Naturwissenschaften im Unterricht Physik

Digital Physik unterrichten

Grundlagen, Impulse und Perspektiven

Thomas Wilhelm (Hrsg.)

Klett Kallmeyer

Download-Material

Thomas Wilhelm (Hrsg.)

Digital Physik unterrichten
Grundlagen, Impulse und Perspektiven

Klett | Kallmeyer

In diesem Fachbuch gibt es redaktionelle Hinweise auf digitale Angebote von Drittanbietern. Die Angebote wurden vor Veröffentlichung auf ihre schulische Eignung geprüft. Eine fortlaufende Prüfung der Drittinhalte auf ihre Rechtmäßigkeit und Aktualität ist dem Verlag nicht möglich. Daher obliegt jeder Lehrkraft vor dem Einsatz eine Prüfung auf Zulässigkeit für die Verwendung im Unterricht.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Impressum

Thomas Wilhelm (Hrsg.)
Digital Physik unterrichten
Grundlagen, Impulse und Perspektiven

1. Auflage 2023
Das E-Book folgt der Printausgabe: 1. Auflage 2023

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede Nutzung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlages.

© 2023. Kallmeyer in Verbindung mit Klett
Friedrich Verlag GmbH
D-30159 Hannover
Alle Rechte vorbehalten.
www.friedrich-verlag.de

Redaktion: Dirk Haupt, Leipzig
Realisation: Frederieke Ruberg
E-Book-Erstellung: Friedrich Verlag GmbH, Hannover

ISBN: 978-3-7727-1701-7

Thomas Wilhelm (Hrsg.)

Digital Physik unterrichten

Grundlagen, Impulse und Perspektiven

Klett | Kallmeyer

1 Vorwort ... **7**
1.1 Digitaler Physikunterricht ... 7

2 Messen ... **13**
2.1 Messwerte aufnehmen und verarbeiten ... 14
2.1.1 Was ist „digitale Messwerterfassung"? ... 14
2.1.2 Warum die Messwerte digital erfassen? ... 15
2.1.3 Technik von Messwerterfassungssystemen ... 17
2.1.4 Übersicht über Hard- und Software gängiger Messwerterfassungssysteme ... 22
2.1.5 Verwendung von Messwerterfassungssystemen ... 28
2.1.6 Zum Einsatz digitaler Messwerterfassung im Unterricht ... 36
2.2 Bewegungen analysieren mittels digitaler Videoanalyse ... 40
2.2.1 Die Idee und ihre Vorläufer ... 40
2.2.2 Wie wird eine Videoanalyse von Bewegungen durchgeführt? ... 42
2.2.3 Didaktische Vorteile der Videoanalyse ... 52
2.2.4 Übersicht über Videoanalyse-Apps und Software ... 60
2.2.5 Stroboskopbilder ... 63
2.3 Interaktive Bildschirmexperimente im Unterricht einsetzen ... 71
2.3.1 Das kennzeichnet ein Interaktives Bildschirmexperiment (IBE) ... 71
2.3.2 Interaktive Bildschirmexperimente im historischen Rückblick ... 76
2.3.3 Welche Arten von IBE gibt es? ... 78
2.3.4 Der Einsatz von IBE im Physikunterricht ... 81
2.3.5 Praktische Tipps und Beispiele zum Einsatz von IBE ... 88
2.4 Dreidimensional drucken im Physikunterricht ... 97
2.4.1 Additive Fertigung und 3D-Druck: Grundlagen ... 97
2.4.2 Hintergrund: 3D-Druck in der Bildung – Vom Making zum schulischen Unterricht ... 101
2.4.3 3D-Druck im Physikunterricht: Begründung, Klassifikation, Best-Practices ... 104
2.4.4 3D-Druck im Physikunterricht: Praktische Hinweise ... 110

3 Simulieren ... **118**
3.1 Mit Simulationen experimentieren ... 119
3.1.1 Interaktive Simulationen ... 119
3.1.2 Gedanken zur unterrichtlichen Nutzung ... 122
3.1.3 *CK-12*, *PhET* und mehr ... 127
3.1.4 Fazit und Ausblick ... 136
3.2 In virtuellen Welten eigene Ideen verfolgen ... 140
3.2.1 Was sind Simulationsbaukästen? ... 140
3.2.2 Was sind virtuelle Welten? ... 142
3.2.3 Grundlegende Nutzungsarten ... 145

3.3 Bewegungen (mathematisch) modellieren 155
3.3.1 Was versteht man unter mathematischer Modellbildung? 155
3.3.2 Arten von Modellbildungssoftware 156
3.3.3 Argumente für den Unterrichtseinsatz 162
3.3.4 Unterrichtsbeispiele 163
3.3.5 Literaturempfehlungen zum Weiterlesen 173
3.4 In Virtual und Augmented Reality experimentieren 177
3.4.1 Immersive Technologien 177
3.4.2 Digitale Experimentierumgebungen 179
3.4.3 Präsenzerleben und Visualisierungen 181
3.4.4 Apps und Entwicklungsumgebungen 182
3.4.5 Beispiele 186
3.4.6 Weiterführende Literatur 190

4 Präsentieren und Austauschen 192
4.1 Mit Lernplattformen unterrichten 193
4.1.1 Begriffe und Definitionen 193
4.1.2 Didaktisches Potenzial von Online-Plattformen 196
4.1.3 Online-Plattformen für den Physikunterricht 197
4.1.4 Auf dem Weg zu einer umfassenden Bildungsplattform 206
4.2 Angepasst unterrichten mit Schüler-Feedback-Systemen 210
4.2.1 Feedback für effektives Lernen vs. Diagnose für effektives Feedback 210
4.2.2 Was wir von unseren Lernenden wissen wollen 212
4.2.3 Die richtigen Fragen finden 214
4.2.4 Das geeignete Werkzeug finden 216
4.2.5 Ausgewählte Tools 219
4.2.6 Schülerfeedback im Unterricht umsetzen 225
4.3 Aus Erklärvideos lernen 230
4.3.1 Warum Physik aus Erklärvideos lernen? 230
4.3.2 Was kann man aus Erklärvideos lernen? 231
4.3.3 Wie kann man aus Erklärvideos lernen? 233
4.3.4 Chancen beim Lernen aus Erklärvideos 237
4.3.5 Fallstricke beim Lernen aus Erklärvideos 238
4.3.6 Auf den Punkt: Wie sollte man Erklärvideos in den Unterricht einbetten? 239

Autorenverzeichnis 245

Bildquellenverzeichnis 247

Download-Material 248

1 Vorwort

Thomas Wilhelm

1.1 Digitaler Physikunterricht

„Digitaler Physikunterricht“ ist hier eine Kurzform für „digital gestützter Physikunterricht“. Wie hier erklärt werden wird, geht es in diesem Buch um den Einsatz digitaler Medien als Werkzeuge im Physikunterricht. Das bedeutet also nicht, dass der Unterricht rein digital stattfindet, sondern dass entsprechende Medien eingesetzt werden. Desktopcomputer, Laptops, Tablets, Smartphone und Einplatinenrechner werden dabei alle unter dem Begriff Computer subsumiert.

Ein Überblick

Bereits in den 1980er-Jahren wurden Computer im Physikunterricht eingesetzt. Mitte der 1980er-Jahren konnte der Heimcomputer Commodore 64, kurz C64, in Schulen in größerer Stückzahl zu einem erschwinglichen Preis gekauft werden. Im Physikunterricht konnten einfache Simulationen ablaufen (siehe Kapitel 3.1), mit der Programmiersprache Basic mit der „Methode der kleinen Schritte“ Bewegungen modelliert werden (siehe Kapitel 3.3) und mit angesteckten AD-Wandlern physikalische Größen (z. B. mit der Software PAKMA für den C64, Heuer 1988) gemessen und grafisch dargestellt werden (siehe Kapitel 2.1). Gerade Physiklehrkräfte galten als besonders computeraffin.

Mittlerweile hat sich viel verändert. Digitale Medien haben sich stark verbreitet, sind im Alltag selbstverständlich geworden und haben in alle Schulfächer Einzug gehalten. Im Physikunterricht gibt es viel mehr Arten des Einsatzes digitaler Medien und das Angebot an Software ist unüberschaubar geworden. Gerade für den Physikunterricht wurde viel spezielle Software programmiert, die ganz spezifische Einsatzmöglichkeiten bietet. Um den Überblick zu erleichtern und etwas Ordnung in die Nutzungsmöglichkeiten zu bringen, ist eine Kategorisierung der Einsatzmöglichkeiten nötig, die recht unterschiedlich ausfallen kann.

Mehrere Naturwissenschaftsdidaktiker haben gemeinsam intensiv überlegt, welche fachspezifischen digitalen Basiskompetenzen für die universitäre Lehramtsausbildung in den Naturwissenschaften wichtig sind (Becker Meßinger-Koppelt & Thyssen 2020). Unter Berücksichtigung diverser Vorarbeiten wurden sieben Kompetenzbereiche beschrieben, genannt DiKoLAN.

Diese Bereiche haben jeweils mit einer bestimmten Art des Einsatzes digitaler Medien zu tun. So stehen die sieben Kompetenzbereiche in gewisser Weise z. T. auch für sieben Arten digitaler Werkzeuge. Die Kompetenzbereiche gemäß dem DiKoLAN sind: Dokumentation, Präsentation, Kommunikation / Kollaboration, Recherche / Bewertung, Messwerterfassung / Datenerfassung, Datenverarbeitung, Simulation / Modellierung.

Kompetenzbereiche gemäß dem DiKoLAN

Der Kompetenzbereich „Dokumentation" beschreibt Kompetenzen zur systematischen Ablage und dauerhaften Speicherung von Daten, wie sie bei der Vorbereitung, Durchführung, Nachbereitung und Klassenführung anfallen. Dazu gehört nicht nur, Informationen strukturiert zu sichern und zu archivieren, sondern auch Fotos, Bilder und Videos zu bearbeiten und verschiedene Medien zu kombinieren. Beim Kompetenzbereich „Präsentieren" geht es um die Fähigkeit, mit digitalen Medien Inhalte zu präsentieren und zu kommunizieren. Neben der Beherrschung der Medien und der Kenntnisse von Präsentationsformen sowie Vor- und Nachteilen gehört dazu auch, Schülerinnen und Schülern an diesen Einsatz heranzuführen. Der Kompetenzbereich „Kommunikation und Kollaboration" beschäftigt sich mit der Kommunikation zwischen den Lernenden und kollaborativem Arbeiten von Lernenden, indem ihnen ermöglicht wird, gemeinsame Dateien und Produkte zu erstellen. Dazu müssen gemeinsame Datenpools angelegt und entsprechende Systeme zur Rechtevergabe genutzt werden. Zum Kompetenzbereich „Recherche und Bewertung" gehört neben technischen Fertigkeiten für eine Internetrecherche insbesondere die Fähigkeit, Informationen zu bestimmten Themen bzw. Fragestellungen zu finden und zu bewerten. Beim Kompetenzbereich „Messwert- und Datenerfassung" geht es darum, mit Sensoren und Programmen Messdaten zu erheben, aber auch Messwerte aus Bildern oder Videos zu gewinnen. Dagegen geht es im Kompetenzbereich „Datenverarbeitung" darum, digitale Daten weiter zu verarbeiten, wozu die Berechnung weiterer Größen, statistische Analysen und die Aufbereitung der Ergebnisse gehören. Schließlich geht es im Kompetenzbereich „Simulation und Modellierung" sowohl darum, vorgefertigte Simulationen geschickt und sachgerecht im Physikunterricht einzusetzen, als auch darum, selbst computergestützte Modellierungen zu erstellen bzw. erstellen zu lassen.

Aus der Beschreibung der sieben Bereiche wird deutlich, dass es sich bei den ersten vier Bereichen um allgemeine Kompetenzen handelt, die für alle Schulfächer relevant sind (Dokumentation, Präsentation, Kommunikation / Kollaboration und Recherche / Bewertung). Die letzten drei Bereiche sind dagegen fachspezifische Kompetenzen für die Naturwissenschaften (Mess-

werterfassung / Datenerfassung, Datenverarbeitung und Simulation / Modellierung). Messwert- bzw. Datenerfassung und Datenverarbeitung kann man auch zusammenfassen, da es im Physikunterricht in der Regel die Messwerte sind, die erfasst und dann mit der gleichen Software weiterverarbeitet werden. Damit bleiben zwei große fachspezifische Bereiche, die typische Einsatzarten digitaler Medien im Physikunterricht sind: Messen und Simulieren.

Inhalte und Ziele des Buches

Das Besondere am Physikunterricht ist, dass digitale Geräte als spezifische Werkzeuge eingesetzt werden. Um diese physikspezifischen Tools soll es in diesem Buch gehen. Software, die in vielen verschiedenen Fächern einsetzbar ist, kann aus Platzgründen nicht thematisiert werden. Dieses Buch möchte deshalb keine Aspekte behandeln, die für alle Schulfächer gelten, sondern nur das vorstellen, was speziell für den Physikunterricht gilt, denn hier gibt es schon sehr viel. Wie dargestellt, sind die zwei großen fachspezifische Einsatzarten digitaler Medien im Physikunterricht das Messen und das Simulieren. Entsprechend sind dies zwei große Kapitel des Buches.

Allerdings wird es drei Ausnahmen geben, die das Präsentieren und Austauschen betreffen, da diese beim Physiklernen eine gewisse Bedeutung erlangt haben und es hierzu einiges Physikspezifisches gibt. Dies sind E-Learning-Plattformen, Schülerfeedbacksysteme und Erklärvideos, die alle im vierten Kapitel vorgestellt werden.

Digital gestützter Physikunterricht hat natürlich auch Auswirkungen auf die verwendeten Sozialformen, die eingesetzten methodischen Großformen bzw. Organisationsformen und auf Formen der Aktion und Interaktion. Da diese Überlegungen aber für alle Schulfächer gelten, werden sie hier ausgeklammert. Des Weiteren ermöglichen digitale Tools auch bezüglich der Inhalte andere Unterrichtskonzeptionen (Wilhelm et al. 2021) und andere Themen. Auch darauf kann aus Platzgründen nicht eingegangen werden.

Das Buch möchte *Grundlagen* digitaler Werkzeuge im Physikunterricht aufzeigen: Was sind die Grundideen? Was sind die technischen Funktionsprinzipien? Was sind die physikdidaktischen Ideen? Welche Vorteile verspricht man sich? Welche Ziele können auf welche Weise verfolgt werden? In diesem Kontext soll auch jeweils kurz auf die historische Entwicklung eingegangen werden.

Schließlich sollen Lehrkräften *Impulse* für ihren Physikunterricht gegeben werden: Was ist heute möglich? Welche Varianten gibt es? Welche Software gibt es? Wo findet man Materialien, Software oder Literatur? Die Hardware ist heute oft vorhanden, aber es fehlt das Wissen, was damit alles möglich ist. Das wiederum ist nicht verwunderlich, da es kaum entsprechende Fortbildungen gibt.

Damit sollen Lehrkräften *Perspektiven* aufgezeigt werden, was in ihrem Physikunterricht denkbar ist. Es geht nicht nur darum, in den bestehenden Unterricht einzelne kleine Vorschläge aufzunehmen. Hier vorgestellte Ideen können den Unterricht grundlegend verändern, um so digital gestützt Physik zu unterrichten.

Physikdidaktische Arbeitsgruppen arbeiten auch an neuen Ideen und entwickeln neue Software und Einsatzmöglichkeiten. Solche Möglichkeiten, die jetzt aktuell noch nicht eingesetzt werden können, sondern Visionen für die Zukunft sind, sollen in diesem Buch jedoch ausgeklammert werden. Es geht darum, für die Lehre für Studierende und Referendare aufzuzeigen, was aktuell möglich ist. Und es geht darum, Referendaren und Lehrkräften Anregungen für den aktuellen Unterricht zu geben. Wir wissen, dass die Entwicklung digitaler Medien schnell geht und damit in einigen Jahren hier neuere Entwicklungen fehlen werden. Gewisse Grundideen bleiben jedoch immer gleich.

Theorien zum Lernen mit digitalen Medien

Um die Lernwirksamkeit des Computereinsatzes, aber auch mögliche Lernschwierigkeiten fundiert verstehen zu können, ist es hilfreich, Theorien zum Lernen mit digitalen Medien zu kennen. Diese sind wiederum fachunabhängig und für deren Darstellung ist kein Platz vorhanden. Dennoch sollen ein paar Hinweise gegeben werden.

Die „cognitive load"-Theorie (CTL) betont, dass die kognitive Verarbeitungskapazität des Arbeitsgedächtnisses begrenzt ist und dies bei der Unterrichtsgestaltung berücksichtigt werden muss (Chandler & Sweller 1991; Sweller 1994, 2011). Das Informationsangebot muss deshalb so strukturiert werden, dass der Arbeitsspeicher möglichst wenig belastet wird und so genügend Ressourcen für das Lernen vorhanden sind, wobei die kognitive Belastung allgemein vom Vorwissen und von kognitiven Fähigkeiten abhängt, sodass es hilfreich sein kann, dass unterschiedlichen Lernern unterschiedliche Darstellungen angeboten werden. Ungewohnte bildliche Darstellungen können durch ihre hohe kognitive Belastung dem inhaltlichen Verstehen im Wege stehen, während verbale Zusatzinformationen und farbliche Codierungen die kognitive Belastung reduzieren können. Auch durch Übung wird weniger Anstrengung für die Verarbeitung der Information notwendig.

Die Cognitive Theory of Multimedia Learning (CTML) nach Mayer (1999, 2003) geht von einem visuellen System zur Erzeugung visuellen Wissens und einem verbalen System für verbales Wissen aus, wobei die beiden Arbeitsgedächtnisspeicher jeweils eine begrenzte Kapazität haben, woraus verschiedene Prinzipien multimedialen Lernens abgeleitet werden (Urhahne et al. 2000; Mayer & Moreno 2003). Nach dem Multimediaprinzip ist es förderlich, wenn

Text- und Bildinformationen parallel angeboten werden. Nach dem Kontiguitätsprinzip müssen zusammengehörige Texte und Bilder räumlich und zeitlich gemeinsam dargeboten werden. Nach dem Modalitätsprinzip sollten Erklärungen nicht als Text auf dem Bildschirm, sondern in gesprochener Form als mitlaufender Kommentar gegeben werden, sodass verschiedene Aufnahmekanäle benutzt werden. Das Kohärenzprinzip besagt, dass nichtsachbezogene Informationen möglichst ausgeblendet werden sollen. Und das Redundanzprinzip besagt, dass das Lernen mit bewegten Bildern, die mit gesprochenem Text kommentiert sind, durch die zusätzliche schriftbasierte Darstellung desselben Textes erschwert wird. Das Personalisierungsprinzip besagt, dass eine persönliche Ansprache das Lernen unterstützen kann.

Das Design-Funktionen-Aufgaben-Rahmenmodell (englisch: Design, Functions, Tasks [DeFT] Framework) zum multimedialen Lernen von Ainsworth (1999, 2006, 2008) geht davon aus, dass neben Bildern und Texten mit Diagrammen, Formeln, Tabellen etc. weitere Repräsentationen (Darstellungen) verwendet werden, bei denen verschiedene Funktionen unterschieden werden. Die komplementäre Funktion besagt, dass relevante Informationen auf verschiedene Repräsentationen aufgeteilt werden sollten, wenn eine einzelne Repräsentation, die alle Informationen enthält, zu kompliziert zu verstehen ist. Die beschränkende Funktion besagt, dass eine vertraute Darstellung die Interpretation einer anderen, weniger vertrauten Darstellung so einschränken kann, dass Unklarheiten aufgelöst werden können. Der Aufbau eines tieferen Verständnisses des Lerninhaltes wird durch die Integration verschiedener Darstellungen ermöglicht.

Die Untersuchungen und Ergebnisse der Lernpsychologen zum Lernen mit Multimedia haben jedoch häufig das Lernen von einzelnem deklarativem Wissen im Blick, während es der Physik um das Lernen und Anwenden von Prinzipien und Konzepten geht. Deshalb sind nicht alle diese Theorien komplett auf das Lernen von Physik übertragbar.

Literatur

Ainsworth, S. (1999). The functions of multiple representations. Computers & Education, 33, 131 – 152. doi:10.1016/S0360-1315(99)00029-9.

Ainsworth, S. (2006). DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. Learning and Instruction, 16 (3), 183 – 198. doi:10.1016/j.learninstruc.2006.03.001.

Ainsworth, S. (2008). The educational value of multiple-representations when learning complex scientific concepts. J. K. Gilbert, M. Reiner & M. Nakhleh (Hrsg.). Visualization: Theory and practice in science education (S. 191 – 208). Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-1-4020-5267-5_9.

Becker, S.; Meßinger-Koppelt, J. & Thyssen, C. (Hrsg.) (2020). Digitale Basiskompetenzen. Orientierungshilfe und Praxisbeispiele für die universitäre Lehramtsausbildung in den Naturwissenschaften, Joachim Herz Stiftung.

Chandler, P. & Sweller, J. (1991). Cognitive load theory and the format of instruction. Cognition and Instruction, 8 (4). 293 – 332.

Heuer, D. (1988). Computer-Versuchs-Analyse, Messen und Analysieren von Versuchsabläufen mit der Programmierumgebung PAKMA. W. Kuhn (Hrsg.). Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1988 Gießen. Gießen: Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuss Didaktik der Physik. 304 – 309.

Mayer, R. E. (1999). Multimedia aids to problem-solving transfer. International Journal of Educational Research, 31, 611–624. doi:10.1016/S0883-0355(99)00027-0.

Mayer, R. E. (2003). The promise of multimedia learning: Using the same instructional design methods across different media. Learning and Instruction, 13 (2), 125 – 139. doi:10.1016/S0959-4752(02)00016-6.

Mayer, R. E. & Moreno, R. (2003). Nine Ways to Reduce Cognitive Load in Multimedia Learning. Educational Psychologist, 38 (1), 43 – 52. doi:10.1207/S15326985EP3801_6.

Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulties, and instructional design. Learning and instruction 4 (4). 295 – 312.

Sweller, J.; Ayres, P. & Kalyuga, S. (2011). Cognitive Load Theory. New York: Springer. doi:10.1007/978-1-4419-8126-4.

Urhahne, D.; Prenzel, M.; Davier, M.; Senkbeil, M. & Bleschke, M. (2000). Computereinsatz im naturwissenschaftlichen Unterricht – Ein Überblick über die pädagogisch-psychologischen Grundlagen und ihre Anwendung. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 6, 157 – 186.

Wilhelm, T.; Schecker, H. & Hopf, M. (Hrsg.) (2021). Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Berlin/Heidelberg: Springer-Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-662-63053-2.

2 Messen

Mit Beiträgen von:
Sebastian Becker, Fabian Bernstein, Alexander Gößling, Oliver Keller, Jürgen Kirstein, Jochen Kuhn, Stephan Lück, Volkhard Nordmeier & Thomas Wilhelm

Stephan Lück & Thomas Wilhelm

2.1 Messwerte aufnehmen und verarbeiten

Die digitale Erfassung eines Messsignals erfolgt durch Sensoren, deren Ausgangsspannungen über einen AD-Wandler in digitale Werte umgewandelt werden. Nach einer Erklärung, um was es geht (2.1.1), werden didaktische Vorteile (2.1.2) aufgezeigt. Ausführlich wird auf die technische Verarbeitung der Signale eingegangen (2.1.3). Die Kenntnis hierüber ist insbesondere hilfreich bei einer Beurteilung von Messwerten, um Falschmessungen oder Fehldeutungen zu verhindern. Es folgt eine Übersicht über gängige Messwerterfassungssysteme, die für Einsatz im schulischen Rahmen geeignet sind (2.1.4). Anschließend werden Aspekte vorgestellt, die man für einen gelungenen Einsatz digitaler Messwerterfassung beachten sollte (2.1.5). Den Abschluss bildet ein Abschnitt mit didaktischen Hinweisen und Möglichkeiten für den Einsatz digitaler Messwerterfassung im Rahmen des Schulunterrichts (2.1.6).

2.1.1 Was ist „digitale Messwerterfassung“?

Ein „digitales Messwerterfassungssystem“ ist ein System, das mittels Sensoren physikalische Größen misst, die Messwerte auf digitalen Datenträgern speichert und weiterverarbeitet, d. h. es werden daraus weitere physikalische Größen berechnet und die Ergebnisse dargestellt. Zu einem solchen System gehört eine Hardware sowie eine Software, die die Messung, Berechnung und Darstellung steuert. Für verschiedene physikalische Messgrößen werden dabei verschiedene Sensoren verwendet. Die Messwerte sowie die Darstellungen können abgespeichert und später wieder aufgerufen werden. Werden dagegen von einem Experimentierenden auf einem analogen oder digitalen Messgerät physikalische Größen abgelesen und diese in einen Computer eingegeben, um daraus neue Daten zu berechnen bzw. um sie digital darzustellen, ist das keine digitale Messwerterfassung, sondern lediglich eine digitale Messdatenverarbeitung, um die es hier nicht geht.

Historisch gesehen fing die digitale Messwerterfassung im Physikunterricht in den 1980er-Jahren an. Damals benutzte man einen AD-Wandler, der eine zu messende analoge Spannung in ein digitales Signal umwandelte, das ein Computer verarbeiten konnte. Wollte eine Lehrkraft eine andere physikalische Größe als die Spannung messen, musste sie sich überlegen, wie sie eine dazu proportionale Spannung erzeugen kann (Spannung am ohmschen Widerstand für Stromstärkemessung, Spannung am temperaturabhängigen Widerstand für Temperaturmessung und Spannung am Tachogenerator für

Geschwindigkeitsmessung). Ab den 1990er-Jahren gab es dann von Lehrmittelfirmen große Messboxen, an die Sensoren für die jeweilige Größe angeschlossen wurden. Ab den 2000er-Jahren konnte dann jeder Sensor einzeln per USB an den Computer angeschlossen werden und gegen Ende des Jahrzehnts konnten Sensoren ihre Daten per Funk (Bluetooth, eigener Funk oder WLAN) an den Computer senden (Scheler & Wilhelm 2009). Mittlerweile können diese Sensoren auch zusammen mit einem Smartphone oder Tablet verwendet werden. Außerdem können die vielen Sensoren, die im Smartphone bzw. Tablet verbaut sind, mit der gleichen Software der Lehrmittelhersteller oder mit diversen anderen Apps ausgelesen werden (Kuhn & Vogt 2019; Wilhelm & Kuhn 2022). Vermehrte Aufmerksamkeit bekommen aktuell auch Einplatinenrechner, wie der Arduino oder der Raspberry Pi.

2.1.2 Warum die Messwerte digital erfassen?

Werden Messdaten von einem Messgerät abgelesen, notiert und wird dann daraus ein Diagramm erzeugt, dann dauert das sehr lange und der physikalische Zusammenhang, der untersucht werden soll, gerät im Physikunterricht aus dem Blick. So wie man im Mathematikunterricht die Multiplikation großer Zahlen oder das Wurzelziehen vom Taschenrechner viel schneller machen lässt, kann man die Messwerterfassung von einem digitalen System machen lassen. Der Unterricht wird dadurch von langweiligen Routinearbeiten wie dem Zeichnen von Diagrammen entlastet, und die für die Messwerterfassung benötigte Unterrichtszeit verkürzt sich. Diese Zeit kann zur Interpretation der Ergebnisse, zur Diskussion ihrer Bedeutung oder für andere Lernaktivitäten zur intensiven Auseinandersetzung mit der entsprechenden Physik verwendet werden. Möglich ist auch, die Versuche zur Kontrolle zu wiederholen, sie mit anderen Parametern ablaufen zu lassen oder ähnliche Versuche durchzuführen. So richtet sich der Fokus mehr auf die physikalischen Gesetzmäßigkeiten und weniger auf den Messprozess. Fragen der Lernenden und offene Fragestellungen können dabei leicht messend verfolgt werden.

Bei konventionellen Messungen liegen oft nur wenig Messwerte vor, sodass es nicht unbedingt überzeugend ist, dass diesen ein behaupteter Zusammenhang zugrunde liegt. Bei einer digitalen Messwerterfassung werden dagegen viel mehr Messwerte erfasst. Zudem ist es möglich, dass sie genauer erfasst werden – was aber nicht unbedingt so sein muss. Eine hohe Abtastrate ermöglicht die Messwertaufnahme sehr schneller Vorgänge wie Stöße oder Einschalt- bzw. Einschwingvorgänge. Andererseits können auch langsam ablaufende Prozesse von langer Dauer wie Temperaturverläufe oder radioaktive Zerfälle in Langzeitmessungen erfasst werden, ohne dass es jemand überwachen muss.

Moderne Messwerterfassungssysteme bieten viele verschiedene Möglichkeiten an, die Daten zu präsentieren, da meist verschiedene Darstellungsformen auswählbar sind. So können multiple externe Repräsentationen des Experimentes eingesetzt werden (Krey & Schwanewedel 2018). Dazu zählen neben Fotos und Videos insbesondere Diagramme, Formeln, Tabellen oder Animationen der Messwerte. Werden physikalische Größen durch bewegte bildhafte Darstellungen wie Pfeile oder Säulen dargestellt, spricht man von dynamisch ikonischen Repräsentationen. Dadurch, dass die grafische Darstellung der Messwerte in Echtzeit möglich ist, kann die Darstellung leichter verstanden und besser mit dem Experiment verknüpft werden.

Digitale Messwerterfassungssysteme bieten viele verschiedene Auswertemöglichkeiten an. Wurden mehrere physikalische Größen gemessen oder errechnet, können diese nicht nur in Abhängigkeit der Zeit dargestellt werden, sondern jede Größe kann über eine beliebig andere dargestellt werden. Leicht können Steigungen oder Flächen unter einem Graphen ermittelt werden, ohne dass dazu spezielle mathematische Fähigkeiten nötig sind. Ausgleichskurven oder Fitkurven können schnell berechnet und eingezeichnet werden.

Die digitale Messwerterfassung und -verarbeitung ist aus unserer heutigen technischen Welt nicht mehr wegzudenken. So gehört es auch zur Allgemeinbildung, von diesen Möglichkeiten, ihren Chancen und Grenzen etwas zu wissen. Dass heute in der Hochschulphysik Messdaten nur noch so erfasst werden, sei nur am Rande erwähnt.

Dadurch, dass man bei einem Experiment viele verschiedene physikalische Größen gleichzeitig messen und sofort eine Vielzahl von verschiedenen Diagrammen haben kann, besteht aber auch die Gefahr, im Unterricht zu schnell vorwärtszugehen. Lernende können den Überblick verlieren und erfassen dann möglicherweise nicht, was aus welchem Grund gemacht wurde. Gerade das Lesen und Interpretieren von Diagrammen ist für Lernende nicht leicht und braucht Unterstützung und Zeit. Und schließlich sollen Schülerinnen und Schüler im Physikunterricht auch lernen, Tabellen und Diagramme selbst zu erstellen, sodass dies zumindest anfangs exemplarisch auch von Hand durchgeführt werden sollte, um zu verstehen, was der Computer tut.

Die Messwerterfassungssysteme von Lehrmittelfirmen sind meist recht intuitiv benutzbar und bieten viele Möglichkeiten. Anderseits sind sie meistens recht kostenintensiv. Verwendet man dagegen Smartphones oder Tablets mit ihren internen Sensoren können klassische Demonstrationsexperimente zu Schülerexperimenten werden. Außerdem sind Messungen in authentischen Kontexten außerhalb des Physikraumes möglich. Entsprechende Messungen können Lernende mit ihrem eigenen Smartphone überall durchführen, da sie ihr digitales Messwerterfassungssystem einschließlich der Sensoren immer dabeihaben (Kuhn & Vogt 2019).

In diesem Zusammenhang ist der „Bring your own device“-Ansatz (BYOD-Ansatz) von Interesse. Gemeint ist damit, dass die Lernenden ihre eigenen digitalen Geräte (z. B. Smartphones) mit in den Physikunterricht bringen und unter Anleitung durch die Lehrkraft Messwerte digital erfassen. Schließlich besitzt ohnehin fast jeder Lernende ein solches Gerät (JIM-Studie 2021 des Medienpädagogischen Forschungsverbundes Südwest). Hilfreich ist es dann, wenn es eine App sowohl für Android als auch für iOS-Systeme gibt. Alternativ können auch zwei Lernende mit einem Android-Gerät arbeiten.

Auch Einplatinenrechner ermöglichen mobile Messungen und eine hohe Alltagsorientierung (Girwidz & Watzka 2018). Zudem sind sie sehr kostengünstig in der Anschaffung. Das Messwerterfassungssystem ist dabei weniger eine Blackbox und es werden weitere Kompetenzen durch eine einfache Programmierung gefördert.

2.1.3 Technik von Messwerterfassungssystemen

Damit von einem digitalen Endgerät (PC, Tablet, Smartphone) Messwerte einer physikalischen Größe verarbeitet werden können, müssen Signale in eine für das Gerät verarbeitbare, also digitale Datenform übertragen werden. Dieser recht simpel klingende Satz enthält gleich mehrere Vorgänge und daraus resultierende Bedingungen, deren Eigenschaften insbesondere für die Anwendung von großer Bedeutung sind.

Generell gilt bei einer Beurteilung von Messwerten – auch schon bei klassischer Messtechnik –, dass das Wissen um die Messung wesentlich für die Beurteilung ist. Während der Bereich von Messunsicherheiten, etwa durch die Genauigkeit des Messgerätes, vielen Anwendern zumindest grundsätzlich bekannt und teils auch geläufig ist, ist der Komplex der Messartefakte, also durch die Messung hervorgerufene Falschmessungen oder Fehldeutungen, oft unbekannt. Grundsätzlich stellt sich bei einem Messvorgang immer die Frage, ob und inwieweit die aufgenommenen Daten eine adäquate Annäherung an die physikalische Wirklichkeit wiedergeben. Um diese Frage angemessen beurteilen zu können, ist ausreichendes Wissen über den Messprozess vonnöten.

Messwertumwandlung in digitale Daten

Bei der hier besprochenen digitalen Messwerterfassung kommen neue Aspekte hinzu, die im Wesentlichen durch die technische Realisierung der Messwertumwandlung in digitale Daten gegeben sind. Artefakte, die durch die Datenübertragung (z. B. durch verlustbehaftete Datenkomprimierung) hervorgerufen werden, spielen im schulischen Kontext keine Rolle und werden daher hier nicht weiter thematisiert.

Wie im Abschnitt 2.1.1 angedeutet, besteht die Messdatenumwandlung aus zwei wesentlichen Schritten (siehe Abbildung 1). Computer sind elektrisch arbeitende Geräte. Daher muss die physikalische Größe zunächst in eine elektrische Größe (meist die elektrische Spannung) umgewandelt werden. Dies geschieht durch sogenannte Sensoren, die eine elektrische Eigenschaft haben müssen, die von der zu messenden physikalischen Größe in irgendeiner Weise abhängt. Gegebenenfalls muss die resultierende elektrische Größe mithilfe einer passenden elektrischen Schaltung noch in eine Spannung umgewandelt werden, die dann für den nächsten Schritt, der *Analog-Digital-Wandlung* (kurz *AD-Wandlung*) durch einen sogenannten *ADC (= analog digital converter)* benötigt wird. Oftmals geschieht diese Datenumwandlung in periodischen Zeitabständen bzw. mit einer bestimmten Aufnahmerate (= Umwandlungen pro Zeiteinheit). Die nach diesem Wandlungsschritt angefallenen Daten werden dann in das digitale Endgerät eingelesen, was über verschiedene Übertragungswege (kabelgebunden oder drahtlos) und unterschiedliche Datenübertragungsprotokolle geschehen kann. Mithilfe passender Software können anschließend die übertragenen Messdaten in vielfacher Art und Weise dargestellt (z. B. Tabelle, Grafik) und weiterverarbeitet werden (z. B. Ausgleichsgerade). In einigen Geräten, insbesondere in Smartphones, sind Sensoren für bestimmte Größen (z. B. Beschleunigung) und AD-Wandler bereits fest eingebaut. Das hier dargestellte Grundprinzip ist jedoch identisch.

Im Folgenden sollen die technischen Grundlagen des Wandlungsvorgangs von analog zu digital erörtert werden. Das Verständnis ist für die Anwendung und die Beurteilung der Messergebnisse zentral, da durch die Wandlung Artefakte auftreten können, die in bestimmten Fällen einen großen Einfluss auf die Messdaten haben.

Diskretisierung

Die Umwandlung einer analogen Messgröße (z. B. Spannung) in digitale Messwerte (die sogenannte Digitalisierung) ist immer auch eine Diskretisie-

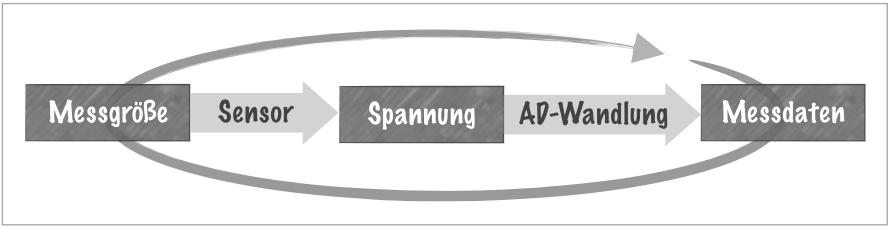

Abb. 1: Ablauf der digitalen Messwertaufnahme

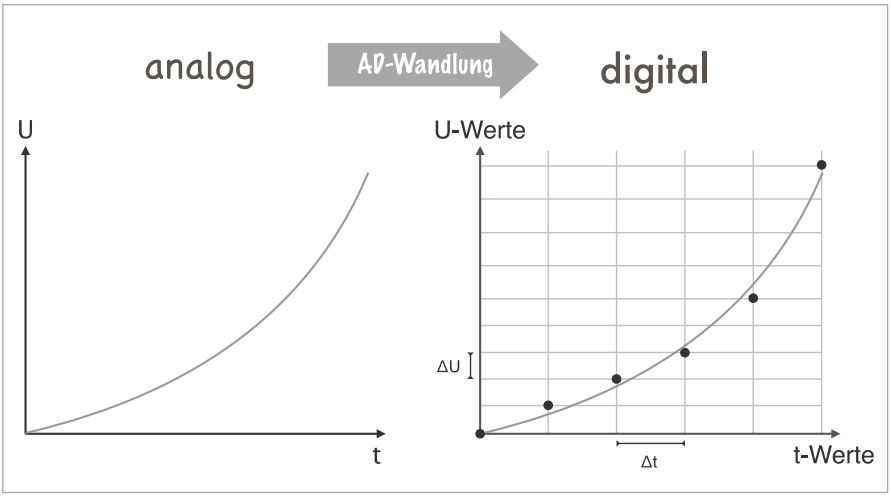

Abb. 2: Entstehung der Granulation bei der Wandlung analoger Messgrößen in digitale Messwerte

rung, d. h. die möglichen, kontinuierlichen analogen Werte werden auf eine endliche Zahl möglicher digitaler Werte in gewissen Abständen reduziert. Das liegt daran, dass digitale Geräte mit diskreten Zuständen arbeiten (insbesondere Darstellung der Zahlen durch 0 und 1). Im Unterschied zur analogen Welt gibt es hier, egal wie man den Zahlenbereich wählt, immer einen endlich großen Unterschied zwischen zwei Werten. Dies gilt sowohl für die zeitliche als auch die Messgrößenkomponente. In der Abbildung 2 erkennt man, dass durch die Diskretisierung der kontinuierliche Graph in eine Abfolge von Punkten (Messwerten) übergeht, die recht grobkörnig ist (Begrenzung durch minimales Δt und ΔU), und demzufolge die Punkte nicht exakt auf der Kurve liegen können.

Da es aus technischen Gründen nicht möglich ist, diesen kleinsten Unterschied zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten oder Messwerten beliebig klein zu machen, kann die Digitalisierung zu unerwünscht ungenauen Ergebnissen führen. Man muss sich also im Klaren sein, welche technischen Randbedingungen ein vorliegendes digitales Messwerterfassungssystem besitzt.

Aufnahmerate

Die für den schulischen Bereich relevanten Geräte besitzen maximale Aufnahmeraten aktuell bis hin zu 1 MHz und damit einen kleinsten Zeitabstand zweier Messwerte von $\Delta t = 1$ µs. Nun ist es auch nicht sinnvoll, immer die größtmögliche Aufnahmerate zu wählen, da hierdurch möglicherweise so viele Messwerte anfallen, dass sie nicht mehr verarbeitet werden können

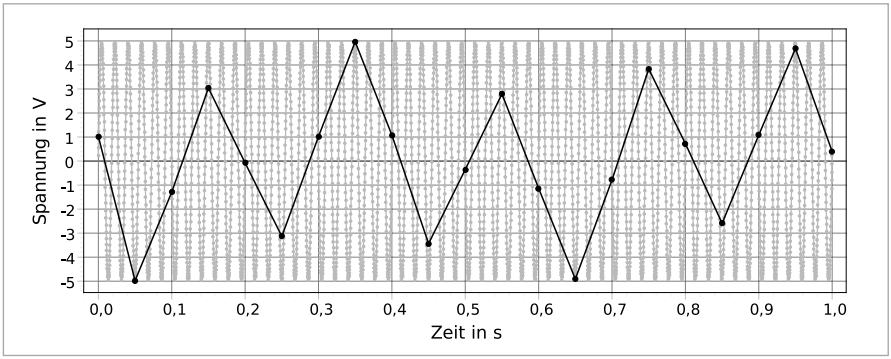

Abb. 3: Aliasingeffekt bei der Messung einer elektrischen Schwingung bei zu geringer Aufnahmerate (grau: Aufnahmerate 1 kHz, schwarz: 2 Hz)

(bei 1 MHz sind das immerhin 1 Million Messpunkte pro Sekunde). Man muss dann die Messzeit entsprechend kurz einstellen, was jedoch zur Folge haben kann, dass der Vorgang nicht vollständig aufgenommen werden kann. Wählt man hingegen die Aufnahmerate zu klein (und damit die Schrittweite zu groß), dann ist im Extremfall der Vorgang schon beendet, ehe ein Messwert aufgenommen wurde (z. B. Entladen eines Kondensators). Sehr wichtig ist also, sich *vor* der Messung zu überlegen, wie lange ein zu messender Vorgang dauert, und das Gerät so zu wählen (oder ggf. per Software so einzustellen), dass passend viele Messwerte mit der passenden Aufnahmerate aufgenommen werden (Faustregel: 20 bis 30 Messungen pro Schwingung bei einem gleichmäßig periodischen Vorgang).

Besonders möchten wir auf sogenannte Aliasing-Artefakte aufmerksam machen, die auftreten, wenn im abzutastenden Signal Frequenzanteile vorkommen, die größer als die halbe Aufnahmerate (sog. *Nyquist-Frequenz*) sind. In einem solchen Fall treten Schwingungsmuster auf, die fälschlicherweise als sinnvolles Messergebnis gedeutet werden können, wenn man nicht genau aufpasst. Im Beispiel der Abbildung 3 würde man eine langsame Schwingung vermuten (schwarz), obgleich die zu messende Schwingung viel hochfrequenter ist (grau). Bei nicht-harmonischen Signalen können auch völlig andere Schwingungsmuster auftreten, die ebenfalls nichts mit dem Originalsignal zu tun haben. Bei der Messung einer periodisch sich verändernden Größe ist also sorgfältig auf die geeignete Wahl der Aufnahmerate (z. B. nach Faustregel oben) zu achten. Falls die Größenordnung der zu messenden Schwingung nicht bekannt ist, sollte man immer Kontrollmessungen mit höherer Aufnahmerate machen, um Aliasing-Artefakte und damit eine Fehldeutung auszuschließen.

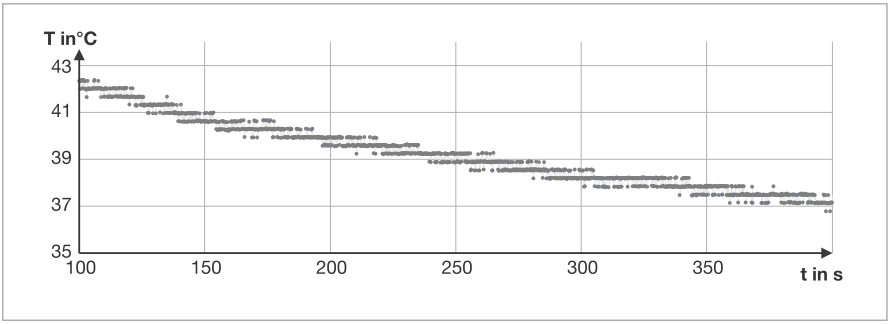

Abb. 4: Beispiel für ungünstige Messbereichswahl bei der Aufnahme des Temperaturverlaufs bei Abkühlung aufgewärmter Luft (Sensorbereich 0 °C bis 1200 °C). Auf der Temperaturachse sind die Stufung und das Flippen zwischen den Stufen durch Messrauschen deutlich erkennbar.

Rasterung der Messwerte

Auch bei der Digitalisierung der Messwerte selbst ist es wichtig zu wissen, wie diese Umsetzung im Prinzip funktioniert, denn auch hier können fehlerhafte Interpretationen von Ergebnissen auftreten. Wie in Abbildung 2 ersichtlich, gibt es auch auf der Hochachse eine gewisse Rasterung, denn grundsätzlich werden in einem elektrischen AD-Wandler die angelegten Spannungswerte in einen ganzzahligen Digitalwert transformiert (Die Darstellung in der Mess-Software gibt die Werte wiederum bezogen auf den Messbereich mit „Kommazahlen" an; dies suggeriert damit lediglich einen kontinuierlichen Zahlenbereich). Die Rasterung hängt stark von den Eigenschaften der verwendeten Messhardware ab. Zum einen ist hier die Samplingtiefe oder Bittiefe und zum anderen der durch eine vorgeschaltete Elektronik gegebene Messbereich ausschlaggebend. Der Messbereich wird in die durch die Samplingtiefe vorgegebenen Schritte eingeteilt. Typische Samplingtiefen sind 8, 12, 16 usw. Bit, was dann $2^8 = 256$, $2^{12} = 4096$ bzw. $2^{16} = 65636$ Schritten entspricht (So betragen bei einem Messbereich von 0 V bis 100 V die kleinsten messbaren Unterschiede bei 8 Bit nun 100 V / 256 ≈ 390 mV, bei 12 Bit ca. 24,4 mV und bei 16 Bit ca. 1,52 mV). Wählt man nun einen zu großen Messbereich, so wird die Stufung der AD-Umwandlung unmittelbar durch Stufen im Diagramm sichtbar und es gehen Details im Signalverlauf verloren (siehe Abbildung 4). Ebenso kann es vorkommen, dass man glaubt, es liegt kein Signal an (falls das zu messende Signal kleiner ist als die kleinste Stufe). Man erkennt in diesem Fall anhand des typischen stufenförmigen Verlaufs (keine Zwischenwerte) im Diagramm deutlich besser als bei dem oben angesprochenen Aliasing-Effekt, dass die Einstellungen (oder das verwendete Gerät) nicht zum Messproblem passen. Falls der AD-Wandler nicht per Software adäquat eingestellt werden kann (meist, weil es die Hardware nicht hergibt), hilft

hier möglicherweise ein geeigneter externer Vorverstärker (Hintergrund: Die in der Software wählbaren Messbereiche werden schaltungstechnisch ebenso durch Vorverstärker realisiert, die dann eingebaut sind).

2.1.4 Übersicht über Hard- und Software gängiger Messwerterfassungssysteme

Unter einem Messwert-Erfassungs*system* wollen wir hier eine Kombination aus Hard- und Software verstehen, die es erlaubt, vielfältige Messgrößen digital zu erfassen und weiterzuverarbeiten. Diese Systeme kann man nach Endgerätearten einteilen. Man findet Messwertsysteme, die eigenständig als sogenannte Stand-Alone-Geräte betrieben werden, sowie solche für Computer (Desktop-PC oder Notebook) und auch für mobile Endgeräte (Handy, Tablet). Sehr interessant sind auch Messvorrichtungen, die auf Einplatinenrechnern (wie z. B. Arduino, Raspberry-Pi) basieren, da sie recht günstig und selbst herzustellen sind.

Eigenständige Messwerterfassungssysteme

Einige Hersteller bieten Messwerterfassungssysteme an, die eigenständig, das heißt ohne digitales Endgerät, betrieben werden können. Solche Geräte sind an Mobilgeräte angelehnt, beinhalten also eine Rechnereinheit sowie einen Bildschirm und Eingabemöglichkeiten. Hinzu kommt ein eingebautes Interface mit AD-Wandler zum Anschluss von Mess-Sensoren (i. d. R. über USB oder Bluetooth) und eine fest installierte Mess-Software. Solche Geräte eignen sich besonders für den mobilen Einsatz oder für Schülerexperimente. Es gibt Geräte, die ihre aktuelle Aktivität (z. B. aktueller Bildschirminhalt) per WLAN weitergeben. Bei Schülerexperimenten ist dies besonders wertvoll, da die Lehrkraft so die Messungen der Experimentiergruppen direkt live beobachten und bei Fehlern eingreifen kann.

Messwerterfassungssysteme für PC

Dieses ist die historisch älteste Art, Messwerte digital zu erfassen. Nahezu jede Lehrmittelfirma bietet ein eigenes System zur Messwerterfassung mit dem Computer an (siehe Abbildung 6, S. 27). In der Regel werden hier aktuell (Jahr 2023) die Messinterfaces per USB an den Computer angeschlossen, in wenigen Fällen auch kabellos per WLAN oder über Bluetooth. Oft werden verschieden aufwendige Interfaces angeboten, an denen ein oder mehr Sensoren betrieben werden können und die unterschiedliche Zusatzfunktionen bieten können, wie zum Beispiel eine einstellbare Spannungsausgabe oder Schaltfunktionen, um einen Messaufbau zu steuern.

Ebenfalls sind die Kenndaten (Samplerate, Wandlungs-Bittiefe und Messverstärkung) bei den angebotenen Systemen recht unterschiedlich. So variiert die

maximale Samplerate der Interfaces (nicht des Sensors!) von 20 kS/s bis hin zu 1 MS/s (S/s = Samples pro Sekunde = Messergebnisse pro Sekunde), die Bittiefe liegt zwischen 12 Bit ≙ 4.096 Schritte und 16 Bit ≙ 65.536 Schritte. Auch sollte man ein besonderes Augenmerk auf die jeweiligen Messbereiche legen, da sie zusammen mit der Schrittweite die minimal messbaren Werte einer Messgröße bestimmen. Manche Anbieter bieten hier (ohne Zusatzverstärkung) eine Auflösungsgrenze von ca. 24 µV (bzw. 7 µA) an, während andere Systeme lediglich eine Auflösung von 5 mV (bzw. 0,5 mA) haben. Der Unterschied ist mit Faktor etwa 200 (bzw. 70) beträchtlich und kann durchaus den Unterschied zum Gelingen oder Nichtgelingen einer Messung ausmachen.

Eine besondere Form eines Messwerterfassungssystems ist ein Spektrometer, das per USB an den PC angeschlossen werden kann. Hier ist der Sensor eine Digitalkamera, die in das Interface eingebaut ist. Vor der Kamera ist ein optisches Gitter angebracht, das die räumliche Aufspaltung des Lichts bewirkt. Die Kamera nimmt anschließend das entstandene Bild auf und die passende Messsoftware erlaubt über eine (oft automatische) Bildanalyse die Darstellung des Intensitätsverlaufs bezüglich der Wellenlänge oder der Frequenz. Besonders gute Spektrometer erlauben neben der Wellenlängenkalibrierung auch eine Kalibrierung der Intensität. Dies erlaubt es nicht nur, die Wellenlängen von Emissions- bzw. Absorptionslinien zu bestimmen, sondern auch quantitative Aussagen über das gesamte Strahlungsspektrum zu machen (z. B. Nachweis des Wien'schen Verschiebungsgesetzes).

Der besondere Vorteil eines solchen fertigen Messwerterfassungssystems für Computer liegt neben den oft besseren technischen Daten, der besseren Verbindungsstabilität (bei kabelgebundenem Anschluss) und der Vielfalt der Experimentier-Möglichkeiten insbesondere an der zu den Messsystemen angebotenen Software desselben Herstellers. Die PC-Software ist besonders umfangreich, sodass auch aufwendigere Darstellungen gezeigt und umfangreiche Auswertungen oder komplexere Messaufgaben durchgeführt werden können. Speziell für anspruchsvolle Versuche, die vornehmlich in der Oberstufe zu finden sind, eignen sich solche Systeme oftmals besser als die im Folgenden beschriebenen.

Die Lehrmittelfirmen CMA, LD-Didactic, NeuLog, PASCO, Phywe und Vernier bieten verschiedene Messwerterfassungssysteme an. Welche Verbindungsart genutzt wird und auf welchen Systemen die Software läuft, zeigt die Abbildung 6, S. 27. Weitere Informationen erhält man auf den Webseiten entsprechender Lehrmittelfirmen.

Messwerterfassung mit einem Mobilcomputer (Tablet / Smartphone)

Im letzten Jahrzehnt hat es die Miniaturisierung in der Elektronik möglich gemacht, Rechenleistungen und aufwendige Bedienkonzepte in sehr kom-

pakten und damit mobilen, akkubetriebenen Geräten zur Verfügung zu stellen, die vorher Computern vorbehalten waren und somit ausreichen, um komfortabel und genügend genau Messaufgaben durchführen zu können. Angefangen mit den ersten Mobiltelefonen mit einer sogenannten Multitouch-Bedienung wurden in die Geräte (durch die Anwendungszwecke notwendig) verschiedene Sensoren eingebaut. Diese Sensoren bieten zwar recht geringe Aufnahmeraten (i. d. R. nur bis 200 Hertz – lediglich die Soundaufnahme liegt bei ca. 20 kHz) sowie beschränkte Messgenauigkeiten, jedoch reichen sie für viele Versuche aus der Alltagswelt, die häufig in der Mittelstufe vorkommen, durchaus aus. Als Sensoren finden sich in den Handys und vielen Tablets neben Mikrofon und Kamera auch Beschleunigungs-, Gyroskop-, Magnetfeld- oder Luftdruck-Sensoren (Wilhelm & Kuhn 2022). Im Laufe der Jahre wurden immer bessere Apps für diese Geräte veröffentlicht, die Zugriff auf die Sensor-Daten gestatten, wodurch sich ein solches Mobilgerät auch ohne externe Sensoren als Messinstrument eignet. Zum Teil können auch einfache Auswertungen mit den Apps durchgeführt werden. Für den schulischen Bereich ist aktuell besonders die App *phyphox*[1] hervorzuheben, die neben der einfachen Aufnahme der Sensordaten auch Experimentiervorschläge (insbesondere aus dem schulischen Bereich) nebst passender Datenauswertung anbietet. Die Mobilität, die große Verbreitung und die Tatsache, dass eine beachtliche Anzahl an Sensoren bereits vorhanden ist, machen Mobilgeräte besonders für Schülerversuche interessant.

Da Mobilgeräte, insbesondere Tablets, inzwischen ähnliche Rechenleistungen wie Laptop-Computer bieten, finden sich zunehmend auch umfangreichere Messsysteme für solche Geräte. Hier gibt es einerseits die Möglichkeit, Sensoren per Bluetooth direkt mit dem Gerät zu koppeln, andererseits bieten einige Unternehmen auch an, oben beschriebene, sonst mit USB zu koppelnde Interface-Boxen mit hohem Funktionsumfang per Bluetooth oder sogar WLAN an das Tablet zu koppeln (siehe Abbildung 6, S. 27). Leider hängt die zugehörige Software auf den Tablets aktuell noch (je nach System) recht weit hinter dem Funktionsumfang der Computer-Programme hinterher, sodass noch nicht alle Messaufgaben oder Auswertungen mit diesen tabletgestützten Systemen bewältigt werden können. Es scheint aber nur eine Frage der Zeit zu sein, bis diese Beschränkung fällt.

Der Unterschied zwischen direkt gekoppelten Sensoren, sogenannten SMART-Sensoren (siehe oben), und den an die Interfaces angeschlossenen Sensoren sind zu beachten. So findet man beispielsweise für Spannungsmessungen Datenübertragungsraten von maximal 1 kHz bei SMART- und bis zu 500 kHz bei WLAN-Interfaces. Wenn man bedenkt, dass es didaktisch sinn-

1 https://phyphox.org