

Smarte Experimente

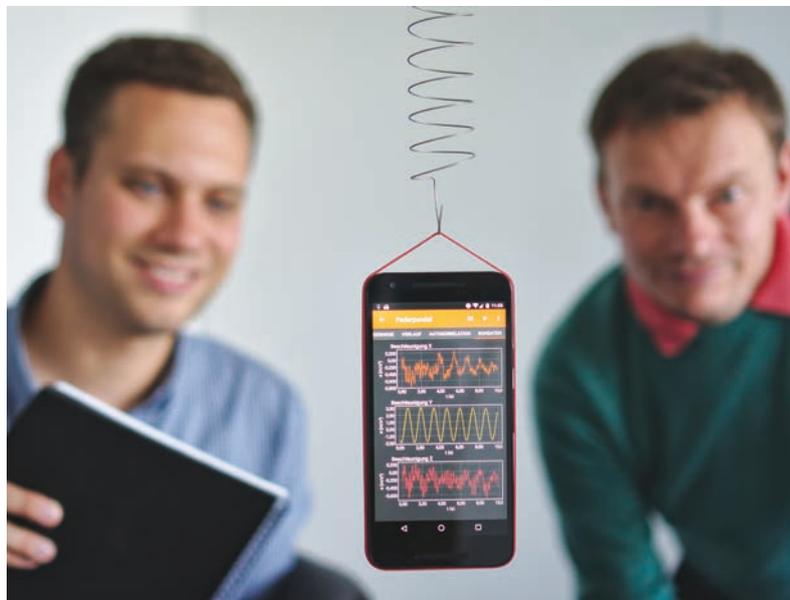
In den Vorlesungen zur Experimentalphysik lassen sich Smartphones sinnvoll einsetzen.

Sebastian Staacks, Heidrun Heinke und Christoph Stampfer

In den meisten Physikstudiengängen bildet die Vorlesung zur Experimentalphysik die zentrale Einführung. Dabei stellen Studierende jedoch schnell fest, dass das „Experiment“ im Titel der Veranstaltung lediglich Demonstrationsversuchen geschuldet ist, sie aber nicht selbst experimentieren dürfen. Da es unmöglich ist, alle Studierenden mit Messgeräten auszustatten, schauen sie den Vorführungen passiv zu und bekommen erst in den physikalischen Praktika die Möglichkeit, selbst Versuche durchzuführen. Die eigenständige Experimentiererfahrung wird losgelöst vom Vorlesungsstoff gesammelt.

Eine Alternative bietet das Einbinden Smartphone-basierter Experimente [1, 2] in den Vorlesungs- und Übungsablauf. Nahezu alle Studierenden bringen heute in Form ihrer Smartphones eigene Messgeräte mit, die über zahlreiche Sensoren verfügen, welche die Mechanik breit abdecken. Je nach Modell gibt es Helligkeits-, Magnetfeld-, Beschleunigungs- und Drehratensensoren, Mikrofone, GPS sowie Luftdrucksensoren. Mikrofon und Beschleunigungssensor sind in jedem Gerät vorhanden. Die Verfügbarkeit anderer Sensoren hängt vom Modell ab, reicht aber meist aus, um in Gruppenarbeit alle Studierenden zu erreichen.

Ausgehend von dieser Beobachtung bekamen die Studierenden im Bachelorstudiengang Physik an der RWTH Aachen im Wintersemester 2016/17 experimentelle Aufgaben, die mit Smartphones sowie hausüblichen Materialien durchzuführen waren. Für die Erfassung und Verarbeitung der Daten hatten sie eine eigens dafür an der RWTH Aachen entwickelte App zur Verfügung: phyphox [3]. Die Aufgaben waren Teil der Übungsaufgaben,



In der Experimentalphysikvorlesung bieten Smartphones die Möglichkeit, die Physikstudierenden von Anfang an selbstständig experimentieren zu lassen.

die gleichzeitig Zulassungsvoraussetzung für die Klausur waren. Die Studierenden konnten auf freiwilliger Basis klassische Aufgaben durch Smartphone-Experimente ersetzen.

Ein Beispiel ist die Messung der Abhängigkeit der Zentrifugalbeschleunigung a_z von der Winkelgeschwindigkeit ω (Abb. 1). Im konkreten Fall war der theoretische Zusammenhang bereits vor dem Experiment bekannt. Darauf aufbauend hatten die Studierenden die Aufgabe, selbst einen geeigneten Versuchsaufbau zu entwickeln, ihn zu dokumentieren und das Messergebnis als Lösung der Aufgabe darzustellen. Sie haben dafür kreative Lösungen gefunden und diverse rotierende Systeme in ihrer Umgebung genutzt, beispielsweise die Laufräder von Fahrrädern, Drehstühle und Karussells. Das Ergebnis entspricht ohne großen experimentellen Aufwand sehr genau der mathematischen Vorhersage, wonach die Zentrifugalbeschleunigung a_z quadratisch mit der Winkelgeschwindigkeit ω wächst

(Abb. 1c). Mithilfe eines einfachen Fits konnten die Studierenden den Radius r selbst bestimmen.¹⁾

Die Einsatzmöglichkeiten solcher Aufgaben sind vielfältig. So lassen sich aus der Vorlesung bereits bekannte Zusammenhänge experimentell verifizieren oder deren Verständnis vertiefen. Hierbei können die Studierenden unmittelbar Bezug zu Demonstrationsversuchen aus der Vorlesung nehmen und diese mit ihren Daten ergänzen. Alternativ können sie aber auch zu bislang unbekanntem physikalischen Themen experimentelle Daten erheben, die der Dozent in späteren Vorlesungen aufgreift.

Die App „phyphox“

Wie bei allen Experimenten ist neben der Durchführung das Erfassen und Darstellen der Daten zentral. Es gilt also, die Sensordaten aus dem Smartphone auszulesen. Dazu gibt es viele Apps, welche die Rohdaten aufzeichnen und

1) Weitere Übungsaufgaben finden sich auf <http://phyphox.org/module>, wo auch Arbeitsblätter für Übungsaufgaben individuell zusammengestellt werden können. Diese Arbeitsblätter entstanden im Rahmen einer Förderung durch den Stifterverband und das Land NRW.

Dr. Sebastian Staacks, Prof. Dr. Heidrun Heinke und Prof. Dr. Christoph Stampfer, Fachbereich Physik, RWTH Aachen, Otto-Blumenthal-Str. 18, 52074 Aachen

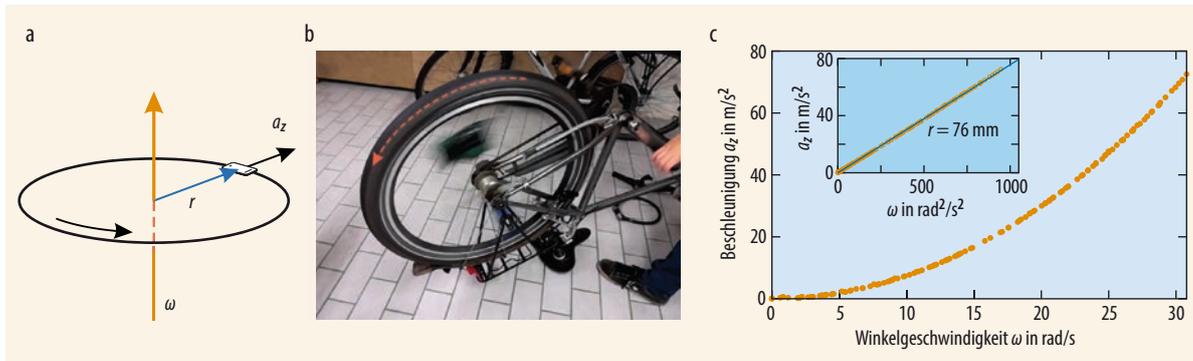


Abb. 1 Mit dem Smartphone und einem rotierenden Hinterrad eines Fahrrads lässt sich die Zentrifugalbeschleunigung messen (a, b). Die App erlaubt es, das

Messergebnis darzustellen – hier für ein rotierendes Smartphone in einer Salat-schleuder (c). Die quadratische Abhängigkeit der radialen Beschleunigung von

der Winkelgeschwindigkeit wird deutlich (Inset).

exportieren können (z. B. Physics Toolbox [4], Science Journal oder Sensor Kinetics). Allerdings zeichnen alle diese Apps die Daten ohne Kontrolle durch den Anwender auf, da das Smartphone während des Experiments oft nicht zugänglich ist. Zudem ist es erforderlich, die Messdaten später mittels einer Datenverarbeitungssoftware darzustellen, weil gängige Apps die Daten nur gegen die Zeit auftragen, nicht aber z. B. die Beschleunigung gegen die Winkelgeschwindigkeit. Diese externe Darstellung ist oftmals viel zeitaufwändiger als das eigentliche Experiment. Damit ist die physikalische Erkenntnis nicht nur von der unmittelbaren experimentellen Erfahrung entkoppelt, sondern auch durch einen kognitiven Mehraufwand massiv behindert. Dies schränkt die Lernwirksamkeit und die motivierende Wirkung vieler Smartphone-Experimente stark ein.

Dieses Hemmnis kann die kostenlose App phyphox überwinden.²⁾ Sie ermöglicht für viele Experimente eine integrierte Datenauswertung. Für das beschriebene Experiment bietet sie die Möglichkeit, eine gemittelte Beschleunigung gegen die Winkelgeschwindigkeit oder das Quadrat der Winkelgeschwindigkeit aufzutragen. Der Nutzer bestimmt die Art der Datenaufbereitung und der grafischen Darstellung. Zudem erlaubt phyphox den Fernzugriff auf das im Experiment verwendete Smartphone. Mithilfe einer leicht zu aktivierenden Fernzugriffsfunktion ist es möglich, die Messwerte des rotierenden Smartphones auf einem

zweiten Gerät in Echtzeit darzustellen, das Experiment zu steuern sowie die Daten direkt zu speichern. Dieses zweite Gerät kann ein Notebook, ein Tablet oder ein zweites Smartphone sein (Abb. 2), auf dem phyphox nicht installiert sein muss – der Zugriff erfolgt über einen Webbrowser. Für die Fernsteuerung müssen die beiden Geräte lediglich in einem gemeinsamen Netzwerk kommunizieren.

Aufgrund ihres Funktionsumfangs kann phyphox gewinnbringend die Erarbeitung eines physikalischen Konzeptverständnisses unterstützen und das eigenständige Experimentieren fördern. Die physikalischen Praktika schulen weiterhin Fähigkeiten zum Aufbereiten, Darstellen und Auswerten experimenteller Daten. Beim Einsatz von Smartphones können die

Studierenden aber viel freier eigenständig experimentieren, als das in vielen Anfängerpraktika mit fest installierten Aufbauten üblich ist. Hier sind also auch Fähigkeiten gefragt, Versuchsaufbauten zu planen und kreativ zu realisieren. Damit ergänzt der Einsatz von phyphox-Experimenten in Vorlesungen und Übungen sinnvoll die klassischen Physikpraktika.

Daten sammeln und...

Phyphox wird durch die vorgefertigte Datenauswertung und -darstellung jedoch nicht zur Blackbox. Die mitgelieferten Experimente sind in einem vollständig dokumentierten Dateiformat definiert und über einen webbasierten Editor³⁾ zu öffnen, einzusehen und

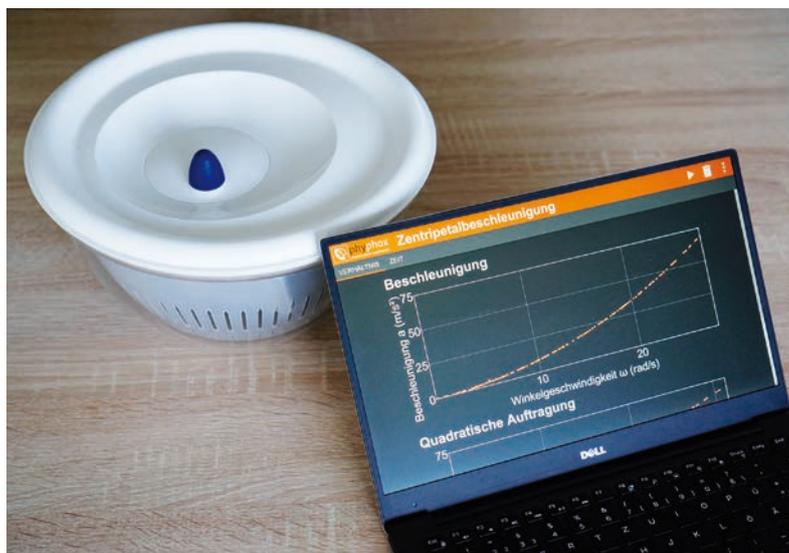


Abb. 2 Das Smartphone in der Salat-schleuder: Die Studierenden können die Messergebnisse von phyphox noch wäh-

rend des Messvorgangs in Echtzeit auf einem Notebook darstellen und speichern.

2) <http://phyphox.org/download>

3) <http://phyphox.org/editor>

anzupassen [5]. So verknüpft ein Experiment beliebige Sensoren mit mathematischen Operationen (von einfacher Addition über bedingte Operationen bis hin zur Fourier-Analyse) und legt die Darstellung in Graphen und anderen Anzeigeelementen fest. Dies ermöglicht es, die Auswertung in phyphox nachzuvollziehen und Details an die jeweilige Lehrveranstaltung anzupassen. Abhängig von den Vorkenntnissen der Studierenden und vom angestrebten Lernziel lässt sich eine spezielle Datenauswertung ergänzen oder vereinfachen. Auch ist es möglich, eigene Experimente zu entwickeln und auf das Smartphone zu übertragen. Um einen gesamten Studiengang mit einem solchen angepassten Experiment zu versorgen, empfiehlt es sich, die entsprechende „Experiment-Datei“ auf einer begleitenden Webseite bereitzustellen.

Ein Beispiel für eine solche neue Experimentidee ist ein Hysterese-Experiment von Christoph Holz vom Institut für Didaktik der Physik der Universität Münster. Um die Hysterese bei der Ummagnetisierung eines Eisenkerns in einer Spule zu zeigen, griff er auf das Magnetometer des Smartphones zurück. Da jedoch der Strom durch die Spule nicht durch das Smartphone selbst messbar ist, schaltete

er eine zweite Spule ohne Eisenkern in Reihe und ordnete sie so an, dass verschiedene Achsen des Magnetometers jeweils nur das Feld einer der beiden Spulen messen: Eine Achse misst das Feld der Spule mit Eisenkern, die andere das Feld der Referenzspule. Um die Hysterese darzustellen, kommt der Editor zum Einsatz. Hier ist lediglich das Magnetometer als Input sowie ein Graph zur Darstellung auszuwählen. Die beiden Elemente werden verknüpft, indem die jeweilige Achse des Magnetometers je einer Achse des Graphen zugeordnet wird. Das Beispiel zeigt zudem, dass die Smartphone-Experimente längst nicht auf die Mechanik beschränkt sein müssen.

... Unsicherheiten verstehen

Viele Facetten der App können die Nutzer anregen, sich explizit mit Fragen der Messgenauigkeit bzw. mit Messunsicherheiten auseinanderzusetzen. So ist es beispielsweise gelungen, für die Studierenden die Normalverteilung des statistischen Rauschens des Beschleunigungssensors ihrer Smartphones in phyphox sichtbar zu machen. Das Experiment ermöglichte es den Studierenden, mit einer schnellen,

leicht verfügbaren Quelle für statistische Daten zu experimentieren und zu untersuchen, wie sich Mittelwert, Standardabweichung und Fehler auf den Mittelwert verschiedenen großer Datensätze auswirken. Da die meisten Beschleunigungssensoren mehr als 100 Datenpunkte pro Sekunde generieren und diese direkt in phyphox zu verarbeiten sind, ist es leicht, den Einfluss der Stichprobengröße zu sehen (Abb. 3).

Die Studierenden zeichneten Daten über verschiedene Zeitspannen auf und konnten so anhand der eigenen Messdaten den Unterschied zwischen statistischen und systematischen Unsicherheiten diskutieren. Interessanterweise weicht der Mittelwert für die einzelnen Geräte aufgrund der unterschiedlichen Kalibration durch die Hersteller teils deutlich vom Erwartungswert von $9,81 \text{ m/s}^2$ ab, was keine noch so lange Messung ausgleichen kann. Dies zeigt sich gut, wenn die Messwerte der Studierenden durch ein Webformular gesammelt und in der Vorlesung diskutiert werden (Abb. 3). Deutlich ist erkennbar, wie der statistische Fehler des Mittelwerts mit zunehmender Messdauer sinkt, aber die Ergebnisse der einzelnen Geräte deutlich um den Literaturwert streuen. Zugleich ist diese Erhebung hilfreich, um die Qualität

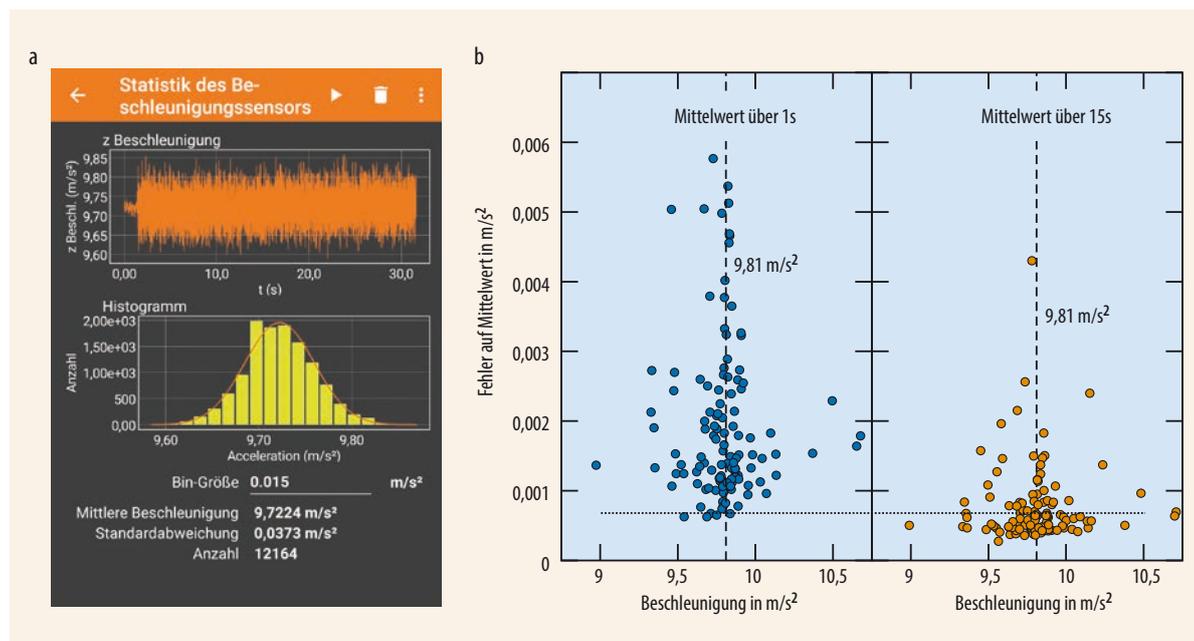


Abb. 3 Der Screenshot zeigt die Statistik des Beschleunigungssensors (a). Die gesammelte Statistik sämtlicher Smart-

phones (jeder Datenpunkt kommt von einem Studierenden, b) zeigt gut, wie der Fehler des Mittelwerts mit der Mess-

zeit abnimmt. Der systematische Fehler durch verschiedene Kalibration der Geräte bleibt davon unberührt.

Einsatzmöglichkeiten von phyphox mit Beispielen	
Die App phyphox ...	Beispiele
... liefert Rohdaten verschiedener interner Sensoren vieler Smartphones (Android, iOS).	<ul style="list-style-type: none"> ■ Beschleunigungssensor ■ Gyroskop (Drehratensensor) ■ GPS ■ Magnetfeldsensor ■ Lichtsensor ■ Luftdrucksensor
... stellt experimentelle Werkzeuge bereit.	<ul style="list-style-type: none"> ■ akustische Stoppuhr ■ Audio Spektrum ■ Magnetlineal ■ Neigungswinkel
... bietet fertig konfigurierte Experimente.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Aufzug ■ Zentripetalbeschleunigung ■ inelastischer Stoß ■ Pendel ■ Doppler-Effekt
... ermöglicht die Adaption existierender Experimente an die eigenen Bedürfnisse und die Umsetzung eigener Ideen für neue Experimente.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Experiment „Aufzug“ für das Wissenschaftsmuseum „Phaeno“ ■ Hysterese des Eisenkerns einer Spule
... wird in den Einsatzmöglichkeiten stetig erweitert, aktuell z. B. durch die nebenstehende Entwicklung.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Einbindung der Daten externer Sensoren über Bluetooth Low Energy (verfügbar ab Ende 2018)

der verfügbaren Sensoren für künftige Experimente einzuschätzen.

Dass die Studierenden im Rahmen ihrer Übung Experimente durchführen und die Ergebnisse in der Vorlesung diskutieren, kann helfen, das Prinzip des „Flipped Classroom“ [6] an die Besonderheiten von Experimentalphysik-Vorlesungen anzupassen. Dabei wird üblicherweise die Vermittlung von Lehrinhalten aus der Präsenzphase in eine vorgelagerte Selbststudienzeit der Lernenden verschoben, sodass diese sich die Inhalte selbstständig außerhalb der Vorlesung erarbeiten müssen. Die Vorlesung dient dazu, tiefergehende Fragen und die Anwendung des Gelernten zu besprechen.

Smartphone-Experimente bieten die Möglichkeit, Teile der methodisch wichtigen Demonstrationsexperimente in die Selbststudienzeit der Lernenden zu verlagern. Hierzu sollte ein Experiment als Aufgabe gestellt werden, bevor der theoretische Hintergrund in der Vorlesung diskutiert wird. Dann können die Studierenden ohne konkrete Erwartungshaltung experimentieren. Die experimentellen Daten werden gesammelt und in einer späteren Vorlesung durch ein Modell beschrieben. Beispielsweise haben die Studierenden Fadenpendel konstruiert und jeweils drei Wertepaare für die verwendete Fadenlänge und die gemessene Frequenz übermittelt. Anschließend

konnte der Dozent in der Vorlesung die Gesetzmäßigkeiten für das mathematische Pendel herleiten und die gesammelten Messdaten diskutieren. Dass Studierende bei dieser freiwilligen Übungsaufgabe fast fünfzig Wertepaare für Fadenlängen bis 3,8 Meter eingereicht haben, belegt, wie phyphox zum eigenständigen Experimentieren anregt und die Motivation der Studierenden erhöht. Dies zeigten auch die Umfrageergebnisse unter den Hörern der Vorlesung „Experimentalphysik I“ an der RWTH Aachen. Am Ende der Vorlesung bewerteten 85 Prozent der Teilnehmer ($N = 96$) die Aussage „phyphox macht mir Spaß und motiviert“ positiv.

Durch das Verwenden eigener Messdaten erhalten die Studierenden einen direkten Bezug zu

den in der Vorlesung diskutierten Inhalten. Die Vorgehensweise erinnert an die im Physikunterricht eingesetzte Methode, arbeitsteilig in Gruppen gewonnene experimentelle Daten zum Ableiten oder Bestätigen eines theoretischen Zusammenhangs zusammenzuführen. Tatsächlich kann phyphox in diesem Sinne auch in der Schule zum Einsatz kommen.

In der Hochschullehre ergibt sich ein wichtiger Vorteil durch die höhere Anzahl experimenteller Daten, die aus der größeren Hörerzahl in Vorlesungen resultiert und zu überzeugenderen Vergleichen zwischen experimentellen Daten und theoretischen Vorhersagen führt. Die Einbindung von Smartphone-Experimenten (Tabelle) steigert somit nicht nur spürbar die Motivation der Studierenden, sondern bietet bereits vor den physikalischen Praktika Gelegenheit, erste Erfahrungen zum Erfassen von Messwerten zu sammeln sowie Messunsicherheiten und die Grenzen experimenteller Methoden kennenzulernen.⁴⁾

- [1] P. Vogt et al., Phys. Teach. **49**, 383 (2011)
- [2] A. Pendrill et al., Phys. Educ. **46**, 676 (2011)
- [3] S. Staacks et al., Phys. Educ. **53**, 045009 (2018)
- [4] R. Vieyra et al., Sci. Teach. **82**, 32 (2015)
- [5] S. Kühlen et al., Physik in unserer Zeit **48**, 148 (2017)
- [6] J. Bergmann und A. Sams, Flip Your Classroom, International Society for Technology in Education (2012), ISBN 1564843157

DIE AUTOREN

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

Heidrun Heinke (FV Didaktik der Physik, Halbleiterphysik) studierte Physik an der U Leipzig, promovierte an der U Würzburg und habilitierte sich an der U Bremen. Seit 2003 ist sie C3-Professorin für



Experimentalphysik an der RWTH Aachen. Hier verantwortet sie seitdem Physikalische Praktika und engagiert sich in der Lehramtsausbildung für das Fach Physik und darüber hinaus. **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 und folgte 2009 einem Ruf auf eine W1-Professur an der RWTH Aachen, wo er 2013 auf eine W3-Professur berufen wurde.



4) Weitere Informationen zu phyphox und Ideen für mögliche Smartphone-Experimente sind auf <http://phyphox.org> zu finden. Neben technischen Anleitungen und Hilfestellungen werden dort auch Videoanleitungen zu Experimenten angeboten.