

Digitale Messwerterfassung beim zentralen elastischen Stoß unter Einbeziehung von Reibungseffekten

- Eine präzise Analyse von Erhaltungsgrößen -

Saskia Riedel*, Frank Stallmach*

*Universität Leipzig, Institut für Didaktik der Physik, Vor dem Hospitaltore 1, 04317 Leipzig
saskia.riedel@uni-leipzig.de; stallmac@physik.uni-leipzig.de

Kurzfassung

Lehrkräfte stellen sich täglich den Herausforderungen des digitalen Wandels im Bildungssystem. Um sie bei der Erweiterung ihrer digitalen Kompetenzen und Implementierung digitaler Medien in den Physikunterricht zu unterstützen, sollten ihnen digitale Lehr-Lern-Settings zur Verfügung gestellt werden. In diesem Artikel stellen wir einen klassischen Schulversuch vor, in dem die Erhaltungsgrößen Impuls und Energie bei Stoßprozessen mit einem digitalen Messwerterfassungssystem untersucht werden. Dabei diskutieren wir die Notwendigkeit detaillierter Unterstützung von Lehrkräften beim digitalen Wandel und die Vorteile multimedialer Lernsettings mit digitalen Sensoren. Außerdem stellen wir die Durchführung und Auswertung des digitalen Schulversuches vor und ordnen abschließend dessen Einbettung im Unterricht didaktisch ein.

1. Einleitung

Spätestens seit dem 2016 vorgelegten Strategiepapier der Kultusministerkonferenz findet eine Verankerung von digitalen Medien in den Bildungsplänen statt (Kultusministerkonferenz, 08.12.2016). Fächerübergreifende und fachbezogene digitale Kompetenzen sind damit ein wesentlicher Bestandteil der curricularen Bildung an Schulen in Deutschland. Die Medien-erziehung und -bildung ist nunmehr von allen Lehrkräften im Fachunterricht umzusetzen. Aufgabe der Schulen und Universitäten ist es daher, die Lehrkräfte und Lehramtsstudierenden im Umgang mit digitalen Medien zu professionalisieren, damit diese didaktisch sinnvoll und inhaltlich reflektiert im Unterricht eingesetzt werden (Kultusministerkonferenz, 08.12.2016).

1.1. Einsatz von digitalen Medien im Unterricht

Die Unterrichtsgestaltung zur Erfüllung des Erziehungs- und Bildungsauftrages wird u.a. durch die Einstellung und lerntheoretischen Überzeugungen der Lehrenden bestimmt (Baumert & Kunter, 2006). Viele Lehrkräfte sehen die Vorteile von digitalen Medien für die Vor- und Nachbereitung sowie Durchführung des Unterrichts und sind gegenüber der Digitalisierung des Bildungssystems positiv eingestellt (Bicak, Hattermann, & Hübner, 2023), (Kurth, Walpert, & Wodzinski, 2019), (Waffner, 2020). Dennoch wird das Potential digitaler Bildung in der unterrichtlichen Praxis von Lehrenden in Deutschland nur teilweise ausgeschöpft. Dies ergaben verschiedene Studien und Lehrerbefragungen zur Verfügbarkeit, Nutzung und Selbstkompetenz von Lehrkräften in Bezug auf digitale Medien (Ikeda, 2020) (Lorenz, Yotyodying, Eickelmann, & Endberg, 2022), (Thoms & Girwidz, 2021), (Kurth, Walpert, & Wodzinski,

2019). Anhand von Interviews und Umfragen wurde festgestellt, dass eine positive Einstellung zum Einsatz digitaler Medien im (naturwissenschaftlichen) Unterricht mit den Rahmenbedingungen wie Verfügbarkeit digitaler Endgeräte und zeitlichen Ressourcen korrelieren sowie von den technischen, fachdidaktischen und medienpädagogischen Kompetenzen der Lehrenden abhängen (Härtig, H., Ostermann, A., Ropohl, M. et al., 2021), (Kurth, Walpert, & Wodzinski, 2019), (Schmechtig, Puderbach, Schellhammer, & Gehrman, 2020). Besonders signifikant für den Medieneinsatz ist die Überzeugung von Lehrpersonen, ob digitale Medien die Lernprozesse von Lernenden fördern oder deren Kompetenzerwerb hemmen (Waffner, 2020), (Kurth, Walpert, & Wodzinski, 2019). Es ist daher zielführend Lehrkräfte mittels Fortbildungen bei der Erweiterung ihrer medienpädagogischen Kompetenzen und durch die Bereitstellung von bausteinartig einsetzbaren, digitalen Lehr-Lern-Sequenzen bei der Umsetzung eines modernen Physikunterrichts zu unterstützen.

1.2. Multimediales Lernen im Physikunterricht

Digitale Medien sind aus lerntheoretischer Sicht wichtige Elemente zur Unterstützung von Lernprozessen von Schülerinnen und Schülern. Diese ermöglichen den Lernenden einen multimedialen Zugang zum Lerngegenstand, sodass zwei voneinander getrennte Sinneskanäle gleichzeitig bei der Informationsverarbeitung angesprochen werden (Mayer, 2014). Auditive/verbale und visuelle/bildliche Reize werden z.B. bei der digitalen Messwerterfassung synchron angesteuert, da ein reales Experiment beobachtet und zeitgleich die Änderung von physikalischen Größen numerisch oder graphisch veranschaulicht wird. Um eine Überlastung des Arbeitszeitgedächtnisses zu vermeiden, müssen bei der Entwicklung von

digitalen Lehr-Lern-Sequenzen die Gestaltungsprinzipien von multimedialen Lernangeboten berücksichtigt werden (Mayer, 2014) (Sweller, 1988). Die Lernwirksamkeit multimedialer Lehr-Lern-Settings konnte z.B. beim experimentellen Einsatz von Smartphones in der Anfangsphase des Physik-Lehramtsstudiums (Kaps, Splith, & Stallmach, 2021) oder von Tablet-PC-gestützter Videoanalyse im Mechanikunterricht der Sekundarstufe II nachgewiesen werden (Becker, Klein, Gößling, & Kuhn, 2019).

1.3. Chancen digitaler Lernangebote

Werden digitale Lernangebote gemäß multimedialer Gestaltungsprinzipien entwickelt, können auch im Physikunterricht komplexere Themen wie Erhaltungsgrößen bei Stoßprozessen unter Berücksichtigung von Reibungseffekten präzise analysiert werden. Im Vergleich zu konventionellen Schulversuchen mittels Videoanalyse oder Gabellichtschranken lassen sich mit digitalen Messwerterfassungssystemen Stoßprozesse recht einfach und zeiteffektiv analysieren, sodass die kognitiven Ressourcen der Lernenden überwiegend für die computergestützte Auswertung der Messdaten und die Verknüpfung ihres Vorwissens mit neuen Lerninhalten zur Verfügung stehen (Lück & Wilhelm, 2023). Somit können zentrale Basiskonzepte wie Energie- und Impulserhaltung an Stoßprozessen empirisch untersucht und leichter in die bestehende physikalisch-mathematische Wissensstruktur im Bereich der Kinematik und Dynamik integriert werden. Neben einer vertieften fachlichen Betrachtung von Stoßprozessen werden auch die digitalen Handlungskompetenzen der Lernenden gefördert, da ein reflektierter und sinnhafter Umgang mit digitalen Endgeräten im Rahmen einer computergestützten Auswertung und graphischen Darstellung der Messwerte ermöglicht wird.

Eine Experimentiermethode zur präzisen Analyse eines zentralen elastischen Stoßes mittels digitaler Messwerterfassung, welche die Reibungseffekte einbezieht, stellen wir nachfolgend vor und diskutieren deren Integrationsmöglichkeiten in den Physikunterricht. Dabei werden die Erhaltungsgrößen Energie und Impuls sowie der Zusammenhang zwischen Kraftstoß und Impulsänderung untersucht und die Ergebnisse mit Angabe der Messunsicherheiten vorgestellt.

2. Physikalische Grundlagen

In einem abgeschlossenen System mit n Körpern bleiben im reibungsfreien Fall der Gesamtimpuls \vec{p} und die Gesamtenergie E erhalten.

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \text{const} \quad \text{bzw.} \quad \frac{d}{dt} \vec{p} = 0 \quad \{1\}$$

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \text{const} \quad \text{bzw.} \quad \frac{d}{dt} E = 0 \quad \{2\}$$

Dabei lassen sich Impuls und kinetische Energie eines Körpers gemäß Gleichung 3 und 4 berechnen.

$$\vec{p}_i = m_i \cdot \vec{v}_i \quad \{3\}$$

$$E_{i,kin} = \frac{m_i}{2} v_i^2 \quad \{4\}$$

Da der zentrale elastische Stoß zweier Körper eine eindimensionale Bewegung ist, kann zur didaktischen Reduktion auf die Vektordarstellung verzichtet werden. Somit folgen aus den Gleichungen 1 bis 4 für die Wechselwirkung von zwei Körpern in einem abgeschlossenen System die nachfolgenden Gleichungen, wobei u für die Geschwindigkeiten vor dem Stoß und v für jene nach dem Stoß stehen:

$$m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2 = m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 \quad \{5\}$$

$$\frac{m_1}{2} \cdot u_1^2 + \frac{m_2}{2} \cdot u_2^2 = \frac{m_1}{2} \cdot v_1^2 + \frac{m_2}{2} \cdot v_2^2 \quad \{6\}$$

Bei der Wechselwirkung von zwei aufeinanderstoßenden Körpern findet ein Kraftstoß statt. Die dabei wirkenden Kräfte sind gemäß des 3. Newtonschen Axioms betragsmäßig gleich groß, zeigen aber in entgegengesetzter Richtung. Durch Integration der Kraft F nach der Zeit t erhält man den Kraftstoß I , welcher der Impulsänderung Δp_i jedes Körpers entspricht.

$$\int F_i dt = I_i \quad \Delta p_i = I_i \quad \{7\}$$

Ein Kraftstoß findet bei realen Bewegungsvorgängen auch aufgrund der Reibung statt, weshalb die Geschwindigkeiten von Körpern bei Stoßprozessen zeitabhängig sind. Bei einer Rollbewegung auf gerader Fahrbahn sind die Reibungskräfte mit ausreichender Genauigkeit als konstant anzunehmen und wirken in entgegengesetzter Richtung zur momentanen Bewegung. Die Stoßpartner erfahren demnach eine konstante Beschleunigung von $-a_r$ und es gilt das folgende Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz für beide Wagen.

$$v(t) = -a_r \cdot t + v_0 \quad \{8\}$$

3. Vorstellung der Experimentiermethode

Digitale Messwerterfassungssysteme wie die Smart Carts (PASCO Scientific Inc., USA) oder die Digi-Carts (PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, Deutschland) besitzen kabellose Sensoren, mit denen mehrere physikalische Größen zeitgleich aufgenommen und graphisch dargestellt werden. So können in einem Schulversuch zum zentralen elastischen Stoß zweier massegleicher Wagen die Impuls- und Energieerhaltung sowie der Zusammenhang zwischen Kraftstoß und Impulsänderung untersucht werden. Der Versuchsaufbau mit zwei massegleichen Rollwagen ist in Abbildung 1 dargestellt.

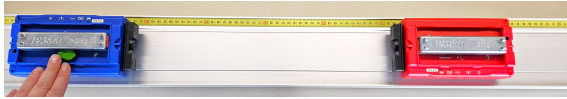


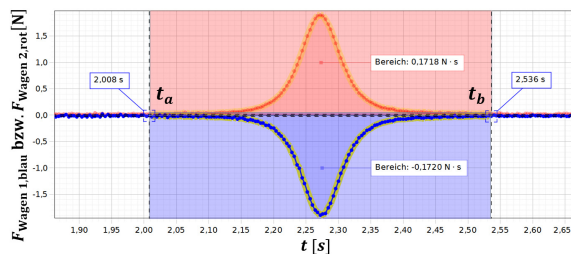
Abb. 1: Versuchsaufbau zum zentralen elastischen Stoß mit zwei massegleichen Rollwagen und Rollbahn

Die Rollwagen, an welchen sich Permanentmagnet-Puffer befinden, stehen sich mit den Kraftsensoren gegenüber. Die zeitsynchrone Datenaufzeichnung für die Kraft- und Positionssensoren wird gestartet und Wagen 1 in Bewegung versetzt, sodass er auf den in Ruhe befindlichen Wagen 2 stößt. Mit den Positionssensoren werden die Geschwindigkeiten der Rollwagen und mit deren Kraftsensoren die beim Stoß auf sie wirkenden Kräfte zeitsynchron und mit hoher zeitlicher Auflösung gemessen. Die während des Experiments aufgezeichneten Daten werden unmittelbar am Computer mit der zu den Rollwagen gehörigen Software (PASCO Capstone) graphisch dargestellt. Abbildung 2 zeigt das aufgenommene Kraft-Zeit-Diagramm beider Wagen. Die aus dem Positionssensor durch numerische Differentiation berechneten Geschwindigkeits-Zeitkurven sind in Abbildung 3 bzw. 4 dargestellt. Im Folgenden werden diese Messdaten ausgewertet und diskutiert.

4. Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

4.1. Kraftstoß

Beginn und Ende des Stoßprozesses können mit dem $F(t)$ - und dem $v(t)$ -Diagramm identifiziert werden. Gemäß Abbildung 2 beginnt die Wechselwirkung beider Wagen bei $t_a = 2,008$ s und endet bei $t_b = 2,536$ s.



$$I_i = \int_{t_a}^{t_b} F_i(t) dt$$

$$I_1 = (-0,1720 \pm 0,009) \text{ N} \cdot \text{s}$$

$$I_2 = (0,1718 \pm 0,009) \text{ N} \cdot \text{s}$$

$$I_1 = -I_2$$

Abb. 2: Auswertung des $F(t)$ -Diagrammes des zentralen elastischen Stoßes der beiden massegleichen Rollwagen

Zur Bestimmung der Kraftstöße I_1 und I_2 erfolgt eine numerische Integration der $F(t)$ -Graphen im Zeitintervall von t_a bis t_b . Die Kraftstöße sind im Rahmen der Messunsicherheiten betragsmäßig gleich groß, haben jedoch unterschiedliche Vorzeichen (vgl. Abbildung 2). Dies entspricht den Erwartungen aus dem 3. Newtonschen Axiom zu Richtung und Betrag der Wechselwirkungskräfte zweier Stoßpartner.

4.2. Einbezug von Reibungseffekten

Beide Rollwagen unterliegen der Rollreibung, welche zu einer geringen, aber nicht vernachlässigbaren Geschwindigkeitsänderung auch außerhalb des Zeit-

intervalls des Kraftstoßes führt (siehe farbig markierte Bereiche in Abbildung 3).

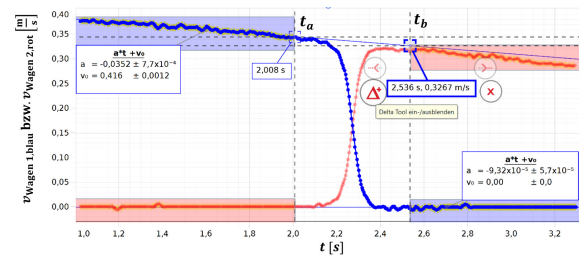
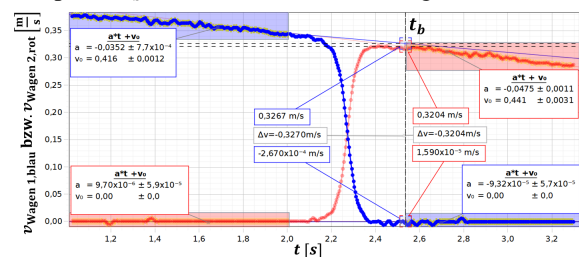


Abb. 3: $v(t)$ -Diagramm des Stoßprozesses und lineare Extrapolation der Datenpunkte für Wagen 1

Eine konstante Rollreibung führt für den jeweils in Bewegung befindlichen Wagen zu einer gleichmäßig verzögerten Bewegung, weshalb eine lineare Geschwindigkeitsabnahme im experimentell aufgenommenen $v(t)$ -Diagramm (siehe Abbildung 3) erkennbar ist. Da die Rollreibungskräfte auch während der Wechselwirkung der Wagen untereinander wirken, werden die jeweiligen Geschwindigkeiten beider Wagen vor dem Stoß gemäß Gleichung 8 über lineare Extrapolation der Datenpunkte für $t < t_a$ bis zum Ende des Stoßprozesses t_b bestimmt. Analog erfolgt die Bestimmung der Geschwindigkeiten beider Wagen zum Ende des Stoßes bei $t = t_b$, wobei hier jeweils die Datenpunkte für $t > t_b$ zur Extrapolation herangezogen werden.

4.3. Impulsänderung und Kraftstoß

Während des Kraftstoßes im Zeitintervall von t_a bis t_b erfahren beide Wagen aufgrund ihrer Wechselwirkung untereinander eine abrupte Geschwindigkeitsänderung. Diese wird jeweils aus den Differenzen der extrapolierten Geschwindigkeiten jedes Wagens zum Zeitpunkt t_b ermittelt (siehe Abbildung 4).



$$t = t_b \quad m_1 = 0,52600 \text{ kg} \quad m_2 = 0,52603 \text{ kg}$$

$$\Delta p_i = \Delta v_i \cdot m_i \quad I_i = \Delta p_i$$

$$\Delta p_1 = (-0,1720 \pm 0,0015) \text{ N} \cdot \text{s} \quad I_1 = (-0,1720 \pm 0,009) \text{ N} \cdot \text{s}$$

$$\Delta p_2 = (0,1687 \pm 0,0022) \text{ N} \cdot \text{s} \quad I_2 = (0,1718 \pm 0,009) \text{ N} \cdot \text{s}$$

$$E_{kin,1} + E_{kin,2} = E_{kin,1}' + E_{kin,2}'$$

$$(0,0281 \pm 0,0005) \text{ J} = (0,0270 \pm 0,0007) \text{ J}$$

$$p_1 + p_2 = p_1' + p_2'$$

$$(0,1719 \pm 0,0016) \text{ N} \cdot \text{s} = (0,1684 \pm 0,0022) \text{ N} \cdot \text{s}$$

Abb. 4: Auswertung des $v(t)$ -Diagrammes des zentralen elastischen Stoßes der beiden massegleichen Rollwagen

Die Geschwindigkeitsänderungen beider Wagen sind im Rahmen der Messunsicherheiten entgegengesetzt gleich groß (vgl. Abbildung 4). Es gilt:

$$\Delta v_1 = -\Delta v_2 \quad \{9\}$$

Mit Gleichung 3 lassen sich aus den Geschwindigkeitsänderungen und Massen m_i beider Wagen (siehe Abbildung 4) die Impulsänderungen Δp_i berechnen. Weil die Massen beider Wagen fast identisch sind, gilt analog zu Gleichung 9 für die Impulsänderungen:

$$\Delta p_1 = -\Delta p_2 \quad \{10\}$$

Dies entspricht der Erwartung aus dem Impulserhaltungssatz für ein abgeschlossenes System aus zwei Körpern, die nur untereinander in Wechselwirkung stehen.

Die aus dem $F(t)$ -Diagramm ermittelten Werte der Kraftstöße stimmen mit hoher Genauigkeit auch mit den berechneten Impulsänderungen überein (vgl. Abbildung 2 und 4). Der Zusammenhang zwischen Kraftstoß und Impulsänderung (Gleichung 7) wurden daher mit hoher Präzision verifiziert und die Gültigkeit des 2. Newtonschen Axioms über das Zeitintervall des Stoßes überprüft.

4.4. Erhaltungsgrößen Energie und Impuls

Mit den Gleichungen 5 und 6, den extrapolierten Momentangeschwindigkeiten und den Wagenmassen können Gesamtimpuls und die kinetische Gesamtenergie zum Zeitpunkt t_b berechnet werden (siehe Abbildung 4). Im Rahmen der Messunsicherheiten sind sowohl der Gesamtimpuls als auch die kinetischen Gesamtenergien vor und nach dem Stoß zum Zeitpunkt t_b gleich groß und bleiben somit erhalten (vgl. Abbildung 4).

Die Impulserhaltung gilt bei einem abgeschlossenen System zu jedem Zeitpunkt der Wechselwirkung zwischen den beiden Körpern. Um dies zu prüfen, wurden in Abbildung 5 die Impulse p_1 (blau) und p_2 (rot) beider Wagen zum Gesamtimpuls (violett) des Systems addiert und in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

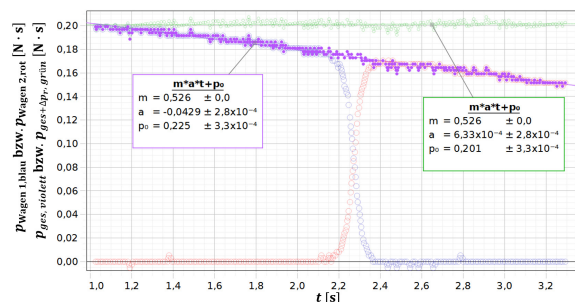


Abb. 5: $p(t)$ -Diagramm eines zentralen elastischen Stoßes der beiden massegleichen Rollwagen

Man erkennt in Abbildung 5, dass der Gesamtimpuls über den gesamten Bewegungszeitraum linear abnimmt. Interessant ist, dass diese lineare Abnahme auch in dem Bereich beobachtbar ist, in dem der Kraftstoß stattfindet, der aus der Wechselwirkung beider Wagen untereinander resultiert. Ursache für diese lineare Abnahme ist die Rollreibung, wodurch auf das abgeschlossene System konstante äußere Kräfte entgegen der Bewegungsrichtung der Wagen

wirken. Aufgrund dieser Reibung findet ein Kraftstoß statt, der zu einer Impulsänderung führt.

$$I_r = \int F_r dt \quad \{11\}$$

$$\Delta p_r = m \cdot a_r \cdot \Delta t \quad \{12\}$$

Mittels linearer Regression wurde eine mittlere Beschleunigung $a_r = -0,0429 \frac{m}{s^2}$ für das System aus den beiden Wagen ermittelt. Addiert man zu jedem Zeitpunkt die Impulsänderung Δp_r zum Gesamtimpuls p_{gesamt} des abgeschlossenen Systems erhält man den grünen Graphenverlauf in Abbildung 5.

$$p_{gesamt} = p_1 + p_2 + \Delta p_r \quad \{13\}$$

Dieser Verlauf entspricht den Erwartungen an ein reibungsfreies abgeschlossenes System.

5. Integration in den Physikunterricht

Die digitale Messwerterfassung ermöglicht es den zentralen elastischen Stoß zweier massegleicher Körper mit kabellosen Sensoren und computergestützter Auswertung präzise zu analysieren. Die Datenerfassung erfolgt mit hoher zeitlicher Auflösung sowie Genauigkeit und spiegelt den aktuellen Stand ähnlicher Messverfahren in Wissenschaft und Technik wider. Lernende können zeitgleich den Stoßprozess der Wagen und den zeitlichen Verlauf mehrerer physikalischer Größen in Diagrammen beobachten und erhalten dadurch einen multimedialen Zugang zum Lerngegenstand. Die zeiteffektive und vergleichsweise einfache Datenerfassung sowie die computergestützte Auswertung ermöglichen den Lernenden eine intensivere physikalisch-mathematische Auseinandersetzung mit den experimentellen Daten.

5.1. Schulversuch als Demonstrationsexperiment

Dieser Versuch eignet sich als Demonstrationsexperiment zur Erarbeitung der physikalischen Größen Impuls und Kraftstoß sowie der Impulserhaltung. Die präzise Analyse des Stoßprozesses aktiviert das Vorwissen der Lernenden über gleichmäßig beschleunigte Bewegungen, Kräfte und Energie. Dabei werden Grundlagen wie die Newtonschen Axiome und das Prinzip der Energieerhaltung gefestigt und mit den neuen Lerninhalten verknüpft. Durch den multimedialen Zugang zum Experiment wird das physikalische Verständnis der Lernenden bezüglich der Erhaltungsgrößen Energie und Impuls, der Bewegung von Körpern sowie der Wechselwirkungen zwischen Körpern gefestigt und erweitert.

Die Integration des Experiments in den Physikunterricht ist individuell an das Lern- und Leistungsniveau der Schülerinnen und Schüler anpassbar. Lehrende können das Experiment vorführen und die gewonnenen Daten gemeinsam mit den Lernenden arbeitsteilig in Gruppenarbeit oder in Einzelarbeit auswerten und anschließend im Plenum besprechen.

Je nach Leistungsniveau und Softwarekenntnissen können die neuen physikalischen Größen Impuls und Kraftstoß bzw. die Impulserhaltung auch selbstständig erarbeitet werden. Für eine schülerzentrierte Lehr-Lern-Sequenz ist die Bereitstellung von gestuften Hilfen sinnvoll. Denkbar wären Tipps zur Analyse der Bewegung der Wagen, methodische Anleitungen zur Software- und Datenauswertung sowie zu bekannten physikalischen Gesetzen. Diese unterstützen die Lernenden dabei, ihr Vorwissen zu aktivieren, die experimentellen Daten selbstständig zu analysieren und in ihre Wissensstruktur zu integrieren.

Prinzipiell kann die Einführung des Kraftstoßes und der Impulsänderung durch deduktives Ableiten aus dem 2. Newtonschen Axiom und der Definition der Beschleunigung oder durch deskriptive Festlegung erfolgen. In beiden Fällen dient der Schulversuch zur experimentellen Verifizierung des Zusammenhangs. Ebenso kann die Impulserhaltung deduktiv abgeleitet oder deskriptiv vorgegeben werden. Jedoch bietet sich für die Überprüfung der Impulserhaltung auch ein induktives Vorgehen an, denn Impuls und kinetische Energie sind Zustandsgrößen, welche beide durch die gleichen physikalischen Größen – Masse und Geschwindigkeit – definiert werden. Eine Hypothese zur Erhaltung des Impulses analog zur Energieerhaltung ist daher naheliegend und mit diesem Schulversuch nachweisbar. Dabei ist auch eine genauere Betrachtung des physikalischen Systembegriffs sinnvoll, um diesen und die Bedeutung eines abgeschlossenen System an einem Beispiel zu vertiefen.

5.2. Differenzierung

Neben der bereits aufgezeigten Differenzierung hinsichtlich der Unterrichtsmethode und Sozialform sowie der Binnendifferenzierung zur Berücksichtigung der individuellen Lernvoraussetzungen aber auch der individuellen Unterrichtsvorbereitung durch die Lehrperson, kann dieser Schulversuch ebenso inhaltlich variiert werden. So lässt sich das Experiment mit verschiedenen Massen und Anfangsgeschwindigkeiten der Wagen oder als unelastischer Stoß durchführen. Zudem sind die Reibungskräfte und die verrichtete Reibungsarbeit über die ermittelten Beschleunigungen bestimmbar. Diese und weitere Variationen könnten in Übungsphasen zur Festigung der fachlichen und digitalen Kompetenzen dienen.

5.3. Experimentelle Leistungskontrolle

Der vorgestellte oder eine Variation dieses Schulversuches sind auch als Experiment im Rahmen des physikalischen Praktikums z.B. in der Sekundarstufe II durchführbar. Voraussetzungen für eine Einbettung in den Leistungsraum sind, dass die Lernenden den Umgang mit der Messwerterfassungssoftware und den Auswertungstools beherrschen und die neuen theoretischen Grundlagen von Impuls, Kraftstoß und Impulserhaltung zuvor ausreichend gefestigt wurden. Dies kann in vorherigen Übungs- und

Anwendungseinheiten und durch die verschiedenen Variationsmöglichkeiten des Versuchs erreicht werden.

6. Ausblick

Wir konnten zeigen, dass mit dem verwendeten Messwerterfassungssystem eine präzise Analyse der Erhaltungsgrößen mit Berücksichtigung von Reibungseffekten zeiteffektiv und vergleichsweise einfach möglich ist. Dazu werden wir nun konkrete Lehr-Lern-Sequenzen als Handreichungen für den Physikunterricht erstellen. Diese sollten aus individuell nutzbaren Bausteinen bestehen, welche sowohl Aufgabenstellungen mit gestuften Hilfen und Hinweise zur Durchführung, Auswertung und Bestimmung der Messunsicherheiten als auch verschiedene Varianten des didaktisch-methodischen Vorgehens enthalten. Diese Lehr-Lern-Settings werden anschließend im Unterricht erprobt und deren Einsatz sowie Lernwirksamkeit evaluiert. Die angesprochenen inhaltlichen Variationsmöglichkeiten des Schulversuches, z.B. die Analyse von inelastischen Stößen, sollen ebenfalls mit der vorgestellten Methode durchgeführt und ausgewertet werden, um diese anschließend zu erproben.

7. Literatur

- Baumert, J., & Kunter, M. (01. 12. 2006). Stichwort: Professionelle Kompetenz von Lehrkräften. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 9. Jahrg., S. 469-520. doi:<https://doi.org/10.1007/s11618-006-0165-2>
- Becker, S., Klein, P., Gößling, A., & Kuhn, J. (05. 02. 2019). Förderung von Konzeptverständnis und Repräsentationskompetenz durch Tablet-PC-gestützte Videoanalyse. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 25, S. 1-24. doi:<https://doi.org/10.1007/s40573-019-00089-4>
- Bicak, B., Hattermann, M., & Hübner, C. (2023). Einsatz digitaler Medien im Unterricht vor und während der Coronapandemie. In F. Förster, T. Fritzlar, & B. Rott (Hrsg.), *Probleme sind zum Lösen da* (S. 41-58). Münster: WTM Verlag für wissenschaftliche Texte und Medien.
- Härtig, H., Ostermann, A., Ropohl, M. et al. (18. 06. 2021). Gibt es einen fachspezifischen Medieneinsatz im naturwissenschaftlichen Fachunterricht? Ergebnisse einer Fragebogenerhebung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*(27), S. 139-154.
- Ikeda, M. (2020). Were schools equipped to teach – and were students ready to learn – remotely? *PISA in Focus*(108). doi:<https://doi.org/10.1787/4bcd7938-en>

- Kaps, A., Splith, T., & Stallmach, F. (11. 02. 2021). Implementation of smartphone-based experimental exercises for physics courses at universities. *Physics Education*, 56(3). doi:<https://doi.org/10.1088/1361-6552/abdee2>
- Kultusministerkonferenz. (08.12.2016). Bildung in der digitalen Welt. In Sekretariat der Kultusministerkonferenz (Hrsg.), *Strategie der Kultusministerkonferenz*. Berlin: KMK.
- Kurth, C., Walpert, D., & Wodzinski, R. (2019). Digitale Messwerterfassung im Kontext digitaler Bildung - Einstellungen von Physiklehrkräften. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- Lorenz, R., Yotyodying, S., Eickelmann, B., & Endberg, M. (Hrsg.). (2022). *Schule digital – der Länderindikator 2021. Lehren und Lernen mit digitalen Medien in der Sekundarstufe I in Deutschland im Bundesländervergleich und im Trend seit 2017*. Münster; New York: Waxmann.
- Lück, S., & Wilhelm, T. (2023). Warum die Messwerte digital erfassen? In T. Wilhelm (Hrsg.), *Digital Physik unterrichten* (S. 15-17). Hannover: Kallmeyer in Verbindung mit Klett Friedrich Verlag GmbH.
- Mayer, R. E. (2014). Cognitive Theory of Multimedia Learning. In *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 43-71). Cambridge University Press.
- Schmechtig, N., Puderbach, R., Schellhammer, S., & Gehrman, A. (2020). *Einsatz von und Umgang mit digitalen Medien und Inhalten in Unterricht und Schule. Befunde einer Lehrkräftebefragung zu beruflichen Erfahrungen und Überzeugungen von Lehrerinnen und Lehrern in Sachsen 2019*. Dresden: TU Dresden, Zentrum für Lehrerbildung, Schul- und Berufsbildungsforschung (ZLSB).
- Sweller, J. (April 1988). Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning. *COGNITIVE SCIENCE*(12(2)), S. 257-285.
- Thoms, L.-J., & Girwidz, R. (2021). Eine Lehrerbefragung zum Einsatz digitaler Tools im Physikunterricht. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- Waffner, B. (2020). Unterrichtspraktiken, Erfahrungen und Einstellungen von Lehrpersonen zu digitalen Medien in der Schule. In A. Wilmers, C. Anda, C. Keller, & M. Rittberger (Hrsg.), *Bildung im digitalen Wandel* (Bd. 1, S. 57-102). Münster; New York: Waxmann.

Danksagung

Wir bedanken uns für die kollegialen Hinweise und Diskussionen zum Einsatz digitaler Messwerterfassung im Physikunterricht nach der Vorstellung dieses Vorhabens auf der DPG-Frühjahrstagung in Greifswald.

Dem Sächsischen Staatsministerium für Kultus gilt unser Dank für die Abordnung von Saskia Riedel als Lehrkraft im Hochschuldienst an die Universität Leipzig und der damit verbundenen Unterstützung ihres Promotionsvorhabens zu Aspekten der Digitalisierung des Physikunterrichts.