels liegt hier nun eine nicht-lineare Differentialgleichung zweiten Grades vor, die im Bereich der elementaren Funktionen keine geschlossene Lösung besitzt. Um diesem Problem entgegenzutreten, muss die Kleinwinkelnäherung $\sin \varphi = \varphi$ herangezogen werden. Somit ergibt sich die lineare Differentialgleichung des harmonischen Oszillators (für kleine Winkelauslenkungen) zu:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -\frac{g}{l} \varphi \quad \{7\}$$

Analog zum Federpendel resultiert daraus der Ausdruck für die Schwingungsdauer eines Fadenpendels:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad \{8\}$$

3.3. Didaktische Anmerkungen zu den Versuchen

Lernziele von Unterrichtseinheiten, die eines der hier vorgestellten Smartphone-Experimente beinhalten, können wie folgt formuliert werden:

Die Schülerinnen und Schüler ...

- ... untersuchen den Zusammenhang der Größen Schwingungsdauer, Masse, Amplitude (bzw. Auslenkung) und Federkonstante (bzw. Fadenlänge) mit Blick auf die Formel für die Schwingungsdauer eines Federpendels (bzw. Fadenpendels).
- ... führen ein Experiment mit dem Smartphone und der App *phyphox* durch und wenden das Smartphone als Messinstrument zur Datenerfassung an.

Meist haben die SuS bereits durch „vielfältige Alltagserfahrungen tief verankerte Vorstellungen zu den Phänomenen, Begriffen und Prinzipien“ ([7], S. 3), die im Unterricht behandelt werden, dementsprechend auch im Themenbereich der Schwingungen. So sind z. B. die Einflussfaktoren auf die Schwingungsdauer, trotz bekannter Formel, nicht immer allen SuS ersichtlich. Die Experimente und die dazugehörigen Arbeitsmaterialien berücksichtigen mögliche Schüler Vorstellungen und sollen eventuellen Fehlvorstellungen entgegenwirken (siehe Abschnitte 5 und 6).

4. Die App *phyphox*

Es existieren diverse Apps auf dem Markt, mit denen die Daten einzelner Sensoren ausgelesen und ihre physikalischen Messwerte angezeigt werden können. Die hier verwendete App *phyphox* ist in der Lage, eine Vielzahl der gängigen Sensoren eines Smartphones (oder Tablets) anzusprechen, sowie die entsprechenden Messdaten graphisch darzustellen und auszulesen. Konzipiert wurde *phyphox* am 2. Physikalisches Institut der RWTH Aachen University. Sie ist kostenlos und werbefrei für die Betriebssysteme iOS und Android im App Store™ und Google Play Store™ erhältlich. Weitere Informationen können der Internetseite www.phyphox.org entnommen werden.

4.1. Funktionen und Möglichkeiten

Die App *phyphox* ist mit einigen Funktionen und Möglichkeiten ausgestattet, die gerade für den Physikunterricht von besonderem Interesse sein können. Da viele gängige Sensoren integriert sind, wird eine Anhäufung mehrerer Apps (vgl. [8]) beim Einsatz verschiedener Smartphone-Experimente vermieden. Dies spart Recherche-, Installations- und Einarbeitungsaufwand bei Lehrkräften und SuS und sollte somit die Hemmschwelle für den Einsatz von Smartphone-Experimenten senken.

Zusätzlich zur Möglichkeit, die einzelnen Sensoren direkt zur Datenaufnahme zu benutzen, kann der Benutzer auch direkt auf dem Home-Bildschirm auf eine Auswahl von vordefinierten Experimenten zurückgreifen. Dazu zählen u.a. auch das Experiment „Federpendel“, welches die Periode und Frequenz eines Federpendels ausgibt, und das Experiment „Fadenpendel“, welches die Bestimmung der Erdbeschleunigung erlaubt. Weitere Experiment-Ideen und die dazugehörigen Anleitungen sind aus der App heraus erreichbar.

Durch die Möglichkeit der Nutzung einer Zeitautomatik oder Fernsteuerung können auch komplexere Versuchsaufbauten realisiert werden. Dabei können Versuche durch die Zeitautomatik mit einem zeitlichen Vorlauf gestartet und beendet werden. Bei der Fernsteuerung können die Messungen extern, z. B. von einem Tablet oder Laptop, gesteuert und dann live an einem anderen Bildschirm verfolgt werden. Auf diese Weise kann das Smartphone als Messinstrument auch derart in den Aufbau des Experiments

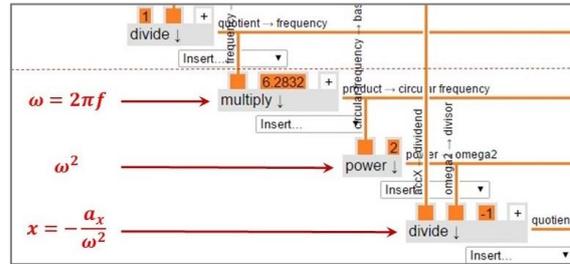


Abb. 2: Ausschnitt aus der „Analysis“ des *phyphox* Editors zum harmonischen Federpendel. Mit den Daten des Beschleunigungssensors a_x und der Frequenz f wird über das Beschleunigungsgesetz der harmonischen Schwingung die Elongation x in x-Richtung berechnet.

integriert werden, dass es zur Bedienung nicht erreichbar sein muss. Für eine Fernsteuerung müssen sich das Smartphone zur Messdatenaufnahme und das Steuergerät im gleichen Netzwerk befinden. Alternativ kann man die Möglichkeit des Smartphones zur Einrichtung eines Hotspots nutzen, mit dem man das Steuergerät verbindet.

Des Weiteren bietet *phyphox* über einen Datenexport die Möglichkeit, sämtliche Messdaten im Detail zu sichten, zu sichern und weiterzuverarbeiten. Zur Wahl stehen hier neben dem Excel-Datei-Format auch verschiedene CSV-Formate. Die Daten können u.a. per Bluetooth, Dropbox oder E-Mail transferiert oder bei einer Fernsteuerung direkt auf einem Computer gespeichert werden.

Die bisher genannten Aspekte bieten gleichermaßen technisch-praktische wie auch didaktische Vorteile. Dies kann man leicht am Beispiel der Fernsteuerung verdeutlichen, die nicht nur komplexere Versuchsaufbauten, sondern auch das Teilen der live aufgenommenen Messdaten mit einer größeren Schülergruppe, z. B. über einen Beamer, erlaubt. Gleichermäßen kann die einfache Handhabung des Datenexports an Gruppen von SuS den Unterrichtsalltag erleichtern und der Bereitstellung realer Messdaten für Modellierungsaufgaben der SuS dienen.

Die Vorteile der App können mit dem *phyphox* Editor um eine zusätzliche didaktische Komponente erweitert werden, welche die App für den Unterrichtseinsatz besonders wertvoll macht.

4.2. Der *phyphox* Editor

Mit dem speziell für *phyphox* entwickelten Editor eröffnet sich ein neuer Horizont an Anwendungsmöglichkeiten für die gezielte Messwerterfassung mit dem Smartphone. Der Editor bietet dem Nutzer die Möglichkeit darüber zu entscheiden, auf welche Art und Weise die Messdaten angegeben und dargestellt werden sollen. So können die Experimente an die didaktischen Vorstellungen der Lehrkraft und die Voraussetzungen der Lerngruppe individuell angepasst werden.

Der Editor ist über einen Link auf der Homepage (<http://phyphox.org/editor>) erreichbar und bedarf keiner separaten Software. Dort ist auch eine detaillierte Einführung in die Benutzung zu finden (<http://phyphox.org/editor-info>). Auf Grund der Funktionsvielfalt des Editors werden an dieser Stelle nur einige Elemente der Handhabung skizziert.

In einem „Analysis“-Segment des Editors können die Eingabedaten der gewünschten Sensoren mittels diverser mathematischer Operationen miteinander verknüpft und modifiziert werden (vgl. Abb. 2). Die auf diese Weise ‚neu‘ berechneten Werte können dann in gewünschter Form, z. B. graphisch oder numerisch, ausgegeben werden. Auf Grund der Point-and-Click orientierten Handhabung ist die Bedienung sehr intuitiv und ohne größere Programmierkenntnisse zu meistern. Erstellte Experimente können auf dem Computer gespeichert und von da aus auf das Smartphone übertragen werden. Darüber hinaus können bereits erstellte Experimente, somit auch alle bereits vordefinierten, in den Editor geladen werden, um sie dort zu verbessern, zu variieren oder auch nur nachzuvollziehen. Letzteres kann am Anfang helfen, die Struktur des Editors besser kennenzulernen und zu verstehen. So wurden auch die beiden hier erstellten Experimente durch Modifikationen und Ergänzungen an den bereits für die beiden Pendel vorhandenen Versuchen entwickelt. Bei der Erläuterung dieser Experimente im folgenden Abschnitt werden die konkreten Anpassungen, die im Editor vorgenommen wurden, nochmal detaillierter aufgegriffen.

5. Die konkreten Experimente

Die hier vorgestellten Smartphone-Experimente zu den harmonischen Pendelschwingungen sind nicht in der Liste der bereits vorinstallierten Versuche von *phyphox* enthalten. Um sie durchzuführen, müssen die Dateien „Harmonisches Federpendel (xyz)“ und

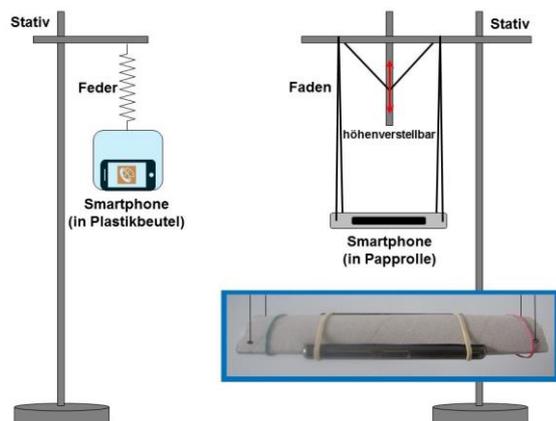


Abb. 3: Schematische Aufbauten der Smartphone-Experimente zu den harmonischen Pendelschwingungen. Links: Bei dem Federpendel ist das Smartphone in einem Plastikbeutel platziert, der an der Feder befestigt wird. Rechts: Der Versuchsaufbau des Fadenpendels wurde durch eine Schaukel realisiert. Als Halterung für das Smartphone dient ein Hohlzylinder aus Pappe.

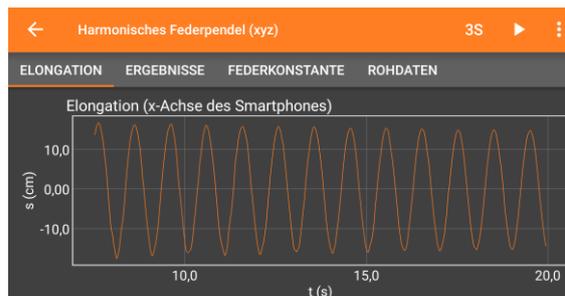


Abb. 4: Screenshot des Experiments „Harmonisches Federpendel (xyz)“ vom Smartphone-Bildschirm. Dargestellt ist die Änderung der Elongation eines Federpendels über die Zeit.

„Schaukel (y)“ auf die jeweiligen Smartphones geladen werden. Nachdem man die Dateien dann geöffnet hat, lassen sie sich dauerhaft zur eigenen Sammlung der vordefinierten Experimente hinzufügen. Die Dateien sowie detailliertere Anleitungen und ergänzende Videos finden sich auf der Homepage über die Links <http://phyphox.org/experiment/federpendel> bzw. <http://phyphox.org/experiment/fadenpendel>.

5.1. Das Experiment zum Federpendel

Der schematische Aufbau des Versuchs ist in Abbildung 3 (links) zu sehen. Eine schnelle und einfache Befestigung des Smartphones als Pendelkörper kann durch einen durchsichtigen Plastikbeutel realisiert werden. Das bietet den Vorteil, dass das Display des Smartphones durch das Plastik sowohl sichtbar als auch bedienbar bleibt.

Der Sensor, der diesem Experiment zugrunde liegt, ist der Beschleunigungssensor. Damit das Smartphone die Beschleunigung in jeder Richtung messen kann, ist es mit drei dieser Sensoren ausgestattet, die in den drei Raumrichtungen angeordnet sind. Aus diesem Grund sollte bei der Versuchsdurchführung stets darauf geachtet werden, dass das Gerät mit einer beliebigen, aber festen Achse parallel zur Schwingungsrichtung ausgerichtet ist. Bei diesem Versuch bietet sich die Möglichkeit der Zeitautomatik an. So kann man z. B. eine Messzeit von 30 Sekunden mit einer Startverzögerung von 5 Sekunden einstellen. Auf diese Weise verhindert man, dass der Start- und Stopp-Prozess mit aufgezeichnet werden und somit eventuell die Messdaten verfälscht werden. Selbstverständlich kann hier auch von vornherein auf die Fernsteuerung von einem externen Gerät zurückgegriffen werden, falls die Rahmenbedingungen das zulassen.

Wie bereits in Abschnitt 4.2 erwähnt, handelt es sich bei dem hier verwendeten *phyphox*-Experiment um eine Modifikation des bereits vorinstallierten Experimentes „Federpendel“. Dieses liefert dem Nutzer bereits die Werte der Periodendauer und Frequenz. Als zentrales Element des Versuches soll für die SuS jedoch der Bewegungsablauf bei der harmonischen Schwingung sichtbar werden. Der sinusförmige Verlauf ist zwar gemäß Gleichung {3} auch bei der zeitlich aufgetragenen Beschleunigung zu sehen. Jedoch

wird den SuS hier im Sinne einer didaktischen Reduktion der zusätzliche Transfer von der direkt aus den Sensordaten stammenden Beschleunigung auf die Auslenkung vorerst erspart. Damit wird durch das Design des Experiments bewusst ein Begriff vermieden, der in der fachdidaktischen Literatur mit sachbedingten Lernschwierigkeiten verbunden wird (vgl. [9], S. 35).

Die Periodendauer bzw. die Frequenz werden bereits in dem „Federpendel“-Versuch mit Hilfe einer Autokorrelation ermittelt. Der Ausschnitt des Editors in Abbildung 2 auf Seite 3 zeigt, wie aus der Kreisfrequenz und dem Beschleunigungsgesetz der harmonischen Schwingungen die Ermittlung der Elongation in x-Richtung realisiert wird (vgl. Gl. {3}). Diese wird dann über die Zeit aufgetragen und in einem Graphen auf dem Bildschirm dargestellt (siehe Abb. 4). Der Zusatz (xyz) im Namen des Experiments besagt, dass diese Berechnungen für alle drei Achsrichtungen durchgeführt wurden, sodass die Ausrichtung des Smartphones im Plastikbeutel keine Rolle spielt, solange eine Achsrichtung parallel zur Schwingung verläuft. Neben der ergänzenden Angabe der Kreisfrequenz ω wurde das Experiment um die Möglichkeit erweitert, die Masse des Pendelkörpers einzutragen. So kann *phyphox* über die Schwingungsdauer (vgl. Gl. {5}) auch die Federkonstante berechnen und angeben. Eine Variation der Masse im Sinne einer Variablenkontrolle ist problemlos durch Zugabe von Massestücken in den Plastikbeutel zu erreichen.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit [10] wurden u.a. die Messungen, die mit dem Experiment „Harmonisches Federpendel (xyz)“ erhoben wurden, auf Reliabilität und Validität hin untersucht. Auf Grundlage der dort erlangten Ergebnisse kann die Aussage getroffen werden, dass die zentralen Messwerte dieses Smartphone-Experiments reliabel und valide sind. Gewonnene Messergebnisse können wiederholt und parallele Messungen verschiedener Versuchsgruppen miteinander verglichen werden. Diesbezüglich erfüllt dieses Smartphone-Experiment grundlegende Voraussetzungen, die ein gezielter Unterrichtseinsatz erfordert. Des Weiteren wurde die dargestellte Zeitspanne, auf der die Elongation aufgetragen wurde, so gewählt, dass die ‚sichtbare‘ Abnahme der Amplitude 10 % der Maximalwerte nicht überschreitet. Dies ist

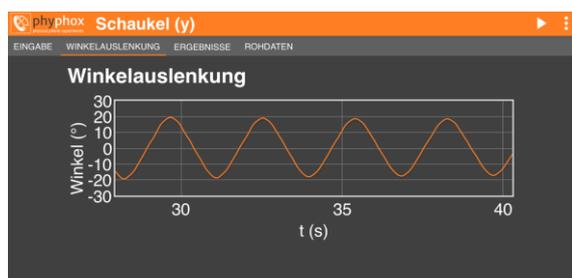


Abb. 5: Screenshot des Experiments „Schaukel (y)“ vom Laptop-Bildschirm. Dargestellt ist die Änderung der Winkelauslenkung einer Schaukel über die Zeit.

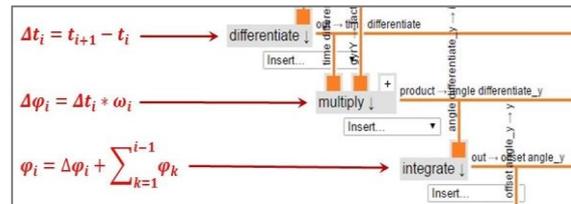


Abb. 6: Ausschnitt aus der „Analysis“ des *phyphox* Editors zum harmonischen Fadenpendel. Aus der Differenz aufeinanderfolgender Zeitdaten und den dazugehörigen Daten des Gyrometers wird die Winkeldifferenz zwischen zwei Messpunkten ermittelt. Deren Addition ergibt einen harmonischen Verlauf der Winkeländerung.

durch eine Variation der Größe des Zwischenspeichers (Buffer) für die Sensorwerte im Editor realisierbar. Dadurch kann die Betrachtung einer ungedämpften Schwingung im Unterricht legitimiert werden. Ist die Dämpfung allerdings als Untersuchungsgegenstand gewünscht, lässt sich der Buffer im Editor problemlos vergrößern.

5.2. Das Experiment zum Fadenpendel

Abbildung 3 zeigt auf der rechten Seite den schematischen Aufbau des Versuchs zum harmonischen Fadenpendel. Im Gegensatz zum Experiment des Federpendels wird hier auf den Sensor des Gyroskops zurückgegriffen. Dieser Sensor misst die Rotationsbewegung des Gerätes und gibt die Winkelgeschwindigkeit des Smartphones um eine seiner Achsen an. Auf Grund dieser Tatsache muss beim Versuchsaufbau dafür gesorgt werden, dass das Smartphone auch möglichst nur um eine seiner Achsen rotiert. Daher wurde der Aufbau so konzipiert, dass das Smartphone wie eine Schaukel in eine festgelegte Richtung schwingt. Dazu wurde, in Anlehnung an die Sitzfläche einer Schaukel, bei der hier vorgestellten Variante die Pappe einer Küchenrolle verwendet, in die das Smartphone durch zwei Längsschlitze eingeschoben werden kann. Grundsätzlich kann der Versuchsaufbau von der Lehrperson vorgegeben oder von den SuS selbst entwickelt werden. Der Phantasie und Kreativität sind dabei kaum Grenzen gesetzt. Neben der festen Achsrichtung sollte lediglich berücksichtigt werden, dass die Fadenlänge der Schaukel in irgendeiner Form veränderbar sein sollte, um die Abhängigkeit der Pendelbewegung gemäß Gleichung {8} untersuchen zu können. Auf Grund der Tatsache, wie das Smartphone hier in der Schaukel verbaut ist, empfiehlt sich für diesen Versuch, das Gerät von einem zweiten Gerät aus fernzusteuern.

Das Experiment „Schaukel (y)“ baut auf den Grundzügen des vorinstallierten Experiments „Fadenpendel“ auf. Nach Eingabe der Fadenlänge wird in diesem vordefinierten Experiment der Wert der Erdbeschleunigung bestimmt. Allerdings kann im Rückschluss auch die Fadenlänge aus der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ errechnet werden. Bei der modifizierten Variante „Schaukel (y)“ sollte jedoch auch die eigentliche Pendelbewegung für die SuS im Vordergrund stehen.

Analog zum Federpendel erscheint an dieser Stelle die Auftragung der Winkelauslenkung ebenfalls didaktisch sinnvoller als die der Winkelgeschwindigkeit (vgl. Abb. 5). Mit der Winkelgeschwindigkeit als zeitliche Ableitung der Winkelauslenkung lassen sich die Winkeldifferenzen zweier aufeinanderfolgender Messpunkte durch die Multiplikation der zeitlichen Differenz und der jeweils dazugehörigen Winkelgeschwindigkeit (Sensoraten) berechnen. Die Summation aller Winkeländerungen ergibt bereits einen zeitlich harmonischen Verlauf der Winkeländerung (vgl. Abb. 6). Allerdings wäre die dargestellte Sinuskurve mit einem Winkeloffset versehen, da der Nulldurchgang vom Startpunkt der Messung abhängt. Um den Verlauf zu normieren, muss dieser Offset fortlaufend berechnet und mit den Werten der Winkelauslenkung verrechnet werden. Dazu wird über die maximalen und minimalen Werte die Amplitude berechnet und diese vom Maximum abgezogen. Zieht man diesen Offset wiederum ständig vom Winkelverlauf ab, so ergibt sich die gewünschte normierte Winkelauslenkung. Da der hier vorgestellte Aufbau nur die Drehung um die y-Achse des Smartphones zulässt, wurde auch nur die dazugehörige Winkelauslenkung im Editor ausgerechnet und graphisch angezeigt.

Auch hier haben tiefere Betrachtungen im Rahmen einer Bachelorarbeit [10] ergeben, dass die zentralen Messwerte von *phyphox* bei diesem Experiment im Rahmen der Kleinwinkelnäherung ebenfalls reliabel und valide sind und somit den Anforderungen eines Unterrichtseinsatzes genügen. Die Abweichung zwischen der von *phyphox* mit der Kleinwinkelnäherung errechneten und der mathematisch vollständigen Lösung (vgl. [11], S. 12) liegt bei einer Auslenkung von 45° unter 5 % und selbst bei 60° unter 10%. Da dieses Experiment in erster Linie der Veranschaulichung des Schwingungsvorgangs dient, ist der Grad der Genauigkeit der Messwerte völlig ausreichend. Zudem lagen sämtliche erhobenen Werte stets im Ungenauigkeitsbereich einer manuellen Messung der Periodendauer mit einer Stoppuhr.

Analog zum Federpendel ist auf Grund der dargestellten Zeitspanne die Betrachtung einer ungedämpften Schwingung legitimiert, da auch hier die Amplitudenabnahme im dargestellten Bereich unter 10 % des Maximalwertes liegt. Bei Bedarf kann durch eine Vergrößerung des Zwischenspeichers für die Messwerte dieser dargestellte Bereich ebenfalls vergrößert werden.

6. Materialien und weitere Informationen

Zu beiden hier vorgestellten Smartphone-Experimenten wurden Arbeitsblätter erstellt, welche die SuS durch die Versuche führen. Zentrales Element sind hierbei die jeweiligen Formeln für die Schwingungsdauer {5} und {8}. Grundsätzlich sind die Arbeitsblätter in drei didaktische Abschnitte unterteilt: eine inhaltliche Orientierung, eine Steuerung der Arbeitsabläufe und eine Vertiefung in Form von zu bearbei-

tenden Aufgaben. Diese beinhalten u.a. Hypothesenbildungen bezüglich des Einflusses unterschiedlicher Parameter auf die Schwingungsdauer, auf die dann eine Aufforderung zur Planung und Durchführung geeigneter Experimente (unter Beachtung der Variablenkontrolle) folgt. Neben der Förderung experimenteller Kompetenzen können hier eventuell vorhandene Fehlvorstellungen der SuS ausgemacht und diesen unter Begleitung der Lehrkraft entgegengewirkt werden.

Zusätzlich zu den Arbeitsblättern wurde zu jedem der beiden entwickelten Smartphone-Experimente jeweils eine Handreichung für Lehrkräfte ausgearbeitet, die bei der Planung und dem Einsatz im Unterricht behilflich sein soll. Hier werden Informationen zu den Rahmenbedingungen der Versuche, wie z. B. Thematik, notwendige Lernvoraussetzungen, angesprochene Kompetenzbereiche oder Lernzielformulierungen, geliefert. Des Weiteren werden methodische Anmerkungen zu den einzelnen Abschnitten des Arbeitsblattes gegeben sowie Variations- und Differenzierungsmöglichkeiten vorgeschlagen. Mit Hilfe dieser Angaben und Ratschläge können die Smartphone-Experimente passend zum Unterrichtsgeschehen ausgewählt und individuell an die Gegebenheiten der Lerngruppe angepasst werden.

Da die beiden vorgestellten Versuchsreihen in Thematik und Struktur sehr nah beieinanderliegen, kommt eine sequenzielle Bearbeitung beider Experimente, besonders unter Berücksichtigung des umfangreichen Lehrplans, im Regelfall nicht in Betracht. Anstatt sich als Lehrkraft für eine Variante, also Feder- oder Fadenpendel, entscheiden zu müssen, bietet sich auch ein kombinierter Einsatz, zum Beispiel in Form eines Expertenpuzzles (vgl. [12], S. 131), an.

Sämtliche erstellten Materialien, also die modifizierten Dateien, die Arbeitsblätter und Handreichungen, sind auf der Homepage über die Links <http://phyphox.org/experiment/federpendel> bzw. <http://phyphox.org/experiment/fadenpendel> zu beziehen. Weitere Anregungen für einen schulischen Einsatz mit *phyphox* in Form von Smartphone-Experimenten zu gleichmäßig beschleunigten Bewegungen finden sich bei Goertz et al [13].

7. Fazit

Die beiden entwickelten Smartphone-Experimente zur harmonischen Schwingung am Feder- bzw. Fadenpendel mit der App *phyphox* stellen eine vielseitige Alternative zu vorherrschenden Versuchsdurchführungen in diesem Themengebiet dar. Dabei ergänzt die App *phyphox* die Versuche durch einige innovative Aspekte, die sowohl der Lehrkraft als auch den SuS neue Möglichkeiten im Bereich der Schülerexperimente eröffnen. So können z. B. Experimente mit dem Editor an die Lernumgebung und Vorstellungen der Lehrkraft angepasst werden. Die Anwendung bei den hier vorgestellten Experimenten „Harmonisches Federpendel (xyz)“ und „Schaukel (y)“ gestattet einen ersten Einblick in die Vielseitigkeit, die sich

mit dem Editor ergibt. So wurde bei den Experimenten, unabhängig von den beiden zugrundeliegenden Sensoren, der Fokus auf die Veranschaulichung der Pendelbewegung und den Einfluss einzelner Schwingungsparameter gelegt. Weitere Freiheiten in der Versuchsplanung und -durchführung schafft die Möglichkeit eine Fernsteuerung oder Zeitautomatik zu nutzen. Eine Weiterentwicklung der Experimente könnte darin bestehen, sie um weitere Betrachtungen im Zusammenhang mit mechanischen Schwingungen, z. B. zur Energieerhaltung, zu ergänzen.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit [10] haben erste didaktische Erprobungen in einem physikalischen Praktikum für Lehramtsanwärter und einem schulischen Einsatz bereits stattgefunden. Zur detaillierteren Ausarbeitung der Stärken und Schwächen dieser Versuche empfehlen sich weitere zu reflektierende Einsätze unter schulischen Bedingungen.

Zusammengenommen kann *phyphox* das Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Smartphone-Experimente erweitern und ihren Einsatz im Physikunterricht für Lernende und Lehrende interessant und flexibel gestalten.

Der allgemeine mobile Charakter der Smartphones birgt neben einem Alltagsbezug für SuS auch die Möglichkeit, den Experimentierraum aus dem Klassenzimmer zu verlagern. Statt ‚künstlicher‘ können reale Begebenheiten betrachtet werden, z. B. auf den Fahrgeschäften des Jahrmarkts oder der Schaukel des nächstgelegenen Spielplatzes.

8. Literatur

- [1] Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest: *JIM-Studie 2016 – Jugend, Information, (Multi-) Media*.
https://www.mpfs.de/fileadmin/files/Studien/JIM/2016/JIM_Studie_2016.pdf
(Stand: 5/2017)
- [2] Kuhn, J.; Müller, A.; Hirth, M.; Hochberg, K.; Klein, P.; Molz, A. (2015): Experimentieren mit Smartphone und Tablet-PC - Einsatzmöglichkeiten für den Physikunterricht im Überblick. In: Kuhn, J. (Hrsg.) (2015). *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, Heft 145 (S. 4-9). Seelze: Friedrich Verlag.
- [3] Kuhlen, S.; Stampfer, C.; Wilhelm, T.; Kuhn, J. (2017): *Phyphox* bringt das Smartphone ins Rollen. In: *Physik in unserer Zeit*, Volume 48 (2017), Issue 3 (S. 148-149). Weinheim: WILEY-VCH Verlag.
<http://www.online-library.wiley.com/doi/10.1002/piuz.201770311/abstract>
(Stand: 5/2017)
- [4] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2014). *Kernlehrplan für die Sekundarstufe II, Gymnasium/Gesamtschule, in Nordrhein-Westfalen: Physik*.
http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrpläne/upload/klp_SII/ph/KLP_GOSt_Physik.pdf
(Stand: 5/2017)
- [5] Demtröder, W. (2015): *Experimentalphysik 1. Mechanik und Wärme* (7. Auflage). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- [6] Tipler, P.A.; Mosca, G.; Wagner, J. (Hrsg.) (2015): *Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure* (7. deutsche Auflage). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- [7] Müller, R.; Wodzinski, R. (2004): *Schülervorstellungen in der Physik*. Köln: Aulis Verlag.
- [8] Hirth, M.; Hochberg, K.; Klein, P.; Molz, A.; Kuhn, J.; Müller, A. (2015): Apps für den Physikunterricht – Geeignete Apps für Experimente mit Smartphone und Tablets. In: Kuhn, J. (Hrsg.) (2015). *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, Heft 145 (S. 47-50). Seelze: Friedrich Verlag.
- [9] Wiesner, J.; Schecker, H.; Hopf, M. (2011): *Physikdidaktik kompakt*. Halbergmoos: Aulis Verlag.
- [10] Goetze, B. (2016): *Entwicklung von Smartphone-Experimenten zu harmonischen Pendelschwingungen mit der App phyphox für den Einsatz in der Sekundarstufe II*. Bachelorarbeit am I. Physikalischen Institut IA der RWTH Aachen University, unveröffentlicht.
- [11] Hanser, F. (2011): *Medizinische Physik und Biophysik SS 2011 – Ausführliche physikalische Beispiele – Das mathematische Pendel*.
<https://www.umit.at/data.cfm?vpath=pdf-dokumente/mpbp-examples>
(Stand: 5/2017)
- [12] Green, N.; Green, K. (2012): *Kooperatives Lernen im Klassenraum und im Kollegium – Das Trainingsbuch* (7. Auflage). Seelze: Friedrich Verlag.
- [13] Goertz, S.; Heinke, H.; Riese, J.; Stampfer, C.; Kuhlen, S. (2017): Smartphone-Experimente zu gleichmäßig beschleunigten Bewegungen mit der App *phyphox*. In: *PhyDid B, Didaktik der Physik*, Beiträge zur DPG Frühjahrstagung (2017).