

## Digitale Messwerterfassung mit Mikrocontrollern - Konnektivität, Datenauswertung, Nutzeroberflächen -

Fabian Bernstein\*, Thomas Wilhelm\*

\* Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt  
[bernstein@physik.uni-frankfurt.de](mailto:bernstein@physik.uni-frankfurt.de), [wilhelm@physik.uni-frankfurt.de](mailto:wilhelm@physik.uni-frankfurt.de)

### Kurzfassung

Um Messwerte digital im naturwissenschaftlichen Unterricht zu erfassen, stehen Lehrkräften unterschiedliche Optionen zur Verfügung. Neben klassischen Stand-alone-Messgeräten kann auf Messwerterfassungssysteme von Lehrmittelherstellern, mobile Endgeräte oder Mikrocontroller-Boards zurückgegriffen werden. Moderne Mikrocontroller weisen dabei eine große Leistungsfähigkeit bei geringen Kosten und hoher Flexibilität auf. Die reine Erfassung von Messdaten ist für unterrichtliche Zwecke allerdings nicht ausreichend: Vielmehr müssen schülergerechte Abläufe gestaltet werden, die insbesondere den Datentransfer vom Mikrocontroller zu Endgeräten wie PCs, Smartphones oder Tablets sowie grafische Nutzeroberflächen und Möglichkeiten der Datenauswertung miteinschließen. Dies wird durch moderne Schnittstellen wie Microsoft Datastreamer, die phyphox Arduino BLE-Bibliothek oder MIT App Inventor ermöglicht, die die Gestaltung robuster und hochwertiger Experimentierumgebungen erlauben.

### 1. Gründe für den Einsatz digitaler Messwerterfassung naturwissenschaftlichen Unterricht

Die digitale Erfassung von Messdaten ist nicht nur aus Wissenschaft und Industrie nicht mehr wegzudenken, sondern zunehmend auch ein Standard des allgemeinbildenden naturwissenschaftlichen Unterrichts. So wird Messwert- und Datenerfassung bspw. als eine der digitalen Basiskompetenzen des DIKOLAN-Frameworks geführt, in dem auch explizit auf die Vorteile für den naturwissenschaftlichen Unterricht hingewiesen wird. Demgemäß ermöglicht die digitale Erfassung von Messwerten u. a. die Beobachtung außerordentlich schnell oder langsam ablaufender Prozesse, flexible Darstellungs-, Visualisierungs- und Analysemöglichkeiten und erlaubt ferner, physikalische Vorgänge, die ohne technische Hilfsmittel nicht wahrnehmbar sind, der Anschauung zugänglich zu machen (z. B. mithilfe von Wärmebildkameras) [1].

Eine darüberhinausgehende Begründung für den Einsatz digitaler Messtechnik im naturwissenschaftlichen Unterricht geben Lück und Wilhelm [2]. Sie argumentieren, dass der Einsatz digitaler Messgeräte die Chance biete, den Unterricht von langweiligen und repetitiven Routinetätigkeit zu entlasten, die den Fokus von dem eigentlich interessierenden physikalischen Zusammenhang weg zu den Tätigkeiten seines manuellen Nachweises verschoben. Dementsprechend eröffneten digitale Messgeräte Zeitfenster im Unterricht, die zur Diskussion und allgemein zur Vertiefung des physikalischen Konzeptverständnisses bei den Schülerinnen und Schülern häufig besser genutzt werden könnten als zur manuellen Erhebung von Messwerten.

Schließlich kann mithilfe digitaler Sensoren in kurzer Zeit eine große Zahl an Messwerten mit (oft) großer Genauigkeit erfasst werden, sodass eine aus Schülersicht überzeugendere Begründung physikalischer Zusammenhänge möglich wird. Dies gilt insbesondere, wenn verschiedene physikalische Größen gleichzeitig gemessen werden und komplexe Interdependenzen verständlich gemacht werden sollen [2-3].

### 2. Digitale Messwerterfassung im Unterricht: Systeme und Optionen

Lehrkräfte, die Messwerte digital im Unterricht erfassen (lassen) möchten, können dies prinzipiell auf verschiedene Art und Weise unterrichtspraktisch umsetzen. Grob lassen sich Systeme digitaler Messwerterfassung wie folgt klassifizieren:

- Stand-alone-Messgeräte, wie z.B. digitale Multimeter, Digital-Oszilloskope, Wärmebildkameras etc.,
- Messwerterfassungssysteme von Lehrmittelherstellern, wie z.B. Cassy (Leybold), Cobra (Phywe), Passport (Pasco) oder LabQuest (Vernier),
- Mobile Endgeräte, d.h. Smartphones oder Tablets, die mittels geeigneter Apps wie bspw. Arduino Science Journal, phyphox oder Physics Sensor Toolbox zu Messgeräten umfunktioniert werden,
- Mikrocontroller-Boards und Einplatinencomputer, wie z.B. Mikrocontroller-Boards der Arduino-Familie oder der Raspberry Pi.

Vergleicht man diese verschiedenen Möglichkeiten, wird schnell deutlich, dass jede dieser Optionen in praktischer Hinsicht mit eigenen Vor- und Nachteilen einhergeht.

### 2.1. Stand-alone-Messgeräte

Stand-alone-Messgeräte – also eigenständige Messgeräte, die für bestimmte Messaufgaben spezifiziert und auf bestimmte Messbereiche ausgelegt sind – zeichnen sich oft durch eine hohe Zuverlässigkeit und Robustheit aus. Die Messbereiche und die Messgenauigkeit sind im Allgemeinen bekannt. Dem gegenüber stehen eine begrenzte Flexibilität, erhöhter Platzbedarf und zumeist höhere Kosten als für integrierte Lösungen.

### 2.2. Messwert-Systeme von Lehrmittelherstellern

Digitale Systeme zur Messwerterfassung von Lehrmittelherstellern sind für den unterrichtspraktischen Einsatz optimiert, weisen eine gute Usability auf, sind durch die Verfügbarkeit einer Vielzahl von Sensoren flexibel und ermöglichen zumeist einen einfachen Austausch der Messwerte zwischen verschiedenen Geräten oder Systemen zur weiteren Auswertung. Aufgrund der oft hohen Kosten sind die Systeme im Allgemeinen jedoch nicht flächendeckend und in Schülersätzen an Schulen verfügbar. Darüber hinaus impliziert der Erwerb eines solchen Systems de facto die Bindung an ein geschlossenes Ökosystem und die Messwerterfassung selbst bleibt zwangsläufig eine „Black-Box“, da die internen Prozesse der Messdatenverarbeitung nicht zugänglich sind.

### 2.3. Mobile Endgeräte

Der Einsatz von Smartphones und Tablets zur digitalen Messwerterfassung ist seit einiger Zeit sowohl in der Hochschullehre [4] als auch an allgemeinbildenden Schulen etabliert [5]. Dieser Ansatz bietet einige Vorzüge: In fachdidaktischer und lernpsychologischer Hinsicht stellen mobile Endgeräte einen Alltags- und Lebensweltbezug für die Schülerinnen und Schüler her, was positive motivationale und kognitive Effekte erwarten lässt [6]. In technischer Hinsicht ist ihr Einsatz niedrigschwellig, da eine Vielzahl von Apps für verschiedenste Messaufgaben zur Verfügung stehen, Einsatzszenarien beschrieben sind [5, 7] und die Messgeräte selbst – nämlich die Smartphones oder Tablets der Schule oder auch der Schülerinnen und Schüler – in aller Regel bereits vorhanden sind. Begrenzt werden die Einsatzmöglichkeiten einerseits durch die in den mobilen Endgeräten verbauten Sensoren, sowohl nach Typ als auch nach Genauigkeit, sowie andererseits durch den Formfaktor der Geräte und die Risikobereitschaft der Lehrkraft, die nicht beliebige Einsatzszenarien zulassen.

### 2.4. Einplatinencomputer

Wie (und dass) sich Mikrocontroller-Boards, bspw. der verbreitete „Arduino Uno“, oder Einplatinencomputern wie der Raspberry Pi zur digitalen Erfassung von Messdaten im Physikunterricht nutzbar gemacht werden können, wurde bereits verschiedentlich diskutiert [8-9]. Ein solcher Ansatz ist in mehrfacher Hinsicht naheliegend: Mikrocontroller-Boards sind preisgünstig, flexibel einsetzbar, weit verbreitet und

dank einer globalen Community hervorragend dokumentiert. Darüber hinaus existiert eine Vielzahl kosteneffektiver Sensoren für nahezu alle denkbaren unterrichtlichen Messszenarien und aufgrund des Open-Source und Open-Hardware-Ansatzes kann der Prozess der digitalen Messwerterfassung selbst, sofern gewünscht, zum Gegenstand des Unterrichts werden. Anders als bei „Closed Source“-Produkten ist der Programmiercode zur Messwerterfassung, -verarbeitung, und -speicherung einsehbar und modifizierbar oder kann sogar – je nach angestrebtem Kompetenzerwerb – durch die Schülerinnen und Schüler selbst erstellt werden. Dieser grundsätzliche Vorteil kann allerdings auch zum Nachteil werden, nämlich dann, wenn eine Beschäftigung mit dem digitalen Messwerterfassungssystem selbst nicht erwünscht ist. Die verbreitete Arduino-Entwicklungsumgebung bietet beispielsweise nur sehr begrenzte Möglichkeiten, aufgenommene Messwerte anzuzeigen oder zu visualisieren. Der standardmäßig verfügbare serielle Monitor sowie der serielle Plotter wurden für die Fehlersuche („Debugging“) und nicht für den Unterrichtseinsatz konzipiert, und dürften jedenfalls aus einer Vielzahl von Gründen für viele, wenn nicht die meisten, unterrichtlichen Einsatzszenarien wenig geeignet sein. Eine aus didaktischen Erwägungen und auch unter Usability-Gesichtspunkten sinnvolle Trennung zwischen den technischen Vorgängen, die zur Messdatenerfassung erforderlich sind (dem „Backend“), und der Nutzeroberfläche, über die die Nutzer mit dem System interagieren (das „Frontend“), war bis vor einigen Jahren noch schwer und nur unter erheblichem Aufwand zu realisieren. Dies begrenzte den Nutzen dieser Systeme für den naturwissenschaftlichen Unterricht und ließ diese eher für den Einsatz in AGs und Wettbewerben geeignet erscheinen.

### 3. Interfaces für Mikrocontroller: Microsoft Datastreamer, phyphox und MIT App Inventor

Seit einiger Zeit werden insbesondere im Kontext von Internet of Things (IoT), Smart Home und Industrie 4.0 Entwicklungsumgebungen auch für Konsumenten und Bildungsinstitutionen verfügbar, die es ohne größeren Aufwand ermöglichen, Messwerte von Mikrocontroller-Boards zu mobilen Endgeräten oder Desktop-Computern zu übertragen und ansprechende grafische Nutzeroberflächen zu gestalten. Populäre Beispiele hierfür bieten die Arduino IoT Cloud, Thingsboard, Node-Red, phyphox, Microsoft Datastreamer oder MIT App Inventor. In gewissem Sinne und bis zu einem gewissen Grad verbinden diese Schnittstellen die Vorteile von mobilen Endgeräten – verfügbar, vertraut, motivierend – mit jenen von Mikrocontrollern: flexibel, kostengünstig, transparent.

Drei der zuvor genannten Schnittstellen, Microsoft Datastreamer, phyphox und MIT App Inventor, werden im Folgenden genauer vorgestellt und ihre Vor- und Nachteile diskutiert. Diese Schnittstellen zeichnen sich dadurch aus, dass die zugrundeliegenden

Anwendungen bereits im schulischen Unterricht etabliert sind und dass sich in Kombination dieser Lösungen verschiedene unterrichtliche und außerunterrichtliche Einsatzszenarien abdecken lassen. Da Mikrocontroller, wie der Arduino, gegenüber Einplatinencomputern, wie dem Raspberry Pi, einfacher zu programmieren und generell robuster sind und zudem einen größeren Kostenvorteil bieten, wird die Messwerterfassung mit Einplatinencomputern nachfolgend nicht weiter betrachtet.

Um einen Vergleich der mit den Schnittstellen realisierbaren Nutzeroberflächen zu erleichtern, wurde ein Minimalbeispiel bestehend aus Mikrocontroller, Ultraschall-Abstandssensor und LED realisiert (s. Abb. 1). Die vom Abstandssensor aufgezeichneten Daten wurden vom Mikrocontroller zum Endgerät übertragen, wohingegen die LED durch ein Bedienelement auf der Nutzeroberfläche gesteuert werden kann.

### 3.1. Microsoft Datastreamer

Bei Microsoft Datastreamer handelt es sich um ein 2015 von Microsoft veröffentlichtes Add-In für Microsoft Office 365, das es ermöglicht, eine Verbindung zu einem Microcontroller-Board über die serielle Schnittstelle herzustellen (vornehmlich via USB-Kabel; es gibt aber auch drahtlose Konnektivitätslösungen wie „Serial over Bluetooth“). Daten können so in Echtzeit vom Microcontroller in ein Tabellenblatt (und zurück) übertragen werden. Ein großer Vorzug dieses Ansatzes besteht darin, dass Microsoft Excel ein im Physikunterricht ohnehin weitverbreitetes Werkzeug zur Aufnahme und Auswertung von Messdaten darstellt und dass alle Auswertungs- und Analysewerkzeuge von Excel zur Verfügung stehen. Darüber hinaus ist keine separate Installation des Tools erforderlich, da es standardmäßig mit Office 365 ausgeliefert wird. Auch fallen keine weiteren Kosten für die Nutzung des Add-Ins an. Als Nachteil muss genannt werden, dass Microsoft Datastreamer

nur für die Windows-Desktop-Version von Office 365 verfügbar ist – mobile Geräte oder Microsoft Office für Mac werden nicht unterstützt – und dass es nicht mit älteren Versionen von Microsoft Excel verwendet werden kann.

In praktischer Hinsicht läuft die Nutzung von Datastreamer so ab, dass zunächst das Add-In unter „Datei – Optionen – Add-Ins – COM-Add-Ins“ aktiviert werden muss. Dies führt dazu, dass ein weiteres Ribbon in der Menüleiste von Excel sichtbar wird, mit dem die Verbindung zum Mikrocontroller hergestellt werden kann. Hardwareseitig ist ein geeigneter Mikrocontroller erforderlich, der aufgenommene Messdaten in einem vorgegebenen Format über die serielle Schnittstelle sendet. Ein einfaches Beispiel ist in Abb. 2 zu sehen: Die Daten des Ultraschall-Entfernungssensors werden in ein Excel-Tabellenblatt übertragen und über der Zeit aufgetragen. Weitere Details zu den verwendbaren Mikrocontrollern sowie zur praktischen Nutzung von Datastreamer sind unter [10-12] zu finden.

Über die reine Übertragung von Messdaten hinaus können mit Microsoft Excel und Datastreamer auch sehr hochwertige grafische Nutzeroberflächen und interaktive Experimentierumgebungen geschaffen werden. Excel stellt hierzu als Teil der Entwicklerwerkzeuge zahlreiche Bedien- und Anzeige-Elemente wie Schaltflächen, Dropdown-Listen etc. zur Verfügung, deren Funktionalität allerdings mittels der Office-eigenen Programmiersprache „Visual Basic for Applications“ implementiert werden muss.

Einen Eindruck davon, was prinzipiell möglich ist, zeigen die Beispiele, die Microsoft in Kooperation mit der NASA für die Hacking STEM-Initiative realisiert hat [13]. In diesem Projekt wurden mehr als zwanzig Unterrichtsbausteine entlang der Next Gene-



**Abb. 1:** Minimalbeispiel: Mikrocontroller, LED und Ultraschall-Abstandssensor zur Demonstration der Kommunikation zwischen Mikrocontroller und Endgerät für verschiedene Schnittstellen

ration Science Standards entwickelt, die in technischer Hinsicht auf Datastreamer beruhen und teils sehr aufwendig gestaltet wurden.

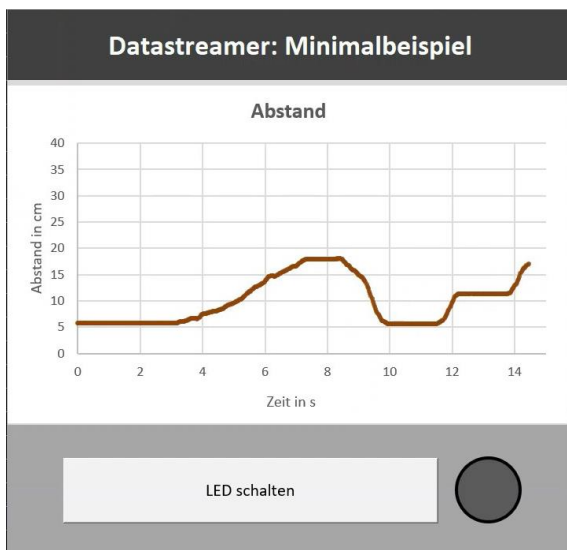


Abb. 2: Benutzeroberfläche zum Minimalbeispiel in Microsoft Datastreamer

### 3.2. phyphox Arduino BLE-Bibliothek

Die von der RWTH Aachen entwickelte App phyphox [14] ist im Physikunterricht bereits verbreitet und dafür konzipiert, die Sensoren eines Smartphones oder Tablets (Android oder iOS) auszulesen und die so erhobenen digitalen Messwerte zu visualisieren.

Mit der Veröffentlichung der phyphox Arduino BLE-Bibliothek [15-16] ist es nun darüber hinaus möglich geworden, Messdaten von einem Mikrocontroller mittels Bluetooth an ein mobiles Endgerät zu übertragen und in der phyphox-App aufzuzeichnen und darzustellen. Dies erweitert das Einsatzspektrum der App erheblich.

Die grundsätzliche Vorgehensweise besteht darin, Messwerte mit einem geeigneten Mikrocontroller und (fast) beliebigen externen Sensoren zunächst zu erheben und im zweiten Schritt per Bluetooth-Low-Energy an ein mobiles Endgerät in die phyphox-App zu übertragen. Die Nutzung von Bluetooth-Low-Energy als Übertragungsmedium impliziert, dass nur solche Mikrocontroller-Boards eingesetzt werden können, die diese Technologie beherrschen. Insbesondere das weitverbreitete Arduino-Uno-Board kann aus diesem Grund nicht verwendet werden. Stand 2023 werden fünf Mikrocontroller-Boards unterstützt: Arduino Nano 33 BLE, -IoT und -Sense, die senseBox sowie ESP32-Mikrocontroller-gestützte Boards.

Ein Beispiel für die Verwendung der phyphox BLE-Bibliothek zeigt Abb. 3: Wie im vorhergehenden Beispiel wurde der Abstand zu einem Objekt mithilfe eines Ultraschall-Entfernungssensors gemessen, die Messdaten an das Smartphone übertragen und in der phyphox-App visualisiert.

Weitere Hinweise zur Nutzung der phyphox BLE-Bibliothek sind [12, 15-17] zu entnehmen.

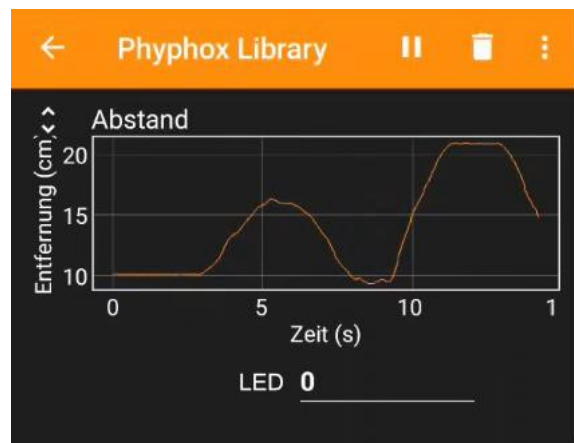


Abb. 3: Benutzeroberfläche zum Minimalbeispiel in der phyphox-App

### 3.3. MIT App Inventor

MIT App Inventor [18] ist eine blockbasierte Entwicklungsumgebung, die zur Erstellung von Apps für mobile Endgeräte dient. Die Entwicklungsumgebung selbst ist webbasiert und besteht aus zwei komplementären Ansichten: In der „Designer“-Ansicht der App werden Anzeige- und Bedienelemente wie z.B. Bilder, Diagramme, Schaltflächen, Schieberegler oder auch Sensoren hinzugefügt. In der „Block-Editor“-Ansicht wird das Verhalten der verschiedenen Elemente dann mithilfe einer blockbasierten Programmiersprache festgelegt. Die in der Entwicklung befindlichen Apps können mittels der „MIT AI2-Companion“-App auf dem eigenen Smartphone getestet und nach Fertigstellung entweder über den google Play-Store veröffentlicht oder zu .apk-Dateien kompiliert und mittels QR-Code verbreitet werden. Eine Verwendung mit iOS ist derzeit nur testweise mit der Companion App möglich, ein Build-Server für iOS ist aber schon seit längerer Zeit in Planung.

MIT App Inventor verfolgt einen universellen Ansatz und ist daher nicht primär für die Erstellung von Apps zur Messdatenerfassung ausgelegt. Der Hauptzweck von MIT App Inventor besteht darin, Schülerinnen und Schülern eine niedrigschwellige Einführung in die Programmierung von Apps für mobile Endgeräte zu bieten. Da App Inventor aber auch über Werkzeuge zur Erstellung von Diagrammen verfügt und über die Bluetooth-Schnittstelle eines Smartphones kommunizieren kann, ist es mit App Inventor möglich, eigene Apps zur Messwernerfassung und -visualisierung zu kreieren. Ein Beispiel gibt wiederum die Ultraschall-Abstandsmessung (s. Abb. 4), wobei die Datenübertragung und Visualisierung dieses Mal mithilfe von MIT App Inventor realisiert wurde.

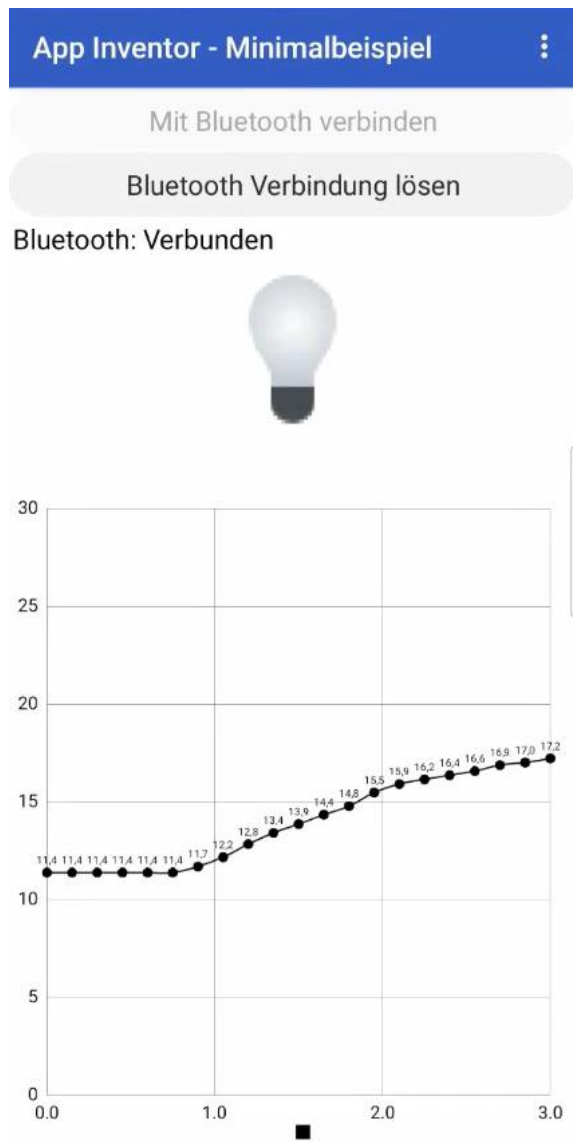


Abb. 4: Benutzeroberfläche zum Minimalbeispiel in MIT App Inventor

#### 4. Mikrocontroller als Werkzeug zur digitalen Messwerterfassung im Physikunterricht?

Zusammenfassend stellen Schnittstellen wie Datastreamer, phyphox und MIT App Inventor eine interessante Alternative zur digitalen Messwerterfassung mit Messwerterfassungssystemen von Lehrmittelherstellern dar, die bestehende Ansätze komplementieren können. Insbesondere die Trennung von Frontend und Backend und die damit einhergehende Möglichkeit, ansprechende und didaktisch sinnhafte grafische Nutzeroberflächen zu gestalten, zeichnen diese Systeme aus – bei vergleichsweise geringen Kosten und einer hohen Flexibilität hinsichtlich der zu erhebenden physikalischen Größen. Die Abwägung, ob und welches der Systeme zum Einsatz kommen soll, wird einerseits von technischen Rahmenbedingungen abhängen – Datastreamer für Windows-Desktop-Computer, phyphox Arduino BLE-Bibliothek oder MIT App Inventor für mobile Endgeräte –

aber auch von den didaktischen Zielstellungen und organisatorischen Rahmenbedingungen.

Für den regulären Unterricht scheinen in Anbetracht von Entwicklungsaufwand und Zuverlässigkeit Datastreamer oder phyphox geeignet, während MIT App Inventor im Kontext digitaler Messwerterfassung seinen Platz eher in AGs oder Wettbewerben finden könnte. Insbesondere für App Inventor gilt, dass es zwar sehr flexibel einsetzbar ist, da es die Entwicklung einer vollständigen App erlaubt, dass aber im Umkehrschluss der Programmieraufwand erheblich ist und dass die Stabilität der so generierten Apps nicht immer den Erwartungen entspricht. Andererseits wird MIT App Inventor aktiv weiterentwickelt und durch eine Arbeitsgruppe am MIT gepflegt, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich Stabilität und Funktionsumfang in Zukunft weiter verbessern.

#### 5. Literatur

- [1] Becker, S., Bruckermann, T., Finger, A., Huer, J., Kremser, E., Meier, M., Thoms, L.-J., Thyssen, C., & von Kotzebue, L. (2020). Orientierungsrahmen Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften – DiKo-LAN. In S. Becker, J. Meßinger-Koppelt, & C. Thyssen (Hrsg.), *Digitale Basiskompetenzen – Orientierungshilfe und Praxisbeispiele für die universitäre Lehramtsausbildung in den Naturwissenschaften*, (S. 14-43). Hamburg: Joachim Herz Stiftung. [https://www.joachim-herz-stiftung.de/fileadmin/Redaktion/Projekte/Naturwissenschaften/2020\\_Nawi\\_Digitale\\_Basiskompetenzen\\_web.pdf](https://www.joachim-herz-stiftung.de/fileadmin/Redaktion/Projekte/Naturwissenschaften/2020_Nawi_Digitale_Basiskompetenzen_web.pdf) (Stand 05/2023)
- [2] Lück, S. & Wilhelm, T. (2023). Messwerte aufnehmen und verarbeiten – In: Wilhelm, T. (Hrsg.): *Digital Physik unterrichten. Grundlagen, Impulse, Perspektiven*. Hannover: Klett Kallmeyer, S. 14-39.
- [3] Kurth, C., Walpert, D., & Wodzinski, R. (2019). Digitale Messwerterfassung im Kontext digitaler Bildung. *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/965/1087> (Stand 05/2023)
- [4] Hütz, S., Staacks, S., Stampfer, C., & Heinke, H. (2018). Gelingensbedingungen von Innovationen in der Hochschullehre am Beispiel des Einsatzes der App phyphox. *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/860/999> (Stand 05/2023)
- [5] Wilhelm, T. & Kuhn, J. (Hrsg.) (2022). *Für alles eine App: Ideen für Physik mit dem Smartphone* (1. Aufl. 2022). Berlin Heidelberg: Springer.

- [6] Kuhn, J. (2017). Smartphones, Tablets & Co. im Physikunterricht: Lehren und Lernen mit mobilen digitalen Medien von heute und morgen – In: Meßinger-Koppelt, J., Schanze, S. & Groß, J. (Hrsg.): Messwerte aufnehmen und verarbeiten. Hamburg: Joachim Herz Stiftung Verlag, S. 10-13.
- [7] Kuhn, J., & Vogt, P. (2019). Physik ganz smart. New York: Springer Spektrum.
- [8] Wiesner, H. (Hrsg.) (2018). Arduino. Plus Lucis 1/2018.
- [9] Girwidz, R. & Watzka, B. (Hrsg.) (2018). Arduino, Raspberry Pi & Co. Alltagsphysik und Messtechnik verstehen mit digitalen Werkzeugen. Naturwissenschaften im Unterricht Physik, 29 (167). Hannover: Friedrich Verlag.
- [10] <https://support.microsoft.com/de-de/office/was-ist-datenstreamer-1d52ffce-261c-4d7b-8017-89e8ee2b806f>  
(Stand 05/2023)
- [11] <https://github.com/microsoft/HackingSTEMSamples/blob/master/DataStreamerSample/DataStreamerSample.ino>  
(Stand 05/2023)
- [12] Bernstein, F. & Wilhelm, T. (2023): Digitale Messwerterfassung mit Mikrocontrollern und digitalen Endgeräten. Interaktive Dashboards mit Datastreamer und phyphox gestalten. Plus Lucis 3/2023.
- [13] <https://learn.microsoft.com/en-us/training/educator-center/instructor-materials/hacking-stem>  
(Stand 05/2023)
- [14] <https://phyphox.org/>  
(Stand 05/2023)
- [15] <https://phyphox.org/arduino/>  
(Stand 05/2023)
- [16] <https://github.com/phyphox/phyphox-arduino>  
(Stand 05/2023)
- [17] Dorsel, D., Staacks, S., Pusch, A. & Loch, M. (2023). Sensordaten drahtlos zur Smartphone-App phyphox übertragen und grafisch auswerten - ein einfaches Beispiel mit dem ESP32 und dem Ultraschallsensor HC-SR04. MNU Journal 76 (1), S. 36-43.
- [18] <https://appinventor.mit.edu/>  
(Stand 05/2023)