

**Anlehnung an die Bachelorarbeit**

---

**Entwicklung von Smartphone-Experimenten  
zu harmonischen Pendelschwingungen  
mit der App *phyphox*  
für den Einsatz in der Sekundarstufe II**

---

**von**

**Benjamin Daniel Götze**

Aachen, 23. Januar 2017

Prof. Dr. rer. nat. Heidrun Heinke  
I. Physikalisches Institut (IA)  
RWTH Aachen

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Die Physik der harmonischen Schwingung	2
2.1	Schwingungsvorgänge und Schwingungsgrößen . . . . .	2
2.2	Das Federpendel . . . . .	4
2.3	Das Fadenpendel . . . . .	6
3	Didaktische Vorüberlegungen	8
3.1	Schülervorstellungen zu harmonischen Schwingungen . . . . .	8
3.2	Formulierung der Lernziele . . . . .	9
3.3	Verortung im Kernlehrplan . . . . .	10
3.4	Einbettung in den Unterricht . . . . .	11
3.5	Das Smartphone als Medium im Physikunterricht . . . . .	12
4	Die App <i>phyphox</i>	14
4.1	Funktionen und Möglichkeiten . . . . .	14
4.2	Die verwendeten Sensoren . . . . .	16
4.3	Der <i>phyphox</i> -Editor . . . . .	17
5	Das Smartphone-Experiment zum harmonischen Federpendel	19
5.1	Entwicklung des Experiments . . . . .	19
5.1.1	Aufbau und Durchführung . . . . .	20
5.1.2	Entwicklung des Experiments im <i>phyphox</i> -Editor . . . . .	21
5.1.3	Arbeitsblatt für die Lernenden . . . . .	23
5.2	Erprobung im Labor . . . . .	24
5.2.1	Messergebnisse . . . . .	25
5.2.2	Diskussion der Messergebnisse . . . . .	30

5.3	Didaktische Erprobung . . . . .	31
5.3.1	Rahmenbedingungen . . . . .	31
5.3.2	Ergebnisse . . . . .	32
5.4	Zusammenfassung und Konsequenzen . . . . .	33
6	Das Smartphone-Experiment zum harmonischen Fadenpendel	35
6.1	Entwicklung des Experiments . . . . .	35
6.1.1	Aufbau und Durchführung . . . . .	35
6.1.2	Entwicklung des Experiments im <i>phyphox</i> -Editor . . . . .	37
6.1.3	Arbeitsblatt für die Lernenden . . . . .	38
6.2	Erprobung im Labor . . . . .	39
6.2.1	Messergebnisse . . . . .	39
6.2.2	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	43
6.3	Didaktische Erprobung . . . . .	44
6.3.1	Rahmenbedingungen . . . . .	44
6.3.2	Ergebnisse . . . . .	45
6.4	Zusammenfassung und Konsequenzen . . . . .	46
7	Abschließende Reflexion	48
	Literaturverzeichnis	50
	Abbildungsverzeichnis	53
	Tabellenverzeichnis	54
A	Anhang	55
A.1	Messungen zum harmonischen Federpendel . . . . .	56
A.2	Messungen zum harmonischen Fadenpendel . . . . .	59
A.3	Arbeitsblätter zum harmonischen Federpendel . . . . .	62
A.4	Handreichung zum harmonischen Federpendel . . . . .	67
A.5	Arbeitsblätter zum harmonischen Fadenpendel . . . . .	72
A.6	Handreichung zum harmonischen Fadenpendel . . . . .	77
A.7	Methodenblatt: Expertenpuzzle . . . . .	82
A.8	Anleitung zu <i>phyphox</i> . . . . .	84

# 1 Einleitung

Das Smartphone ist aus dem alltäglichen Leben, besonders dem der heutigen Schülerinnen und Schüler (SuS), nicht mehr wegzudenken. Zwischen 2011 und 2015 ist laut der aktuellen JIM-Studie der Anteil der Jugendlichen zwischen 12 und 19 Jahren, die ein solches Touchscreen-Handy besitzen, von 25 % auf 92 % gestiegen ([MPFS 2015], S. 46). Es dient längst nicht mehr hauptsächlich der Telefonie. Heutzutage stehen weitere Formen der Kommunikation, Internetzugang und das Hören von Musik an prominenter Stelle bei der Nutzung.

Trotz, oder gar wegen der großen Bedeutung, die Smartphones im Leben der SuS spielen, sind sie im Unterricht meist unerwünscht. Oft sollen sie in der Schule komplett ausgeschaltet werden, womit sich der Lebensraum Schule in Teilen von dem sozialen Leben der Jugendlichen abgrenzt. Dabei können die vielfältigen technischen Möglichkeiten und die große Vertrautheit der SuS mit dem Gerät den Unterricht durch einen gezielten Einsatz bereichern. Die hand(y)liche Größe und die Ausstattung mit diversen Sensoren machen das Smartphone besonders für den Physikunterricht als „Messgerät“ sehr interessant. Mit der am 2. Physikalisches Institut der RWTH Aachen University entwickelten Applikation (App) *phyphox* (**physical phone experiments**) können diese Sensoren ausgelesen und ihre Messdaten graphisch dargestellt werden. Ergänzt durch eine Vielzahl weiterer innovativer Funktionen eignet sich *phyphox* auch sehr gut für einen Einsatz an der Schule.

Den Kern dieser Ausarbeitung bildet daher die Entwicklung zweier Smartphone-Experimente zu harmonischen Schwingungen für den Einsatz in der Sekundarstufe II. Explizit werden das Federpendel sowie das Fadenpendel in Form einer Schaukel behandelt. Nach einer Betrachtung der physikalischen und didaktischen Hintergründe, die dieser Arbeit zugrunde liegen, wird die App *phyphox* mit ihren Funktionen und Möglichkeiten vorgestellt. Daraufhin werden die beiden Smartphone-Experimente detailliert erläutert und diskutiert, von der Entwicklung über die Erprobung bis hin zu den erstellten Arbeitsmaterialien.

## 2 Die Physik der harmonischen Schwingung

„Schwingungen [...] gehören zu den grundlegenden Strukturen, die in allen Gebieten der Physik auftreten“ ([Grehn et al. 2007], S. 89). Das theoretische Fundament der ausgewählten Experimente bilden die mechanischen Schwingungen, deren mathematische Behandlung in vielen Aspekten analog zu Schwingungen aus anderen Teilgebieten der Physik, z.B. der Elektrizitätslehre oder der Atomphysik, verläuft. Im Folgenden wird explizit auf die harmonische Schwingung des Feder- und des Fadenpendels eingegangen und jeweils eine Formel für die Schwingungsdauer hergeleitet. Alle in diesem Kontext betrachteten Zusammenhänge und Herleitungen lehnen sich an die Werke von Demtröder ([Demtröder 2015], S. 325ff.) sowie von Tipler und Mosca ([Tipler et al. 2015], S. 413ff.) an.

### 2.1 Schwingungsvorgänge und Schwingungsgrößen

Grundsätzlich verläuft die Bewegung eines schwingenden Körpers, auch Oszillator genannt, zwischen zwei Umkehrpunkten und einem ausgezeichneten Punkt, der Ruhelage des Oszillators. Dieser Bewegungsablauf ist periodisch, wobei der ausgelenkte Körper zu jedem Zeitpunkt von einer rücktreibenden Kraft  $F_r$  zur Ruhelage hin beschleunigt wird. Die Zeit, die der Körper benötigt, um eine vollständige Schwingung auszuführen, wird als Periode oder Schwingungsdauer  $T$  bezeichnet. Die Frequenz  $f$  einer Schwingung gibt die Anzahl der „Durchläufe“ pro Sekunde an und ist somit der Kehrwert der Schwingungsdauer. Die momentane Auslenkung  $y(t)$ , auch als Elongation bezeichnet, beschreibt den Abstand zur Ruhelage des Oszillators zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$ . Die maximale Auslenkung wird dabei als Amplitude  $\hat{y}$  bezeichnet. Bleibt die Amplitude während des Schwingungsvorgangs konstant, so handelt es sich um

## 2 Die Physik der harmonischen Schwingung

---

eine ungedämpfte Schwingung. Ansonsten liegt eine gedämpfte Schwingung vor. Die Pendelschwingungen der im Verlauf dieser Arbeit vorgestellten Experimente sind in der beobachteten Zeitspanne so schwach gedämpft, dass sie diesbezüglich als ungedämpft angesehen werden können. Der physikalische Hintergrund der Dämpfung wird daher hier nicht weiter thematisiert.

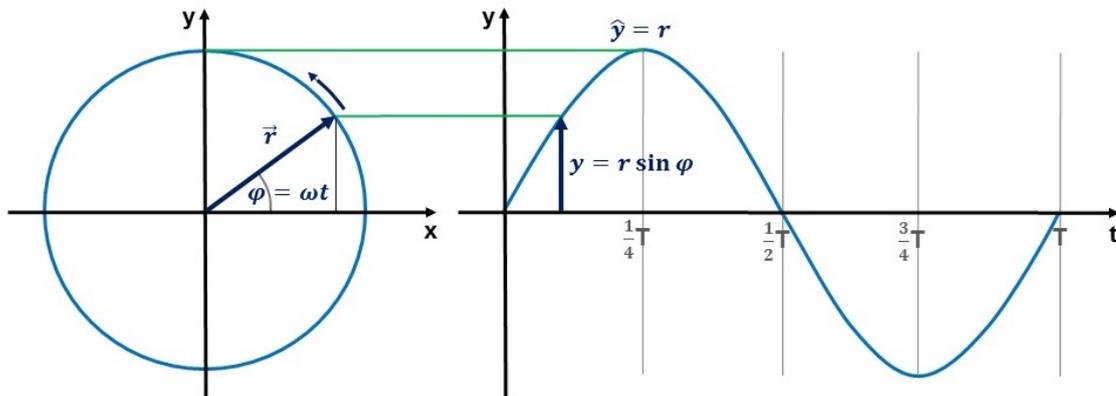
Ist die rücktreibende Kraft  $F_r$  proportional zur Auslenkung, so spricht man von einer harmonischen Schwingung. Im Fall des Federpendels ist der Betrag dieser Kraft dabei durch das Hookesche Gesetz gegeben:

$$F_r = -Dy \quad (2.1)$$

Hierbei ist  $D$  die sogenannte Rückstellkonstante. Das negative Vorzeichen zeigt an, dass die rücktreibende Kraft der Auslenkung entgegengesetzt ist.

Die Bewegung des Pendelkörpers einer harmonischen Schwingung verläuft synchron zur Projektion einer gleichförmigen Kreisbewegung (vgl. Abb. 2.1) und kann daher analog zu ihr beschrieben werden. Die zeitliche Abhängigkeit der Elongation einer harmonischen Schwingung kann somit durch folgende Weg-Zeit-Funktion beschrieben werden:

$$y(t) = \hat{y} \sin(\omega t) \quad (2.2)$$



**Abbildung 2.1:** Bei einer gleichförmigen Kreisbewegung wird die Position eines Körpers durch den Radius  $r$  und den Winkel  $\varphi$  bestimmt. Dabei entspricht der Abstand zur  $x$ -Achse der Auslenkung der Schwingung und es gilt  $y = r \sin(\varphi) = \hat{y} \sin(\omega t)$  (nach [Grehm et al. 2007], S. 91).

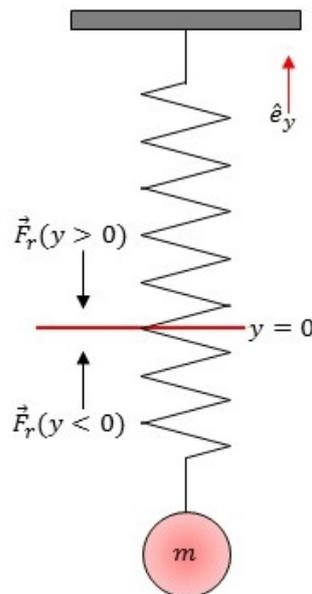
Die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  einer gleichförmigen Kreisbewegung wird bei einer Schwingung als Kreisfrequenz  $\omega$  bezeichnet:

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T} \quad (2.3)$$

### 2.2 Das Federpendel

Bei der folgenden mathematischen Auseinandersetzung mit dem Federpendel wird die Annahme vorausgesetzt, dass die Pendelbewegung reibungsfrei vonstatten geht. Des Weiteren wird die Masse des Pendelkörpers als Punktmasse idealisiert und die Feder selbst vorerst als masselos angesehen. Die Thematisierung der Federmasse folgt am Ende dieses Abschnitts.

Abbildung 2.2 zeigt die schematische Darstellung eines harmonischen Oszillators. Befindet sich der Pendelkörper in seiner Ruhelage, so herrscht ein Kräftegleichgewicht zwischen der rücktreibenden Kraft  $F_r$  und der Gewichtskraft  $F_G$ . Unter Anwendung des zweiten Newtonschen Axioms  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$  liefert das Hookesche Gesetz (Gl. 2.1) eine



**Abbildung 2.2:** Ungedämpfter harmonischer Oszillator mit Pendelmasse  $m$  und Ruhelage bei  $y = 0$ .

## 2 Die Physik der harmonischen Schwingung

---

Proportionalität zwischen der Beschleunigung und der Auslenkung aus der Ruhelage:

$$a_y = \frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{D}{m}y \quad (2.4)$$

Die Beschleunigung ist dabei, analog zur rücktreibenden Kraft, stets zur Ruhelage hin gerichtet. Es handelt sich bei der Gleichung (2.4) um eine lineare Differentialgleichung zweiten Grades, die durch die Weg-Zeit-Funktion (Gl. 2.2) gelöst wird:

$$a_y(t) = \frac{d^2y}{dt^2} = -\omega^2 \hat{y} \sin(\omega t) = -\omega^2 y(t). \quad (2.5)$$

Diese Formel (2.5) wird auch als Beschleunigungsgesetz der harmonischen Schwingung bezeichnet. Ein Vergleich der Gleichungen (2.4) und (2.5) liefert nun folgenden Ausdruck für die Kreisfrequenz  $\omega$ :

$$\omega = \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (2.6)$$

Dies führt über obigen Zusammenhang (Gl. 2.3) schlussendlich zu einer Formel für die Schwingungsdauer eines Federpendels:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}} \quad (2.7)$$

Die Schwingungsdauer ist also von der Rückstellkonstante, in diesem Zusammenhang auch als Federkonstante bezeichnet, und der Masse des Pendelkörpers abhängig.

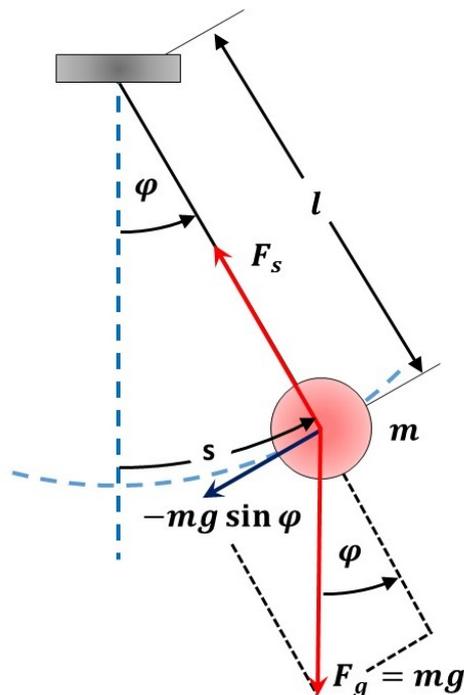
An dieser Stelle soll daher kurz die Bedeutung der Federkonstante angesprochen werden. Es kann über eine Betrachtung der kinetischen Energie einer realen Feder, die im  $\Phi$ -liki der Uni Kiel ([\[www.philiki.uni-kiel.de\]](http://www.philiki.uni-kiel.de)) im Detail nachzuvollziehen ist, gezeigt werden, dass sich die in Gleichung (2.7) aufgeführte Masse  $m$  exakterweise als Summe der Masse des Pendelkörpers und eines Drittels der Federkonstante ergibt. Welchen konkreten Unterschied dieser Anteil der Federkonstante bei der Berechnung der Schwingungsdauer macht, wird in Abschnitt 5.2 näher betrachtet.

## 2.3 Das Fadenpendel

Analog zur Betrachtung des Federpendels wird beim Fadenpendel von einer reibungsfreien Pendelbewegung ausgegangen. Es wird die Idealisierung eines mathematischen Pendels angesetzt, d.h. der Pendelkörper wird als Punktmasse und der Faden als masselos angesehen.

Eine schematische Darstellung der Pendelbewegung mit ihren geometrischen Beziehungen ist in Abbildung 2.3 aufgeführt. Die beteiligten Größen, die bei einer solchen Schwingung auftreten, sind die Pendelmasse  $m$ , die Länge  $l$  des Pendels (bzw. die Fadlänge  $l$ ) und der Auslenkungswinkel  $\theta$ . Die Startauslenkung  $\theta_0$  kann dabei mit der Amplitude der Schwingung gleichgesetzt werden. Die momentane Auslenkung  $\theta$  steht durch  $s = l \cdot \theta$  in direktem Zusammenhang zur Bogenlänge  $s$ .

Die Kräfte, die auf die Pendelmasse wirken, sind ebenfalls Abbildung 2.3 zu entnehmen. Dies sind zum einen die Gewichtskraft  $F_G = m \cdot a_G$  mit der Erdbeschleunigung  $|a_G| = g = 9,81 \text{ m/s}^2$  ([Tipler et al. 2015], S. 85) und zum anderen die radiale Zugkraft  $F_S$  des Fadens, welche die Pendelmasse auf der Kreisbahn hält. Die Kraft, die tangential auf den Pendelkörper wirkt und ihn somit zur Ruhelage hin beschleunigt, ergibt sich



**Abbildung 2.3:** Schematische Darstellung einer Pendelschwingung mit den Kräften, die auf die Pendelmasse  $m$  wirken (nach [Tipler et al. 2015], S. 427).

wieder mit Hilfe des zweiten Newtonschen Axioms zu:

$$\begin{aligned} -mg \sin \theta &= m \frac{d^2 s}{dt^2} = ml \frac{d^2 \theta}{dt^2} \\ \Rightarrow \quad \frac{d^2 \theta}{dt^2} &= -\frac{g}{l} \sin \theta \end{aligned} \quad (2.8)$$

Bei dieser Gleichung (2.8) handelt es sich um eine nicht-lineare Differentialgleichung zweiten Grades, die im Bereich der elementaren Funktionen keine geschlossene Lösung besitzt. Erst unter Anwendung der Kleinwinkelnäherung  $\sin \theta \approx \theta$ , die im Abschnitt 6.2 näher betrachtet wird, ergibt sich die lineare Differentialgleichung des harmonischen Oszillators für kleine Winkelauslenkungen:

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = -\frac{g}{l} \theta \quad (2.9)$$

Unter diesen Voraussetzungen kann die Pendelschwingung also als harmonisch betrachtet werden, sodass die Differentialgleichung (2.9) analog zur Betrachtung des Federpendels (mit  $y \rightarrow \theta$ ) durch die Weg-Zeit-Funktion (Gl. 2.2) gelöst werden kann:

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = -\omega^2 \theta_0 \sin(\omega t) = -\omega^2 \theta(t) \quad (2.10)$$

Ein Vergleich der Gleichungen (2.9) und (2.10) liefert unmittelbar den Zusammenhang für die Kreisfrequenz  $\omega$  eines Fadenpendels:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (2.11)$$

Es ist hier auf die Unterscheidung zwischen der Kreisfrequenz und der Winkelgeschwindigkeit der Pendelbewegung zu achten, die ebenfalls mit  $\omega$  bezeichnet wird. Setzt man diesen Zusammenhang (Gl. 2.11) in die obige Beziehung zwischen der Kreisfrequenz und der Schwingungsdauer (Gl. 2.3) ein, so resultiert schließlich eine Formel für die Schwingungsdauer des Fadenpendels:

$$\boxed{T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}} \quad (2.12)$$

## 3 Didaktische Vorüberlegungen

Aus didaktischer Sicht sind Experimente im Physikunterricht ein Mittel, um „physikalische Phänomene zu veranschaulichen und physikalische Vorstellungen aufzubauen [...]. Gerade auf Schulniveau können (und müssen) Experimente das physikalische Wissen konkretisieren“ ([Kircher et al. 2015], S. 228f.). Als Bindeglied zwischen der Theorie und Praxis lassen sich so diverse Elemente des naturwissenschaftlichen Arbeitens vertiefen. In dieser Ausarbeitung sind zwei Versuchseinheiten zur Einbindung in den Unterricht entwickelt worden, die jeweils aus einem Smartphone-Experiment, begleitenden Arbeitsaufträgen für die SuS und einer erläuternden Lehrerhandreichung bestehen. Auf Basis der fachwissenschaftlichen Hintergründe des zweiten Kapitels werden in den folgenden Abschnitten die didaktischen Aspekte erläutert und diskutiert.

### 3.1 Schülervorstellungen zu harmonischen Schwingungen

Der US-amerikanische Lernpsychologe David Ausubel merkte bereits Ende der 60er Jahre an, dass „der wichtigste Einflussfaktor für das Lernen ist [...], was der Lerner bereits weiß“ (Ausubel, zit. n. [Wiesner et al. 2011], S. 29). Meist haben die SuS bereits durch „vielfältige Alltagserfahrungen tief verankerte Vorstellungen zu den Phänomenen, Begriffen und Prinzipien“ ([Wodzinski et al. 2004], S. 3), die im Unterricht behandelt werden. Häufig widersprechen solche Vorstellungen den entsprechenden physikalischen Konzepten und sind dazu teilweise resistent gegenüber dem Physikunterricht. So sind laut Wodzinski die Lernschwierigkeiten in der Mechanik äußerst vielschichtig und vielseitig (vgl. [Wodzinski et al. 2004], S. 107). „Lernen bedeutet, Wissen auf der Basis der vorhandenen Vorstellungen aktiv aufzubauen. Der Unterricht muss also an den Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler anknüpfen und ihre Eigenaktivitäten fördern und fördern“ ([Duit 2010], Brief Nr. 1, S. 1).

Daher sollten die möglichen Schülervorstellungen bezüglich der harmonischen Schwingung bei der Ausarbeitung der Arbeitsblätter zu den jeweiligen Smartphone-Experimenten berücksichtigt werden. So ist die Vorstellung, dass die Schwingungsdauer eines Pendels unabhängig von der Amplitude, im Falle des Fadenpendel zusätzlich unabhängig von der Masse des Pendelkörpers ist, nicht zwangsweise intuitiv. Ein alltagsnahes Beispiel ist die Schaukel auf dem Spielplatz, die physikalisch als Fadenpendel betrachtet werden kann. Die Fehlvorstellung, dass z.B. ein Elternteil, das mit gleicher oder gar kleinerer Startauslenkung zu schaukeln beginnt, den tiefsten Punkt zeitlich eher passiert als das leichtere Kind, existiert gewiss bei einigen SuS. Allerdings merkt Barth an, dass keine systematisch tiefgehende Untersuchungen über Alltagsvorstellungen zu Schwingungen vorliegen ([Barth 2011a], S. 4), die dies fundiert belegen.

## 3.2 Formulierung der Lernziele

In Anlehnung an die Beachtung möglicher Schülervorstellungen geht es bei der Konzeption einer Unterrichtseinheit darum, die SuS im Unterricht dort abzuholen, wo sie inhaltlich stehen. Zum einen müssen hierbei Überlegungen zu den notwendigen Lernvoraussetzungen in die Gestaltung einfließen, auf die im Abschnitt 3.4 bei der Einbettung in den Unterricht noch genauer eingegangen wird. Zum anderen müssen auch die gewünschten Lernziele festgelegt und formuliert werden.

Die Betrachtung der Lernziele setzt hier erst nach der klassischen didaktischen Analyse und der Unterscheidung der vier Zieldimensionen nach Klafki (vgl. [Jank/Meyer 2009], S. 205) an, auch wenn besonders die Gegenwarts- und Zukunftsbedeutung sowie die Zugänglichkeit für die SuS die Aufbereitung des Themas Schwingungen stark beeinflussen. Stattdessen soll hier auf den sogenannten Lernzielraum zur Präzisierung der Lernziele eingegangen werden. Die folgenden Erläuterungen sind dem Werk von Kircher ([Kircher et al. 2015], S. 84ff.) entnommen.

Bei Betrachtung des Zielebenenmodells nach Westphalen lassen sich die beiden in dieser Arbeit erstellten Versuchsreihen zum harmonischen Federpendel und harmonischen Fadenpendel Grob- und Feinzielen zuordnen. Auf der einen Seite sind sie klar auf ein Teilgebiet der Physik, die harmonischen Schwingungen, bezogen und beinhalten die hierfür relevanten Formeln für die Schwingungsdauer (Grobziel). Auf der anderen Seite stellt die Verifizierung eben dieser Formeln durch eine klar strukturierte Aufgabenstellung und das Experimentieren mit der App *phyphox* eine Verfeinerung dar (Feinziel).

In Anlehnung an die von Roth vorgeschlagenen vier Lernzielstufen können die entwickelten Smartphone-Experimente die ersten drei Stufen, namentlich Reproduktion, Reorganisation und Transfer, abdecken. Die bereits im Unterricht erworbenen Sachverhalte zu harmonischen Schwingungen werden in den Versuchen reproduziert (Stufe I). Im Zusammenspiel beider Versuchsteile (Feder- und Fadenpendel) müssen die bekannten Sachverhalte zum einen reorganisiert (Stufe II) und zum anderen transferiert (Stufe III) werden.

Dabei sollen einzelne Konzeptziele wie das Wissen über die relevanten Begriffe, das Verstehen von Zusammenhängen und das Bewerten und Beurteilen von Messungenauigkeiten erreicht werden. Daneben werden auch Prozessziele adressiert, wobei besonders die Aneignung physikalischer Untersuchungsmethoden zu nennen ist. Konkretisiert wird das in diesem Fall in Form der Messwerterfassung mit dem Smartphone und der App *phyphox*.

Lernziele für die Unterrichtseinheiten, in denen die Smartphone-Experimente eingebettet sind, können somit folgendermaßen ausformuliert werden:

Die Schülerinnen und Schüler

- untersuchen den Zusammenhang der Größen Schwingungsdauer, Masse, Amplitude (bzw. Auslenkung), 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

### 3.3 Verortung im Kernlehrplan

Die Kernlehrpläne in NRW greifen die Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz (KMK) auf und konkretisieren sie (vgl. [MSW NRW 2014], S. 3). Im Gegensatz zu den in Abschnitt 3.2 formulierten Lernzielen, die konkrete Anforderungen auch in Bezug auf Lösungswege benennen, sind die Kernlehrpläne kompetenzorientiert ausgelegt. Dies gibt Lehrenden und Lernenden die Möglichkeit, auch mit offenen Anforderungssituationen individuell umzugehen und entsprechend der verschiedenen Hintergründe Lösungsstrategien selbstständig zu erkennen und zu nutzen. So ermöglicht die lernzielorientierte Unterrichtspraxis einen langfristigen, zielgerichteten Prozess des Kompetenzaufbaus.

Das Themengebiet der Schwingungen und Wellen ist im Kernlehrplan Physik im Inhaltsfeld der Mechanik verortet (vgl. [MSW NRW 2014], S. 24). Im Bereich Fachwissen, sollen die SuS die Größen „Position, Strecke, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Masse, Kraft [...] und ihre Beziehung zueinander an unterschiedlichen Beispielen“ erläutern ([MSW NRW 2014], S. 24). Im Falle der beiden Pendel sind dies u.a. die in der physikalischen Theorie beschriebenen Kenngrößen. Des Weiteren beschreiben die SuS „Schwingungen [...] als Störung eines Gleichgewichts und identifizieren die dabei auftretenden Kräfte“ ([MSW NRW 2014], S. 25). Hinsichtlich der Erkenntnisgewinnung sollen die SuS Bewegungen in verschiedenen Kontexten analysieren, Bewegungszustände mithilfe des Newtonschen Kraftgesetzes berechnen und unter diesem Aspekt Kausalitäten vorhersagen, die auftretenden Kräfte der Kreisbewegung analysieren, selbstständig Experimente planen und durchführen, die Regeln des Experimentierens dabei reflektieren und schließlich mechanische Größen mithilfe digitaler Werkzeuge bestimmen (vgl. [MSW NRW 2014], S. 25-26). Die in dieser Arbeit vorgestellten Smartphone-Experimente können diesbezüglich eine Reihe von Kompetenzerwartungen erfüllen, hauptsächlich im Bereich Wiedergabe und Auswahl (UF1/UF2), Wahrnehmung / Messung (E2) sowie Hypothesen und Auswertung (E3/E5) (vgl. [MSW NRW 2014], S. 22-23).

## 3.4 Einbettung in den Unterricht

Wie bereits in Abschnitt 3.1 angedeutet, hängt der Lernerfolg stark vom aktuellen Wissensstand der SuS ab. Es spielt somit eine wesentliche Rolle, zu welchem Zeitpunkt und in welcher Form die Versuche in das Unterrichtsgeschehen eingebettet werden.

Beide Smartphone-Experimente sind als Schülerexperimente konzipiert, die je nach Klassengröße oder Lerngruppe in 2er- bis 4er-Teams durchgeführt werden können. Der Einsatz ist während oder kurz nach der Erarbeitungsphase zu den harmonischen Schwingungen vorgesehen. Die fachlichen Lernvoraussetzungen bestehen demnach aus den grundlegenden Begrifflichkeiten der harmonischen Schwingung. In der hier vorgestellten Form der Arbeitsaufträge sollten die SuS die beiden Formeln für die Schwingungsdauer (Gl. 2.7 und 2.12) ebenfalls bereits im Unterricht behandelt haben. Es ist jedoch auch eine Handhabung denkbar, in der die SuS eben diese Zusammenhänge mit Hilfe eines dieser Versuche selbstständig entdecken. Im Anschluss können die Formeln gemeinsam im Klassenverband erarbeitet werden.

Da beide Versuchsreihen in Thematik und Struktur sehr nah beieinanderliegen, kommt eine sequenzielle Bearbeitung beider Experimente, besonders unter Berücksichtigung des umfangreichen Lehrplans, kaum in Betracht. Anstatt sich als Lehrkraft nur für eine Variante entscheiden zu müssen, bietet sich an dieser Stelle auch ein kombinierter Einsatz in Form eines Expertenpuzzles an (vgl. [Green 2012], S. 131). Bei dieser Methode des kooperativen Lernens werden die SuS in zwei Lerngruppen unterteilt, die sich jeweils mit einem der beiden Experimente beschäftigen. Nach einer anschließenden Sicherungsphase setzen sich je ein „Experte“ pro Lerngruppe zusammen und tauschen ihre Erfahrungen und gewonnenen Erkenntnisse aus. Dabei können die Gemeinsamkeiten und Unterschiede beider Pendel herausgearbeitet und anschließend im Klassenverband gesammelt diskutiert werden. Eine Methodenblatt zum Expertenpuzzle befindet sich als Kopiervorlage im Anhang A.7.

Zu jedem der entwickelten Smartphone-Experimente wurde ebenfalls eine gesonderte Handreichung ausgearbeitet, die der Lehrkraft bei der Planung und dem Einsatz im Unterricht behilflich sein soll. Zum einen liefert sie Informationen zu den Rahmenbedingungen des Versuchs, wie z.B. Thematik, benötigte Lernvoraussetzungen, angesprochene Kompetenzbereiche oder Lernzielformulierungen. Zum anderen gibt sie dem Lehrenden methodische Anmerkungen zu den einzelnen Abschnitten des dazugehörigen Arbeitsblattes an die Hand. Neben methodischen Empfehlungen werden auch Variations- und Differenzierungsmöglichkeiten vorgeschlagen, die teilweise in den Abschnitten zu den jeweiligen Smartphone-Experimenten noch näher beleuchtet werden. Mit Hilfe dieser Angaben und Ratschläge kann die Lehrkraft die Smartphone-Experimente passend zum Unterrichtsgeschehen auswählen und individuell an die Begebenheiten der Lerngruppe anpassen. Die Lehrerhandreichungen befinden sich als Kopiervorlage im Anhang A.4 und A.6.

## 3.5 Das Smartphone als Medium im Physikunterricht

Bei einer Ausstattungsquote moderner Touchscreen-Handys unter Jugendlichen zwischen 12 und 19 Jahren von über 90% (vgl. [MPFS 2015], S. 46) ist ein zielgerichteter Einsatz von Smartphone-Experimenten im Unterricht naheliegend. Abgesehen von allgemeinen Vorteilen, wie der mobilen Internetrecherche, den Dokumentationsmöglichkeiten oder dem schnellen Datenaustausch, sind Smartphones heutzutage mit diversen Sensoren ausgestattet, die eine große Bandbreite von physikalischen Daten erfassen

können. Daher sind die Einsatzmöglichkeiten des Messgerätes „Smartphone“ gerade im Physikunterricht sehr vielfältig. U.a. werden einige klassische Demonstrationsexperimente damit auch als Schülerversuch realisierbar. Aufgrund der gewonnenen Mobilität wird die Möglichkeit von Experimenten außerhalb des Klassenzimmers (z.B. zu Hause) wesentlich erleichtert. Smartphone-Experimente können auch als eine Variation von Freihandversuchen betrachtet werden, bei denen nach Kircher ebenfalls Materialien aus der Alltagswelt eingesetzt werden und für die kein großes Experimentiergeschick seitens der SuS vonnöten ist (vgl. [Kircher et al. 2015], S. 173).

Allerdings weisen Rath und Schittkopf (nach [Kircher et al. 2015], S. 425) darauf hin, dass bei allen Vorteilen, die der Smartphone-Einsatz mit sich bringt, die Konzentration auf das eigentliche physikalische Phänomen in den Hintergrund rücken könnte. Im Gegensatz zu Demonstrationsexperimenten kann die Lehrperson den Fokus nicht mehr gezielt auf die wesentlichen Aspekte des Versuches lenken, sodass im Allgemeinen seitens der SuS mehr kognitive Ressourcen in Anspruch genommen werden. Aufgrund der vielzähligen Einsatzmöglichkeiten ist auch die Gefahr des „Missbrauches“ erhöht, das Smartphone für Tätigkeiten zu nutzen, die nicht mit dem Unterrichtsgeschehen in Verbindung stehen. Zuletzt darf der Aspekt nicht außer Acht gelassen werden, dass sich einige SuS ein Smartphone finanziell nicht leisten können. Ein Schulfundus an Geräten und eine gezielte Gruppeneinteilung kann hier einer sozialen Ungleichheit entgegenwirken.

Aufgrund des noch recht jungen technologischen Fortschritts im Bereich der Smartphones sind zum jetzigen Zeitpunkt sehr wenige Forschungserkenntnisse über die Effektivität ihres Einsatzes im Unterricht bekannt. Der Einsatz lässt sich jedoch in etablierte lernpsychologische Rahmentheorien, wie situiertes Lernen bzw. kontextbasierten Unterricht, einbetten. Diese besagen, dass der „kognitive und motivationale Lernerfolg der Lernenden größer ist, wenn sie ein physikalisches Phänomen mit Experimentiermitteln untersuchen, die sie jeden Tag benutzen“ ([Kuhn et al. 2015], S. 5).

## 4 Die App *phyphox*

Mit Hilfe diverser auf dem Markt erhältlicher Applikationen (Apps) können die Daten einzelner Sensoren ausgelesen und ihre physikalischen Messwerte angezeigt werden. Die hier verwendete App *phyphox* ist in der Lage, fast **alle** Sensoren des Smartphones anzusprechen und ihre Messdaten graphisch darzustellen. Konzipiert wurde *phyphox* am 2. Physikalisches Institut der RWTH Aachen University von Prof. Dr. Christoph Stampfer und Dr. Sebastian Kuhlen, der die App samt Peripherie entwickelt hat. In diesem Kapitel werden einige innovative Funktionen und Möglichkeiten vorgestellt, die *phyphox* seinen Nutzern bietet. Dabei wird konkret auf die Einbettung der App in die jeweiligen Experimente eingegangen.

### 4.1 Funktionen und Möglichkeiten

Die App *phyphox*, die seit September 2016 im App Store<sup>TM</sup> und Google Play Store<sup>TM</sup> frei erhältlich ist, ist mit einer Reihe von verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten ausgestattet, die sie aus der Fülle der sensorauslesenden Applikationen herausragen lässt. Sie ermöglicht, anstelle mit einem Sammelsurium von verschiedenen Apps für physikalische Experimente nur noch mit dieser einen arbeiten zu können. Die dazugehörige Internetseite ([[www.phyphox.org](http://www.phyphox.org)]) gibt einen Überblick über die Vielseitigkeit der App und steht dem Benutzer mit einem eigenen Wiki bei seinen ersten Schritten mit *phyphox* helfend zur Seite. Ein Wiki ist ein Hypertextsystem, in dem das Wissen und die Erfahrungen der Benutzer mit der Zielsetzung gesammelt werden, Interessierten eine verständliche Dokumentation zu bieten.

Die aktuelle Version 1.0.0 von *phyphox* ist bereits mit Eingängen ausgestattet, um die meisten Sensoren anzusprechen und auszulesen. Eine Liste all dieser Sensoren befindet sich auf der Startseite der App, die in Abbildung 4.1 gezeigt ist. Zusätzlich mögliche Eingänge sind das Mikrofon und Bluetooth für eigene externe Gerä-

te (z.B. Arduino). In naher Zukunft ist die Aufnahme weiterer Sensoren, wie z.B. GPS oder der Kamera, geplant. Die ansteuerbaren Ausgänge sind der Lautsprecher und Bluetooth. Im Abschnitt 4.2 wird auf die Sensoren, die bei den Experimenten zu den harmonischen Pendelschwingungen verwendet werden, detaillierter eingegangen.

Außer der Möglichkeit, die einzelnen Sensoren zur Datenaufnahme zu benutzen, kann auch auf eine Auswahl von vorgefertigten „Experimenten“ aus den Bereichen der Akustik, der Mechanik oder aus alltäglichen Situationen zurückgegriffen werden. So kann z.B. mit dem Experiment *Aufzug* die Geschwindigkeit und die zurückgelegte Höhe bei der Fahrt in einem Aufzug bestimmt werden.

Mit dem eigenen Editor<sup>1</sup> von *phyphox* kann man sogar noch einen Schritt weiter gehen. Zum einen können hier einzelne Parameter eines vordefinierten Experiments, wie z.B. Sensorrate oder Datenmenge, variiert werden, um den Versuch an eigene Vorstellungen und Rahmenbedingungen anzupassen. Zum anderen können aber auch vollständig neue Experimente selbstständig kreiert werden, wie die beiden hier detailliert beschriebenen Experimente (siehe Abschn. 4.3).

Zwei weitere große Vorteile von *phyphox* sind die Möglichkeit der Fernsteuerung und des Datenexports. So kann ein Experiment über das Netzwerk von einem Computer gesteuert und die Messung live am Bildschirm verfolgt werden. Das Smartphone kann dadurch als Messwerkzeug in den Aufbau der Experimente integriert werden, ohne dass es zur Bedienung noch erreichbar sein muss. Die Messung kann am Computer gestartet und am übersichtlicheren Bildschirm beobachtet werden. Um die aufgenommenen Daten weiter zu verarbeiten, besteht die Möglichkeit eines Exports in Komma-getrennte Werte (CSV), Tabulator-getrennte Werte oder das Dateiformat von Microsoft Excel (xls). Die Datenspeicherung kann bei Fernsteuerung direkt über den Computer erfolgen. Vom Smartphone können die Daten u.a. per Bluetooth oder E-Mail übertragen werden.

Von Simon Goertz wurde eine Kurzanleitung der App *phyphox* für Lehrkräfte und SuS entwickelt (vgl. [Goertz 2016]), die im Rahmen dieser Arbeit um einige Punkte ergänzt wurde. Sie findet sich als Kopiervorlage im Anhang A.8.



**Abbildung 4.1:** Screenshot der Startseite von *phyphox* auf dem Smartphone. In diesem Abschnitt sind die ansprechbaren Sensoren der Version 1.0.0 aufgelistet.

<sup>1</sup> <http://phyphox.org/editor>

## 4.2 Die verwendeten Sensoren

Bei den Experimenten zu den Pendelschwingungen werden zwei Sensoren verwendet. Die Messungen zum Federpendel greifen dabei auf den linearen Beschleunigungssensor (ohne g) zurück, während die zum Fadenpendel das Gyroskop benutzen. Um die erhaltenen Messwerte richtig zu interpretieren, kann es hilfreich sein, die prinzipielle Funktionsweise der einzelnen Sensoren zu kennen.

Je nach Hersteller und Modell unterscheiden sich Aufbau, Arbeitsweise und Leistung der verschiedenen Sensoren, sodass an dieser Stelle lediglich eine oberflächliche Betrachtung erfolgen kann. Bei den meisten Sensoren im Smartphone handelt es sich um hochwertige Chips, die neben der elektronischen Komponente auch noch winzige mechanische Teile enthalten, sogenannte MEMS (**M**icro **E**lektro **M**echanical **S**ystem). So enthält auch der Beschleunigungssensor zusätzlich zu einem mikro-mechanischen Sensor noch eine Auswerteelektronik. Vereinfacht besteht er aus zwei in Reihe angeordneten Kondensatoren (vgl. [Kuhn et al. 2015]). Die beiden äußeren Platten sind dabei fest mit dem Gehäuse verbunden, während die mittlere derart zwischen den beiden anderen gelagert ist, dass sie frei in eine vorgegebene Bewegungsrichtung schwingen kann. Bei einer Beschleunigung ändert sich nun aufgrund der Massenträgheit der mittleren Platte ihr Abstand zu den beiden äußeren. Dies führt zu einer messbaren Änderung der jeweiligen Kapazität der Kondensatoren. Genau genommen handelt es sich also um einen Kraftsensor. In der Auswerteelektronik können diese Kapazitätsänderungen aufgrund eines linearen Zusammenhangs dann in Beschleunigungswerte umgerechnet werden. Damit ein Smartphone die Beschleunigung in jeder Richtung messen kann, ist es mit drei dieser Sensoren ausgestattet, die in den drei Raumrichtungen im Smartphone angeordnet sind.

Aufgrund der oben beschriebenen Funktionsweise wird das Smartphone in unbeschleunigter Ruhelage lotrecht zur Erdoberfläche also stets die Erdbeschleunigung messen und dementsprechend im freien Fall gar keine. Verwendung finden diese Sensoren z.B. bei der Erkennung der Bildschirmausrichtung. Der bei dem Experiment zum Federpendel verwendete *lineare* Beschleunigungssensor filtert intern den Effekt der Erdbeschleunigung heraus und gibt somit nur die Beschleunigung relativ zum Erdgravitationsfeld an. Erreicht wird dies durch eine Kombination aus einem Beschleunigungssensor und einem Gyroskop, das auch bei den Messungen zum Federpendel zum Einsatz kommt. Der prinzipielle Aufbau eines Gyroskops ist dabei ähnlich zu dem des Beschleunigungssensors. Ebenfalls auf dem Trägheitsprinzips basierend, kann dieser Sensor zusätzlich die Rota-

tionsbewegung des Gerätes messen. Hierbei wird jeweils die Winkelgeschwindigkeit des Smartphones um eine seiner Achsen, auch Yaw, Pitch und Roll genannt, angegeben. Zur Geltung kommen solche Sensoren u.a. bei 180°-Videos oder Anwendungen im Virtual-Reality-Bereich.

Die Frequenz, mit der die Daten von den einzelnen Sensoren an das Smartphone übermittelt werden, ist von Modell zu Modell (sowohl des Smartphones als auch des Sensors) unterschiedlich. Bei aktuellem Stand variiert sie zwischen 10 Hz und 50 Hz. Standardmäßig ist *phyphox* auf 50 Hz eingestellt und nutzt somit die aktuell maximal mögliche zeitliche Auflösung.

### 4.3 Der *phyphox*-Editor

Mit dem speziell für *phyphox* entwickelten Editor eröffnet sich ein ganz neuer Horizont an Anwendungsmöglichkeiten für die gezielte Messwerterfassung mit dem Smartphone. Erreichbar ist er über einen Link auf der Homepage<sup>2</sup>. Voraussetzung für die Nutzung ist somit eine Verbindung zum Internet.

Aufgrund der Funktionsvielfalt des Editors kann die Handhabung an dieser Stelle nur skizziert werden. Alle Funktionen und Operationen sind jedoch sowohl mit einem Informationsfenster versehen, in dem jedes Element noch einmal näher beschrieben wird, als auch im Wiki<sup>3</sup> detailliert erklärt. Der Editor besteht aus sieben Sektionen, die über einzelne Reiter am oberen Bildschirmrand anwählbar sind. Zur verständlicheren Zuordnung werden die im Folgenden beschriebenen Elemente in dieser Ausarbeitung durchgehend in SMALL CAPITALS geschrieben.

- **MAIN:** Hier können allgemeine Informationen zu dem Experiment wie Titel, Kategorie oder eine allgemeine Beschreibung angegeben werden.
- **INPUT:** An dieser Stelle werden die Sensoren und deren Ausleserate ausgewählt, welche die Daten für das geplante Experiment liefern sollen.
- **OUTPUT:** Es besteht die Möglichkeit, eine Audio- oder Bluetooth-Ausgabe zu generieren, die hier ausgewählt und eingestellt werden kann.
- **VIEWS:** Die VIEWS sind die einzelnen Tabulatoren, welche während der Messung in der App selber (oder auf dem Computer) angezeigt werden. Dies können

---

<sup>2</sup> <http://phyphox.org/editor/>

<sup>3</sup> <http://phyphox.org/wiki/>

neben reinen Informationen auch berechnete Werte (z.B. Periodendauer) oder Graphen (z.B. zeitlicher Verlauf einer Pendelbewegung) sein. Zusätzlich besteht hier die Möglichkeit, die Eingabe von Werten zu fordern (z.B. Masse des Pendelkörpers), die zur weiteren Berechnung und Auswertung benötigt werden. Mit den VIEWS wird also das optische Erscheinungsbild (Interface) des Experiments bestimmt. In welcher Weise die zugrunde liegenden Daten von *phyphox* generiert oder verarbeitet werden, wird in der Sektion ANALYSIS festgelegt.

- **ANALYSIS:** Die ANALYSIS bildet sozusagen das Herzstück des Editors. Hier können die Eingabedaten, die als INPUT gewählt wurden, mittels diverser mathematischer Operationen miteinander verknüpft werden. Die so berechneten Werte können dann in gewünschter Form über die erstellten VIEWS oder den OUTPUT wieder ausgegeben werden. Die Handhabung ist sehr intuitiv und ohne größere Programmierkenntnisse zu meistern. Die schematisch dargestellten Sensoren, bzw. die Speicher, welche die gelieferten Daten enthalten, werden als Linien dargestellt. Die Bausteine der einzelnen mathematischen Operatoren besitzen Ein- und Ausgänge, die durch manuelle Verbindungen mit den Sensoren oder untereinander verknüpft werden können.
- **EXPORT:** Ein beliebiger, bei der ANALYSIS angelegter Speicher (buffer) kann hier als Datensatz zum Export deklariert werden. Vorzugsweise werden dies einige der erstellten VIEWS sein. Diese Messdaten können nach einem Experiment dann extern, z.B. mit Excel, weiterverarbeitet werden.
- **XML:** Diese Sektion zeigt eine Vorschau des Codes, den der Editor zur eigentlichen Programmierung generiert. Dieser wird zur Erstellung eines Experiments vom Benutzer nicht explizit benötigt und richtet sich an diejenigen, die sich für die zugrunde liegende Programmierung interessieren.

Nachdem man mit dem Editor ein Experiment erstellt hat, kann es mit *Download experiment* (am unteren, linken Bildschirmrand) auf dem Computer gespeichert und von da aus auf das Smartphone übertragen werden. Durch Öffnen der Datei wird daraufhin *phyphox* gestartet und das Experiment auf Wunsch auch direkt der vorhandenen Sammlung von Experimenten dauerhaft zugefügt. Mit *Load experiment* (ebenfalls am unteren, linken Bildschirmrand) kann ein erstelltes Experiment in den Editor geladen werden. Somit können bestehende Experimente verbessert, variiert oder nachvollzogen werden. Diese Funktion bietet vor allem Anfängern die Möglichkeit, die Struktur des Editors und der ANALYSIS besser zu verstehen.

# 5 Das Smartphone-Experiment zum harmonischen Federpendel

In diesem Kapitel wird mit dem Versuch zum harmonischen Federpendel eines der beiden im Rahmen dieser Ausarbeitung entwickelten Smartphone-Experimente vorgestellt. Der Versuch zum harmonischen Fadenpendel wird dann in Kapitel 6 behandelt. Zu Beginn wird die Entwicklung des Experiments erläutert. Dies beinhaltet neben Aufbau und eigentlicher Durchführung sowohl die Programmierung im *phyphox*-Editor als auch die Erläuterung der erstellten Arbeitsmaterialien. Daraufhin werden die Erprobung des Versuchs und die daraus gewonnenen Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Dies geschieht in zwei separaten Abschnitten: der Erprobung im Labor und einer didaktischen Erprobung mit Studierenden. Abschließend werden die gesammelten Erkenntnisse zusammengefasst und zu einem möglichen Unterrichtseinsatz in Bezug gesetzt.

## 5.1 Entwicklung des Experiments

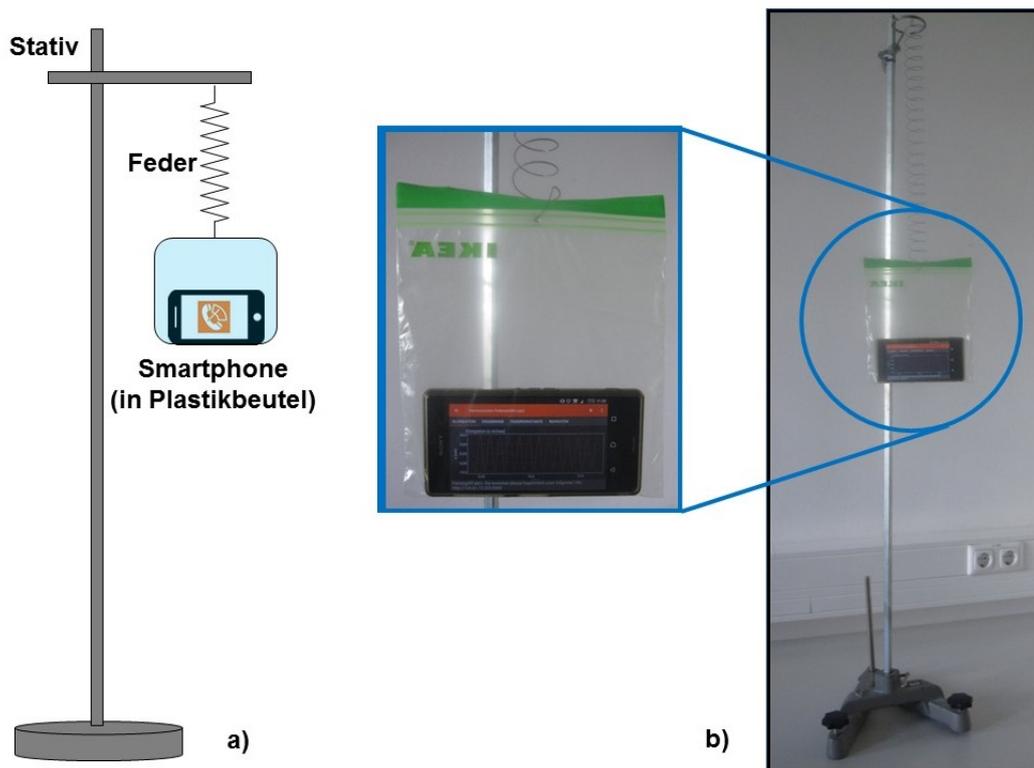
Um das hier vorgestellte Smartphone-Experiment zum harmonischen Federpendel durchführen zu können, muss die eigens dafür erstellte Datei *Harmonious Spring Pendulum (xyz).phyphox* auf die jeweiligen Smartphones geladen und zur Sammlung der vordefinierten Experimente hinzugefügt werden. Das genaue Vorgehen kann der Kurzanleitung (vgl. Anh. A.8, §4) entnommen werden. Die Datei selbst befindet sich auf einer separaten Daten-CD, die dieser Arbeit beiliegt.

### 5.1.1 Aufbau und Durchführung

Abbildung 5.1 zeigt einmal den schematischen (a) sowie den realen (b) Aufbau des Versuchs. Das benötigte Material für die hier vorgestellte Ausführung besteht neben Stativmaterial und verschiedenen Federn (mit unterschiedlichen Federkonstanten) aus handelsüblichen Gefrierbeuteln und zusätzlichen Massestücken. Zur Fixierung der Feder sollte Klebeband, zur Massenbestimmung eine Waage zur Verfügung stehen.

Aus dem Stativmaterial wird eine Halterung für die Feder gebaut, sodass sie (mit Pendelkörper) ungehindert und sicher schwingen kann. Daraufhin kann das Smartphone in den Plastikbeutel gelegt, und der Beutel an der Feder befestigt werden. Zur Sicherung des Smartphones sollten die Verbindungsstellen Halterung-Feder und Feder-Beutel bei Bedarf mit Klebeband gesichert werden. Der Vorteil des Plastikbeutels liegt darin, dass man das Display des Smartphones durch das Plastik sowohl sehen als auch bedienen kann.

Um mit der Durchführung zu beginnen, wird in der App *phyphox* das Experiment *Har-*



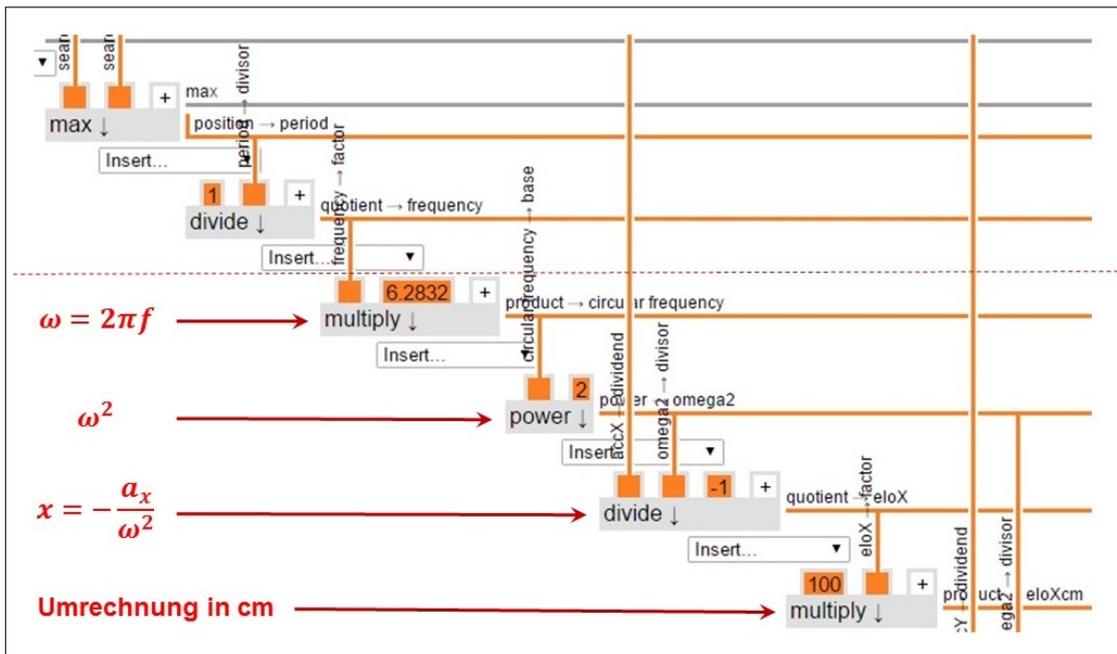
**Abbildung 5.1:** Schematischer (a) und realer (b) Aufbau des Smartphone-Experiments zum harmonischen Federpendel. An dem Stativmaterial wird eine Feder derart angebracht, dass sie ungehindert und sicher schwingen kann. Am unteren Ende der Feder wird ein Plastikbeutel befestigt, in dem das Smartphone platziert wird.

monisches Federpendel (*xyz*) geöffnet und die Messung gestartet. Daraufhin wird das Pendel in Schwingung versetzt. Nach einer kurzen Einschwingphase befindet sich das Smartphone dann in einer (annähernd) harmonischen Schwingung, die von *phyphox* aufgezeichnet wird. Damit ausreichend Daten zur Verfügung stehen, nachdem sich das Pendel eingeschwungen hat, sollte die App mindestens 20 Schwingungsdurchläufe aufnehmen, bevor die Messung beendet wird. Nachdem das Pendel angehalten worden ist, sollte das Stoppen der Messung auf dem Smartphone zügig geschehen. Sonst werden zusätzlich zu viele Daten aufgenommen, die nichts mit der zu betrachtenden Schwingung zu tun haben und somit zu einer Verfälschung der Messung führen können. Diese Gefahr besteht bei der Fernsteuerung über einen Computer nicht, da die Messung noch während des Schwingvorgangs gestoppt werden kann. Der App *phyphox* sind nun der graphische Verlauf der Elongation, die Schwingungsdauer und die berechnete Federkonstante zu entnehmen. Im weiteren Verlauf des Versuchs wird die beschriebene Messung mehrere Male wiederholt, wobei einzelne Schwingungsparameter (vgl. Abschn. 5.1.3) variiert werden.

### 5.1.2 Entwicklung des Experiments im *phyphox*-Editor

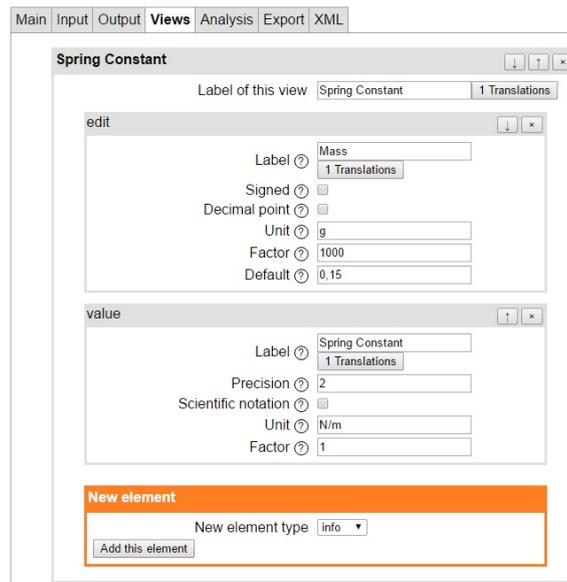
Unter den von *phyphox* vordefinierten Experimenten gibt es ebenfalls ein *Federpendel*, das auf die Daten des linearen Beschleunigungssensors zurückgreift. Hier werden dem Nutzer die Werte der Periodendauer und Frequenz sowie deren zeitlicher Verlauf angegeben. Diese werden intern durch eine sogenannte Autokorrelation gewonnen. Sie vergleicht die Merkmale einer Funktion mit sich selbst zu einem zeitlich verschobenen Zeitpunkt. Die Periodendauer lässt sich daraus sehr gut bestimmen, da der sinusförmige Verlauf der Schwingung nach eben dieser Zeit wieder bestmöglich mit sich selbst übereinstimmt. Das Experiment *Federpendel* dient als Ausgangspunkt des *Harmonischen Federpendels* (*xyz*). Die Verknüpfungen im Editor wurden teilweise übernommen und durch weitere Operationen ergänzt, die im Folgenden näher erläutert werden.

Als zentrales Element des Versuchs soll für die SuS die Bewegung der harmonischen Schwingung stehen. Der sinusförmige Verlauf ist zwar auch bei der zeitlich aufgetragenen Beschleunigung zu sehen, jedoch soll den SuS der zusätzliche Transfer von der Beschleunigung auf die Pendelbewegung (vorerst) erspart bleiben. Gewünscht ist eine Auftragung der Elongation über der Zeit. Diese kann für alle drei Achsrichtungen mit Hilfe des Beschleunigungsgesetzes der harmonischen Schwingung (Gl. 2.5) aus den entsprechenden Rohdaten berechnet werden. Abbildung 5.2 zeigt die Implementierung



**Abbildung 5.2:** Ausschnitt aus der ANALYSIS des Editors zum harmonischen Federpendel. Mit Hilfe der Beziehung  $a = -\omega^2 \cdot x$  wird die Elongation in  $x$ -Richtung aus der Beschleunigung in  $x$ -Richtung gewonnen. Die Implementierungen oberhalb der gestrichelten Linie, hier die Periode und die Frequenz, sind aus dem Experiment Federpendel übernommen.

in der ANALYSIS des Editors exemplarisch für die  $x$ -Komponente. Das wurde für alle drei Achsrichtungen durchgeführt. Die Elongation wird also schlussendlich in  $x$ -,  $y$ -, und  $z$ -Richtung angezeigt, was durch den Zusatz ( $xyz$ ) im Namen des Experiments angedeutet wird. Dazu wurde in *phyphox* eine VIEW in Form eines Graphen hinzugefügt, die mit den berechneten Werten der Elongation und der Zeit in der Sektion ANALYSIS verknüpft wurden. Die VIEW, welche die Werte der Periodendauer und Frequenz angibt, wurde um die Kreisfrequenz  $\omega$  ergänzt. Ähnlich zur Bestimmung der Elongation (vgl. Abb. 5.2) wurde über die Beziehung der Formel für die Schwingungsdauer (Gl. 2.7) die Federkonstante durch mathematische Operatoren berechnet. Dazu wurde eine weitere VIEW erstellt, die neben der Ausgabe des Wertes (value) der Federkonstante auch die Eingabe bzw. die Bearbeitung (edit) der zur Berechnung erforderlichen Masse vom Benutzer einfordert (siehe Abb. 5.3). Wird das Experiment immer mit ein und dem gleichen Smartphone durchgeführt, bietet es sich an, die dazugehörige Pendelmasse an dieser Stelle als Standard (default) anzugeben.



**Abbildung 5.3:** Ausschnitt aus dem Editor des Experiments Harmonisches Federpendel (xyz). Gezeigt ist die erstellte Ansicht (VIEW) der Federkonstanten. Hier wird die Eingabe (edit) der Masse durch den Benutzer definiert und die Ausgabe des Wertes (value) der Federkonstante deklariert.

### 5.1.3 Arbeitsblatt für die Lernenden

Das Arbeitsblatt zur harmonischen Schwingung am Federpendel, das als Kopiervorlage dem Anhang A.3 zu entnehmen ist, soll die SuS gezielt durch den Versuch führen. Dabei lässt es sich in drei didaktische Abschnitte unterteilen, die jeweils einem methodischen Schwerpunkt zuzuschreiben sind: *Orientierung*, *Steuerung* und *Vertiefung* (vgl. [Kircher et al. 2015], S. 217f).

Die Versuchs- und Materialbeschreibungen zu Beginn des Blattes sollen die *inhaltliche Orientierung* sichern und somit eine Brücke zwischen der theoretischen Behandlung im Unterricht und dem praktischen Versuchsaufbau schlagen. An dieser Stelle wird die Formel für die Schwingungsdauer des Federpendels (Gl. 2.7) als zentrales Element noch einmal hervorgehoben. Der folgende Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung dienen zur *Steuerung des Arbeitsablaufs*. Den Aufbau des Versuchs sollen die SuS mit den bereitgestellten Materialien eigenverantwortlich realisieren. An dieser Stelle enthält das Arbeitsblatt einen Warnhinweis, der die SuS für die Sicherung des Smartphones sensibilisieren soll. Die Versuchsdurchführung enthält neben den Arbeitsaufträgen für eine erste Messung auch wichtige Hinweise, die es bei der Durchführung zu beachten gilt. Zusätzlich werden die SuS gebeten, die Masse des Pendelkörpers zu bestimmen und in die App einzutragen. Die daraufhin zu bearbeitenden Aufgaben dienen der

*Vertiefung* der bereits gelernten Zusammenhänge nach dem Prinzip der Aktivierung oder Selbsttätigkeit. Das heißt, die SuS sollen zur selbsttätigen, sachgerechten Auseinandersetzung mit dem Unterrichtsgegenstand motiviert werden. Nach Jank und Meyer sind „Führung und Selbsttätigkeit [...] im Unterrichtsprozess dialektisch miteinander verbunden“ ([Jank/Meyer 2009], S. 86), wobei dieser „dialektische Widerspruch [...] den Unterrichtsprozess vorantreibt“ ([Jank/Meyer 2009], S. 248).

Das Aufgabenblatt ist so gestaltet, dass das Augenmerk zuerst auf die graphische Darstellung der Schwingung in *phyphox* gerichtet, ihr Verlauf beschrieben und analysiert werden soll. Die auf wiederholende Hypothesenbildung bezüglich des Einflusses unterschiedlicher Parameter folgende Variablenkontrolle der 3. Aufgabe fördert die experimentellen Kompetenzen der SuS. Des Weiteren können hier eventuell vorhandene Fehlvorstellungen der SuS ausgemacht werden. Selbst wenn diesen im Verlauf des Experiments entgegengewirkt werden kann, sollten sie im Nachhinein von der Lehrkraft nochmal gezielt diskutiert werden. Durch die sich wiederholenden Fragestellungen und Schritte in der Versuchsdurchführung entwickeln die SuS zusätzliche Routine und erlangen dadurch Sicherheit. Zur Ergebnissicherung und späteren Kontrolle werden die Resultate in einer Tabelle auf dem Arbeitsblatt festgehalten. Abgerundet wird das Arbeitsblatt mit einer Aufgabe zur *Kontrolle*, bei der die SuS aus den zuvor gesammelten Messdaten eine zusätzlich angehängte Masse bestimmen sollen. Hierzu muss die Formel der Schwingungsdauer umgeformt und das Ergebnis durch Bestimmung des zusätzlichen Massestücks verifiziert werden. Diese Aufgabe besitzt einen höheren mathematischen Anspruch und ist als Differenzierung für leistungstärkere SuS geeignet. In einer Fußnote werden Informationen zum Sensor und den Daten, welche die App daraus liefert, ergänzt. Somit wird eine gewisse Transparenz geschaffen und der Betrachtung des Smartphones als „Black Box“ entgegengewirkt.

### 5.2 Erprobung im Labor

In diesem Abschnitt werden diejenigen physikalischen Größen und Einflussfaktoren, die im Zusammenhang mit der Durchführung des Smartphone-Experiments stehen, untersucht. Außer der Genauigkeit der Sensordaten, der Schwingungsdauer und der Signifikanz der Federmasse wird die Reliabilität und Validität der Daten, die *phyphox* liefert, überprüft. Abschließend werden die dabei erhobenen Ergebnisse im Hinblick auf den geplanten Unterrichtseinsatz diskutiert.

### 5.2.1 Messergebnisse

Um eine Einschätzung über die Genauigkeit der Sensordaten zu bekommen, wurden für den Beschleunigungssensor (mit  $g$ ) und den linearen Beschleunigungssensor (ohne  $g$ ) jeweils neun Leermessungen durchgeführt. Dazu wurde in drei Messreihen die Beschleunigung des ruhenden Smartphones mittels *phyphox* bestimmt, und zwar jeweils mit jeder der drei Achsrichtungen des Geräts lotrecht zum Erdboden, also parallel zur Schwerkraft. Im optimalen Fall sollte der lineare Beschleunigungssensor in allen drei Fällen keine Beschleunigung anzeigen, der Beschleunigungssensor in paralleler Ausrichtung zur Schwerkraft annähernd die Erdbeschleunigung von  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Die Betrachtung der maximalen Abweichung vom jeweiligen Erwartungswert lieferte beim Beschleunigungssensor einen Wert von  $0,49 \text{ m/s}^2$  für die  $x$ -Komponente und beim linearen Beschleunigungssensor einen Wert von  $4,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$  für die  $z$ -Komponente. Eine Auflistung aller Messwerte befindet sich in Tabelle A.1 im Anhang. Die systematische Ungenauigkeit, die dem linearen Beschleunigungssensor zugrunde liegt, ist demnach im Vergleich zum *reinen* Beschleunigungssensor sehr gering. Dies könnte u.a. daran liegen, dass durch das Herausfiltern der Erdbeschleunigung eventuelle mechanische Ungenauigkeiten der Beschleunigungssensoren korrigiert werden. Da über die genaue Funktionsweise der Sensoren jedoch keine detaillierten Informationen vorliegen, wird die Messunsicherheit des linearen Beschleunigungssensors im Folgenden sehr großzügig auf den größten Wert zu  $\Delta a_{linear} = 0,5 \text{ m/s}^2$  abgeschätzt. So kann mit hoher Wahrscheinlichkeit gewährleistet werden, dass das Spektrum der verschiedenen Smartphone- und Sensormodelle damit abgedeckt wird.

Bezüglich der Ungenauigkeit auf die von *phyphox* angegebene Periodendauer wurde zuerst die Ausleserate des Sensors betrachtet. Bei einer Puffergröße des Datenausgangs von 500 und einer im Editor eingestellten Ausleserate von 50 Hz sollten zwischen dem ersten und dem letzten ausgegebenen Wert etwa 10 Sekunden liegen. Tatsächlich waren es bei dem verwendeten Smartphone (Sony Xperia Z3) etwa 12,5 Sekunden. Es konnte also statt der verlangten Datenrate von 50 Hz lediglich mit circa 40 Hz ausgelesen werden, d.h. alle 25 Millisekunden ein Messwert. Bei der zeitlichen Position der Extremwerte, die für die Betrachtung der Amplituden herangezogen werden, kann folglich eine Ungenauigkeit von  $\Delta t_{Sensor} = \pm 25 \text{ ms}$  angesetzt werden. Für die Schwingungsdauer, die aus der Autokorrelation der Beschleunigungswerte gewonnen wird, folgt daraus eine Ungenauigkeit von  $\Delta T = 2\Delta t_{Sensor} = 0,05 \text{ s}$ . Es ist zu beachten, dass dieser Wert nur von der Ausleserate und nicht von der Genauigkeit der Sensoren abhängt.

Somit kann in folgenden Betrachtungen die Unsicherheit auf die im Editor aus (Gl. 2.5) berechnete Elongation über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung abgeschätzt werden:

$$s = -\frac{a}{\omega^2} \stackrel{2.3}{=} -\frac{aT^2}{4\pi^2} \quad \wedge \quad a \leq a_{max} \quad (5.1)$$

$$\Rightarrow \Delta s \leq \sqrt{\left(\frac{T^2}{4\pi^2}\right)^2 \Delta a^2 + \left(\frac{a_{max}T}{2\pi^2}\right)^2 \Delta T^2} \quad (5.2)$$

Des Weiteren soll hier der in der Theorie angesprochene Einfluss der Federmasse (vgl. Abschn. 2.2) betrachtet werden. Dazu wurden die Federkonstanten von drei unterschiedlichen Federn mit *phyphox* bestimmt. Mit typischen Federmassen bis zu 20 g, macht ein Drittel ihrer Masse in der Regel keine 5 % der eines Smartphones aus. Dennoch wurde bei der Eingabe der Gesamtmasse auf dem Smartphone ein Drittel der Federmasse einmal berücksichtigt und einmal ignoriert. Bei einer Eingabegenauigkeit der Masse in *phyphox* von 1 g folgt eine Unsicherheit von  $\Delta m = 0,5$  g auf alle im Folgenden betrachteten Massen. Daraus lässt sich die Unsicherheit auf die im Editor aus (2.7) berechnete Federkonstante über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung abschätzen:

$$\Delta D = \sqrt{\left(8\pi \frac{m}{T^3}\right)^2 \Delta T^2 + \left(4\pi \frac{1}{T^2}\right)^2 \Delta m^2} \quad (5.3)$$

Die ausgegebenen Werte samt Unsicherheiten der jeweiligen Federkonstanten sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Es ist zu beachten, dass *phyphox* selbst keine Ungenauigkeiten angibt. Durch alle möglichen Kombinationen der Federn wurden nun analog zum obigen Vorgehen erneut die Federkonstanten sowie die Periodendauern der zusammengesetzten Federn mit *phyphox* bestimmt. Zum Vergleich wurden über den Zusammenhang  $D_{i+j}^{-1} = D_i^{-1} + D_j^{-1}$  (nach [Maschinenbau-Wissen]) die resultierenden Federkonstanten theoretisch bestimmt und über die Formel für die Schwingungsdauer (Gl. 2.7) die einzelnen Periodendauern errechnet.

**Tabelle 5.1:** Für drei verschiedene Federn sind mit *phyphox* die jeweiligen Federkonstanten bestimmt worden. Dabei wurde bei der Eingabe der Gesamtmasse einmal ein Drittel der Federmasse addiert und einmal ignoriert. Die Ungenauigkeiten resultieren aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung und werden nicht von *phyphox* angegeben.

	$D_1$ [N/m]	$D_2$ [N/m]	$D_3$ [N/m]
ohne Federmasse	$7,6 \pm 0,8$	$14,8 \pm 2,1$	$17,1 \pm 2,6$
mit Federmasse	$7,7 \pm 0,8$	$15,0 \pm 2,1$	$17,6 \pm 2,7$

## 5 Das Smartphone-Experiment zum harmonischen Federpendel

**Tabelle 5.2:** Gegenüberstellung der theoretisch bestimmten Federkonstanten der zusammengesetzten Federn und der daraus resultierenden Schwingungsdauer mit den Werten von *phyphox*. Dabei fließt bei der unteren Tabelle im Vergleich zur oberen ein Drittel der Federmasse mit in die Berechnung der Gesamtmasse ein. Die Werte von *phyphox* sind, wie in der App angezeigt, ohne Ungenauigkeit angegeben.

Federmasse berücksichtigt	$D_{\text{theo}} [N/m]$	$T_{\text{theo}} [s]$	$D_{\text{phyphox}} [N/m]$	$T_{\text{phyphox}} [s]$
Feder 1+2	$5,0 \pm 0,4$	$1,20 \pm 0,17$	5,03	1,20
Feder 1+3	$5,3 \pm 0,5$	$1,17 \pm 0,17$	5,25	1,17
Feder 2+3	$7,9 \pm 0,8$	$0,96 \pm 0,14$	7,62	0,97
Feder 1+2+3	$3,9 \pm 0,3$	$1,36 \pm 0,19$	3,80	1,42

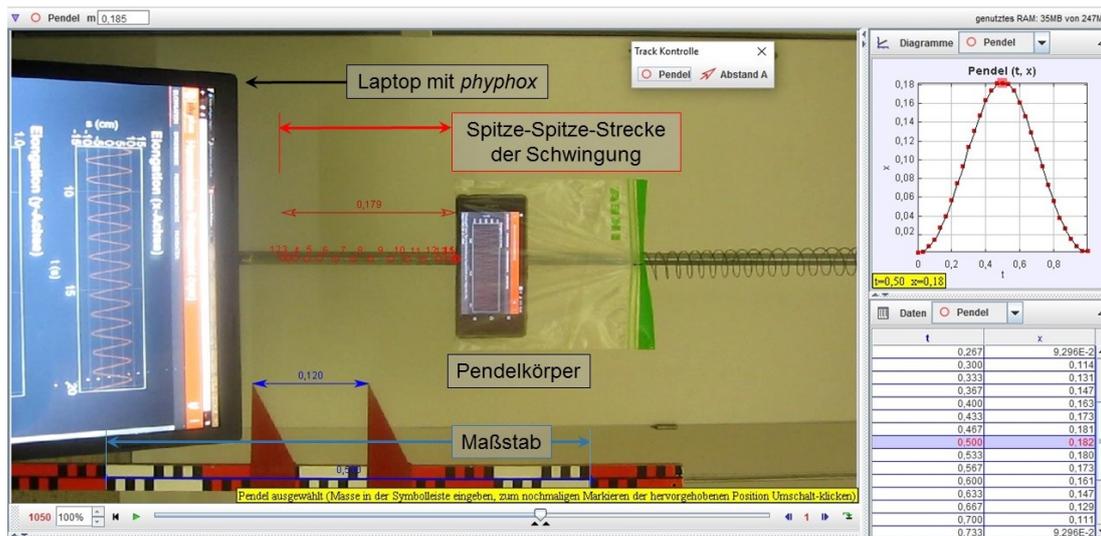
Federmasse unberücksichtigt	$D_{\text{theo}} [N/m]$	$T_{\text{theo}} [s]$	$D_{\text{phyphox}} [N/m]$	$T_{\text{phyphox}} [s]$
Feder 1+2	$5,1 \pm 0,4$	$1,21 \pm 0,23$	5,19	1,20
Feder 1+3	$5,4 \pm 0,5$	$1,18 \pm 0,23$	5,48	1,17
Feder 2+3	$8,1 \pm 0,8$	$0,97 \pm 0,19$	7,99	0,97
Feder 1+2+3	$3,95 \pm 0,29$	$1,4 \pm 0,3$	3,80	1,42

Eine Gegenüberstellung dieser Werte findet sich in Tabelle 5.2. Wie hier zu erkennen ist, liegen die Federkonstanten und Schwingungsdauern von *phyphox* stets im Unsicherheitsbereich der theoretisch errechneten Werte, unabhängig davon, ob die Federmasse in die theoretische Berechnung mit eingeflossen ist oder nicht. Es lagen keine Herstellerinformationen zu den Federn vor, mit der die Federkonstanten verglichen werden konnten.

Zur Untersuchung der Reliabilität und der Validität der von *phyphox* angegebenen Periodendauer und Elongation wurden insgesamt zehn Messungen durchgeführt. Hierbei wurden die Federn sowie die Pendelmasse in verschiedenen Kombinationen variiert. Die Schwingungsdauer wurde zusätzlich mit einer Stoppuhr bestimmt. Dabei wurde jeweils die Zeit von zehn Perioden gestoppt und durch den Faktor 0,1 die Schwingungsdauer berechnet. Es wurde hierbei darauf geachtet, dieselben Schwingungsdurchläufe zu messen, die auch unter *phyphox* betrachtet wurden. Auf die Zeitmessung der zehn Schwingungsdurchläufe wurde eine Messungenauigkeit von 0,5 s angesetzt, woraus sich diejenige auf die Schwingungsdauern zu  $\Delta T_{\text{Uhr}} = 0,05 \text{ s}$  ergibt. Außerdem wurden die Schwingungen per Video aufgenommen und mit dem *Tracker Videoanalysis and Modeling Tool*<sup>1</sup> bearbeitet. Bei der anschließenden Videoanalyse konnten so die Amplituden der Schwingung bestimmt und mit *phyphox* verglichen werden. Exemplarisch zeigt Abbildung 5.4 an einer Messung die Bestimmung der „doppelten“ Amplitude, dem

<sup>1</sup> Die Freeware von *Tracker - Videoanalysis and Modeling Tool* ist auf der Internetseite <http://physlets.org/tracker/> zu beziehen.

## 5 Das Smartphone-Experiment zum harmonischen Federpendel



**Abbildung 5.4:** Bestimmung des Spitze-Spitze-Werts einer Pendelschwingung mit dem Programm Tracker. Um die vertikale Schwingung besser bemessen zu können, wurde das Video um  $90^\circ$  gedreht. Durch einen Maßstab am unteren Bildschirm wurden der Bildausschnitt kalibriert und daraufhin der Abstand zwischen dem Minimum und dem Maximum einer Schwingung bestimmt. Am linken Bildrand ist die parallel laufende Aufnahme am Laptop zu erkennen, um die bemessenen Schwingungen in phyphox zu identifizieren. Am rechten Bildrand ist die getrackte Pendelbewegung dargestellt.

Spitze-Spitze-Wert. Aufgrund möglicher Parallaxenfehler, also der Tatsache, dass die zweidimensionale Videoaufnahme die Flucht des Raumes nicht berücksichtigen kann, sowie einer Ungenauigkeit in der Bestimmung des angesetzten Maßstabs, werden alle durch *Tracker* bestimmten Abstände mit einer Unsicherheit von  $\Delta s = 1 \text{ cm}$  versehen. Die zehn Messungen lassen sich in vier Messreihen zusammenfassen. Es wurde mit den drei verschiedenen Federn gemessen, wobei bei einer Feder (Nr. 1) zusätzlich die Masse variiert wurde. Auflistungen der jeweiligen Messergebnisse zur Schwingungsdauer und Amplitude befinden sich in den Tabellen A.2 und A.3 im Anhang. Die Federkonstanten der einzelnen Federn sind Tabelle 5.2 zu entnehmen. Die Masse des Smartphones (Sony Xperia Z3) samt Beutel  $m_0 = 181,80 \text{ g}$  und die zusätzlich angehängte Masse  $m_1 = 151,85 \text{ g}$  wurden mit einer digitalen Waage mit Anzeigegenauigkeit von  $0,01 \text{ g}$  gemessen. In *phyphox* wurden die auf Gramm gerundeten Werte eingegeben und bei Berechnungen dementsprechend die Ungenauigkeiten von  $\Delta m = 0,5 \text{ g}$  berücksichtigt. Um die gemessenen Schwingungen unter einheitlichen Bedingungen zu vergleichen, wurde pro Messreihe stets dasselbe Zeitintervall betrachtet. Mit Distanzstangen wurde für annähernd gleiche Startauslenkungen gesorgt, indem das Pendel jeweils bis zur Stange ausgelenkt wurde.

## 5 Das Smartphone-Experiment zum harmonischen Federpendel

**Tabelle 5.3:** Überprüfung der Validität von *phyphox* bezüglich der Schwingungsdauern und Amplituden beim Experiment zum harmonischen Federpendel. Die Vergleichsmessungen wurden manuell mit einer Stoppuhr und dem Programm Tracker durchgeführt. Bei allen Betrachtungen wurden jeweils die gleichen Zeitintervalle zur Messwertbestimmung zugrunde gelegt.

Messreihe 1: Feder 1 ohne zusätzliche Masse				Messreihe 1: Feder 1 ohne zusätzliche Masse			
phyphox		Stoppuhr		phyphox		Tracker	
T [s]	$\Delta T$ [s]	T [s]	$\Delta T$ [s]	s [cm]	$\Delta s$ [cm]	s [cm]	$\Delta s$ [cm]
0,97	0,03	0,98	0,03	8,7	0,4	8,98	0,29

Messreihe 2: Feder 1 mit zusätzlicher Masse				Messreihe 2: Feder 1 mit zusätzlicher Masse			
phyphox		Stoppuhr		phyphox		Tracker	
T [s]	$\Delta T$ [s]	T [s]	$\Delta T$ [s]	s [cm]	$\Delta s$ [cm]	s [cm]	$\Delta s$ [cm]
1,27	0,04	1,28	0,04	11,6	0,8	11,5	0,4

Messreihe 3: Feder 2 ohne zusätzliche Masse				Messreihe 3: Feder 2 ohne zusätzliche Masse			
phyphox		Stoppuhr		phyphox		Tracker	
T [s]	$\Delta T$ [s]	T [s]	$\Delta T$ [s]	s [cm]	$\Delta s$ [cm]	s [cm]	$\Delta s$ [cm]
0,70	0,03	0,71	0,03	4,00	0,25	4,22	0,29

Messreihe 4: Feder 3 ohne zusätzliche Masse				Messreihe 4: Feder 3 ohne zusätzliche Masse			
phyphox		Stoppuhr		phyphox		Tracker	
T [s]	$\Delta T$ [s]	T [s]	$\Delta T$ [s]	s [cm]	$\Delta s$ [cm]	s [cm]	$\Delta s$ [cm]
0,65	0,04	0,65	0,04	4,13	0,28	4,4	0,4

Ein Blick in Tabelle A.2 zeigt, dass *phyphox* pro Messreihe stets identische Periodendauern anzeigt. Außerdem stimmen die Spitze-Spitze-Werte der einzelnen Messungen in Tabelle A.3 unter Berücksichtigung der jeweiligen Ungenauigkeiten stets überein. Insgesamt können die Werte, die *phyphox* für die Schwingungsdauer und die Elongation liefert, als reliabel bezeichnet werden.

Zur Betrachtung der Validität wurden die Mittelwerte der Messreihen von *phyphox* denen der jeweiligen Vergleichsmessung gegenübergestellt. Tabelle 5.3 listet diese Vergleiche auf. Hierbei werden die Spitze-Spitze-Mittelwerte direkt halbiert und als Amplitude angegeben. Alle angegebenen Ungenauigkeiten ergeben sich aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung der Mittelwertbildung. Bei allen Messreihen liegen die Werte von *phyphox* im Unsicherheitsbereich ihrer jeweiligen Vergleichsmessung. Daher gilt das Smartphone-Experiment zur harmonischen Schwingung am Federpendel als valide.

Abschließend soll hier noch die Dämpfung der aufgezeichneten Schwingungen behandelt werden. Der physikalischen Betrachtung dieses Experiments geht die Annahme voraus, dass es sich um eine ungedämpfte Schwingung handelt. Aufgrund der Luftreibung ist dies natürlich nicht der Fall. Abbildung A.1 im Anhang zeigt exemplarisch den graphischen Verlauf einer Schwingung (Messung 10). Die Messpunkte beruhen auf den exportierten Daten von *phyphox*. Bei einer Ausleserate von 50 Hz und einer Buffergröße

von 500 beträgt die dargestellte Zeitspanne zehn Sekunden. Um eine Näherung des exponentiellen Abfalls der Amplitude durch die Dämpfung zu erhalten, wurden die Minima und Maxima der Elongation hier mit einer linearen Regression durch Excel versehen. Mit deren Steigungen von  $m_{max} = -0,06 \text{ cm/s}$  und  $m_{min} = 0,06 \text{ cm/s}$  liegt der Abfall der Amplitude in dem darstellbaren Schwingungsverlauf daher bei etwa 6 mm. Dies entspricht hier einer Abnahme von unter 10 %. Alle in diesem Abschnitt getätigten Messungen und deren Auswertung sind dieser Arbeit in Form von Excel-Tabellen auf der Daten-CD beigelegt.

### 5.2.2 Diskussion der Messergebnisse

Auf Grundlage der Messergebnisse aus dem vorangegangenen Abschnitt 5.2.1 kann die Aussage getroffen werden, dass die zentralen Messwerte dieses Smartphone-Experiments zum harmonischen Federpendel, namentlich Schwingungsdauer und Elongation, sehr reliabel und valide sind. Solange die Masse des Pendelkörpers und die Feder unverändert bleiben, gibt *phyphox* bei wiederholten Messungen identische Schwingungsdauern wieder. Bei der Elongation, die stellvertretend über die Amplituden betrachtet wurde, treten zwischen den Werten der Einzelmessungen lediglich kleine Schwankungen auf. In allen Fällen stimmen die Werte jedoch im Bereich ihrer Messunsicherheit überein. Bei den angestellten Vergleichsmessungen liegen die pro Messreihe erhobenen Mittelwerte der Schwingungsdauer und Elongation von *phyphox* unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten stets im Bereich der Werte aus der parallelen Bestimmung mit der Stoppuhr bzw. *Tracker*.

Zwar kann diesen Ergebnissen aufgrund der kleinen Anzahl von Messungen pro Messreihe keine große Gewichtung beigelegt werden, doch aufgrund der relativ geringen Schwankungen innerhalb der Messreihen kann davon ausgegangen werden, dass alle Messwerte, die unter gleichen Voraussetzungen erhoben werden, unter Berücksichtigung ihrer Ungenauigkeit eine hohe Validität und Reliabilität aufweisen werden. Daher können die mit dem erstellten Experiment *Harmonisches Federpendel (xyz)* für *phyphox* gewonnenen Messergebnisse wiederholt oder bei parallelen Messungen verschiedener Versuchsgruppen miteinander verglichen werden. Diesbezüglich erfüllt das Smartphone-Experiment die Voraussetzungen, die ein gezielter Unterrichtseinsatz erfordert.

Zusätzlich konnten die Messungen in Abschnitt 5.2.1 zeigen, dass es keinen signifikanten Unterschied ausmacht, ob die Feder mit einem Drittel ihrer Masse, die im Allgemeinen etwa zwischen 2 % und 5 % der Masse eines Smartphones liegt, in die Berechnungen mit

einfließt. Eine Behandlung im Unterricht wird somit nicht zwingend vorausgesetzt. Mit einer maximalen Abnahme der Amplitude von unter 10 % in dem von *phyphox* darstellbaren Schwingungsverlauf kann auch die Betrachtung einer ungedämpften Schwingung legitimiert werden. Die Durchführung dieses Versuchs benötigt daher keine physikalischen Vorkenntnisse zur Dämpfung seitens der SuS. Aufgrund des leichten Abfalls der Schwingung kann jedoch eine Diskussion der Dämpfung als Ausgangspunkt für deren Thematisierung im Unterricht dienen.

### 5.3 Didaktische Erprobung

Zusätzlich zu den im Labor durchgeführten Messungen zur Untersuchung der allgemeinen Reliabilität und Validität konnte im Rahmen eines universitären Praktikums das Smartphone-Experiment zum harmonischen Federpendel von Studierenden durchgeführt werden. Dies geschah zu einem Zeitpunkt, an dem sich die Entwicklung des Experiments in der Anfangsphase befand. So wurde die Bearbeitung des Versuchs mit einer früheren, unausgereiften Version des Arbeitsblattes durchgeführt. Seitdem vorgenommene Änderungen zur Optimierung des Blattes basieren u.a. auf den in diesem Kapitel dokumentierten Erfahrungen.

#### 5.3.1 Rahmenbedingungen

Im Rahmen des physikalischen Anfängerpraktikums für Lehramtsstudierende der RWTH Aachen konnten Smartphone-Experimente, die im Sommersemester 2016 in Bachelorarbeiten entwickelt wurden, unter schulähnlichen Bedingungen erprobt werden. Neben den in dieser Arbeit behandelten harmonischen Pendelschwingungen waren dies noch Experimente zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung von Simon Goertz (vgl. [Goertz 2016]) und zur Reibung an der schiefen Ebene von Patrick Klein (vgl. [Klein 2016]). An vier Terminen á 90 Minuten haben sich die Studierenden in den für diesen Zweck bereitgestellten Praktikumsräumen mit den Smartphone-Experimenten auseinandergesetzt. Im Laufe dieser Zeit ist das *harmonische Federpendel* von insgesamt neun Zweiergruppen bearbeitet worden. Die Studierenden wurden im Vorfeld gebeten, die App *phyphox* zu installieren und das Experiment *Harmonisches Federpendel (xyz)* zu implementieren. Die Materialien für den Versuchsaufbau (vgl. 5.1.1) wurden bereitgestellt, der Versuch selber jedoch nicht aufgebaut. Zur Bearbeitung wurde ein Zeitrahmen

von 30 Minuten pro Versuch angesetzt. Dabei sollten die ersten 15 Minuten von den Studierenden ohne Hilfestellung seitens der Betreuer absolviert werden, darüber hinaus erfolgte eine Unterstützung auch nur auf Anfrage der Versuchsteilnehmer. Die Versuchsleiter sollten, wenn möglich, lediglich eine beobachtende Rolle einnehmen. Zusätzlich wurden alle Gruppen, nach schriftlichem Einverständnis aller Studierenden, mit sogenannten Smartpens der Firma livescribe<sup>2</sup> ausgestattet. Somit konnte alles, was seitens der Experimentierenden geschrieben oder gesprochen wurde, aufgezeichnet werden.

### 5.3.2 Ergebnisse

Eine detaillierte Auswertung der Schriftsätze und Audiodaten der Studierenden hätte den inhaltlichen und zeitlichen Rahmen dieser Ausarbeitung überschritten. Daher beruhen die folgenden Ergebnisse der didaktischen Erprobung allein auf Beobachtungen. Die Daten der Smartpens befinden sich auf der Daten-CD. Im Folgenden werden die Erfahrungen erläutert, die zu einer Optimierung des Arbeitsblattes geführt haben. Die Beschreibungen fassen den gesamten Versuchszeitraum zusammen.

Vorab ist festzuhalten, dass nur zwei Gruppen das Arbeitsblatt in 30 Minuten vollständig bearbeitet haben. Da ein Großteil der Studierenden nach Ablauf der Zeit noch mit Messungen aus Aufgabe 3 (vgl. Anh. A.3) beschäftigt waren, konnten nur wenige Erkenntnisse zu Aufgabe 4 gewonnen werden.

Der Aufbau wurde von fast allen Gruppen insgesamt zügig und gewissenhaft realisiert. Lediglich eine Gruppe tat sich hierbei schwer und konnte erst nach zehn Minuten mit der Versuchsdurchführung beginnen. Hierbei kam es bei drei Gruppen zu Zwischenfällen mit dem Smartphone. Einmal ist der Plastikbeutel ohne Zutun der Versuchsteilnehmer gerissen und das Smartphone zu Boden gefallen. Zweimal wurde die Feder von Studierenden überspannt oder schräg ausgelenkt. Das eine Mal löste sich der Beutel von der Feder und fiel ebenfalls samt Inhalt zu Boden. Das andere Mal stieß das Smartphone gegen eine Tischkante. In allen drei Fällen kam es zu keinen Schäden an den Geräten. Daraufhin ist das Arbeitsblatt um den Warnhinweis zur sorgfältigen Versuchsdurchführung ergänzt worden. Da zwei Versuchsgruppen das Smartphone schräg in den Beutel platziert haben, was zur Verfälschung der ausgegebenen Daten geführt hat, enthält das aktuelle Arbeitsblatt daher auch wichtige Hinweise zur Versuchsdurchführung,

---

<sup>2</sup> Für weitere Informationen siehe [www.livescribe.com](http://www.livescribe.com)

um diese Fehlerquellen zu vermeiden. Die Bestimmung der Masse des Pendelkörpers erfolgte dreimal unter Einbeziehung der gesamten Federmasse. Bei der Aufstellung der Hypothesen bezüglich des Einflusses einzelner Parameter auf die Schwingungsdauer haben drei Versuchsgruppen die Formel für die Schwingungsdauer, die auf der ersten Seite des Arbeitsblattes vorgestellt wird, nicht in ihre Überlegungen mit einbezogen. In drei weiteren Fällen wurde vor den Messungen gar keine Hypothese aufgestellt. Um dem entgegenzuwirken wurde die zu dem Zeitpunkt noch kurz gehaltene Aufgabenstellung – alle drei zu variierenden Parameter wurden zuvor zusammen in einer Teilaufgabe behandelt – umformuliert und in drei Teilaufgaben unterteilt, um den Fokus auf jeweils eine Variable und die dazugehörige Hypothesenbildung zu lenken. Von den drei Gruppen, die Aufgabe 4 in dem vorgesehenen Zeitrahmen bearbeitet haben, hatte eine Schwierigkeiten bei der Umstellung der Formel für die Schwingungsdauer, sodass die Aufgabe nicht gelöst werden konnte.

Jeder Versuchstag hat mit einer Feedback-Runde geendet, bei der die Studierenden ihre Meinung zu den Versuchen und Arbeitsblättern mitteilen konnten. Ein zentraler Kritikpunkt der Studierenden war, dass das Aufgabenblatt zu textlastig sei. Sie hätten lieber weniger lesen müssen und mehr experimentieren dürfen. Die jetzige Version des Aufgabenblattes ist daraufhin aufgelockert worden: Versuchsaufbau und -durchführung wurden thematisch getrennt, Formulierungen teilweise präzisiert und Icons ergänzt, welche die einzelnen Aufgaben und Handlungsschritte thematisch in Hinweise (Ausrufezeichen), Messungen (Smartphone) und Aufforderungen zum Schreiben (Stift) unterteilen.

### 5.4 Zusammenfassung und Konsequenzen

Aufgrund der hier gesammelten Erkenntnisse bezüglich der Reliabilität und Validität des Experimentes selbst sowie der Beobachtungen in der didaktischen Erprobung im Rahmen des physikalischen Anfängerpraktikums kann das Smartphone-Experiment zur harmonischen Schwingung am Federpendel in seiner jetzigen Form als unterrichtstauglich angesehen werden. Dies wird unter Hinzunahme der Tatsache verstärkt, dass der Lehrkraft die Möglichkeit gegeben wird, eine gezielte Anpassung des Versuchs an ihre Lerngruppe vorzunehmen. Eine zusätzliche Handreichung (vgl. Anh. A.4) liefert Anregungen zur methodischen Modifikation. Durch Anwendung des Editors, wie sie im Abschnitt 4.3 erläutert wird, kann der Ablauf des Experiments nach eigenen Vor-

stellungen verändert werden. Zum Beispiel kann die Lehrperson, je nach Gewichtung der von ihr gesetzten Lernziele, den Versuchsaufbau im Vorfeld selbst realisieren. Dies vermindert den Zeitaufwand, besonders wenn das Experiment mit Computern durchgeführt wird, da in diesem Fall die Smartphones noch mit den Rechnern gekoppelt werden müssen. Zusätzlich wird dadurch der Fokus vom Aufbau stärker auf die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Schwingungsgrößen auf dem Aufgabenblatt verschoben. Da nicht von einer Ausstattung der Schule ausgegangen werden kann, die allen Versuchsgruppen eine Rechnernutzung ermöglicht, und da der Versuch universell durchführbar sein sollte, ist das Experiment zum harmonischen Federpendel ohne Fernsteuerung am Computer beschrieben. Falls jedoch die Möglichkeit besteht, sollte aufgrund der leichteren und daher ressourcensparenden Bedienung die Steuerung und Beobachtung über einen Rechner in Anspruch genommen werden.

Es ist durchaus denkbar, die SuS ohne Vorgabe der Formel für die Schwingungsdauer die physikalischen Zusammenhänge der harmonischen Schwingung eines Federpendels im Versuch selbstständig entdecken zu lassen.

Es hat sich auch gezeigt, dass die Lehrkraft auf einige Aspekte achten sollte, die nicht alleine durch das Aufgabenblatt aufgefangen werden können. Auch wenn das Arbeitsblatt einen Warnhinweis enthält, um die SuS gegenüber der Sicherung des Smartphones zu sensibilisieren, sollte die Lehrkraft stets den Aufbau sichten und freigeben, bevor die SuS mit dem Experiment beginnen können. Da die Plastikbeutel schnell verschleißen, sollten sie ebenfalls nach jeder Unterrichtsreihe ersetzt werden. Die didaktische Erprobung hat die Überlegung angeregt, ob der Einfluss der Federmasse auf die Schwingungsdauer, wenn sie auch keine signifikante Auswirkung auf die Messergebnisse hat, im Unterricht thematisiert werden soll. Basierend auf den Erfahrungen mit den Studierenden bietet eine Doppelstunde genügend Zeit, den Versuch vorzubereiten, durchzuführen und eventuell im Anschluss im Klassenverbund zu diskutieren. Aufgrund des übersichtlichen und begrenzten fachlichen Inhalts sowie einer gut strukturierten und unkomplizierten Versuchsdurchführung eignet sich dieser Versuch zum harmonischen Federpendel gut als Einführung von Smartphone-Experimenten in den Physikunterricht, insbesondere mit der App *phyphox*.

# 6 Das Smartphone-Experiment zum harmonischen Fadenpendel

Dieses Kapitel behandelt die Entwicklung des Smartphone-Experiments zum harmonischen Fadenpendel. Die Grundstruktur dieses Versuchs ist an die des harmonischen Federpendels angelehnt. Die einzelnen Abschnitte sind dementsprechend analog zum vorangegangenen Kapitel aufgebaut. Daher werden im Folgenden einige Aspekte nicht in aller Ausführlichkeit behandelt, sondern es wird hier auf entsprechende Darlegungen im Kapitel 5 zum Federpendel verwiesen.

## 6.1 Entwicklung des Experiments

Das Smartphone-Experiment zum harmonischen Fadenpendel wurde, wie bereits das zum Federpendel, eigens mit dem *phyphox*-Editor erstellt. Um den Versuch durchführen zu können, muss daher die Datei *Swing (y).phyphox* auf die jeweiligen Smartphones geladen und der Sammlung der vordefinierten Experimente hinzugefügt werden. Das genaue Vorgehen kann der Kurzanleitung (vgl. Anh. A.8, §4) entnommen werden. Um einen Alltagsbezug in den Versuch zu integrieren, orientiert sich der experimentelle Aufbau an einer den SuS bekannten Schaukel.

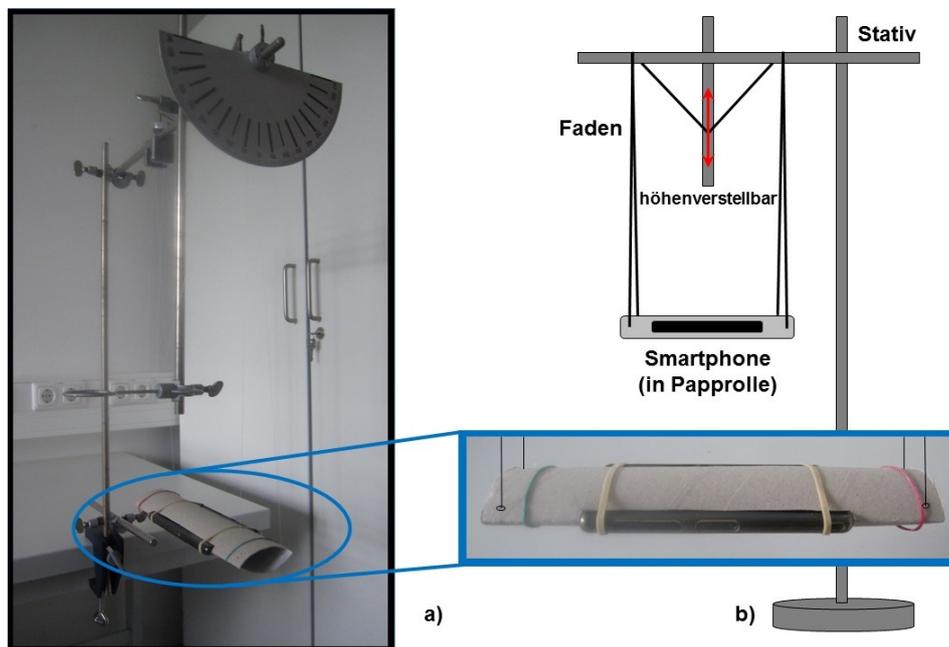
### 6.1.1 Aufbau und Durchführung

In Abbildung 6.1 sind der reale (a) sowie der schematische (b) Aufbau des Versuchs dargestellt. Der Aufbau wurde so konzipiert, dass das Smartphone wie eine Schaukel in eine festgelegte Richtung schwingen kann. Neben diversem Stativmaterial muss dafür die Halterung für das Smartphone angefertigt werden. Dazu wurde, in Anlehnung an die Sitzfläche einer Schaukel, bei der hier vorgestellten Variante eine (leere) Küchenrolle

## 6 Das Smartphone-Experiment zum harmonischen Fadenpendel

verwendet, in die das Smartphone durch zwei Längsschlitze eingeschoben werden kann (vgl. Abb. 6.1 b). Durch Gummibänder kann das Smartphone an der Papprolle fixiert werden. Mit einem Faden wird diese Konstruktion so an einer Stativstange befestigt, dass die Fadenlänge einfach und schnell, z.B. über eine Klemme, variiert werden kann. Um die Masse zu variieren, sollten einige Massestücke (z.B. schmale Holzklötze) zur Verfügung stehen, die mit weiteren Gummibändern an der „Sitzfläche“ befestigt werden können. Zur Bestimmung der einzelnen Massen dient eine Waage.

Um mit der Durchführung zu beginnen, wird das Experiment *Schaukel (y)* in *phyphox* geöffnet und das Smartphone in der Papprolle platziert. Bei der Versuchsdurchführung wird *phyphox* über die Fernsteuerung am Computer bedient, da das Smartphone ohne Entnahme aus der Rolle nicht zu bedienen ist. Dazu muss eine Verbindung mit dem Computer hergestellt werden. Das genaue Vorgehen hierbei kann der Anleitung im Anhang A.8 entnommen werden. Daraufhin können die gewogene Masse des Pendelkörpers, also Smartphone samt Halterung, und die Fadenlänge in die View EINGABE in *phyphox* eingetragen werden. Daraufhin wird die Messung auf dem Computer gestartet und die Schaukel in Schwung gesetzt. Der zeitliche Verlauf des Schwingungsvorgangs



**Abbildung 6.1:** Realer (a) und schematischer (b) Aufbau des Smartphone-Experiments zum harmonischen Fadenpendel. Dabei wurde durch den Versuchsaufbau eine Schaukel realisiert, die eine feste Achsrichtung für die Schwingung des Smartphones vorsieht. Die Halterung für das Smartphone wurde aus einer Papprolle gefertigt und mit Fäden so an dem Stativmaterial befestigt, dass die „Schaukel“ ungehindert schwingen kann und höhenverstellbar ist.

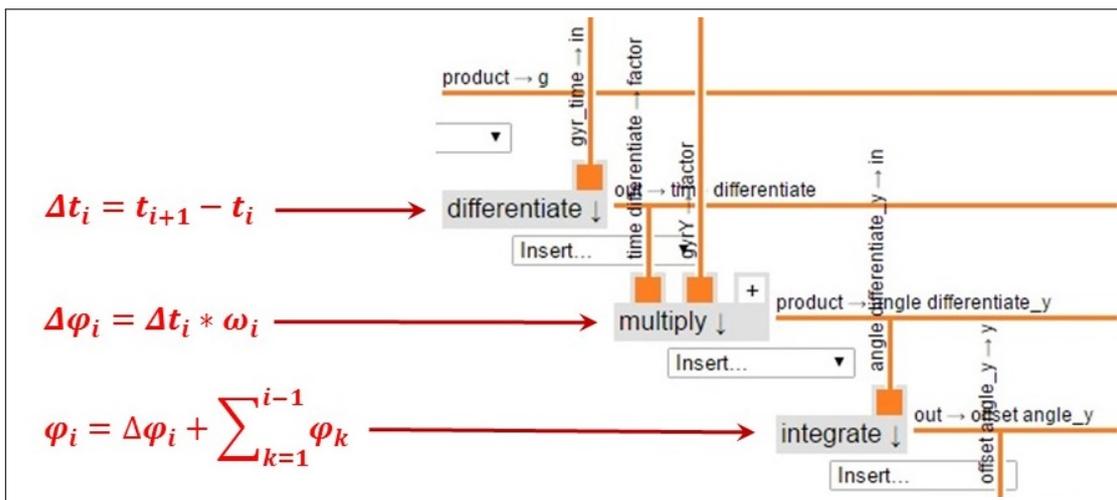
kann während der Messung live am Bildschirm unter WINKELAUSLENKUNG verfolgt werden. Um möglichst aussagekräftige Messwerte zu bekommen, sollen zwei Aspekte beachtet werden. Zum einen soll das Smartphone möglichst gerade schwingen, damit nur eine Achse des Gyroskops angesprochen wird. Zum anderen sollen mindestens 20 Schwingungsdurchläufe aufgenommen werden, damit der Einschwingvorgang aus dem Speicher der App fällt und somit bei der Auswertung nicht berücksichtigt wird.

Im weiteren Verlauf des Versuchs wird die Messung mehrere Male wiederholt, wobei die einzelnen Schwingungsparameter (vgl. Abschn. 6.1.3) variiert werden.

### 6.1.2 Entwicklung des Experiments im *phyphox*-Editor

Unter den vordefinierten Experimenten von *phyphox* gibt es das sogenannte *Pendel*, das auf die Daten des Gyroskops zurückgreift. Wenn der Benutzer hier die Fadenlänge eines Pendels eingibt, berechnet die App daraus die Erdbeschleunigung  $g$ . Zusätzlich werden der zeitliche Verlauf der Schwingungsdauer und der Frequenz angegeben, die analog zum *Fadenpendel* durch eine Autokorrelation gewonnen werden. Das entwickelte Experiment *Schaukel (y)* baut auf dem des *Pendels* auf. Im Folgenden werden die vorgenommenen Anpassungen näher erläutert. Analog zum *Harmonischen Federpendel (xyz)* sollen bei der *Schaukel (y)* nicht die Rohdaten des Gyroskops, sprich die Winkelgeschwindigkeiten, im Vordergrund stehen, sondern vielmehr die Winkelauslenkung. Daher wurde die zeitliche Änderung der Winkelauslenkung im Editor implementiert. Aufgrund der konkreten Halterung, welche die für eine Schaukel typische Schwingungsrichtung senkrecht zur Aufhängung vorsieht, wurde nur die Rotation der y-Achse des Smartphones betrachtet. Das wird durch das (y) im Namen des Experiments verdeutlicht. Eine Bewegung parallel zur Aufhängung ist nicht vorgesehen. Bei abweichenden Aufhängungen, bei denen das Smartphone um eine andere Achse rotiert, muss eine dementsprechende Anpassung im Editor vorgenommen werden.

Um die Winkeldifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messpunkten zu bestimmen, wurde mit dem Befehl DIFFERENTIATE die zeitliche Differenz zweier Messpunkte gebildet und diese mit der jeweils dazugehörigen Winkelgeschwindigkeit multipliziert. Dieser Ausschnitt der Implementierung in der ANALYSIS des Editors ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Durch INTEGRATE wurde dann die zuletzt berechnete Winkeländerung auf die Summe der vorangegangenen addiert. Bereits jetzt würden diese Werte einen zeitlich harmonischen Verlauf der Winkeländerung darstellen. Allerdings wäre die dargestellte Sinuskurve mit einem Winkeloffset versehen, da der Nulldurchgang vom Startpunkt



**Abbildung 6.2:** Ausschnitt aus dem Editor der Schaukel (y). Hier wurde die Zeitdifferenz zwischen zwei Messwerten mit der jeweils dazugehörigen Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  multipliziert, um so die Winkeldifferenz zwischen den betrachteten Punkten zu erhalten. Durch Aufsummieren dieser Werte kann ein zeitlicher Winkelverlauf gewonnen werden. Dieser ist allerdings mit einem Offset versehen, der noch ausgeglichen werden muss.

der Messung abhängt. Um das zu korrigieren, muss der Nullwinkel  $\varphi_N = 0^\circ$  manuell definiert werden. Dazu wird fortlaufend die Amplitude der Schwingung bestimmt. Dies geschieht, indem die Beträge (ABS) des Maximums (MAX) und des Minimums (MIN) der berechneten Winkelwerte addiert (ADD) und anschließend halbiert (DIVIDE) werden. Da aufgrund der dazugehörigen Größe des Speichers (buffer) immer nur die letzten 500 Werte in die Berechnungen einfließen, ändert sich dieser Wert mit dem Verlauf der Schwingung fortlaufend. Um den Offset zu erhalten, wird dieser Wert durchgehend von dem Maximum abgezogen (SUBTRACT). Zieht man den Offset wiederum vom Winkelverlauf ab, so ergibt sich die gewünschte, normierte Winkelauslenkung.

Zur graphischen Darstellung wurde die View WINKELAUSLENKUNG erstellt. Die View EINGABE wurde ebenfalls hinzugefügt, um die Länge des Fadens und die Masse des Pendelkörpers einzutragen (vgl. Abb. 5.3 in Kapitel 5.1.2).

### 6.1.3 Arbeitsblatt für die Lernenden

Entwicklung und Aufbau des Arbeitsblatts zur harmonischen Schwingung am Fadenpendel, das als Kopiervorlage dem Anhang A.5 entnommen werden kann, sind komplett an die Vorarbeiten zum Federpendel angelehnt. Für eine detaillierte Betrachtung wird hier auf den entsprechenden Abschnitt 5.1.3 verwiesen.

Zentrales Element der *inhaltlichen Orientierung* ist auch die Formel für die Schwingungsdauer, hier die des Fadenpendels (Gl. 2.12). Die Auflistung der Materialien in der *Steuerung des Arbeitsablaufs* ist diesem Versuch angepasst. Bei diesem Experiment soll der Aufbau von der Lehrkraft realisiert werden. Zusätzlich zur Masse des Pendelkörpers werden die SuS anfangs gebeten die Fadenlänge zu bestimmen und in der App einzutragen. Aufgrund der Steuerung über einen Computer besteht theoretisch die Möglichkeit, diese Eingabe jederzeit vorzunehmen. Um die einheitliche Gestaltung der Arbeitsblätter zu beiden Versuchen zu erhalten und um Irritationen durch intern falsch berechnete Werte zu vermeiden, wurde die Reihenfolge der Arbeitsabläufe hier nicht abgeändert. Bis auf die an das Fadenpendel angepasste Wahl der Parameter sind die Aufgabenstellungen zur *Vertiefung* identisch. Bei der abschließenden Aufgabe zur *Kontrolle* sollen die SuS hier mit Hilfe ihrer zuvor gesammelten Messdaten die Erdbeschleunigung berechnen und mit dem Literaturwert vergleichen.

## 6.2 Erprobung im Labor

Analog zu Abschnitt 5.2 sollen in diesem Abschnitt diejenigen physikalischen Größen und Einflussfaktoren, die im Zusammenhang mit der Durchführung des Experiments stehen, näher untersucht werden. Konkret wird die Genauigkeit der Sensordaten sowie der Einfluss der Kleinwinkelnäherung behandelt, bevor die Reliabilität und Validität der Daten, die *phyphox* liefert, überprüft wird. Im Anschluss werden die Ergebnisse im Hinblick auf den geplanten Unterrichtseinsatz diskutiert.

### 6.2.1 Messergebnisse

Bei der Einschätzung der Genauigkeit des Gyroskops sollen analog zum Beschleunigungssensors die Nullpunktfehler der Sensoren, auch als Bias bezeichnet, betrachtet werden (vgl. [Wendel 2011], S. 69). An dieser Stelle wird auf eine Durchführung eigener Leermessungen verzichtet und auf Wendel verwiesen, der eine Abweichung bis zu  $5^\circ/\text{s}$  angibt. Aufgrund der Vielzahl verschiedener Smartphone- und Sensormodelle wird an dieser Stelle eine großzügige Ansetzung der Messungenauigkeit des Gyroskops auf eben diesen Maximalwert  $\Delta\omega = 5^\circ/\text{s}$  als legitimiert angesehen.

Durch die Verwendung desselben Smartphones (Sony Xperia Z3) und der identischen Steuerungsgrößen Ausleserate und Puffergröße ergibt sich analog zum harmonischen

Federpendel eine Ungenauigkeit auf die Schwingungsdauer von  $\Delta T = 0,05$  s.

Bezüglich der Kleinwinkelnäherung wurden keine expliziten Messungen durchgeführt. Allerdings erfolgt hier eine kurze mathematische Betrachtung, um einen Toleranzbereich für die Winkelauslenkungen bei diesem Experiment abzuschätzen. Die exakte Lösung der nicht-linearen Differentialgleichung (Gl. 2.8) erfordert Kenntnisse über elliptische Integrale, auf die hier nicht weiter eingegangen wird. Darauf basierend ist die Lösung gegeben durch (vgl. [Hanser 2011], S. 12):

$$T(\varphi_0) = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \left( 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \sin^4\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) + \dots \right) \quad (6.1)$$

Die Tabelle A.4, die den Einfluss der Kleinwinkelnäherung für verschiedene Winkel exemplarisch für eine Fadenlänge von  $l = 0,5$  m aufzeigt, befindet sich im Anhang. Hieraus ist zu entnehmen, dass die Abweichung zwischen der exakten Lösung in Gleichung (6.1) und der angewendeten Näherung in Gleichung (2.12) bei  $\varphi_0 = 45^\circ$  unter 5 %, bei  $\varphi_0 = 60^\circ$  unter 10 % und bei  $\varphi_0 = 90^\circ$  über 25 % liegt.

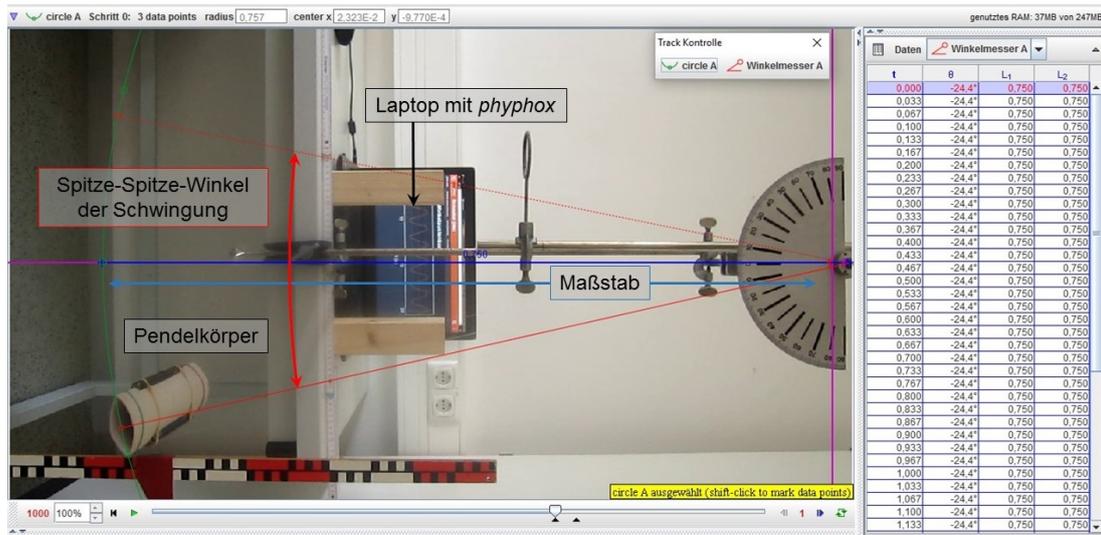
Zur Untersuchung der Reliabilität und der Validität der von *phyphox* gelieferten Schwingungsdauer und Winkelauslenkung wurden insgesamt neun Messungen durchgeführt. Diesmal wurden Fadenlänge und Pendelmasse in verschiedenen Kombinationen variiert. Die Vergleichsmessungen wurden auch hier mit einer Stoppuhr und dem *Tracker Videoanalysis and Modeling Tool*<sup>1</sup> durchgeführt. Das Vorgehen bei der Zeitmessung ist identisch zu dem in Abschnitt 5.2.1. Bei *Tracker* wurde über die Bestimmung der Kreisbahn, auf der sich die *Schaukel* bewegt, der Maßstab durch die bekannte Fadenlänge des Pendels kalibriert. Daraufhin konnte bei Betrachtung einer Periode der Winkel zwischen den beiden Maximalauslenkungen, also die zweifache Amplitude, abgemessen werden. Abbildung 6.3 zeigt exemplarisch das Vorgehen für eine Messung. Aufgrund möglicher Parallaxenfehler und der Ungenauigkeit in der Positionierung des Maßstabs werden alle durch *Tracker* bestimmten Winkel mit einer Unsicherheit von  $\Delta\varphi_{\text{Tracker}} = 1,5^\circ$  angesetzt. Die neun Messungen lassen sich in drei Messreihen zusammenfassen. Es wurde mit zwei verschiedenen Fadenlängen (50 cm und 75 cm) gemessen, wobei bei letzterer Messung zusätzlich die Pendelmasse variiert wurde. Eine Auflistung der jeweiligen Messergebnisse befindet sich in den Tabellen A.5 und A.6 im Anhang.

Der Pendelkörper, bestehend aus Smartphone samt Halterung, hatte eine Masse von  $m_0 = (192,0 \pm 0,5)$  g, die zusätzliche Masse, bestehend aus einem schmalen Holzklötzchen,

---

<sup>1</sup> Die Freeware von *Tracker - Videoanalysis and Modeling Tool* ist auf der Internetseite <http://physlets.org/tracker/> zu beziehen

## 6 Das Smartphone-Experiment zum harmonischen Fadenpendel



**Abbildung 6.3:** Bestimmung des Winkels zwischen den Maximalauslenkungen einer Pendelschwingung mit dem Programm Tracker. Um den gesamten Ablauf übersichtlicher bemessen zu können, wurde das Video um 90° gedreht. Über die Bestimmung der Kreisbahn, auf der sich der Pendelkörper bewegt, wurde der Maßstab auf die Fadenslänge kalibriert. Um die gemessene Schwingung in phyphox zu identifizieren, zeigt das Video auch die parallel laufende Aufnahme am Laptop. Am rechten Bildrand sind die Angaben zum Winkel und zu den Schenkellängen dargestellt.

$m_2 = (107,0 \pm 0,5)$  g. Um einheitliche Bedingungen zu schaffen, wurden pro Messreihe stets dieselben Zeitintervalle betrachtet. Durch einen seitlichen Anschlag wurde für annähernd gleiche Startauslenkungen gesorgt.

Ein Blick in die Tabellen A.5 und A.6 im Anhang zeigt, dass sowohl die Werte der Periodendauer als auch der Amplitude von *phyphox* pro Messreihe stets im Rahmen der Messunsicherheiten übereinstimmen. Über alle Messreihen betrachtet, lag die maximale Abweichung der in der App angezeigten Schwingungsdauer bei 0,01 s.

Die Unsicherheit der Amplitude ergibt sich aus der mathematischen Berechnung im Editor. Wie bereits im Abschnitt 6.1.2 beschrieben, wird die Winkelauslenkung aus den Winkelgeschwindigkeiten gewonnen, indem die einzelnen Winkeländerungen pro Zeitintervall aufsummiert werden. In Anlehnung an die Darstellung in Abbildung 6.2 und der daraus resultierenden Gaußschen Fehlerfortpflanzung ergibt sich:

$$\varphi_i = (t_{i+1} - t_i)\omega_i \cdot \frac{180}{\pi} + \varphi_{i-1} \quad (6.2)$$

$$\Rightarrow \Delta\varphi_i = \sqrt{\left(\frac{180}{\pi} (t_{i+1} - t_i)\right)^2 \Delta\omega^2 + \Delta\varphi_{i-1}^2} \quad (6.3)$$

**Tabelle 6.1:** Überprüfung der Validität der Schwingungsdauer und der Amplituden von *phyphox*. Die aufgelisteten Werte sind jeweils die Mittelwerte der einzelnen Messungen einer Messreihe. Die Ungenauigkeiten beruhen auf der Gaußschen Fehlerfortpflanzung. Parallel zu *phyphox* wurden die Schwingungsdauern mit einer Stoppuhr und die Amplituden mit dem Programm Tracker bestimmt. Bei allen Betrachtungen wurden jeweils die gleichen Zeitintervalle zur Messwertbestimmung zugrunde gelegt.

Messreihe 1: Fadenlänge 75 cm - ohne zus. Masse				Messreihe 1: Fadenlänge 75 cm - ohne zus. Masse			
phyphox		Stoppuhr		phyphox		Tracker	
T [s]	$\Delta T$ [s]	T [s]	$\Delta T$ [s]	$\varphi$ [°]	$\Delta\varphi$ [°]	$\varphi$ [°]	$\Delta\varphi$ [°]
1,76	0,03	1,77	0,03	12,4	0,9	12,1	0,6

Messreihe 2: Fadenlänge 75 cm - mit zus. Masse				Messreihe 2: Fadenlänge 75 cm - mit zus. Masse			
phyphox		Stoppuhr		phyphox		Tracker	
T [s]	$\Delta T$ [s]	T [s]	$\Delta T$ [s]	$\varphi$ [°]	$\Delta\varphi$ [°]	$\varphi$ [°]	$\Delta\varphi$ [°]
1,77	0,03	1,77	0,03	12,4	0,9	12,1	0,6

Messreihe 3: Fadenlänge 50 cm - ohne zus. Masse				Messreihe 3: Fadenlänge 50 cm - ohne zus. Masse			
phyphox		Stoppuhr		phyphox		Tracker	
T [s]	$\Delta T$ [s]	T [s]	$\Delta T$ [s]	$\varphi$ [°]	$\Delta\varphi$ [°]	$\varphi$ [°]	$\Delta\varphi$ [°]
1,43	0,03	1,44	0,03	20,3	0,9	19,8	0,6

In der Formel zur Fehlerfortpflanzung (Gl. 6.3) fällt auf, dass die Unsicherheit einer Winkelauslenkung mit in diejenige ihres Nachfolgers fließt. Die Unsicherheit steigt somit stetig an. Somit gilt exemplarisch für Messung 1:  $\Delta\varphi_1 = 0,12^\circ$  und  $\Delta\varphi_{400} = 2,4^\circ$ . Bei Betrachtung der zeitlichen Verläufe der Winkeländerung sämtlicher Messungen ist eine solch hohe Ungenauigkeit mit zunehmender Zeit nicht gerechtfertigt. Da bei den Vergleichsmessungen jeweils Perioden zu Beginn des gemessenen Zeitintervalls betrachtet wurden, werden die Messungenauigkeiten für die Winkelangabe von *phyphox* im Rahmen dieser Auswertung auf  $\Delta\varphi_{\text{phyphox}} = 1,5^\circ$  abgeschätzt.

Analog zum Fadenpendel werden zur Betrachtung der Validität die Mittelwerte der Messreihen von *phyphox* denen der jeweiligen Vergleichsmessung gegenübergestellt. Dieser Vergleich ist in Tabelle 6.1 aufgelistet. Es ist in beiden Fällen zu erkennen, dass sämtliche Werte von *phyphox* jeweils im Rahmen der Messungenauigkeit mit denen der jeweiligen Vergleichsmessungen übereinstimmen.

Aufgrund der analogen Verfahrensweise wird bezüglich einer Betrachtung der Dämpfung auf Abschnitt 5.2.1 des Federpendels verwiesen. In einer Zeitspanne von 10 s wurde ein maximaler Abfall der Amplituden von etwa  $2^\circ$  festgestellt. Dies entspricht hier einer Abnahme von unter 10%. Eine dazugehörige graphische Auftragung findet sich in Abbildung A.2 im Anhang. Alle in diesem Zusammenhang getätigten Messungen und deren Auswertung sind dieser Arbeit in Form von Excel-Tabellen auf der Daten-CD beigelegt.

## 6.2.2 Diskussion der Ergebnisse

Auch für das Smartphone-Experiment zum harmonischen Fadenpendel kann auf Grundlage der Messergebnisse aus dem vorangegangenen Abschnitt 6.2.1 die Aussage getroffen werden, dass die zentralen Messwerte von *phyphox* bei diesem Experiment, namentlich Schwingungsdauer und Winkelauslenkung, sowohl reliabel als auch valide sind. Die maximal aufgetretende Abweichung der von *phyphox* angezeigten Messwerte lag diesbezüglich stets unter 1 %. Dabei wird die Amplitude der Schwingung nicht als Wert angegeben, sondern der Winkelverlauf graphisch dargestellt. Eine Schwankung der Amplitude um  $0,2^\circ$  ist dort als solche nicht erkennbar. Bezüglich der Vergleichsmessungen lagen sämtliche Werte von *phyphox* unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten stets im Bereich der durch die manuelle Bestimmung der Periodendauer oder *Tracker* gewonnenen Messwerte.

Zu erwähnen sei in diesem Zusammenhang die Betrachtung der Unsicherheit auf die Winkelauslenkung von *phyphox* (vgl. Formel (6.3)). Zum einen steigt die Ungenauigkeit aufgrund der rekursiven Konstruktion des Gesamtwinkels stetig an, zum anderen ist sie durch den Einfluss der Zeitdifferenzen stark von der Ausleserate des verwendeten Smartphones abhängig. Eine detaillierte Untersuchung dieses Umstandes und seiner Auswirkungen hätte eine größere Anzahl von Messreihen mit wiederum mehr Messungen erforderlich gemacht.

Für die im Rahmen dieser Ausarbeitung betrachteten Aspekte ist die Menge an Messungen jedoch ausreichend um festzuhalten, dass Messergebnisse, die unter annähernd gleichen Voraussetzungen erhoben werden, eine Reliabilität und Validität aufweisen, die den Anforderungen eines gezielten Unterrichtseinsatzes genügen.

Außerdem wurde im vorangegangenen Abschnitt 6.2.1 die Kleinwinkelnäherung, auf der die Formel der Schwingungsdauer (Gl. 2.12) beruht, untersucht. Ein Blick in Tabelle A.4 im Anhang zeigt, dass bei einer Auslenkung von  $45^\circ$  die Abweichung zwischen der verwendeten Näherungsformel und der exakten Lösung unter 5 % und damit in einem Bereich liegt, der für schulische Zwecke vollkommen vertretbar ist. Da dieses Experiment in erster Linie der Veranschaulichung des Schwingungsvorgangs dient, ist die Exaktheit des Messwerte zunächst irrelevant. Daher können die Abweichungen, die durch die Kleinwinkelnäherung verursacht werden, bei Auslenkungen unter  $45^\circ$  vernachlässigt werden. Mit Abweichungen unter 10 % sind auch noch  $60^\circ$  zu vertreten. Davon abgesehen hat eine Schwingung, die mit großem Anfangswinkel ausgelenkt wurde, nach Ablauf von etwa 20 Schwingungsdurchgängen, die laut Aufgabenblatt

mindestens abgewartet werden sollten, eine Amplitude im Bereich  $45^\circ$  bis  $60^\circ$  erreicht. Mit einer maximalen Abnahme der Amplitude von unter 10% in dem von *phyphox* darstellbaren Schwingungsverlauf ist die Dämpfung ähnlich zu dem des harmonischen Federpendels. Eine ungedämpfte Betrachtung ist somit legitimiert. Analog zum Federpendel können die Beobachtungen der Schwingungsabnahme eine Thematisierung im Unterricht anregen.

Zwei Punkte, die bei den Messungen nicht explizit behandelt wurden, sollen hier kurz erwähnt werden. Aufgrund der Erkenntnisse bezüglich der Federmasse aus Abschnitt 5.2.1 kann die sehr kleine Fadenmasse vernachlässigt werden. Zudem braucht die Genauigkeit der eingegebenen Fadenlänge hier nicht behandelt zu werden, da sie intern lediglich zur Berechnung der Erdbeschleunigung benötigt wird. Auf diese Werte von *phyphox* wird in diesem Experiment jedoch nicht planmäßig eingegangen.

### 6.3 Didaktische Erprobung

Für das Smartphone-Experiment zum harmonischen Fadenpendel hat sich die Möglichkeit ergeben, eine erste didaktische Erprobung durch eine Gruppe von SuS vorzunehmen. Bei der Erstellung des dazugehörigen Aufgabenblattes konnte bereits auf die gesammelte Erfahrung der Erprobung des Versuches zum harmonischen Federpendel (vgl. Abschn. 5.3) zurückgegriffen werden. Das den SuS vorgelegte Arbeitsblatt entsprach also bereits in großen Teilen der Version im Anhang A.5.

#### 6.3.1 Rahmenbedingungen

Im Rahmen des Seminars *Medien im Physikunterricht* bot sich die Gelegenheit, den Versuch des harmonischen Fadenpendels einer ausgewählten Gruppe von SuS des Kaiser-Karls-Gymnasiums in Aachen vorzulegen. Hierbei wurde eine seitens des verantwortlichen Physiklehrers ausgewählte Gruppe von freiwilligen Versuchsteilnehmern (zwei Jungen und ein Mädchen) aus der Einführungsphase für die Dauer von zwei Schulstunden vom Physikunterricht freigestellt, um das Experiment durchzuführen. Die Versuchszeit betrug dabei 45 Minuten. Nach Angaben der Lehrkraft waren die SuS einem mittleren Leistungsniveau zuzuordnen, das Thema der harmonischen Schwingungen war nur einige Wochen zuvor im Unterricht behandelt worden. Für die Dauer der Versuchs konnten die Räumlichkeiten der Physiksammlung genutzt werden. Zur Durchführung wurde

den SuS ein Smartphone (Sony Xperia Z3) mit vorinstallierter App und dem Experiment der *Schaukel* ( $y$ ) zur Verfügung gestellt. Den Teilnehmern war die App zu dem Zeitpunkt unbekannt. Der Versuchsaufbau sowie die Verbindung zwischen dem Smartphone und einem Laptop wurde im Vorfeld vom Versuchsleiter realisiert. Mit schriftlicher Genehmigung der SuS wurden mit dem Freeware-Programm *oCam* parallel zum Versuch die Gespräche und Bildschirmaktivitäten aufgezeichnet.

### 6.3.2 Ergebnisse

Aufgrund schlechter Qualität der Audioaufnahmen mit *oCam*, die vermutlich auf die Distanz zwischen Mikrofon und Versuchsteilnehmern zurückzuführen ist, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Auswertung dieser Daten verzichtet. Somit beruhen die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse allein auf Beobachtungen.

Es ist festzuhalten, dass die drei Versuchsteilnehmer die Bearbeitung des Arbeitsblattes sehr souverän in der eingeräumten Zeit gemeistert haben. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sie sich freiwillig zu diesem Experiment gemeldet haben. Dementsprechend kann von einer hohen intrinsischen Motivation bei den SuS ausgegangen werden. Die Handhabung der App *phyphox* war für die drei SuS verständlich. Nach kürzester Zeit waren sie mit den benötigten Funktionen der App vertraut, ohne die Anleitung zur Hand genommen zu haben. Der technische Ablauf des Experiments verlief zu jedem Zeitpunkt reibungsfrei.

Zu Beginn von Aufgabe 3 (vgl. Anh. A.5) haben die SuS einstimmig die Hypothese aufgestellt, dass sich die Schwingungsdauer mit der Startauslenkung erhöhen müsse. Die Messungen haben daraufhin eine Schwingungsdauer von 1,69 s für eine Startauslenkung von etwa  $5^\circ$  und 1,71 s für eine Startauslenkung von etwa  $20^\circ$  ergeben. Basierend auf diesen Ergebnissen, also einer Erhöhung der von *phyphox* angezeigten Schwingungsdauer um 0,02 s, sahen die SuS ihre Vermutung bestätigt. Bei der Variation der Masse in selbiger Aufgabe haben die SuS ebenfalls eine Erhöhung der Schwingungsdauer erwartet. Aufgrund zwei identischer Periodendauern für die variierten Messungen zur Überprüfung ihrer Hypothese, haben sie diese gemeinsam überdacht und korrigiert. In beiden Fällen wurde somit anscheinend die Formel für die Schwingungsdauer unberücksichtigt gelassen. Die Berechnung der Erdbeschleunigung in Aufgabe 4 ergab einen Wert von  $9,83 \text{ m/s}^2$ , der von den SuS mit „sehr nah am Literaturwert“ kommentiert wurde. Nach 35 Minuten hatte die Versuchsgruppe die Bearbeitung des gesamten Arbeitsblattes abgeschlossen. Da noch genügend Zeit vorhanden war, der reguläre Unterricht war noch

nicht beendet, wurde der Arbeitsauftrag vom Versuchsleiter spontan um eine Aufgabe ergänzt. Die Fadenlänge der Schaukel wurde verändert und die SuS wurden so vor die Aufgabe gestellt, eben diese Länge zu bestimmen, ohne sie mit einem Maßband zu messen. Nach kurzer Überlegung und dem Hinweis, sich die Messwerte der App nochmal genau anzuschauen, konnten die drei die Aufgabe lösen, indem sie die Fadenlänge im Eingabefeld der App solange variiert haben, bis sich die Angabe der Erdbeschleunigung im gewünschten Bereich des Literaturwerts befand. Eine Überprüfung ihres Ergebnisses ergab nach eigenen Angaben eine Abweichung von 0,5 cm.

In einer abschließenden Feedback-Runde haben alle drei die Aufgabenstellung als sehr verständlich und die App als sehr übersichtlich und gut bedienbar beschrieben. Vorteile eines Smartphone-Experiments sahen sie in der schnellen und einfachen Messwerterfassung. Als Nachteil nannten sie die mögliche Gefahr, dass das Smartphone bei der Versuchsdurchführung Schaden nehmen könnte.

### 6.4 Zusammenfassung und Konsequenzen

Basierend auf den in diesem Kapitel gesammelten Erkenntnissen bezüglich der Reliabilität und Validität auf der einen Seite sowie der Beobachtungen bei der Erprobung mit SuS auf der anderen Seite kann auch das Smartphone-Experiment zur harmonischen Schwingung am Fadenpendel in seiner jetzigen Form als unterrichtstauglich bewertet werden. Analog zum Versuch des Federpendels gibt eine dazugehörige Handreichung (siehe Anh. A.6) der Lehrkraft methodische und strukturelle Anregungen an die Hand. Auch die Handhabung des Editors ermöglicht die Abänderung der *Schaukel* ( $y$ ), um den Versuch den Gegebenheiten der jeweiligen Lernsituation anzupassen. Die Versuchsdurchführung ist im Gegensatz zum harmonischen Federpendel mit der Fernsteuerung vom Computer vorgesehen, da das Smartphone in der Halterung nicht bedienbar ist. Im Hinblick auf den entstehenden höheren Zeitaufwand empfiehlt es sich, den Aufbau im Vorfeld von der Lehrkraft realisieren zu lassen. Falls der Versuch ohne Rechner durchgeführt werden soll, würde ein zusätzliches „Fenster“ in der Papprolle auch eine direkte Steuerung ermöglichen.

Da die didaktische Erprobung nur mit einer kleinen Versuchsgruppe durchgeführt wurde, können an dieser Stelle nur bedingt Konsequenzen aus dieser Erfahrung gezogen werden. Auffällig war die problemlose Handhabung von *phyphox* seitens der Versuchsteilnehmer. Dies kann als Hinweis dafür gesehen werden, dass die jetzige

Schülergeneration den Umgang mit Apps und deren Menüführung sehr intuitiv und mit einem großen (Selbst-)Verständnis handhabt. Eine weitere interessante Beobachtung bestand darin, wie die Versuchsgruppe zwei Messwerte miteinander verglichen hat. Nach ihrer Hypothese, dass sich die Schwingungsdauer durch Variation der Auslenkung erhöhen würde, wurde bei der Überprüfung eine Differenz zwischen den zwei Schwingungsdauern von 0,02 s gemessen. Dies wurde zum Anlass genommen, die beiden Messwerte als unterschiedlich zu betrachten und somit ihre Hypothese zu bestätigen. Ziel der Aufgabenstellung soll sein, einer möglichen Fehlvorstellung durch die Messungen entgegen zu wirken. Obiges Beispiel birgt jedoch die Gefahr, dass die Fehlvorstellung gefestigt wird. Es liegt die Vermutung nahe, dass sich die SuS in diesem Fall keine Gedanken über mögliche Messunsicherheiten gemacht haben. Diese sollten in einem solchen Zusammenhang von der Lehrkraft vor oder zumindest während der Versuchsdurchführung thematisiert werden, um solche kontraproduktiven Situationen zu vermeiden.

Zufälligerweise wich der von den SuS berechnete Wert für die Erdbeschleunigung ebenfalls um  $0,02 \text{ m/s}^2$  vom Literaturwert ab. In diesem Fall sehen die SuS ihr Messergebnis bestätigt. Die Kombination beider Beispiele lässt vermuten, dass die Messergebnisse jeweils so interpretiert werden, um die eigenen, bereits vorhandenen Vorstellungen und Erwartungen zu verifizieren. Vor dem Hintergrund wäre beim Beispiel der Erdbeschleunigung eine Einschätzung des Ergebnisses seitens der SuS bei einer etwas größeren Abweichung interessant gewesen.

Bei dem Experiment in seiner jetzigen Form sollen Fadenlänge und Masse des Pendelkörpers in *phyphox* eingetragen werden. Die Fadenlänge wird dabei intern lediglich für die Berechnung der Erdbeschleunigung gebraucht, da die Periodendauer aus der Autokorrelation gewonnen wird. Die Masse wird für keine der Berechnungen benötigt. Somit sollen Hypothesen, die eine Beeinflussung der Schwingungsdauer durch die Masse beinhalten, nicht kategorisch ausgeschlossen werden.

Aufgrund der inhaltlichen und strukturellen Nähe zum Smartphone-Experiment zur harmonischen Schwingung am Federpendel eignet sich dieser Versuch gut für einen kombinierten Einsatz (vgl. Abschn. 3.4).

## 7 Abschließende Reflexion

Die Zielsetzung dieser Ausarbeitung bestand darin, das Medium Smartphone zur experimentellen Auseinandersetzung in den Physikunterricht der Sekundarstufe II zu integrieren. Im Kern wurden zwei Smartphone-Experimente zur harmonischen Schwingung am Feder- bzw. Fadenpendel mit der App *phyphox* entwickelt, die eine Alternative zu vorherrschenden Versuchsdurchführungen darstellen können.

Die App *phyphox* ergänzt die Versuche durch einige innovative Aspekte, die sowohl der Lehrkraft als auch den SuS neue Möglichkeiten im Bereich der Schülerexperimente eröffnen. So gibt es z.B. bereits eine Reihe von vordefinierten Experimenten, die verwendet oder mit dem Editor von *phyphox* an die Lernumgebung und Vorstellungen der Lehrkraft angepasst werden können. Sogar ganz neue Experimente sind so implementierbar. Die hier entwickelten *phyphox*-Experimente *Harmonisches Federpendel (xyz)* und *Schaukel (y)* wurden beide auf diese Weise editiert und geben damit einen Einblick in die Vielseitigkeit, die sich mit dem Editor ergeben.

Durch die Möglichkeit, die App per Fernsteuerung über einen PC zu bedienen, werden weitere Freiheiten in der Versuchsplanung und -durchführung geschaffen. Das Smartphone kann somit fest in den Versuchsaufbau integriert werden, ohne manuell bedient werden zu müssen. Diese Möglichkeit wurde bei der Gestaltung des Versuches zum harmonischen Fadenpendel genutzt. Alternativ ist die Bedienung über das Smartphone selbst möglich, wie dies beim Versuch zum harmonischen Federpendel umgesetzt wurde. Hier zeigt sich, dass auch ohne eine ausreichende Anzahl an Schulrechnern eine Versuchsdurchführung gut zu realisieren ist. Beide Versuche sind in der vorgestellten Form mit Alltagsmaterialien und solchen, die in jeder Physiksammlung zu finden sein sollten, realisiert worden. Sieht man von den Kosten der Verbrauchsmaterialien (z.B. Klebeband, Plastiktüten oder Küchenrollen) ab, so entstehen für beide Experimente keine zusätzlichen Kosten.

Bei beiden Versuchen steht eine Formel für die Schwingungsdauer des jeweiligen Pendels im Vordergrund. Durch angewandte Variablenkontrolle sollen der Einfluss einzelner

Schwingungsparameter auf die Schwingungsdauer untersucht werden und die Formeln verifiziert und gefestigt werden. Auf den entwickelten Arbeitsblättern zu den Experimenten wird diesbezüglich vor den Messungen die Bildung einer Hypothese angeregt. So können vorherrschende Fehlvorstellungen seitens der SuS aufgedeckt werden. Diesen kann der weitere Versuchsablauf entgegenwirken. Dazu sollte die Thematik der Messunsicherheiten im Unterricht behandelt worden sein, eine Voraussetzung für die Interpretation physikalischer Messwerte. Eine Weiterentwicklung der Versuche könnte darin bestehen, sie um eine weitere Betrachtung im Zusammenhang mit mechanischen Schwingungen, z.B. zur Energieerhaltung, zu ergänzen.

Ein zentraler Aspekt bei der Entwicklung der Experimente war es, den Fokus auf die Veranschaulichung der Pendelbewegungen und den Einfluss einzelner Schwingungsparameter zu legen. Diese Arbeit konnte zeigen, dass die Messwerte von *phyphox* in diesem Rahmen reliabel und valide sind. Zusammengenommen rechtfertigt dies einen Einsatz im Physikunterricht nicht nur, sondern erweitert das Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten der „mobilen Minilabore“ ([Kuhn et al. 2015], S. 4). Didaktische Rahmenbedingungen wie Kompetenzerwartungen, Lernvoraussetzungen und -ziele sind für beide Versuche in separaten Handreichungen zusammengefasst. Sie liefern einen schnellen Überblick über das jeweilige Experiment und erleichtern so den gezielten Einsatz im Unterricht. Erste methodische Anmerkungen eröffnen Variationsmöglichkeiten in der Versuchsdurchführung und so eine Anpassung an unterschiedliche Lernbegebenheiten. An dieser Stelle soll in Aussicht gestellt werden, dass diese Sammlung an methodischen Vorschlägen um weitere Praxiserfahrungen ergänzt und anderen interessierten Lehrkräften zur Verfügung gestellt werden könnte. Mit dem öffentlichen Wiki von *phyphox* ist ein erster Schritt in der Vernetzung von Anwendern getan.

Erste didaktische Erprobungen haben in Form eines Praktikums für Lehramtsanwärter und eines Schuleinsatzes bereits stattgefunden. Zur weiteren Ausarbeitung der Stärken und Schwächen dieser Versuche empfehlen sich weitere zu reflektierende Einsätze unter schulischen Rahmenbedingungen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass Smartphone-Experimente, besonders mit der App *phyphox*, in der Lage sind, den Physikunterricht interessant und flexibel zu gestalten. Der mobile Charakter birgt neben einem Alltagsbezug der SuS die Möglichkeit, den Experimentierraum aus dem Klassenzimmer zu verlagern. Statt „künstlicher“ können reale Begebenheiten betrachtet werden. Experimente können nun auch außerhalb der Schule durchgeführt werden, z.B. auf den Fahrgeschäften des Jahrmarkts oder der Schaukel des nächstgelegenen Spielplatzes.

# Literaturverzeichnis

- [Barth 2011a] Barth, M. (2011). Schwingungen und Wellen. Grundlagen, Überlegungen, Erfahrungen und Vorschläge. In: Barth, M. (Hrsg.). *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, Heft 125 (S. 4-10). Seelze: Friedrich Verlag.
- [Barth 2011b] Barth, M. (2011). Analogien zum Verstehen nutzen. Analoge Behandlung von mechanischen und elektrischen Schwingungen mit einem Energiesatz. In: Barth, M. (Hrsg.). *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, Heft 125 (S. 29-33). Seelze: Friedrich Verlag.
- [Demtröder 2015] Demtröder, W. (2015). *Experimentalphysik 1. Mechanik und Wärme* (7. Auflage). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- [Duit 2010] Duit, R. (2010). *PIKO-BRIEFE - Der fachdidaktische Forschungsstand kurzgefasst*. Seelze: Friedrich Verlag  
<http://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/abteilungen/didaktik-der-physik/piko/pikobriefe032010.pdf> (Stand 15.09.2016)
- [Goertz 2016] Goertz, S. (2016). *Entwicklung von Smartphone-Experimenten zu gleichmäßig beschleunigten Bewegungen mit der App phyphox für den Einsatz in der Sekundarstufe II*. Bachelorarbeit am I. Physikalischen Institut A der RWTH Aachen University.
- [Green 2012] Green, N. & Green, K. (2012). *Kooperatives Lernen im Klassenraum und im Kollegium - Das Trainingsbuch* (7. Auflage). Seelze: Freidrich Verlag.
- [Grehn et al. 2007] Grehn, J. & Krause, J. (Hrsg.) (2007). *Metzler Physik* (4. Auflage). Braunschweig: Schroedel Verlag (Westermann Gruppe).
- [Hanser 2011] Hanser, F. (2011). *Medizinische Physik und Biophysik SS 2011 - Ausführliche physikalische Beispiele - Das mathematische Pendel*.  
<https://www.uit.at/data.cfm?vpath=pdf-dokumente/mpbp-examples>  
(Stand 15.09.2016)

- [Jank/Meyer 2009] Jank, W. & Meyer, H. (2009). *Didaktische Modelle* (9. Auflage). Berlin: Cornelsen Verlag
- [Kircher et al. 2015] Kircher, E., Girwidz, R. & Häußler, P. (2015). *Physikdidaktik - Theorie und Praxis* (3. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [Klein 2016] Klein, P. (2016). *Entwicklung von Smartphone-Experimenten an der schiefen Ebene mit der App phyphox für den Einsatz in der Sekundarstufe II*. Bachelorarbeit am I. Physikalischen Institut A der RWTH Aachen University.
- [Kuhn et al. 2015] 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 124 (S. 4-9). Seelze: Friedrich Verlag.
- [MSW NRW 2014] 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/lehrplaene/upload/klp\\_SII/ph/KLP\\_G0St\\_Physik.pdf](http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ph/KLP_G0St_Physik.pdf) (Stand 15.09.2016)
- [MPFS 2015] Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest. JIM-Studie 2015.  
[http://www.mpfs.de/fileadmin/JIM-pdf15/JIM\\_2015.pdf](http://www.mpfs.de/fileadmin/JIM-pdf15/JIM_2015.pdf) (Stand 15.09.2016)
- [www.philiki.uni-kiel.de]  $\Phi$ -liki der Universität Kiel  
<https://philiki.uni-kiel.de/index.php/versuche/versuch-schwingungen-wellen/280-2011-12-16-095328> (Stand 15.09.2016)
- [www.phyphox.org] *phyphox* - physical phone experiments  
<http://www.phyphox.org> (Stand 15.09.2016)
- [Maschinenbau-Wissen] Maschinenbau-Wissen. Formel zur Berechnung der Federkonstanten einer Reihenschaltung von Federn.  
<http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/kinetik/280-feder-reihenschaltung> (Stand 15.09.2016)
- [Wodzinski et al. 2004] Müller, R. & Wodzinski, R. (2004). *Schülervorstellungen in der Physik*. Köln: Aulis Verlag
- [Tipler et al. 2015] Tipler, P.A., Mosca, G. & Wagner, J. (Hrsg.) (2015). *Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure* (7. deutsche Auflage). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

[Wendel 2011] Wendel, J. (2011). *Integrierte Navigationssysteme* (2. Auflage). München: Oldenburg Wissenschaftsverlag

[Wiesner et al. 2011] Wiesner, H., Schecker, H. & Hopf, M. (2011). *Physikdidaktik kompakt*. Hallbergmoos: Aulis Verlag.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Projektion einer gleichförmigen Kreisbewegung . . . . .	3
2.2	Ungedämpfter harmonischer Oszillator . . . . .	4
2.3	Schematische Darstellung einer Pendelbewegung . . . . .	6
4.1	Startbildschirm der App <i>phyphox</i> . . . . .	15
5.1	Aufbau des Experiments zum harmonischen Federpendel . . . . .	20
5.2	Ausschnitt aus der ANALYSIS des Editors zum Federpendel . . . . .	22
5.3	Ausschnitt aus der VIEW des Editors zum Federpendel . . . . .	23
5.4	Bildschirmausschnitt aus <i>Tracker</i> zum Federpendel . . . . .	28
6.1	Aufbau des Experiments zum harmonischen Federpendel . . . . .	36
6.2	Ausschnitt aus der ANALYSIS des Editors zum Fadenpendel . . . . .	38
6.3	Bildschirmausschnitt aus <i>Tracker</i> zum Fadenpendel . . . . .	41
A.1	Graphische Auftragung der Schwingung eines Federpendels . . . . .	56
A.2	Graphische Auftragung der Schwingung eines Fadenpendels . . . . .	59

# Tabellenverzeichnis

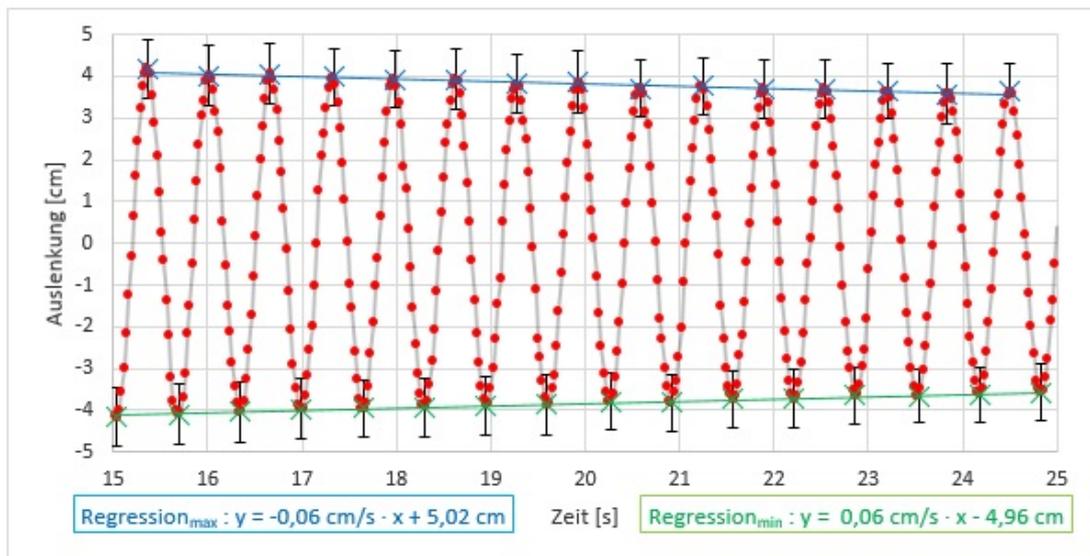
5.1	Auflistung der Federkonstanten dreier Federn . . . . .	26
5.2	Vergleich theoretisch bestimmter Federkonstanten mit <i>phyphox</i> . . . . .	27
5.3	Überprüfung der Validität von <i>phyphox</i> bzgl. des Federpendels . . . . .	29
6.1	Überprüfung der Validität von <i>phyphox</i> bzgl. des Fadenpendels . . . . .	42
A.1	Beschleunigungswerte in Ruhelage . . . . .	56
A.2	Messungen zur Schwingungsdauer eines Federpendels . . . . .	57
A.3	Messungen zur Auslenkung eines Federpendels . . . . .	58
A.4	Betrachtung der Kleinwinkelnäherung . . . . .	59
A.5	Messungen zur Schwingungsdauer eines Fadenpendels . . . . .	60
A.6	Messungen zur Auslenkung eines Fadenpendels . . . . .	61

# A Anhang

## A.1 Messungen zum Smartphone-Experiment des harmonischen Federpendels

**Tabelle A.1:** Abweichungen der Daten des Beschleunigungssensors und des linearen Beschleunigungssensors vom Nullwert in der Ruhelage. Dabei wurden die einzelnen Achsrichtungen des Smartphones, die jeweils für einen einzelnen Sensor stehen, separat betrachtet. Beim Beschleunigungssensor wurde dabei zusätzlich die Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  berücksichtigt und abgezogen.

Achsrichtung	Sensor	
	Beschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]	lin. Beschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]
x	0,49	$3,5 \cdot 10^{-3}$
y	0,14	$4,0 \cdot 10^{-3}$
z	0,10	$4,7 \cdot 10^{-3}$



**Abbildung A.1:** Graphische Auftragung der Auslenkung eines Federpendels über der Zeit. Für die Analyse wurden lediglich die Minima und Maxima betrachtet. Die eingezeichneten Fehlerbalken resultieren aus der fortgepflanzten Ungenauigkeit des linearen Beschleunigungssensors. Die erstellten Regressionsgeraden über die Extremwerte können als Maß für die Dämpfung gesehen werden. Auf eine Bestimmung von Fehlergeraden auf die Regression wurde hier verzichtet, da nur eine grobe Einschätzung erlangt werden soll. Demnach liegt der Abfall der Amplitude in dem bemessenen Zeitintervall von 10 s knapp über 10%.

**Tabelle A.2:** Übersicht der durchgeführten Messungen mit phyphox bezüglich der Schwingungsdauer eines Federpendels. Für Vergleichsmessungen wurde eine Stoppuhr herangezogen. Die Messungen sind in vier Messreihen unterteilt: Messreihe 1, 3 und 4 wurden jeweils mit verschiedenen Federn durchgeführt, Messreihe 2 hingegen mit der identischen Feder zu Messreihe 1, aber mit einer zusätzlichen Pendelmasse von  $m_1 = (152,0 \pm 0,5)$  g. Pro Messreihe ist jeweils der Mittelwert der einzelnen Messungen angegeben, wobei die betrachteten Unsicherheiten auf der Gaußschen Fehlerfortpflanzung der Mittelwertbildung beruhen.

	Messreihe 1: Schwingungsdauer			
	phyphox		Stoppuhr	
	T [s]	$\Delta T$ [s]	T [s]	$\Delta T$ [s]
Mittelwert	0,97	0,03	0,98	0,03
Messung 1	0,97	0,05	0,98	0,05
Messung 2	0,97	0,05	0,98	0,05
Messung 3	0,97	0,05	0,98	0,05

	Messreihe 2: Schwingungsdauer			
	phyphox		Stoppuhr	
	T [s]	$\Delta T$ [s]	T [s]	$\Delta T$ [s]
Mittelwert	1,27	0,04	1,28	0,04
Messung 4	1,27	0,05	1,28	0,05
Messung 5	1,27	0,05	1,29	0,05

	Messreihe 3: Schwingungsdauer			
	phyphox		Stoppuhr	
	T [s]	$\Delta T$ [s]	T [s]	$\Delta T$ [s]
Mittelwert	0,70	0,03	0,71	0,03
Messung 6	0,70	0,05	0,71	0,05
Messung 7	0,70	0,05	0,71	0,05
Messung 8	0,70	0,05	0,71	0,05

	Messreihe 4: Schwingungsdauer			
	phyphox		Stoppuhr	
	T [s]	$\Delta T$ [s]	T [s]	$\Delta T$ [s]
Mittelwert	0,65	0,04	0,65	0,04
Messung 9	0,65	0,05	0,65	0,05
Messung 10	0,65	0,05	0,65	0,05

**Tabelle A.3:** Übersicht der durchgeführten Messungen mit phyphox bezüglich der Amplitudenbestimmung eines Federpendels. Für Vergleichsmessungen wurde das Programm „Tracker Videoanalysis and Modelling Tool“ herangezogen. Die Messungen sind in vier Messreihen unterteilt: Messreihe 1, 3 und 4 wurden jeweils mit verschiedenen Federn durchgeführt, Messreihe 2 hingegen mit der identischen Feder zu Messreihe 1, aber mit einer zusätzlichen Pendelmasse von  $m_1 = (152,0 \pm 0,5)$  g. Aus den Daten von phyphox wurden die „Spitze-Spitze“-Werte der Auslenkung gebildet. Pro Messreihe ist jeweils der Mittelwert der einzelnen Messungen angegeben, wobei die betrachteten Unsicherheiten auf der Gaußschen Fehlerfortpflanzung der Mittelwertbildung beruhen. Dabei ist zu beachten, dass bei der Angabe des Mittelwerts bereits der Faktor 0,5 berücksichtigt wurde, um die Amplitudenwerte zu erhalten.

	Messreihe 1: Amplitude			
	phyphox		Tracker	
	s [cm]	$\Delta s$ [cm]	s [cm]	$\Delta s$ [cm]
Mittelwert/2	8,7	0,4	9,0	0,3
Messung 1	17,3	1,5	18,2	1,0
Messung 2	17,4	1,5	17,8	1,0
Messung 3	17,3	1,5	17,9	1,0

	Messreihe 2: Amplitude			
	phyphox		Tracker	
	s [cm]	$\Delta s$ [cm]	s [cm]	$\Delta s$ [cm]
Mittelwert/2	11,6	0,8	11,5	0,4
Messung 4	23,0	2,2	22,7	1,0
Messung 5	23,4	2,3	23,5	1,0

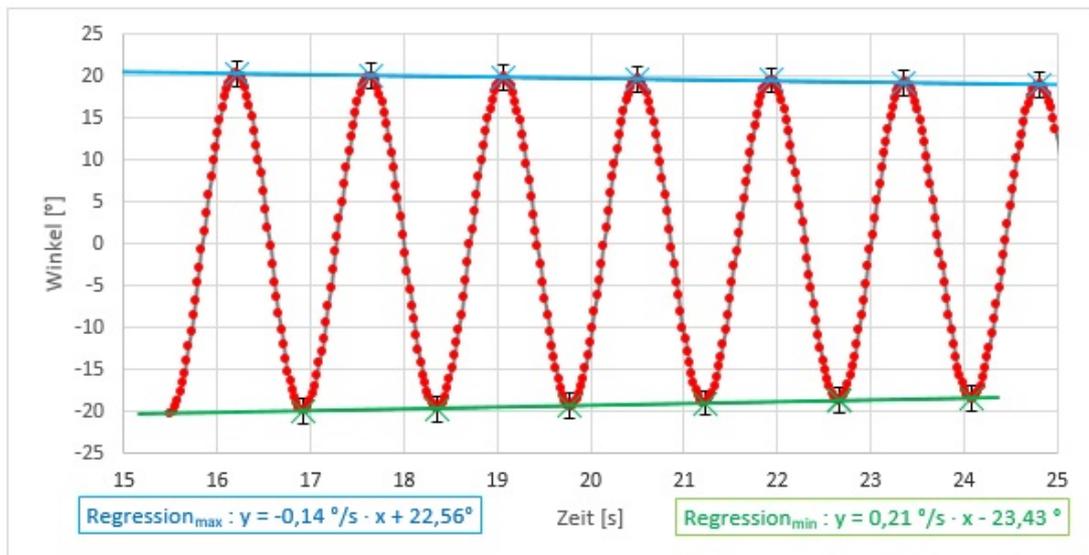
	Messreihe 3: Amplitude			
	phyphox		Tracker	
	s [cm]	$\Delta s$ [cm]	s [cm]	$\Delta s$ [cm]
Mittelwert/2	4,0	0,2	4,2	0,3
Messung 6	8,3	0,9	8,7	1,0
Messung 7	7,8	0,8	8,4	1,0
Messung 8	7,9	0,8	8,2	1,0

	Messreihe 4: Amplitude			
	phyphox		Tracker	
	s [cm]	$\Delta s$ [cm]	s [cm]	$\Delta s$ [cm]
Mittelwert/2	4,1	0,3	4,4	0,4
Messung 9	8,2	0,8	8,6	1,0
Messung 10	8,4	0,8	8,8	1,0

## A.2 Messungen zum Smartphone-Experiment des harmonischen Fadenpendels

**Tabelle A.4:** Einfluss der Kleinwinkelnäherung bei verschiedenen Auslenkungen eines Fadenpendels. Die Fadenlänge betrug bei diesen Berechnungen  $l = 0,50 \text{ m}$ . Für die Abweichung wurde der Quotient der Näherung aus Gleichung (2.7) und der exakten Lösung aus Gleichung (6.1) betrachtet.

Grad [°]	T [s]	T( $\varphi_0$ ) [s]	T/T( $\varphi_0$ )	Abweichung [%]
5	1,42	1,42	1,00	0,05
10	1,42	1,42	1,00	0,19
15	1,42	1,42	1,00	0,44
30	1,42	1,44	1,02	1,9
45	1,42	1,48	1,05	4,6
60	1,42	1,55	1,09	9,1
75	1,42	1,65	1,16	16
90	1,42	1,78	1,26	26



**Abbildung A.2:** Graphische Auftragung der Winkelauslenkung eines Fadenpendels über der Zeit. Für die Analyse wurden lediglich die Minima und Maxima betrachtet. Die erstellten Regressionsgeraden über die Extremwerte können als Maß für die Dämpfung gesehen werden. Auf eine Bestimmung von Fehlergeraden auf die Regression wurde hier verzichtet, da nur eine grobe Einschätzung erlangt werden soll. Demnach liegt der Abfall der Amplitude in dem bemessenen Zeitintervall von 10 s unter 10%.

**Tabelle A.5:** Übersicht der durchgeführten Messungen mit phyphox bezüglich der Schwingungsdauer eines Fadenpendels. Für Vergleichsmessungen wurde eine Stoppuhr herangezogen. Die Messungen sind in drei Messreihen unterteilt, wobei die beiden ersten aufgrund der gleichen Schwingungsdauer zusammengefasst werden können. Die Messungen 1 - 6 sind mit einer Fadenlänge von  $l = 0,75 \text{ m}$ , die Messungen 7 - 9 mit  $l = 0,50 \text{ m}$  getätigt worden. Die Messungen 4 - 6 wurden jeweils mit einer zusätzlichen Masse  $m_2 = (107,0 \pm 0,5) \text{ g}$  durchgeführt. Pro Messreihe ist jeweils der Mittelwert der einzelnen Messungen angegeben, wobei die betrachteten Unsicherheiten auf der Gaußschen Fehlerfortpflanzung der Mittelwertbildung beruhen.

	Messreihe 1/2: Schwingungsdauer			
	phyphox		Stoppuhr	
	T [s]	$\Delta T$ [s]	T [s]	$\Delta T$ [s]
Mittelwert	1,77	0,02	1,77	0,02
Messung 1	1,76	0,05	1,77	0,05
Messung 2	1,76	0,05	1,77	0,05
Messung 3	1,76	0,05	1,78	0,05
Messung 4	1,77	0,05	1,77	0,05
Messung 5	1,77	0,05	1,77	0,05
Messung 6	1,77	0,05	1,77	0,05

	Messreihe 3: Schwingungsdauer			
	phyphox		Stoppuhr	
	T [s]	$\Delta T$ [s]	T [s]	$\Delta T$ [s]
Mittelwert	1,43	0,03	1,44	0,03
Messung 7	1,43	0,05	1,44	0,05
Messung 8	1,43	0,05	1,43	0,05
Messung 9	1,43	0,05	1,44	0,05

**Tabelle A.6:** Übersicht der durchgeführten Messungen mit phyphox bezüglich der Amplitudenbestimmung eines Fadenpendels. Für Vergleichsmessungen wurde das Programm „Tracker Videoanalysis and Modelling Tool“ herangezogen. Die Messungen sind in drei Messreihen unterteilt, wobei die beiden ersten aufgrund der gleichen Schwingungsdauer zusammengefasst werden können. Die Messungen 1 - 6 sind mit einer Fadenlänge von  $l = 0,75\text{ m}$ , die Messungen 7 - 9 mit  $l = 0,50\text{ m}$  getätigt worden. Die Messungen 4 - 6 wurden mit jeweils einer zusätzlichen Masse  $m_2 = (107,0 \pm 0,5)\text{ g}$  durchgeführt. Pro Messreihe ist jeweils der Mittelwert der einzelnen Messungen angegeben, wobei die betrachteten Unsicherheiten auf der Gaußschen Fehlerfortpflanzung der Mittelwertbildung beruhen.

	Messreihe 1/2: Amplitude			
	phyphox		Tracker	
	$\varphi$ [°]	$\Delta\varphi$ [°]	$\varphi$ [°]	$\Delta\varphi$ [°]
Mittelwert	12,4	0,6	12,1	0,4
Messung 1	12,4	1,5	12,2	1,0
Messung 2	12,3	1,5	11,9	1,0
Messung 3	12,4	1,5	12,1	1,0
Messung 4	12,4	1,5	12,0	1,0
Messung 5	12,4	1,5	12,1	1,0
Messung 6	12,4	1,5	12,2	1,0

	Messreihe 3: Amplitude			
	phyphox		Tracker	
	$\varphi$ [°]	$\Delta\varphi$ [°]	$\varphi$ [°]	$\Delta\varphi$ [°]
Mittelwert	20,3	0,9	19,8	0,6
Messung 7	20,4	1,5	19,8	1,0
Messung 8	20,2	1,5	19,8	1,0
Messung 9	20,3	1,5	19,9	1,0

### **A.3 Arbeitsblätter für die Lernenden - Smartphone-Experiment zur harmonischen Schwingung am Federpendel**



# Mechanik -

## Harmonische Schwingung am Federpendel

### Versuchsbeschreibung

In diesem Versuch werden Sie die harmonische Schwingung am Federpendel mithilfe des Smartphones und der App *phyphox* untersuchen. Insbesondere soll dabei die Formel für die Schwingungsdauer

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

verifiziert werden. Die Formel setzt die Periodendauer  $T$ , die Masse  $m$  des Pendelkörpers und die Federkonstante  $D$  der Feder in Beziehung.

### Material

Außer einem Smartphone, auf dem die App *phyphox* installiert ist, steht jeder Versuchsgruppe folgendes Material zur Verfügung:

- Stativmaterial
- Plastikbeutel
- Gewichte
- verschiedene Federn
- Waage
- Klebeband

### Versuchsaufbau

Realisieren Sie mit den vorhandenen Materialien einen Versuchsaufbau, bei dem das Smartphone an einer Feder **sicher** vertikal schwingen kann. Sichern Sie bei Bedarf kritische Stellen.

**Achtung: Sorgen Sie während des gesamten Versuchsablaufs unbedingt dafür, dass das Smartphone ungestört und sicher schwingen kann!**



## Mechanik -

# Harmonische Schwingung am Federpendel

## Versuchsdurchführung

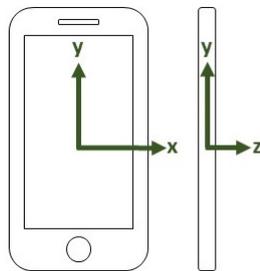
1. Bestimmen Sie die Masse  $m_1$  des Pendelkörpers.
2. Wählen Sie auf dem Smartphone die Messung *Harmonisches Federpendel (xyz)* in *phyphox*. Tragen Sie unter der Kategorie **Federkonstante** die oben bestimmte Masse ein.



### Wichtige Hinweise zur Versuchsdurchführung:

Damit die Messung aussagekräftige Messwerte ergeben kann, müssen Sie folgende Aspekte berücksichtigen:

- Achten Sie darauf, dass das Smartphone in einer seiner 3 Achsrichtungen schwingt! Also **nicht schräg!**



- **Lassen Sie die App mindestens 20 Schwingungsdurchläufe aufnehmen, bevor Sie die Messung wieder beenden!** Dadurch wird gewährleistet, dass *phyphox* genug Daten zur Verfügung hat, nachdem sich das Pendel eingeschwungen hat.
- **Beenden Sie die Messung am Smartphone zügig, nachdem Sie das Pendel anhalten!** Somit wird verhindert, dass zu viele Daten aufgenommen werden, welche die Messung verfälschen würden.



3. Führen Sie eine Messung durch, indem Sie die App am Smartphone starten, es auslenken und schwingen lassen. Notieren Sie sich dabei die Amplitude  $\hat{y}$  der Schwingung.
4. Beenden Sie die Messung am Smartphone und bearbeiten Sie die Aufgaben auf dem Aufgabenblatt.



# Mechanik -

## Harmonische Schwingung am Federpendel

### Aufgaben

1. Schauen Sie sich die getätigte Messung in *phyphox* an. Unter der Kategorie **Elongation**<sup>1</sup> stehen drei Diagramme zur Auswahl. Betrachten Sie das Diagramm, das die größten Werte auf der Weg-Achse (y-Achse) aufweist. Bearbeiten Sie folgende Aufgaben schriftlich:
  - a) Beschreiben Sie die im Diagramm dargestellte Bewegung.
  - b) Erläutern Sie, was dieses Diagramm von den anderen beiden unterscheidet.
  - c) Begründen Sie, ob es sich hierbei um eine harmonische Schwingung handelt.
  
2. Unter der Kategorie **Ergebnisse** gibt Ihnen *phyphox* unter anderem die Periodendauer  $T$  der aufgenommenen Schwingung an. Die Federkonstante  $D$  kann der Kategorie **Federkonstante** entnommen werden. Tragen Sie alle Parameter Ihrer Messung in folgende Tabelle ein:



Amplitude $\hat{y}$	Federkonstante $D$	Masse $m$	Periodendauer $T$

3. Führen Sie weitere Messungen durch, wobei Sie **nacheinander** einzelne Parameter variieren, während Sie die anderen beiden jeweils konstant halten. Gehen Sie dabei wie folgt vor:
  - a)
    - i. Erläutern Sie, welchen Einfluss Sie auf die Periodendauer  $T$  durch eine veränderte Amplitude  $\hat{y}$  erwarten.
    - ii. Überprüfen Sie Ihre Hypothese, indem Sie die Amplitude  $\hat{y}$  in mindestens einer weiteren Messung variieren, wobei Sie die Masse und die Federkonstante gleichbleibend konstant halten.
    - iii. Ergänzen Sie die obige Tabelle mit Ihren Messwerten.



-----> bitte wenden

<sup>1</sup>Bei dem Sensor im Smartphone handelt es sich um einen Beschleunigungssensor. Dieser erfasst die Beschleunigung des Smartphones während der Pendelbewegung. Intern berechnet *phyphox* aus diesen Daten die momentane Auslenkung (Elongation). Die Beschleunigung kann unter der Kategorie **Rohdaten** betrachtet werden.



## Mechanik -

### Harmonische Schwingung am Federpendel

b) i. Erläutern Sie, welchen Einfluss Sie auf die Periodendauer  $T$  durch eine Feder mit einer veränderten Federkonstante  $D$  erwarten.



ii. Überprüfen Sie Ihre Hypothese, indem Sie die Federkonstante  $D$  in mindestens einer weiteren Messung variieren, wobei Sie die Amplitude und die Masse gleichbleibend konstant halten.

iii. Ergänzen Sie die Tabelle auf Seite 3 mit Ihren Messwerten.

c) i. Erläutern Sie, welchen Einfluss Sie auf die Periodendauer  $T$  durch eine zusätzliche Masse  $m_2$  erwarten.



ii. Überprüfen Sie Ihre Hypothese, indem Sie die Masse des Pendelkörpers  $m$  in mindestens einer weiteren Messung variieren, wobei Sie die Amplitude und die Federkonstante gleichbleibend konstant halten.

**Tragen Sie vor der Messung die neue Gesamtmasse ( $m_g = m_1 + m_2$ ) des Pendelkörpers in *phyphox* unter der Kategorie Federkonstante ein!**

iii. Ergänzen Sie die obige Tabelle mit Ihren Messwerten.

4. Oft ist es, z.B. bei verbauten Bestandteilen, nicht möglich, Massen auf direktem Wege zu messen. Bestimmen Sie die zusätzliche Masse  $m_2$  Ihrer letzten Messung mit Hilfe der Formel für die Schwingungsdauer (Gesamtmasse  $m_g = m_1 + m_2$ ). Überprüfen Sie Ihr Ergebnis mit der Waage und diskutieren Sie den Vergleich.

## **A.4 Handreichung für die Lehrkraft - Smartphone-Experiment zur harmonischen Schwingung am Federpendel**

### Anmerkungen zur Lehrerhandreichung:

Der grau unterlegte Informationskasten liefert mit der Jahrgangsstufe, dem Thema, der Methode (Schülerversuch oder Demonstrationsexperiment) und der geschätzten Versuchszeit einen ersten Überblick über das Experiment. Bei einer Sammlung mehrerer Versuche dieser Art ist die Lehrperson so in der Lage, schnell und gezielt ein Experiment zu suchen, das ihren Anforderungen und Vorstellungen entspricht. Die folgenden Beschreibungen zu der Thematik, den fachlichen Voraussetzungen, den Kompetenzbereichen und den angesetzten Lernzielen konkretisieren den Rahmen, in dem der Versuch einzubetten ist.



# Mechanik - Harmonische Schwingung (Federpendel)

## Lehrerhandreichung

- **Jahrgangsstufe:** Einführungsphase
- **Thema:** Harmonische Schwingung
- **Methode:** Schülerversuch
- **Versuchszeit:** 45 min

In diesem Versuch soll die harmonische Schwingung am Federpendel mithilfe des Smartphones und der App *phyphox* untersucht werden. Dabei soll insbesondere die Formel für die Schwingungsdauer eines Federpendels angewandt und gefestigt werden.

### Thema

- Mechanik: harmonische mechanische Schwingung (Lehreinheit: harmonischer mechanischer Oszillator)
- Verwendeter Sensor: Linearer Beschleunigungssensor<sup>1</sup>

### Voraussetzungen

- harmonische Schwingung
- Formel für die Schwingungsdauer des Federpendels:

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

### Kompetenzbereiche<sup>2</sup>

- Wiedergabe / Auswahl (UF1/UF2)
- Wahrnehmung und Messung (E2)
- Hypothesen / Auswertung (E3/E5)

1 Dieser Sensor ist eine Kombination aus dem *reinen* Beschleunigungssensor und dem Gyroskop. Er rechnet bei der Angabe der Beschleunigungsdaten die Erdbeschleunigung intern heraus.

2 In Anlehnung an den Kernlehrplan NRW (2014): Physik.



# Mechanik - Harmonische Schwingung (Federpendel)

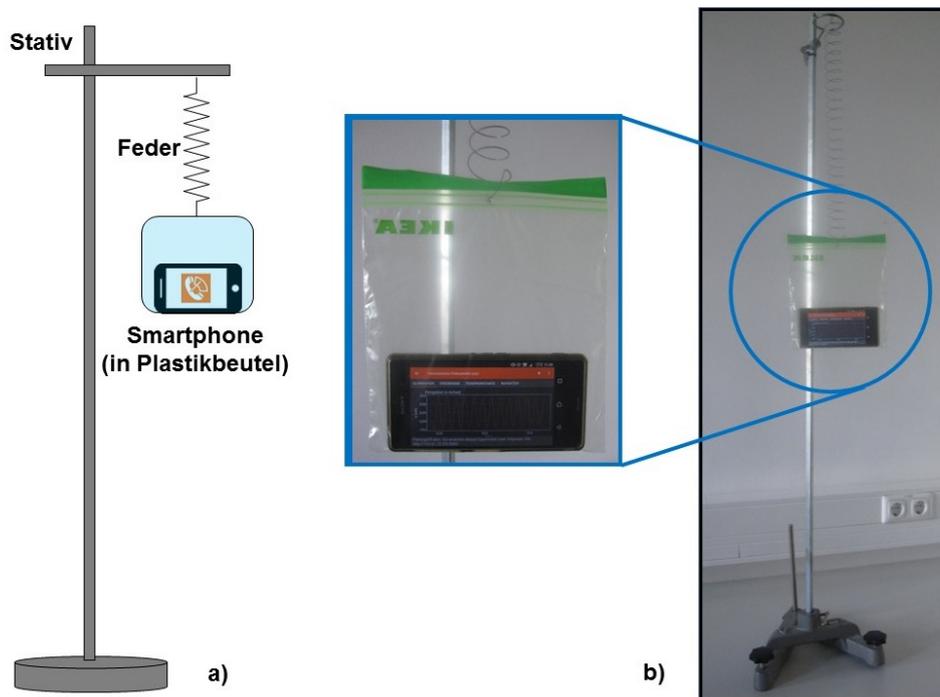
## Lehrerhandreichung

### Lernziele

Die Schülerinnen und Schüler

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

### Versuchsbeschreibung



**Abbildung 1:** Aufbau des Smartphone-Experiments zum harmonischen Federpendel, schematisch (a) und real (b). An dem Stativmaterial wird eine Feder derart befestigt, dass sie ungehindert und sicher schwingen kann. Am unteren Ende der Feder wird ein Plastikbeutel angebracht, in dem das Smartphone platziert wird.



# Mechanik - Harmonische Schwingung (Federpendel)

## Lehrerhandreichung

### Methodische Anmerkungen

Die Bearbeitung des Arbeitsblattes ist als Partnerarbeit während der Unterrichtszeit gedacht. Im Folgenden finden Sie methodische Anregungen und Hinweise zu den einzelnen Aufträgen.

- Versuchsaufbau:

Der Aufbau, wie er für das Arbeitsblatt vorgeschlagen wird, ist in Abbildung ?? zu sehen. Alternativ zum Stativmaterial kann er auch mit Gegenständen aus dem Klassenzimmer realisiert werden. Auf diese Weise kann eine Anregung geschaffen werden, diesen oder ähnliche Versuche zuhause zu wiederholen. Um Zeit einzusparen kann der Versuch auch im Vorfeld von der Lehrkraft aufgebaut werden.

Die Verwendung von Plastikbeuteln bringt den Vorteil mit sich, dass das Smartphone darin bedienbar bleibt. Allerdings ist dabei der Verschleiß zu berücksichtigen. Häufige Verwendung kann zu Rissen im Beutel führen. Diese sollten daher in regelmäßigen Abständen ersetzt werden.

Anwendungsbeispiel: Um eine ausreichende Höhe für die Schwingung der Feder zu garantieren, kann ein Stuhl auf einen Tisch gestellt werden. Auf dem Stuhl wird mit Klebeband ein langer Stift fixiert und mit Büchern beschwert, sodass dieser ausreichend weit über die Tischkante hinausragt. An dem Stift kann nun die Feder befestigt werden und ebenfalls mit Klebeband gesichert werden.

- Versuchsdurchführung:

Es muss darauf geachtet werden, dass die Feder an ihrer Halterung sowie das Handy an der Feder gut befestigt sind (ggf. vor dem Start den Aufbau kurz überprüfen, um Folgeschäden zu vermeiden).

Zudem ist es wichtig, dass Messwerte erst nach der Einschwingphase genutzt werden, um eine Verfälschung der Ergebnisse zu vermeiden. Dafür soll das Smartphone mindestens 20 Perioden schwingen. Nach dem Schwingen ist eine schnelle Beendigung der Messung ebenso nötig, um unerwünschte Daten zu vermeiden.



# Mechanik - Harmonische Schwingung (Federpendel)

## Lehrerhandreichung

- Aufgaben zum Versuch selbst:
  - zu Aufgabe 1: Eine Differenzierung ist hierbei möglich, indem man die SuS zum Teil selbstständig analysieren lässt, welche Richtung der Elongation für ihre weitere Auswertung von Nutzen ist. So könnten die SuS beispielsweise in einem Freihandversuch zunächst die Schwingungsachsen dem Smartphone zuordnen, um damit die für ihren Versuch benötigten Daten der Schwingung zu erhalten.
  - zu Aufgabe 2: Um diese Aufgabe differenzierend zu gestalten, könnte die angegebene Tabelle auch selbstständig von den SuS erstellt werden, wobei sie sich eigene Gedanken machen, welche Parameter von Bedeutung sein können.
  - zu Aufgabe 4: Diese Aufgabe besitzt einen höheren mathematischen Anspruch und ist daher auch als Zusatzaufgabe für leistungsstärkere SuS geeignet.
  - Falls die Daten, die bei der Bearbeitung dieses Arbeitsblattes erhoben wurden, für spätere Auswertung noch verwendet werden sollen, sollte das Aufgabenblatt um eine fünfte Aufgabe ergänzt werden, welche die SuS zur Speicherung ihrer Daten auffordert.

**A.5 Arbeitsblätter für die Lernenden -  
Smartphone-Experiment zur harmonischen  
Schwingung am Fadenpendel**



# Mechanik -

## Harmonische Schwingung am Fadenpendel

### Versuchsbeschreibung

In diesem Versuch werden Sie die harmonische Schwingung am Fadenpendel mithilfe des Smartphones und der App *phyphox* untersuchen. Insbesondere soll dabei die Formel für die Schwingungsdauer

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

verifiziert werden. Die Formel setzt die Periodendauer  $T$ , die Länge  $l$  des Pendels und die Erdbeschleunigung  $g$  in Beziehung.

### Material

Außer einem Smartphone, auf dem die App *phyphox* installiert ist, steht jeder Versuchsgruppe folgendes Material zur Verfügung:

- Stativmaterial
- vorbereitete Halterung für das Smartphone
- Gewichte
- Faden
- Waage
- Befestigungsmaterial

### Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist von der Lehrkraft im Vorfeld vorbereitet worden. Die Verbindung der Smartphones mit den Computern wird gemeinsam unter Anleitung der Lehrperson vorgenommen.

**Achtung: Sorgen Sie während des gesamten Versuchsablaufs unbedingt dafür, dass das Smartphone frei und sicher schwingen kann!**



# Mechanik -

## Harmonische Schwingung am Fadenpendel

### Versuchsdurchführung

1. Bestimmen Sie die Masse  $m_1$  des Pendelkörpers.
2. Bestimmen Sie die Länge  $l$  des Fadens.
3. Wählen Sie auf dem Smartphone die Messung *Schaukel* ( $y$ ) in *phyphox*. Tragen Sie unter der Kategorie **Eingabe** die oben bestimmte Länge und Masse ein.



#### Wichtige Hinweise zur Versuchsdurchführung:

Damit die Messung aussagekräftige Messwerte ergeben kann, müssen Sie folgende Aspekte berücksichtigen:

- Achten Sie darauf, dass das Smartphone so **gerade** wie möglich schaukelt, also beim Schwingen so wenig wie möglich „taumelt“.
- **Lassen Sie die App etwa 20 Schwingungsdurchläufe aufnehmen, bevor Sie die Messung wieder beenden.** Dadurch wird gewährleistet, dass *phyphox* genug Daten zur Verfügung hat, nachdem sich die Schaukel eingeschwungen hat.



4. Führen Sie eine Messung durch, indem Sie sie am Computer starten (Play), die Schaukel auslenken und schwingen lassen. Wählen Sie dazu einen Startwinkel unter  $45^\circ$ .

Betrachten Sie während der Messung unter der Kategorie **Winkelauslenkung** den zeitlichen Verlauf der Messung.<sup>1</sup>

5. Beenden Sie die Messung am Computer (Pause) und bearbeiten Sie die Aufgaben auf dem Aufgabenblatt.

<sup>1</sup>Bei dem Sensor im Smartphone handelt es sich um ein Gyroskop. Dieser erfasst die Winkelgeschwindigkeit, mit der das Smartphone um seine Achsen rotiert. Intern berechnet die App dann aus diesen Daten die momentane Winkelauslenkung. Die Winkelgeschwindigkeit kann unter der Kategorie **Rohdaten** betrachtet werden.



## Mechanik -

# Harmonische Schwingung am Fadenpendel

## Aufgaben

- Schauen Sie sich eine getätigte Messung in *phyphox* an. Unter der Kategorie **Winkelauslenkung** sehen Sie den zeitlichen Verlauf der Winkelauslenkung des Pendels. Bearbeiten Sie folgende Aufgaben schriftlich:
  - Beschreiben Sie die im Diagramm dargestellte Bewegung.
  - Begründen Sie, ob es sich bei dieser Schwingung um eine harmonische Schwingung handelt!
- Unter der Kategorie **Ergebnisse** gibt Ihnen *phyphox* unter anderem die Periodendauer  $T$  der aufgenommenen Schwingung an. Tragen Sie alle Parameter Ihrer Messung in folgende Tabelle ein:



Startauslenkung $\hat{\varphi}_0$	Masse $m$	Fadenlänge $l$	Periodendauer $T$

- Führen Sie weitere Messungen durch, wobei Sie **nacheinander** einzelne Parameter variieren, während Sie die anderen beiden jeweils konstant halten. Gehen Sie dabei wie folgt vor:
  - Erläutern Sie, welchen Einfluss Sie auf die Periodendauer  $T$  durch eine veränderte Startauslenkung  $\hat{\varphi}_0$  erwarten.
    - Überprüfen Sie Ihre Hypothese, indem Sie die Startauslenkung  $\hat{\varphi}_0$  in mindestens einer weiteren Messung mit  $\hat{\varphi}_0 \leq 45^\circ$  variieren, wobei Sie die Masse und die Fadenlänge gleichbleibend konstant halten.
    - Ergänzen Sie die obige Tabelle mit Ihren Messwerten.



-----> bitte wenden



## Mechanik -

### Harmonische Schwingung am Fadenpendel

b) i. Erläutern Sie, welchen Einfluss Sie auf die Periodendauer  $T$  durch eine veränderte Masse  $m_2$  des Pendelkörpers erwarten.



ii. Überprüfen Sie Ihre Hypothese, indem Sie die Masse  $m$  des Pendelkörpers in mindestens einer weiteren Messung variieren, wobei Sie die Startauslenkung und die Fadenlänge gleichbleibend konstant halten.

**Tragen Sie vor der Messung die neue Gesamtmasse ( $m_g = m_1 + m_2$ ) des Pendelkörpers in *phyphox* unter der Kategorie Eingabe ein!**

iii. Ergänzen Sie die Tabelle auf Seite 3 mit Ihren Messwerten.

c) i. Erläutern Sie, welchen Einfluss Sie auf die Periodendauer  $T$  durch eine veränderte Fadenlänge  $l$  erwarten.



ii. Überprüfen Sie Ihre Hypothese, indem Sie die Fadenlänge  $l$  in mindestens einer weiteren Messung variieren, wobei Sie die Startauslenkung und die Masse gleichbleibend konstant halten.

**Tragen Sie vor der Messung die neue Fadenlänge in *phyphox* unter der Kategorie Eingabe ein!**

iii. Ergänzen Sie die Tabelle auf Seite 3 mit Ihren Messwerten.

4. Bestimmen Sie mit Hilfe der Formel für die Schwingungsdauer aus Ihrer letzten Messung die Erdbeschleunigung  $g$ . Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Literaturwert von  $9,81 \text{ m/s}^2$  und diskutieren Sie den Vergleich.

## **A.6 Handreichung für die Lehrkraft - Smartphone-Experiment zur harmonischen Schwingung am Fadenpendel**

### Anmerkungen zur Lehrerhandreichung:

Der grau unterlegte Informationskasten liefert mit der Jahrgangsstufe, dem Thema, der Methode (Schülerversuch oder Demonstrationsexperiment) und der geschätzten Versuchszeit einen ersten Überblick über das Experiment. Bei einer Sammlung mehrerer Versuche dieser Art ist die Lehrperson so in der Lage, schnell und gezielt ein Experiment zu suchen, das ihren Anforderungen und Vorstellungen entspricht. Die folgenden Beschreibungen zu der Thematik, den fachlichen Voraussetzungen, den Kompetenzbereichen und den angesetzten Lernzielen konkretisieren den Rahmen, in dem der Versuch einzubetten ist.



# Mechanik - Harmonische Schwingung (Fadenpendel)

## Lehrerhandreichung

- **Jahrgangsstufe:** Einführungsphase
- **Thema:** Harmonische Schwingung
- **Methode:** Schülerversuch
- **Versuchszeit:** 45 min

In diesem Versuch soll die harmonische Schwingung am Fadenpendel mithilfe des Smartphones und der App *phyphox* untersucht werden. Dabei soll insbesondere die Formel für die Schwingungsdauer eines Fadenpendels angewandt und gefestigt werden.

### Thema

- Mechanik: harmonische mechanische Schwingung (Lehreinheit: Fadenpendel als Schwerependel)
- Verwendeter Sensor: Gyroskop<sup>1</sup>

### Voraussetzungen

- harmonische Schwingung
- Formel für die Schwingungsdauer des Fadenpendels

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

### Kompetenzbereiche<sup>2</sup>

- Wiedergabe / Auswahl (UF1/UF2)
- Wahrnehmung und Messung (E2)
- Hypothesen / Auswertung (E3/E5)

1 Dieser Sensor erfasst die Winkelgeschwindigkeit der drei Achsen, mit der das Smartphone um diese Achsen rotiert.

2 In Anlehnung an den Kernlehrplan NRW (2014): Physik



# Mechanik - Harmonische Schwingung (Fadenpendel)

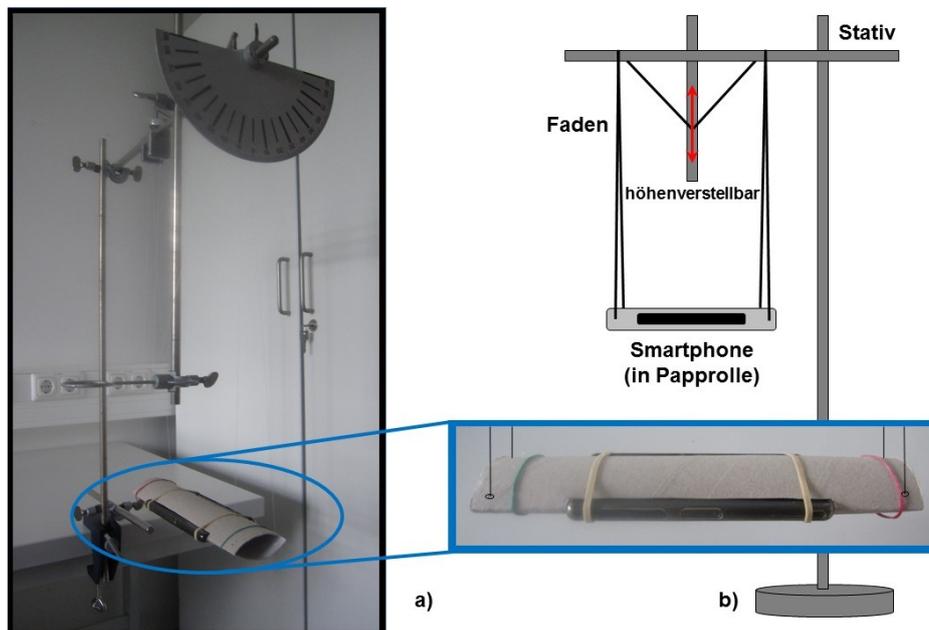
## Lehrerhandreichung

### Lernziele

Die Schülerinnen und Schüler

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

### Versuchsbeschreibung



**Abbildung 1:** Aufbau des Smartphone-Experiments zum harmonischen Fadenpendel, real (a) und schematisch (b). Dabei wurde durch den Versuchsaufbau eine Schaukel realisiert, die in einer festen Achsrichtung des Smartphones schwingt. Die Halterung für das Smartphone wurde aus einer Papprolle gefertigt und mit Fäden derart an dem Stativmaterial befestigt, dass die „Schaukel“ ungehindert schwingen kann und dazu höhenverstellbar ist.



# Mechanik - Harmonische Schwingung (Fadenpendel)

## Lehrerhandreichung

### Methodische Anmerkungen

Die Bearbeitung des Arbeitsblattes ist als Partnerarbeit während der Unterrichtszeit gedacht. Im Folgenden finden Sie methodische Anregungen und Hinweise zu den einzelnen Aufträgen.

- Versuchsaufbau:

Der Aufbau, wie er für das Arbeitsblatt vorgeschlagen wird, ist in Abbildung 1 zu sehen. Alternativ zum Stativmaterial kann er auch mit Gegenständen aus dem Klassenzimmer realisiert werden. Auf diese Weise kann eine Anregung geschaffen werden, diesen oder ähnliche Versuche zuhause zu wiederholen. Aufgrund des Alltagsbezuges wird die Analogie zu einer Schaukel empfohlen. Der Konstruktion der „Sitzfläche“ sind keine kreativen Grenzen gesetzt.

Anwendungsbeispiel: Um eine ausreichende Höhe für die Schwingung der „Schaukel“ zu garantieren, kann ein Stuhl auf einen Tisch gestellt werden. Auf dem Stuhl wird mit Klebeband ein langer Stift fixiert und mit Büchern beschwert, sodass dieser ausreichend weit über die Tischkante hinausragt. An dem Stift können nun die Fäden des Pendels wie eine Schaukel angebracht werden. Zur variablen Befestigung eignen sich z.B. Wäscheklammern. Als Halterung für das Smartphone kann eine leere Küchenrolle benutzt werden, in die Schlitz für das Smartphone geschnitten werden. Zur Sicherung können hier Gummibänder verwendet werden. Durch kleine Löcher an der Seite der Papprolle kann der Faden befestigt werden. Der Faden sollte dabei reißfest und nicht elastisch sein.

- Versuchsablauf:

Es muss darauf geachtet werden, dass das Smartphone in der Halterung gut befestigt ist und diese sicher mit den Fäden verbunden ist, um Folgeschäden zu vermeiden.

Zudem ist wichtig, dass das Smartphone in der Halterung während des Schwingungsvorgangs möglichst nur um eine seiner Achse rotiert, also nicht taumelt. Deshalb sollten die Messwerte erst nach einer Einschwingphase genutzt werden, um eine Verfälschung der Ergebnisse zu vermeiden. Dafür soll das Smartphone mindestens 20 Perioden schwingen. Nach dem Schwingen ist ein schnelles Stoppen der Messung nötig, um unerwünschte Daten zu vermeiden.



# Mechanik - Harmonische Schwingung (Fadenpendel)

## Lehrerhandreichung

- Anmerkungen zu den Aufgaben:
  - zu Aufgabe 1: Eine Differenzierung ist hierbei möglich, indem man im Editor alle drei Rotationsachsen des Smartphones implementiert und die SuS zum Teil selbstständig analysieren lässt, welche Winkelangaben für ihre weitere Auswertungen von Nutzen sind. So könnten die SuS beispielsweise in einem Freihandversuch zunächst die Rotationsachsen dem Smartphone zuordnen, um damit die für ihren Versuch benötigten Daten der Schwingung zu erhalten.
  - zu Aufgabe 2: Um diese Aufgabe differenzierend zu gestalten, kann die angegebene Tabelle selbstständig von den SuS erstellt werden, wobei sie sich eigene Gedanken machen, welche Parameter von Bedeutung sein können.
  - zu Aufgabe 4: Diese Aufgabe kann auch auf die Kräftebetrachtung beim Schwerependel erweitert werden, woraus die Formel für die Periodendauer hergeleitet werden kann.
  - Falls die Daten, die bei der Bearbeitung dieses Arbeitsblattes erhoben wurden, für spätere Auswertung noch verwendet werden sollen, so sollte das Aufgabenblatt um eine fünfte Aufgabe ergänzt werden, welche die SuS zur Speicherung ihrer Daten auffordert.

**A.7 Methode Expertenpuzzle - Verbindung der  
Smartphone-Experimente zur harmonischen  
Schwingung am Fadenpendel und am Federpendel**



# Mechanik - Harmonische Schwingung

## Methode: Expertenpuzzle

Die beiden Smartphone-Experimente zum Federpendel und Fadenpendel können in Form eines Expertenpuzzles durchgeführt werden. Dabei wird jeweils ein Versuch in je einer Expertengruppe durchgeführt, sich anschließend gegenseitig vorgestellt und besprochen.

### Vorbereitung

Material zum Aufteilen der Klasse in zwei möglichst gleichgroße Expertengruppen (z.B. ein Kartenspiel oder verschiedene Kaubonbons). Wichtig ist die Möglichkeit, die Klasse nach einer anfänglichen Zweiteilung (z.B. Farbe beim Kartenspiel) in die Expertengruppen einteilen zu können (z.B. Bilder beim Kartenspiel).

### Durchführung

1. Klasse in zwei Experten-Gruppen aufteilen
2.
  - Expertengruppe 1 führt das Experiment zum Federpendel durch
  - Expertengruppe 2 führt das Experiment zum Fadenpendel durch
3. Innerhalb der Expertengruppen werden kleine Versuchsgruppen mit je 2 bis 4 Teilnehmern gebildet.
4. Nach Bearbeitung der Versuchsaufgaben werden neue Gruppen mit je zwei Experten aus den beiden Expertengruppen gebildet.
5. In diesen gemischten Gruppen werden sich nun gegenseitig die Experimente vorgestellt und miteinander verglichen. Somit lernen alle SuS beide Experimente mit ihren Erkenntnissen und Problemen kennen.

## A.8 Anleitung - Umgang mit *phyphox*

### Anmerkungen zu der Anleitung:

Diese Anleitung, die den Umgang mit der App *phyphox* erleichtern soll, ist in großen Teilen im Rahmen einer Bachelorarbeit von Simon Goertz (vgl. [Goertz 2016]) erstellt worden. In Anpassung an diese Arbeit zu den harmonischen Pendelschwingungen wurde sie mit freundlicher Genehmigung von Simon Goertz um den Paragraphen §4 und die letzten beiden Punkte von Paragraph §5 ergänzt.

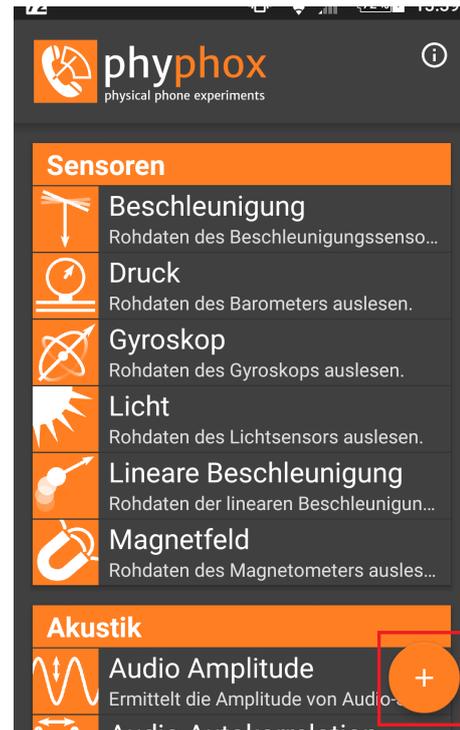


# Anleitung - Umgang mit *phyphox*

Diese Anleitung soll Ihnen den Umgang mit der App *phyphox* erleichtern. Voraussetzung ist die ordnungsgemäße Installation der App.

## §1 Erste Schritte in *phyphox*

1. Öffnen Sie die App *phyphox*.
2. Wählen Sie im Hauptmenü ein definiertes Experiment aus, definieren Sie ein eigenes (§3) oder laden Sie ein extern vordefiniertes Experiment (§4).
3. Beachten Sie, dass Sie nach jeder Durchführung eines Versuches die Messdaten übertragen (§2) und anschließend vor der neuen Messung die Daten über den Punkt „Daten löschen“ im Menü, das Sie über den Button mit den drei vertikal angeordneten Punkten öffnen können, löschen.
4. Zur Übertragung der Daten eines Experimentes stehen Ihnen verschiedene Wege zur Verfügung (z.B. Bluetooth, E-Mail, Dropbox). Eine Auswahl finden Sie im Menü unter „Daten exportieren“. Weiter haben Sie die Möglichkeit *phyphox* über einen Fernzugriff über einen PC zu bedienen. Erklärungen hierzu finden Sie im §2.



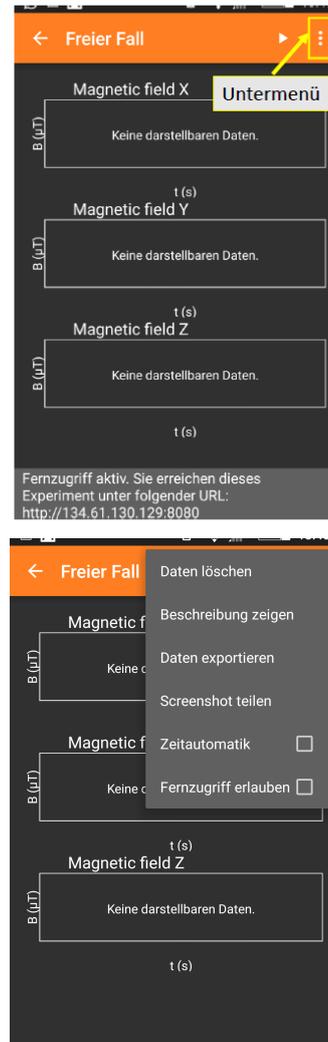


# Anleitung - Umgang mit *phyphox*

## §2 Übertragung der Messdaten an den PC

— Übertragung über einen Fernzugriff —

1. Richten Sie Ihr Smartphone als Hotspot ein.  
**Achtung:** Achten Sie dabei darauf, dass Sie Ihren mobilen Datenverkehr deaktiviert haben.
2. Betätigen Sie das Untermenü, indem Sie auf den Button mit den drei vertikal angeordneten Punkten klicken.
3. Setzen Sie ein Häkchen im Unterpunkt „Fernzugriff erlauben“. Lesen Sie sich die Sicherheitshinweise durch und bestätigen Sie dies mit OK.
4. Verbinden Sie nun Ihren PC mit dem Netz Ihres Smartphones (WLAN).
5. Öffnen Sie anschließend einen Browser und geben Sie die vom Smartphone angezeigte URL als Adresse in den Browser ein (Sie sollten nun das *phyphox*-Experiment auf dem Bildschirm sehen).
6. Starten Sie nun das Experiment über den Play-Button am PC oder am Smartphone.
7. Nach dem Versuch können Sie am PC im Untermenü unter „Daten exportieren“ die Messdaten als Excel-Dateiformat auf dem PC speichern.





## Anleitung - Umgang mit *phyphox*

### — Bluetooth-Übertragung —

Diese Möglichkeit ist nur möglich, wenn Ihr Laptop über eine Bluetooth-Funktion verfügt.

1. Betätigen Sie das Untermenü.
2. Wählen Sie den Unterpunkt „Daten exportieren“ und anschließend das Dateiformat „Excel“ aus. Bestätigen Sie diese Auswahl mit OK.
3. Stellen Sie nun eine Bluetooth-Verbindung mit dem PC her und übertragen Sie die Daten an den PC.

### — Übertragung per Mail —

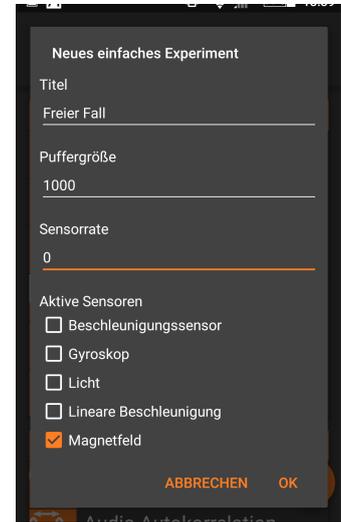
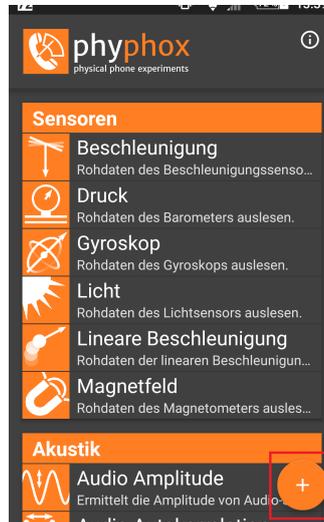
1. Betätigen Sie das Untermenü.
2. Wählen Sie den Unterpunkt „Daten exportieren“ und anschließend das Dateiformat „Excel“ aus. Bestätigen Sie diese Auswahl mit OK.
3. Wählen Sie nun eine App für die E-Mail-Übertragung aus (z.B. „Gmail“) und senden Sie die Datei an eine von Ihnen gewählte E-Mail-Adresse.



# Anleitung - Umgang mit *phyphox*

## §3 Eigenes Experiment definieren

1. Betätigen Sie im Hauptmenü das „Plus“-Zeichen, um ein eigenes Experiment zu definieren. Geben Sie diesem Experiment einen sinnvollen Namen (z.B. Freier Fall). Setzen Sie anschließend die **Puffergröße** und die **Sensorrate**, wobei 0 für die höchste Genauigkeit steht, fest. Anschließend müssen Sie den/die entsprechenden Sensor/Sensoren aktivieren (Häkchen setzen). Bestätigen Sie anschließend Ihre Einstellungen mit OK.



## §4 Vordefiniertes Experiment laden

Mit Hilfe des Editors auf [www.phyphox.com](http://www.phyphox.com) können ebenfalls eigene Experimente erstellt werden. Gespeichert werden diese Dateien im *.phyphox*-Format. Diese Experimente können dann auf ein Smartphone übertragen und durchgeführt werden.

1. Übertragen Sie die gewünschte *.phyphox*-Datei auf Ihr Smartphone.
2. Öffnen Sie die Datei. Daraufhin wird *phyphox* mit dem vordefinierten Experiment gestartet.
3. Um dieses Experiment dauerhaft in *phyphox* zu speichern, wählen Sie im Untermenü den Punkt **Experiment zur Sammlung hinzufügen**. Bitte beachten Sie, dass das Experiment ansonsten nach Beendigung der App nicht mehr zur Verfügung steht und neu geladen werden muss.
4. Ein bereits zugefügtes Experiment kann nachträglich wieder aus der Sammlung entfernt werden, indem man den „Mülleimer“ neben dem Experiment in der Sammlung benutzt.



# Anleitung - Umgang mit *phyphox*

## §5 Besondere Einstellungen zu bestimmten Versuchen

— *Bestimmung der Erdbeschleunigung  $g$*  —

Eigenes Experiment definieren (§3):

Betätigen Sie im Hauptmenü das „Plus“-Zeichen, um ein eigenes Experiment zu definieren. Geben Sie diesem Experiment einen sinnvollen Namen (z.B. Freier Fall). Setzen Sie anschließend die **Puffergröße** auf **1000** und die **Sensorrate** auf **0**. Anschließend müssen Sie den Magnetfeldsensor aktivieren (Häkchen setzen). Bestätigen Sie anschließend Ihre Einstellungen mit OK.

— *Harmonische Schwingung am Federpendel* —

Vordefiniertes Experiment laden (§4):

Laden Sie sich die Datei *Harmonious Spring Pendulum (xyz).phyphox* auf Ihr Smartphone und fügen Sie es der Sammlung von *phyphox* hinzu.

— *Harmonische Schwingung am Fadenpendel* —

Vordefiniertes Experiment laden (§4):

Laden Sie sich die Datei *Swing (y).phyphox* auf Ihr Smartphone und fügen Sie es der Sammlung von *phyphox* hinzu.