

Das Labor im Miniformat

Die App phyphox erlaubt kollaborative Vorlesungsexperimente und lässt sich in Arduino-Projekte integrieren.

Sebastian Staacks, Dominik Dorsel, Heidrun Heinke und Christoph Stampfer

Die an der RWTH Aachen entwickelte App phyphox hat seit ihrer Veröffentlichung im Herbst 2016 vielerorts Einzug in die Lehre in Schulen und Hochschulen gehalten. Sie ist vor allem als kostenfreies „alternatives“ Messgerät bekannt, da sie die in Smartphones und Tablets verbauten Sensoren für Physikexperimente nutzbar macht. Die Möglichkeiten der App gehen jedoch weit über den Einsatz als Messgerät hinaus.

Ein naheliegendes Einsatz-Szenario für den Einsatz von phyphox (und von ähnlichen Apps) in der Hochschullehre sind vorlesungsbegleitende Übungen zur Experimentalphysik, die sich leicht um experimentelle Aufgaben ergänzen lassen.¹⁾ Hierfür benötigen Studierende keinen Zugang zu Messgeräten, da sie diese in Form ihrer Smartphones bereits besitzen. Zudem sind keine aufwändigen experimentellen Aufbauten notwendig: Ein Drehstuhl, eine Salatschleuder, eine Fahrradfelge oder ähnliche Alltagsgegenstände genügen, um etwa kreisförmige Bewegungen mit Beschleunigungs- und Drehratensensor zu untersuchen. Die Lehrenden müssen lediglich eine passende Aufgabenstellung formulieren und als Teil der Übungen ausgeben.

Insbesondere in der Akustik sind in der Regel keine weiteren Materialien nötig. Studierende können paarweise mit ihren beiden Smartphones die Schallgeschwindigkeit bestimmen [6], Schwebungen erzeugen und Resonanzen in beliebigen Gefäßen untersuchen. Andere Experimente erfordern einen geringen Mehraufwand an Material, das die Experimente im Rahmen der Hausaufgaben vereinfacht oder die gemeinsame Durchführung in den Übungen ermöglicht. Lautet die Aufgabe, ein einfaches Fadenpendel zu bauen und damit Daten aufzu-

nehmen, reicht die Ausgabe kleiner Sets aus einem Faden und einer Plastiktüte als Smartphone-Halterung für das Heimexperiment aus (Abb. 1a und 1b).

Die Auswertung der aufgenommenen Messdaten erfolgt häufig direkt in phyphox. Die Daten können auch dazu dienen, dass Studierende anhand selbst aufgenommener digitaler Daten das

algorithmische Auswerten in Programmieraufgaben erlernen. So sind weiterführende Aufgabenstellungen möglich, etwa durch Anbindung an einen Programmierkurs, wo die Studierenden ihre Messwerte in Python weiter auswerten. Hierzu bietet sich ein Export der Daten im CSV-Format an. Für aufwändigere Projekte ist es möglich, Messwerte direkt per Netzwerk auszulesen, indem die REST API der Fernzugriffsfunktion verwendet wird. Für ein kollaboratives Experimentieren vieler Nutzenden bietet phyphox auch eine weitere Schnittstelle.

Experimente im Netzwerk

Eine einfache Form eines kollaborativen Experiments ist mit dem Fadenpendel möglich. Hierzu konstruieren Studierende in vorlesungsbegleitenden Übungen ein Fadenpendel und tragen die ermittelten Pendelfrequenzen für verschiedene Fadenlängen in einem Webformular

zusammen, um die Ergebnisse in der Vorlesung diskutieren zu können (Abb. 1c).

Automatisiert man das Übermitteln und Auswerten der Daten, lässt sich ein solches gemeinschaftliches Experiment auch im Rahmen einer Vorlesung mit hunderten Teilnehmenden zeitgleich durchführen und das Ergebnis unmittelbar visualisieren. Hier hilft die Fähigkeit von phyphox, Experimentkonfigurationen aus externen Quellen nachladen zu können [7]. Eine solche Konfiguration ist eine XML-Datei, die Datenquellen (Sensoren, Mikrofon, Bluetooth-Geräte usw.) festlegt, gegebenenfalls eine Auswertung der Daten als Folge mathematischer Operationen



1) Mehr Details finden sich in Physik Journal, November 2018, S. 35, sowie in [1–5].

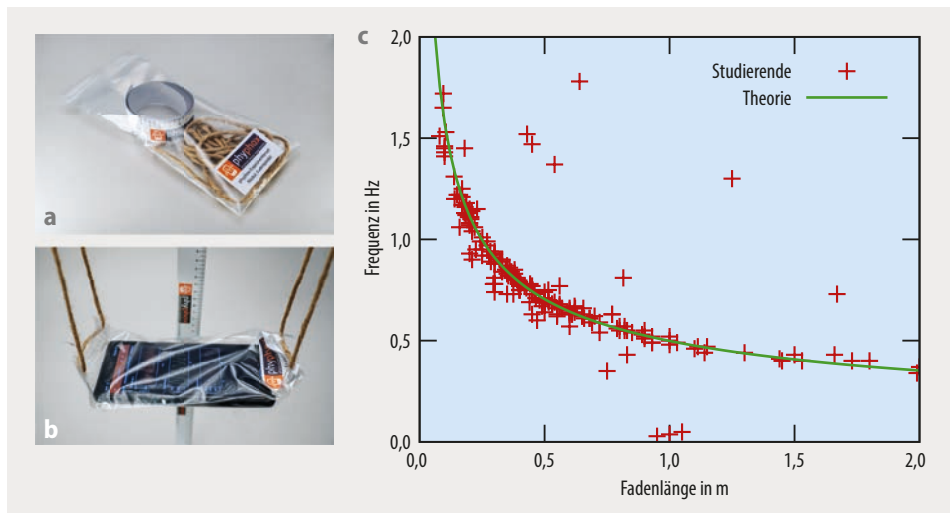


Abb. 1 Das Experimentier-Set für das Fadenpendel besteht aus einer Tüte, zwei Schnüren und einem Maßband (a). Ein schaukelartiges Fadenpendel vermeidet Rotationen um andere Achsen (b). Die Studierenden können ihre Messdaten mit dem mathematischen Pendel mit der theoretischen Erwartung vergleichen (c).

definiert und angibt, wie die Ergebnisse darzustellen und zu exportieren sind. Solche Konfigurationen können die Lernenden mittels QR-Code erhalten. Dadurch lassen sich phyphox-Experimente präzise auf bestimmte Lernszenarien anpassen. In diesem Format wird auch die Netzwerkschnittstelle von phyphox konfiguriert, die als Datenquelle und zum Export von Daten dienen kann.

An der RWTH Aachen gab es in der Vorlesung „Experimentalphysik I“ ein kollaboratives Experiment mit über 300 Studierenden [8]. Hierbei erhielten Zweiertteams jeweils eine Schraubenfeder, eine Plastiktüte und eine Tafel Schokolade. Die Feder und das eigene Smartphone in der Tüte bilden ein Federpendel (**Abb. 2a**). Die Tafel Schokolade lässt sich in annähernd gleiche Teile brechen und diente der Variation der Masse des Pendels in Verbindung mit der Masse des Smartphones, die im Vorfeld zu bestimmen war. Alternativ können etwa Schraubenmutter als Massestücke dienen.

Während der Vorlesung scannten die Studierenden mit phyphox einen QR-Code, um eine Eingabemaske für die Masse m des Pendels zu erhalten und über den Beschleunigungssensor die Pendelfrequenz f zu bestimmen. Ließen die Studierenden ihr Pendel schwingen, wurden beide Werte automatisch an einen Server übermittelt, auf dem zudem

ein Python-Skript lief. Dieses Skript wertet die Daten der Studierenden aus und stellt sie grafisch dar (**Abb. 2c**). Das Ergebnis war ein kollaboratives Experiment des gesamten Auditoriums im Hörsaal, bei dem die Studierenden in Echtzeit mitwirken und sehen konnten, wie die gemeinsamen Daten dazu dienten, die Federkonstante k der ausgeteilten gleichartigen Federn zu ermitteln.

Solche kollaborativen Experimente sind prinzipiell auch global möglich, etwa um die Neigung der Erdachse zu bestimmen: Hierzu ermittelten phyphox-Nutzende weltweit im Verlauf einer Wintersonnenwende die Position der Sonne an ihrem Standort. Ein entsprechender QR-Code lieferte eine Konfiguration, welche die Position des Experimentators mittels GPS bestimmte und mittels Beschleunigungssensor und Magnetometer die Messung von Höhenwinkel und Azimut der Sonne ermöglichte, wenn das Smartphone auf diese ausgerichtet war. Die Werte ließen sich per Knopfdruck übermitteln und erlaubten es in Summe, den Sonnenverlauf über 24 Stunden zu erfassen. Da dieser sich während der Sonnenwende näherungsweise konstant über einem festen Breitengrad befindet, folgt hieraus direkt die Neigung der Erdachse (**Abb. 3**, Details in [8]).

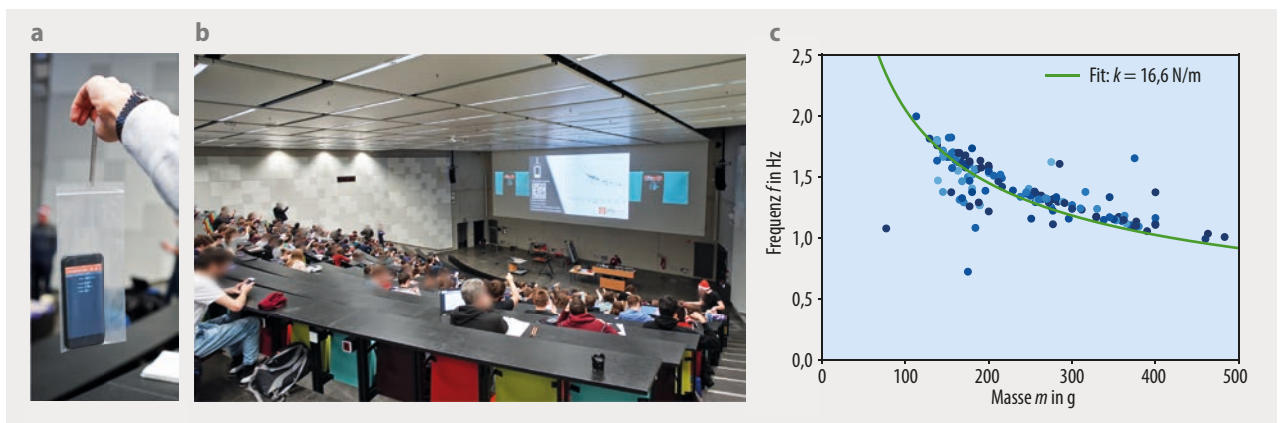


Abb. 2 Schraubenfeder, Plastiktüte und Smartphone bilden ein einfaches Federpendel (a). Ein solches kollaboratives Experiment lässt sich selbst in einer großen Vorlesung durchführen (b). Die Auswertung der Messergebnisse geschah mit Modellfit $\omega^2 = (2\pi f)^2 = k/m$ und wurde während des Versuchs fortlaufend aktualisiert und angezeigt (c).

Externe Bluetooth-Sensoren

Statt Messwerte zu exportieren, dienen Datenschnittstellen in phyphox auch als Datenquelle. Die Funktechnik Bluetooth Low Energy (BLE) erlaubt eine unkomplizierte Anbindung zusätzlicher Sensoren in der unmittelbaren Umgebung des Smartphones und eröffnet damit große experimentelle Freiheiten. Sie reichen von der Ergänzung von Sensoren für Studierende, deren Geräte weniger gut ausgestattet sind, über die Vereinheitlichung der Sensoren aller Lernenden für methodische Aufgabenstellungen und die gezielte Auswahl optimierter Sensorspezifikationen bis zum Design robusterer Messmodule im Vergleich zu Smartphones. Vor allem aber werden damit praktisch beliebige Messgrößen und damit auch viele Themengebiete zugänglich, die mit den klassischen Smartphone-Sensoren experimentell nicht zu erschließen sind. Das betrifft etwa speziellere Messgrößen wie die CO₂-Konzentration [9] oder den pH-Wert, die mit günstigen Sensoren zugänglich sind, ohne ein komplexes Messsystem zu erfordern.

Für diese Anwendungen bietet phyphox eine BLE-Schnittstelle, die sich ähnlich wie die Netzwerkschnittstelle in die Experimentkonfigurationen für phyphox einbinden lässt. Diese Schnittstelle ist sehr flexibel und unterstützt auch Messgeräte, die nicht speziell für phyphox entwickelt wurden. Nach einem Bluetooth-Scan kann man die Geräte direkt nutzen, wenn in der App eine passende Konfiguration vorliegt. Andernfalls lässt sich diese über einen QR-Code nachladen.

In der Summe erlaubt die BLE-Schnittstelle eine intuitive und unkomplizierte Nutzung externer Sensoren als Datenquelle. Durch die Flexibilität der Schnittstelle teilen sich die Nutzer allerdings in zwei Gruppen auf: Programmieraffine Personen können die Schnittstelle flexibel nutzen und sogar Programmcode übermitteln, der auf geeigneten Sensoren (wie dem puck.js von Espruino)

```
1 #include <phyphoxBle.h>
2
3 void setup() {
4   PhyphoxBLE::start();           //Start the BLE server
5 }
6
7 void loop() {
8   float value = random(0,100);    //Random number
9   PhyphoxBLE::write(value);       //Send to phyphox
10  delay(50);                       //Short pause
11 }
```

Abb. 4 Repräsentativ für ein Messgerät generiert der Code Zufallszahlen. Durch Ergänzen der ersten Zeile „#include <phyphoxBle.h>“ sowie der beiden Zeilen 4 und 9 lassen sich die Zufallswerte in phyphox darstellen.

ausgeführt wird. Bei geringen Programmierkenntnissen ist das Erstellen der Konfiguration aber technisch eher anspruchsvoll und bliebe ohne weitere Unterstützung auf Geräte beschränkt, die bereits in phyphox implementiert sind oder einem unterstützten Bluetooth-Standard folgen (etwa Herzratensensoren oder Computermäuse als Wegaufnehmer). Um mehr Menschen die Einbindung individueller Bluetooth-Sensoren zu ermöglichen, setzt phyphox auf eigene Programmier-Bibliotheken.

Arduino und MicroPython

Eigenbausensoren auf Grundlage der Arduino-Plattform erfreuen sich in der Physiklehre und auch in anderen Bereichen wachsender Beliebtheit [10, 11]. Bei jedem Elektronikanbieter gibt es ganze Pakete von Sensoren mit verschiedensten Messgrößen für Arduino-Projekte. Zu jedem Sensor finden sich detaillierte Bauanleitungen im Internet. Der Einsatz solcher Projekte in der Physiklehre

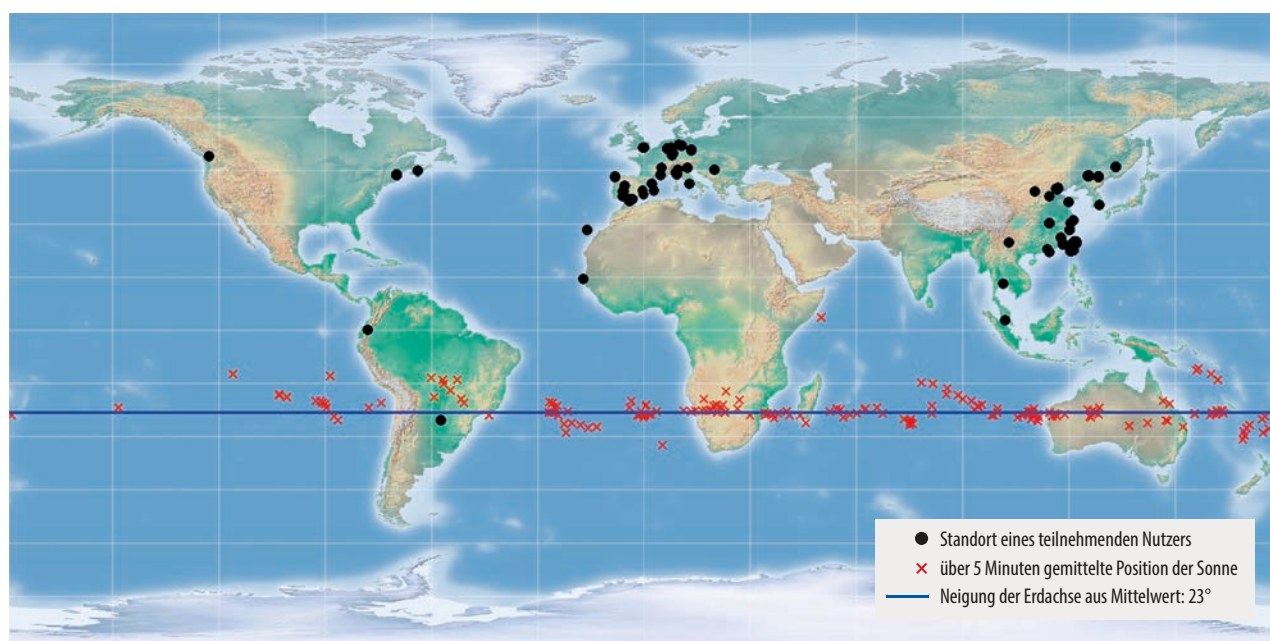


Abb. 3 Nutzende von phyphox halfen weltweit mit, die Neigung der Erdochse zu bestimmen.

Weitere Informationen

Ideen für einfache Experimente mit den Smartphone-Sensoren	https://phyphox.org/experimente
Details zur Arduino-Bibliothek	https://phyphox.org/arduino
MicroPython-Modul der Bibliothek	https://github.com/phyphox
Technische Dokumentation der Schnittstellen	phyphox-Wiki unter https://phyphox.org/wiki
Quellcode der App phyphox	https://github.com/phyphox

Tab. 1 Übersicht über weiterführende Informationen

bietet die Möglichkeit, Grundlagen der Elektronik und Programmierung in kleinen kostengünstigen Projekten zu erlernen.

Einzig die visuelle Aufbereitung und Auswertung der Messwerte bleibt häufig auf der Strecke, da die Darstellung der Messwerte oft aufwändig ist oder die Messwerte als Folge von Zahlenwerten in die serielle Konsole geschrieben und später zur Auswertung von dort kopiert werden.

Hier bietet phyphox eine einfache Alternative in Form einer Arduino-Bibliothek, die direkt über den Bibliotheks-Manager der Arduino-IDE zur Verfügung steht. Die Bibliothek unterstützt bestimmte Arduino-kompatible Boards, die auch Bluetooth Low Energy mitbringen, etwa den Arduino Nano 33 BLE, den Arduino Nano 33 Sense oder den ESP32. Ist die Bibliothek installiert, genügt es, das eigene Sensorprojekt um drei Zeilen Code zu ergänzen, um das eigene Messgerät in phyphox zu finden, wo die Messwerte sich am Smartphone oder Tablet darstellen und exportieren lassen. Mit wenigen weiteren Befehlen lassen sich Beschriftungen, die Darstellung weiterer Messgrößen und vieles mehr realisieren (**Abb. 4**).

Mithilfe dieser Bibliothek können Studierende beliebige eigene Messgeräte konzipieren und ihre Programmierkenntnisse in einem realen Experiment anwenden. In einem einführenden Praktikum eines Physik-Bachelor-Studiengangs an der RWTH Aachen müssen die Studierenden einen optischen Distanzsensor mit einem ESP32-

Mikrocontroller verbinden und mit phyphox auslesen, um die Bewegung eines Federpendels zu vermessen. Die Aufgabenstellungen sind dabei gestaffelt, um Lernende mit unterschiedlichen Programmierkenntnissen passend herauszufordern. Dies reicht von der einfachen Visualisierung der Pendelbewegung bis zur automatisierten Ermittlung der Einhüllenden eines gedämpften Pendels.

Da in der Physik die C/C++-artige Sprache von Arduino weniger verbreitet ist und vor allem Python eine große Rolle spielt, wurde an der RWTH Aachen eine Bibliothek für MicroPython entwickelt (Link in **Tab. 1**). Sie unterstützt aktuell ESP32-basierte Platinen. Eine Erweiterung auf beliebige Boards wie den Raspberry Pi Pico W ist geplant.

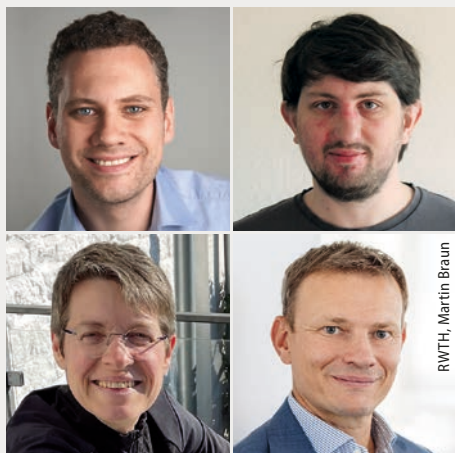
Zusammenfassung

Die App phyphox bedient mit ihren weiterführenden Optionen für Experimente in der Physiklehre ein breites Spektrum von Lehrenden, Lernenden und Lernsituationen. Mit geringem Aufwand können Lehrende Experimente in Hausaufgaben und Kleingruppenübungen einführen, die traditionell von rein mathematischen Aufgabenstellungen geprägt sind. Phyphox kann aber auch kollaborative Experimente, eine einfache Anbindung an Programmierkurse und den Bau eigener Messgeräte ermöglichen. Dies eröffnet eine große Bandbreite neuer didaktischer Szenarien für die Hochschullehre der Physik und verwandter Disziplinen.

Literatur

- [1] P. Vogt et al., Phys. Teach. **49**, 383 (2011)
- [2] A.-M. Pendrill et al., Phys. Educ. **46**, 676 (2011)
- [3] J. Chevrier et al., Phys. Teach. **51**, 376 (2013)
- [4] R. Vieyra et al., Sci. Teach. **082**, 01 (2015)
- [5] M. Monteiro et al., Am. J. Phys. **90**, 328 (2022)
- [6] S. Staacks et al., Phys. Teach. **57**, 112 (2019)
- [7] S. Staacks et al., Phys. Educ. **53**, 045009 (2018)
- [8] S. Staacks et al., Eur. J. Phys. **43**, 055702 (2022)
- [9] D. Dorsel et al., Physik in unserer Zeit **53**, 151 (2022)
- [10] Š. Kubínová et al., Phys. Educ. **50**, 472 (2015)
- [11] F. Bouquet et al., Am. J. Phys. **85**, 216 (2017)

Die Autor:innen



Sebastian Staacks ist akademischer Rat an der RWTH Aachen und Entwickler der App „phyphox“. Er hat 2014 seine Promotion in der experimentellen Festkörperphysik abgeschlossen.

Dominik Dorsel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe von Christoph Stampfer an der RWTH Aachen.

Heidrun Heinke (FV Didaktik der Physik, Halbleiterphysik) ist seit 2003 C3-Professorin für Experimentalphysik an der RWTH Aachen. Hier engagiert sie sich in der experimentellen Ausbildung von Studierenden und in der Lehramtsausbildung für das Fach Physik.

Christoph Stampfer (FV Halbleiterphysik, Metall- und Materialphysik) studierte Physik an der TU Wien und promovierte 2007 an der ETH Zürich in Maschinenbau. Als Postdoc wechselte er in die Experimentalphysik. Seit 2009 ist er Professor an der RWTH Aachen.

Dr. Sebastian Staacks, Dr. Dominik Dorsel, Prof. Dr. Christoph Stampfer und Prof. Dr. Heidrun Heinke, RWTH Aachen, Templergraben 55, 52056 Aachen