

phyphox: Exploration neuer Experimentierideen anhand der länderspezifischen Kernlehrpläne an deutschen Schulen

Dustin Kirwald*, Niklas Westermann*, Dominik Dorsel[°], Sebastian Staacks[°],
Christoph Stampfer[°], Heidrun Heinke*

*I. Physikalisches Institut A, RWTH Aachen University

[°]II. Physikalisches Institut A, RWTH Aachen University
kirwald@physik.rwth-aachen.de, dorsel@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Die Smartphone-App phyphox nutzt wahlweise interne Sensoren oder externe Sensorik via Bluetooth Low Energy und stellt die Messdaten live dar. Mit Hilfe interaktiver Auswertungswerkzeuge lassen sich so viele interessante und didaktisch gewinnbringende Experimente unter anderem für die schulische Lehre verwirklichen. Neben thematisch erweiterten Experimentiermöglichkeiten bieten smartphone-gestützte Experimente eine moderne und schülerzugewandte Möglichkeit der digitalen Messwerterfassung. Damit gelingt unabhängig von der technischen Ausstattung der Schulen die Einbindung digitaler Messwerterfassung in Bildungskontexten des Physikunterrichts, wie sie inzwischen in Vereinbarungen der Kultusministerkonferenz und in bundeslandspezifischen Lehrplänen (wie den Kernlehrplänen in Nordrhein-Westfalen) vorgesehen ist. Auf Grundlage einer gründlichen Auseinandersetzung mit den Lehrplänen ausgewählter Bundesländer sind deshalb Experimentierideen entwickelt und systematisiert worden, die sich unter Einbindung der App phyphox sowie externer Messsensorik durchführen lassen.

1. Motivation

In Deutschland existieren für alle 16 Bundesländer spezifische Lehrpläne, welche durch die zuständigen Ministerien in einem Zeitraum von circa fünf bis 10 Jahren neu herausgegeben werden. Obgleich eine Vielzahl von Lehrplänen existiert, ist es möglich, einige Gemeinsamkeiten in den Kompetenzerwartungen für die verschiedenen Jahrgangsstufen auszuarbeiten. Für die nachfolgenden Ausführungen ist der Fokus exemplarisch auf die Kernlehrpläne der beiden Bundesländer Nordrhein-Westfalen sowie Baden-Württemberg gelegt worden. Grundlegend können die vorgestellten Versuche jedoch auch in den Physikunterricht an weiterführenden Schulen im gesamten Bundesgebiet eingesetzt werden und sind i.d.R. problemlos mit den einschlägigen Kernlehrplänen vereinbar.

Dem konkreten Bezug zum Kerncurriculum wird von Lehrkräften eine hohe Bedeutung zugewiesen, wenn es darum geht, eine Innovation in ihrem eigenen Unterricht zu implementieren [1]. Außerdem sieht der Beschluss der Kultusministerkonferenz der Länder vor, dass digitale Werkzeuge in Lehr-Lern-Prozesse sinnhaft integriert werden sollen [2]. Konkret beschreibt der Kernlehrplan für das Land Nordrhein-Westfalen eine „Einbindung digitaler Messwerterfassungssysteme“ im Fach Physik der Sekundarstufe II [3]. Im Bildungsplan des Gymnasiums Physik für Baden-Württemberg findet sich analog hierzu die Formulierung, dass „die Schülerinnen und Schüler ... Messwerte auch digital erfassen und auswerten (unter anderem Messwerterfassungssystem, Tabellenkalkulation)“ können sollen [4, S. 8].

Eine digitale Messwerterfassung im Physikunterricht erfolgt in der Schule aktuell häufig durch die Lehrkraft im Rahmen eines Demonstrationsexperiments. Dabei wird primär auf die Sensorik von Lehrmittelherstellern zurückgegriffen, die in der Regel teuer ist und an vielen Schulen nicht in ausreichender Stückzahl zur Verfügung steht, um sie in Schülerexperimenten einzusetzen. Die App phyphox ermöglicht es auf die internen Sensoren mobiler Geräte wie Smartphones oder Tablets zuzugreifen, um damit physikalische Messdaten digital auf dem Gerät angezeigt zu bekommen. Diese Daten können dann unmittelbar auf dem Smartphone analysiert werden [5]. Laut der JIM-Studie aus dem Jahr 2022 sind 96% der Jugendlichen in Deutschland zwischen elf und 17 Jahren in Besitz eines Smartphones [6].

Klassische Smartphone-Experimente bieten damit bereits diverse Möglichkeiten, vor allem im Gebiet der Mechanik Schülerexperimente mit digitaler Messwerterfassung in den Unterricht zu integrieren. Um die experimentellen Möglichkeiten zu erweitern, bietet es sich an für die Messwerterfassung gezielt auch externe Sensormodule einzusetzen (siehe z.B. [7], [8], [9], [10] oder [11]). Da Sensoren verschiedener Art zu erschwinglichen Preisen verfügbar sind, können diese mit einem entsprechenden Know-How zu kostengünstigen Alternativen werden und somit mehr digitale Messwerterfassung seitens der Schülerinnen und Schüler im Physikunterricht ermöglichen (siehe z.B. [8], [12] und [13]). Damit lassen sich auch Sensoren auswählen und einsetzen, die für das Experimentieren im Physikunterricht noch besser geeignet

sind als die internen Sensoren von Smartphones. Zudem können externe Sensoren gemeinsam mit günstigen Mikrocontrollern deutlich kompakter und robuster verbaut werden, als dies bei geräteinternen Sensoren von Smartphones und Tablets der Fall ist, was wiederum neue experimentelle Möglichkeiten gegenüber den klassischen Smartphone-Experimenten erschließt. Ein weiterer Vorteil von externen Sensormodulen ist der Umstand, dass sie gegenüber den schülereigenen Smartphones den Vorteil von einheitlicher genutzter Hardware in einer Lerngruppe bieten. Dies erleichtert Lehr-Lern-Szenarien, in denen methodische Aspekte der Erfassung und Auswertung digitaler Messwerte in den Fokus genommen werden [12].

2. Externe Sensorboxen

In der jüngeren Vergangenheit sind im phyphox-Team der RWTH Aachen insgesamt vier externe Sensorboxen entwickelt worden, welche die Messdaten über die Bluetooth-Low-Energy-Schnittstelle (BLE) an das verbundene Smartphone bzw. Tablet übermitteln, sodass innerhalb der phyphox-App eine Analyse und Auswertung der Messdaten erfolgen kann [12]. Die verschiedenen Boxen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

2.1. Distanzbox

Wie der Name bereits verrät, können mit Hilfe der Distanzbox (siehe Abb. 1) Distanzwerte gemessen

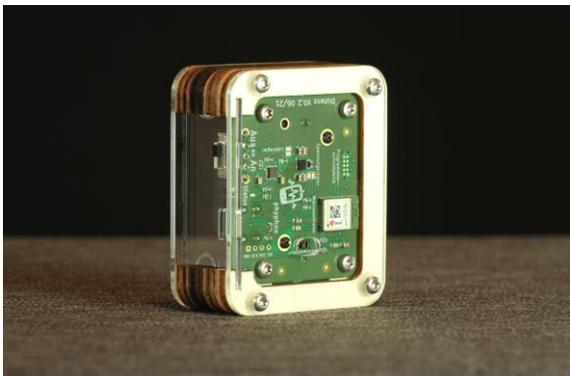


Abb. 2: Die phyphox Distanz-Box mit einem ToF-Sensor misst Distanzen von bis zu vier Metern bei einer Messrate von 50 Hz.

und unter Nutzung der phyphox-eigenen Auswerterroutinen gemeinsam mit ihren zeitlichen Ableitungen graphisch dargestellt werden. Dazu wird ein Time-of-Flight-Sensor (ToF-Sensor) eingesetzt, welcher über die Laufzeit des Lichts zu dem anvisierten Körper und zurück die entsprechende Strecke zwischen dem Sensor und der reflektierenden Oberfläche ermittelt. Die Messgenauigkeit liegt bei wenigen Millimetern, wobei Distanzen bis zu vier Metern gemessen werden können. Dabei können bis zu 50 Distanzwerte in der Sekunde gemessen werden.

2.2. E-Lehre-Box

Mit der phyphox E-Lehre-Box (siehe Abb. 2) können elektrische Spannungswerte erfasst werden. Damit

erweitert sie die interne Messsensorik von Smartphones und Tablets entscheidend um den experimentellen Zugang zu einer physikalischen Größe, die in vielen Gebieten und Experimenten der Schulphysik eine zentrale Rolle spielt. Die Box kann in einem Messbereich von -12V bis $+12\text{V}$ Spannungen messen und



Abb. 1: Die E-Lehre-Box ermöglicht die Messung von Spannungswerten im Messintervall von -12V bis $+12\text{V}$ und kann je nach gewünschter Zeitaufösung in zwei Mess-Modi betrieben werden.

diese via BLE-Verbindung an das Smartphone übermitteln. Für eine simultane Messung und Übermittlung der Daten kann der sogenannte „Live-Modus“ verwendet werden. Hierbei erfolgt die Messung bei einer Datenrate von maximal einem Kilohertz. Des Weiteren ist eine zeitlich präzisere Messung möglich, indem der Oszilloskop-Modus verwendet wird. Hierbei werden Zeitstempel und Spannungswert bei einer Datenrate von bis zu einem Megahertz aufgenommen und zeitlich verzögert über die BLE-Schnittstelle übertragen. So können höherfrequente Messverläufe besser dargestellt und analysiert werden, wie sie beispielsweise im RLC-Schwingkreis auftreten können.

2.3. Wärmelehre-Box

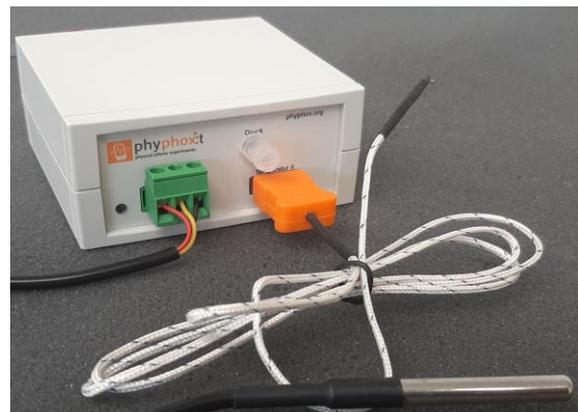


Abb. 3: Mit Hilfe der phyphox Wärmelehre-Box können thermodynamische Größen gemessen werden. Neben einer Druckmessung ist die Messung der Temperatur in verschiedenen Messbereichen möglich.

Die Wärmelehre-Box hilft dem Experimentator dabei, Temperaturen sowie Drücke messbar zu machen. Dazu stehen zum einen zwei Temperatursensoren zur Verfügung, wovon der eine für den Gefrier- und Sie-

debereich von Wasser und der zweite für hohe Temperaturen bis 1100 °C eingesetzt werden kann. Über einen Silikon-Schlauch kann eine Druckmessung bis 1720 mbar erfolgen (siehe Abb. 3).

2.4. Satelliten-Box

Zuletzt wird die sog. phyphox Satelliten-Box vorgestellt (siehe Abb. 4). Sie verfügt im Wesentlichen über ähnliche Sensoren wie typische Smartphones (Beschleunigungssensor, Magnetometer, Gyroskop), bietet aber mit Messsensorik für Druck, Temperatur und Feuchtigkeit auch Erweiterungen gegenüber den meisten schülereigenen Geräten. Die zylindrische Bauweise ermöglicht es die Box zu rollen und über das Gyroskop Strecken zu messen. Sie ist zudem mit



Abb. 4: Die phyphox Satelliten-Box verfügt über viele Sensoren, die prinzipiell auch in Smartphones verbaut sind, hier aber für physikalische Experimente optimiert ausgewählt wurden.

einem Durchmesser von 3,2 cm und einer Höhe von 6,0 cm deutlich kompakter als Smartphones oder gar Tablets und durch die Bauweise auch sehr viel robuster. Beides führt zu deutlich vielseitigeren Einsatzmöglichkeiten in Experimenten gegenüber der Verwendung von schülereigenen oder auch schuleigenen Geräten. Zudem konnte bei der Konstruktion die Position relevanter Sensoren (wie des Magnetometers) so optimiert werden, dass die Auswertung und Interpretation experimenteller Daten erleichtert wird.

Anders als bei den übrigen drei Boxen ist in der Satelliten-Box kein Akku verbaut, sondern ein Superkondensator, welcher vor den Messungen über ein USB-C-Kabel aufgeladen werden muss. Die Ladezeit beträgt hierbei nur wenige Sekunden. Im Anschluss können bis zu 60 Minuten lang Messwerte aufgenommen werden.

Damit ergeben sich verschiedene Vorteile der Satelliten-Box gegenüber der Nutzung eines Smartphones oder Tablets für die Messwerterfassung:

1. Ein wesentlicher Vorteil besteht in der optimierten Wahl der Sensoren für den physikalischen Messprozess. Das Problem, dass manche Sensoren im Smartphone nur geringe Messbereiche aufweisen und somit recht schnell in Sättigung gehen oder für Experimente ungünstige Messraten bieten, kann damit umgangen werden.

2. Die kompakte, robuste und in ihrem Design für experimentelle Anwendungen optimierte Bauweise eröffnet neue experimentelle Möglichkeiten.
3. Die einheitliche Ausstattung erleichtert bzw. erlaubt erst die didaktische Aufarbeitung von manchen methodischen Aspekten des Experimentierens mit digitaler Messwerterfassung. Smartphone-interne Sensoren haben bei ihrem Einsatz in der Lehre unter Nutzung schülereigener Geräte den Nachteil, dass sie sich von Hersteller zu Hersteller unterscheiden und somit keine standardisierte Messinfrastruktur darstellen. Dies betrifft zunächst einmal die Verfügbarkeit von Sensoren wie dem Drucksensor, die in schülereigenen Geräten nur teilweise gegeben ist (siehe <https://phyphox.org/sensordb/>). Es betrifft aber auch die Charakteristika von solchen Sensoren, die zwar in praktisch allen Schülergeräten vorhanden sind, dabei aber auch sehr verschieden sein können. Die Nutzung einer einheitlichen Messsensorik vereinfacht es erheblich, Aspekte von Messunsicherheiten oder der Planung von Experimenten unter Minimierung von Störeffekten in den Mittelpunkt von Unterrichtssequenzen zu stellen.

2.5. Zusammenwirken von geräteinternen Sensoren und externen Sensormodulen

An dieser Stelle sei nochmal betont, dass Smartphone-Experimente mit den geräteinternen Sensoren und die damit verbundene Möglichkeit von Schülerexperimenten mit digitaler Messwerterfassung einen erheblichen Mehrwert gegenüber traditionellem Physikunterricht ohne diese Option bieten. Die nachfolgend vorgestellten konkreten Experimentiervorschläge zeigen an ausgewählten Beispielen, dass die Erweiterung dieser Option mit externen Sensormodulen den experimentell gestützten Unterricht weiter bereichern kann und dabei lehrplankonform wichtige Kompetenzen adressiert. Die App phyphox kann dabei ein wichtiges Bindeglied zwischen beiden Anwendungen darstellen: Schülerinnen und Schüler können in Experimenten mit den smartphone-eigenen Sensoren erste Erfahrungen mit digitaler Messwerterfassung sammeln und dabei auch die Funktionalität der App kennenlernen. Später können sie ihre dabei erworbenen Fähigkeiten in Experimenten mit externen Sensormodulen nutzen. Die App bietet auch die Möglichkeit der Durchführung von Experimenten, in denen die Messdaten sowohl von geräteinternen Sensoren als auch von externen Sensoren ausgelesen und verarbeitet werden.

3. Experimente mit Kernlehrplanbezug

Die digitale Messwertaufnahme, welche die Sensorboxen in Kombination mit der phyphox-App ermöglicht, lässt sich mit verschiedenen Kompetenzerwartungen in den Lehrplänen der Bundesländer verknüpfen. Dies wird im Folgenden an ausgewählten Beispielen gezeigt.

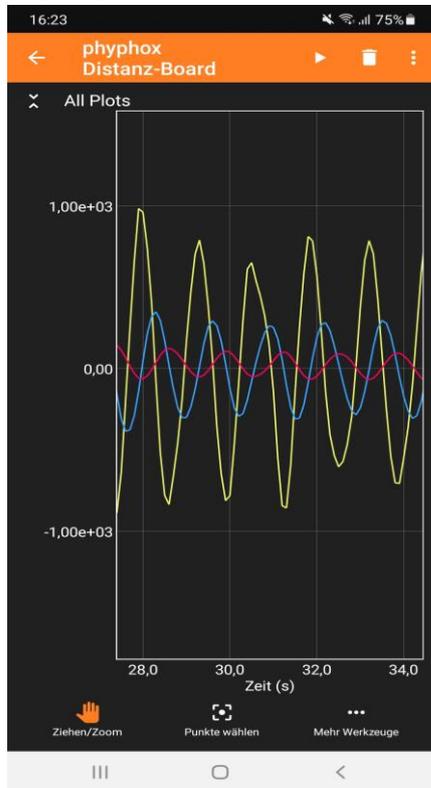


Abb. 5: Weg-Zeit- (rot), Geschwindigkeits-Zeit- (blau) und Beschleunigungs-Zeit-Graph (gelb) für das Federpendel gemessen mit der Distanz-Box. Die Graphen wurden hier in einer gemeinsamen Darstellung geplottet, können aber auch separat in jeweils eigenen Diagrammen dargestellt werden.

3.1. Federpendel (Distanz-Box)

Ein sehr bekanntes Schulexperiment aus dem Themenbereich der Mechanik stellt das Federpendel dar. Da mit dem intern verbauten Beschleunigungssensor lediglich ein Beschleunigungs-Zeit-Diagramm erzeugt werden kann, bietet sich die Distanz-Box dazu an, ein Weg-Zeit-Diagramm aufzunehmen, das für Schülerinnen und Schüler im Lernprozess deutlich einfacher zugänglich ist. Daraus kann mit Hilfe der Rechenwerkzeuge in phyphox anschließend auch ein Geschwindigkeits-Zeit- oder ein Beschleunigungs-Zeit-Diagramm erzeugt (und z.B. mit den Messdaten des Beschleunigungssensors verglichen) werden.

Für die Durchführung des Experiments wird die Distanz-Box auf eine Tischplatte gelegt und eine Feder mitsamt einem Gewichts-Teller mit Gewichten über dem ToF-Sensor der Distanz-Box ausgelenkt. Es ergeben sich die charakteristischen Funktionsgraphen für das Federpendel (Abb. 5). Verankert ist dieser Versuch z.B. im Kernlehrplan für die Sekundarstufe II in Nordrhein-Westfalen, wo es heißt, dass die

Schülerinnen und Schüler Experimente zur Abhängigkeit der Periodendauer von Einflussgrößen beim Federpendel konzipieren und diese unter Anwendung digitaler Werkzeuge auswerten sollen [3].

3.2. Kondensatorkennlinien (E-Lehre-Box)

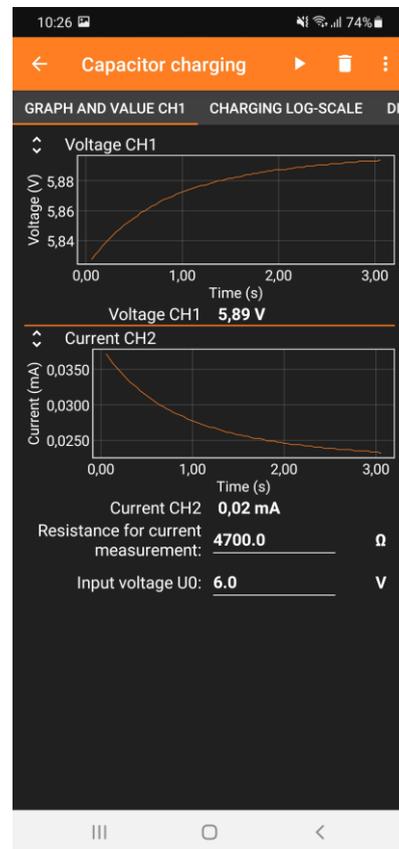


Abb. 6: Auf- und Entladevorgang eines Kondensators aufgenommen mit der phyphox E-Lehre-Box

Ein weiteres verbreitetes Experiment für die Sekundarstufe II ist die Untersuchung der Kondensatorauf- und -entladung aus dem Themenfeld der Elektrodynamik. Anstelle eines Oszilloskops kann die phyphox E-Lehre-Box zur digitalen Messwertaufnahme eingesetzt werden. So lassen sich die typischen zeitabhängigen Spannungs- und Stromkurven generieren (siehe Abb. 6). Durch logarithmisches Auftragen mit anschließender linearer Regression kann die Zeitkonstante des Aufladevorgangs als Kehrwert der Steigung experimentell bestimmt werden. Auch hier lässt sich eine passende Verknüpfung mit dem Kernlehrplan aus Nordrhein-Westfalen für die gymnasiale Oberstufe ausmachen. So sollen die SuS den Auf- und Entladevorgang bei Kondensatoren unter Anleitung experimentell untersuchen [3]. Die Untersuchungen der Kondensatorkennlinien werden für den Physik-Leistungskurs vorgesehen. Mit der E-Lehre-Box und einem entsprechenden phyphox-Experiment kann das Experiment unter Nutzung von digitaler Messwertaufnahme durch die Schülerinnen und Schüler selbst durchgeführt werden.

3.3. Schiefe Ebene (Satelliten-Box)

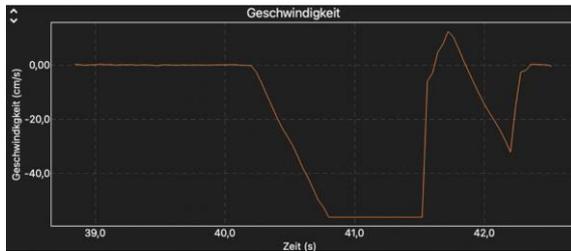


Abb. 7: Typische Messkurve in einem Experiment, bei dem eine Satelliten-Box eine schiefe Ebene herunterrollt. Bei $t \sim 40,8$ s wird die Messgrenze des Gyroskops erreicht. Bei $t \sim 41,6$ s kommt die Box am Ende der schiefen Ebene an.

Zuletzt soll ein Experiment mit der Satelliten-Box vorgestellt werden, welches darin besteht, die Box von verschiedenen Anfangshöhen startend eine schiefe Ebene hinunterrollen zu lassen. Das phyphox-Experiment sorgt dafür, dass aus den Messdaten des Gyroskops ein Weg-Zeit-Diagramm erzeugt wird. Eine typische Messkurve ist in Abb. 7 dargestellt. Bei diesem Experiment erfolgte der Start der Box auf der schiefen Ebene bei ca. 40,2 s und die Box rollte im Zeitintervall bis ca. 41,6 s die schiefe Ebene hinunter. Das Experiment ist durch das einfache Hinabrollen der Box auf einer schiefen Ebene sehr einfach und schnell durchführbar. Gleichzeitig sehen die experimentellen Daten deutlich anders aus, als theoretische Überlegungen nahelegen.

Das konzipierte Arbeitsmaterial soll bei den Schülerinnen und Schülern einen kognitiven Konflikt auslösen, indem die experimentellen Rahmenbedingungen zunächst gezielt so vorgegeben werden, dass ein anderer Verlauf gemessen wird, als er zunächst theoretisch zu erwarten wäre. Dies betrifft im gezeigten Beispiel zunächst die negativen Geschwindigkeitswerte. Hier können sich die Schülerinnen und Schüler durch wiederholte Durchführungen des Experiments ein Verständnis für diese Beobachtungen erarbeiten.

Zusätzlich wird nach dem Start der Rollbewegung zunächst eine Gerade für den Geschwindigkeits-Zeit-Graphen (bzw. eine Parabel für den Weg-Zeit-Graphen) gemessen. Allerdings bildet sich nach einer gewissen Zeit ein Plateau aus, obwohl die Box weiterhin die Ebene hinunterrollt (siehe Abb. 7 im Zeitintervall zwischen 40,8 s und 41,6 s). Diese Beobachtung ist damit zu erklären, dass das Gyroskop der Satelliten-Box die maximal messbare Drehrate erreicht hat, sodass trotz fortlaufender Beschleunigung eine Sättigung im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm zu erkennen ist. Dieses zunächst womöglich unbefriedigend erscheinende Messresultat wird didaktisch genutzt, indem mit Hilfe des Arbeitsmaterials Grenzen der zur digitalen Messwerterfassung eingesetzten Sensoren als Ursache für die Abweichung zwischen den theoretischen Erwartungen und den Messdaten herausgearbeitet werden.

Die Interpretation der Messdatenauswertung von Bewegungen unter qualitativer Berücksichtigung von

Messunsicherheiten sieht der aktualisierte Kernlehrplan Physik für die gymnasiale Oberstufe in Nordrhein-Westfalen vor [3]. Insofern eignet sich das experimentelle Setting sehr gut dazu, dieses Lernziel zu verfolgen. Dabei kann von den Schülerinnen und Schülern explorativ in leicht abgeänderten weiteren experimentellen Durchführungen mit einfachen Mitteln der Gültigkeitsbereich der Theorie für die erhobenen Messdaten eigenständig erweitert werden (zum Beispiel durch Änderung der Neigung der schiefen Ebene oder durch die Verwendung von Rädern unterschiedlichen Durchmessers, deren Achse die Satellitenbox bildet).

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Experimente zeigen exemplarisch, wie eine digitale Messwerterfassung unter Einbindung der Smartphone-App phyphox durch die Schülerinnen und Schüler gelingen kann. Die entwickelten Sensorboxen erweitern dabei die experimentellen Möglichkeiten und standardisieren die Messsensorik. Dabei ist es möglich Smartphone-basierte Experimente mit externen Sensorboxen sinnvoll mit den Vorgaben der Kernlehrpläne zu verknüpfen. Gezeigt worden ist dies insbesondere anhand des Kernlehrplans Physik für die gymnasiale Oberstufe in Nordrhein-Westfalen. Künftig sollen weitere Experimente entwickelt werden, die sich gut mit den Vorgaben der Lehrpläne in Deutschland verknüpfen lassen.

5. Literatur

- [1] T. K. Stürmer-Steinmann, J. A. Fischer, R. Scholz, M. Kerres und K. Neumann, „Stages of Concern: Vorerfahrungen, Interessen und Einstellungen von Lehrkräften in Bezug auf Lehr-Lernplattform-gestütztem Unterricht in den Naturwissenschaften,“ *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, Nr. 28, S. 1-18, 1 Dezember 2022.
- [2] Kultusministerkonferenz (KMK), *Lehren und Lernen in der digitalen Welt*, Berlin, 2021, S. 20.
- [3] Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen, „Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule Physik,“ Düsseldorf, 2022.
- [4] Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, *Bildungsplan des Gymnasiums Physik*, Stuttgart, 2016.
- [5] S. Staacks, S. Hütz, H. Heinke und C. Stampfer, „Advanced tools for smartphone based experiments: phyphox,“ *Physics Education*, Nr. 53, S. 1-2, 2008.
- [6] T. Rathgeb und T. R. Schmid, JIM-Studie, Stuttgart: Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (mpfs), 2022, S. 58.

- [7] F. Bouquet, A. Kolli, J. Bobrof und G. Organtini, „61 Ways to Measure the Height of a Building with a Smartphone,“ *Physics Education*, S. 1-11, 2020.
- [8] A. Pusch, „Arduino im Physikunterricht,“ *Physikjournal* 18, Nr. 5, S. 26-29, 2019.
- [9] P. Vogt, L. Kasper und A. Müller, „Smartphone Physics: Neue Experimente und Fragestellungen rund um das Messwerterfassungssystem Smartphone,“ in *Didaktik der Physik - Frühjahrstagung*, Frankfurt, 2014.
- [10] J. Kuhn und P. Vogt, *Physik ganz smart - Die Gesetze der Welt mit dem Smartphone entdecken*, Berlin: Springer-Verlag, 2019.
- [11] T. Wilhelm und J. Kuhn, *Für alles eine App - Ideen für Physik mit dem Smartphone*, Berlin: Springer-Verlag, 2022.
- [12] D. Dorsel, *Entwicklung der Nutzbarkeit externer Sensoren bei Smartphone-Experimenten und deren Einsatz in naturwissenschaftlichen Experimenten*, Aachen, 2023.
- [13] D. Dorsel, A. Krampe, S. Staacks, H. Heinke und C. Stampfer, „phyphox als Visualisierungstool für Sensordaten aus Arduino-gestützten Messmodulen,“ in *Didaktik der Physik - Frühjahrstagung*, Bonn, 2020.