

Teaching Experimental Physics by Using Mobile Technologies as Experimental Tools Videoanalyse-Aufgaben in der Experimentalphysik 1

Pascal Klein^{*1}, Sebastian Gröber*, Jochen Kuhn*, Henning Fouckhardt*, Georg von Freymann*, Egbert Oesterschulze*, Artur Widera*, Anett Fleischhauer* und Andreas Müller⁺

*Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Physik, ¹pklein@physik.uni-kl.de;
⁺Universität Genf, Institut de la Formation des Enseignants
(Eingegangen: 13.10.2014; Angenommen: 24.11.2014)

Kurzfassung

In dem Beitrag werden zwei neue Aufgabenformate vorgestellt, die klassische Übungen zur Experimentalphysik-1-Vorlesung im Regelbetrieb lernwirksam und motivationsfördernd ergänzen. Studierende der Physik bearbeiten einerseits wöchentliche Aufgabenstellungen zu vorgegebenen Video-Experimenten mit Hilfe des bekannten Verfahrens der Videoanalyse. Andererseits führen sie selbst Freihandexperimente mit Alltagsmaterialien durch, nehmen diese mit der Videofunktion mobiler Endgeräte auf (z. B. Smartphone, Tablet-PC) und werten diese auch direkt damit aus.

Diese beiden, sich ergänzenden, alternativen experimentellen Zugänge konkretisieren theoretische Lerninhalte und erleichtern für Studierende den Übergang zwischen Schule und Hochschule. Studierende werden zudem an einfache Mess- und Analysemethoden herangeführt und auf nachfolgende physikalische Praktika vorbereitet. Die neuen Aufgabenformate werden fachdidaktisch charakterisiert und durch Beispiele illustriert. Aus den Erfahrungen und Untersuchungsergebnissen der zurückliegenden vier Semester werden Schlussfolgerungen für die Implementation in die Lehre gezogen.

Abstract.

We discuss the use and implementation of two types of experiment-based tasks in regular tutorials of introductory mechanics courses at university level: First, video analysis tasks consisting of pre-recorded laboratory videos of motion processes and exercises related to it (VA task). Secondly, mobile device video tasks in which students have to record videos of motion processes by themselves (mVA task). For both tasks, we assume that students profit from experimental activities in calculus-based courses. Learning of theoretical content becomes concretized and the transition between school and university is facilitated. Students are introduced to simple measurement and analysis principles which prepare them well for laboratory work. We illustrate the new problem formats with examples and specify their educational value. We also draw conclusions for implementation based on the experiences and findings of previous semesters.

1. Einleitung

Die Wirksamkeit traditioneller vorlesungsbasierter Physik-Einführungsveranstaltungen wurde national wie international in den letzten Jahrzehnten häufig in Frage gestellt [1]. Vor dem Hintergrund hoher Abbruchquoten (> 30%; [2]) wurden Konzepte entwickelt, erprobt und untersucht, die von Interactive Engagement [3], Peer Instruction [4] bis hin zur Umstrukturierung des Hörsaals in Lerner-zentrierte, aktive Lernumgebungen reichen [5] oder bei denen auf die Vorlesung ganz verzichtet wird [6]. Die Ansätze (1) sind zum Teil konzeptionell orientiert (Fehlkonzepte identifizieren und beseitigen), (2) beruhen auf Kollaborationen zwischen Studierenden und/oder (3) nutzen moderne, den Lernenden unterstützende Informations- und Kommunikationstechnologien. Sie teilen das gemeinsame Ziel, den Lernerfolg der Studierenden zu verbessern und (4) mitunter auch Erkenntnistheorie und naturwissenschaftliche Arbeitsweisen („scientific inquiry“, „inquiry-

based learning“) zu schulen. Eine Meta-Analyse, die o. g. Reformen systematisch nach Art der Konzepte (1), (2), (3), (4) oder Kombinationen daraus untersuchte, ergab, dass die Konzepte überwiegend positive Resultate gegenüber dem traditionellen Lehrbetrieb mit kleinen bis mittleren Effektstärken¹ hervorbringen. Sie ergab aber auch, dass viele Wirksamkeitsstudien unter mangelhaften Untersuchungsmethoden leiden² [7]. Der mit den Konzepten verbundene organisatorische und finanzielle Aufwand ist in

¹ 71 Studien aus der Eingangsphase des Physikstudiums, mittleres Cohen's $d = 0,59 \pm 0,37$ (Standardabweichung); Spannweite – $0,63 \leq d \leq 1,36$. Vgl. [7]

² Keine Randomisierung, fehlende Kontrollgruppen, fehlende Prätests, undurchsichtige Berichterstattung ohne deskriptive Daten, keine Informationen über Reliabilität und Validität der Testinstrumente

vielen Fällen sehr hoch, so dass sich aus den Ergebnissen nur bedingt Implikationen für den Lehreinatz während der Studieneingangsphase in Deutschland ableiten lassen. Im Gegensatz dazu strebt das im Folgenden diskutierte Projekt *physics.move: Teaching Experimental Physics by Using Mobile Technologies as Experimental Tools* die Konzeption und Implementation von experimentellen Aufgabenstellungen an, um ähnliche Interventionserfolge ohne eine Umstrukturierung der in Deutschland weit verbreiteten Dreiteilung „Vorlesung, Übungen und Praktikum“ zu erzielen. Das Projekt setzt in den vorlesungsbegleitenden Übungen an den Aufgabenstellungen selbst an, die wesentlich zur Wissenskonstruktion und zur Problemlösefähigkeit beitragen und somit für das Verstehen von Physik essenziell sind [8]. Der organisatorische Betrieb bleibt daher weitestgehend unbeeinflusst, um eine nahezu reibungsfreie Implementation in den Regelbetrieb und damit eine praktikable Übertragbarkeit an andere Universitäten zu ermöglichen.

In diesem Basisartikel werden zwei neue Aufgabenformate charakterisiert, die das in der Schule bereits etablierte Verfahren der Videoanalyse von Bewegungen nutzen: Videoanalyse-Aufgaben [9] und mobile Videoanalyse-Aufgaben [10, 11]. Obwohl die Bewegungsanalyse von Objekten mit Hilfe digitaler Videotechnik ein seit über 15 Jahren in der Lehre eingesetztes Verfahren ist [12], gibt es bisher keine strukturierte Implementation in universitäre Lernszenarien. Die Forschungslage über Motivations- und Lernwirkung ist durchaus positiv, beruht aber auf wenigen vereinzelt Vergleichsstudien [13, 14]. Einen Überblick über die zur Analyse von Experimentiervideos nötige Software bietet [15].

An ausgewählten Beispielen wird im Folgenden die Intention des Ansatzes verdeutlicht, technologiegestützte, experiment-basierte Instruktionen im geregelten Semesterbetrieb in den Übungen zur Experimentalphysik I zu implementieren.

Das Projekt umfasst eine Begleitforschung im Rahmen einer quasi-experimentellen Interventionsstudie mit Versuchs-Kontrollgruppendesign und Längsschnittuntersuchungen, deren Pilotierung z. T. schon veröffentlicht sind [16, 17]. Hier wird über erste Erfahrungen und für die Lehrpraxis relevante Untersuchungsergebnisse aus vier Semestern berichtet, um abschließende Schlussfolgerungen für die Praxis zu ziehen.

2. Definition und Eigenschaften von Videoanalyse- und mobilen Videoanalyse-Aufgaben

In Videoanalyse-Aufgaben (VA-Aufgaben) arbeiten die Lernenden mit vorgegebenen Videos von Realexperimenten der Mechanik (meist Bewegungsabläufen) und einer adäquaten Problemstellung. Gemäß [9] werden VA-Aufgaben definiert als Sequenz zusammenhängender theoretischer und videobasierter experimenteller Teilaufgaben.

VA-Aufgaben umfassen per Definition sowohl theoretische Teile (z. B. Herleitung von Formeln, Berechnung von Größen) als auch videobasierte experimentelle Aufgabenanteile, die das konzeptionelle Verständnis der Studierenden durch ein Wechselspiel von Theorie und Experiment unterstützen sollen. Beispiele für videobasierte experimentelle Aufgabenanteile sind z. B. das Messen von Zeiten, Längen und Winkeln im Video, das Durchführen einer Videoanalyse (d. h. Bestimmung von zweidimensionalen Ort-Zeit-Koordinaten eines Objekts) oder die Verarbeitung von Messdaten. Die Konstruktion der Teilaufgaben berücksichtigt weiterhin die Ergebnisse kognitionspsychologischer und fachdidaktischer Forschung zum Lernen mit multimedialen Inhalten und greift Aspekte der „neuen Aufgabenkultur“ [18, 19, 20] auf.

Mobile Videoanalyse-Aufgaben (mVA-Aufgaben) beziehen sich nicht auf vorgegebene Experimentiervideos sondern instruieren die Planung, Durchführung und Videographie von Freihandexperimenten geringer Komplexität mit Hilfe von Alltagsmaterialien [10, 11]. Das Attribut „mobil“ deutet an, dass die Lernenden zur Videoaufnahme und Auswertung mobile Endgeräte wie Tablet-Computer oder Smartphones nutzen können. Diese neuen technischen Alltagsmöglichkeiten eröffnen auch neue Möglichkeiten der Lehre. Mobile Videoanalyse-Aufgaben beinhalten ebenso wie VA-Aufgaben theoretische Aufgabenanteile, die Bezug zum Experiment nehmen. Da Freihandexperimente eine geringe experimentell-motorische Komplexität besitzen, liegt der Fokus von mVA-Aufgaben auf (1) der analytischen Variation experimenteller Parameter zur Hypothesenprüfung (Variablenkontrolle), (2) dem konfirmatorischen Prüfen theoretischer Vorhersagen durch lokale empirische Befunde und (3) dem qualitativen Beobachten und Erklären von Phänomenen.

VA- und mVA-Aufgaben können und sollen traditionelle Aufgaben nicht ersetzen, sondern sinnvoll ergänzen. Unter traditionellen Aufgaben (T-Aufgaben) verstehen wir seit Jahren etablierte theoriebasierte Physikaufgaben ohne experimentellen Anteil. VA- und mVA-Aufgaben erheben nicht den Anspruch, physikalische Praktika abzulösen oder alle Fähigkeiten zu schulen, die ein forschender Physiker im Labor für wissenschaftliches Arbeiten benötigt. Vielmehr bereiten sie dieses Ziel vor, unterstützen das Lernen und Verstehen von Physik mittels technischer Möglichkeiten, wecken Neugierde und Interesse an der Disziplin Physik durch abwechslungsreichere und authentischere Problemstellungen³ [21]. Dieser Beitrag zeigt, dass sich medienbasierte VA-Aufgaben in besonderem Maße eignen, schon frühzeitig experimentelle Anteile ins

³Diese Hypothesen und Ziele werden mit Hilfe empirischer Begleitforschung untersucht [16].

Physikstudium einzubringen. Denn die Entwicklung einer „experimentellen Intuition, worauf Physiker so stolz sind“ [22], ausschließlich in die physikalischen Praktika und Abschlussarbeiten zu verorten, widerspricht der Erfahrung, dass sich experimentelle Kompetenzen über Jahre hinweg kontinuierlich aufbauen müssen. Isolierte Demonstrationsexperimente in Vorlesungen schaffen es nicht, eine solche Kompetenz ansatzweise zu fördern [23]. In der Vorlesung demonstrierte Experimente können durch diese Aufgabenformate aufgegriffen und vertieft werden. Perspektivisch ist auch eine Implementierung der Aufgabenformate in das physikalische Anfängerpraktikum angedacht.

Eine Konkretisierung der Lerninhalte durch Video-Experimente soll durch Integration experimenteller Aufgabenanteile die Theoriebildung unterstützen. Weiter wird das Lernen der Studierenden durch eine gesteigerte Anschaulichkeit der Aufgabestellungen gefördert. Dies mag zu einem erfolgreichen Studieneinstieg beitragen, denn Albrecht und Nordmeier identifizierten den hohen fachlichen Anspruch als Hauptexamationsmotiv und fanden heraus, dass Studienabbrecher am häufigsten in physikaffine anwendungsorientierte Berufe wechseln [24].

Nachfolgend werden Beispiele von T-, VA- und mVA-Aufgaben beschrieben und paarweise gegeneinander kontrastiert. Darüber hinaus werden die Strukturen und Mehrwerte der Aufgaben charakterisiert.

3. Beispiele

Das Paar T-/VA-Aufgabe thematisiert Lernschwierigkeiten in der Rotationskinematik und zeigt, wie sich beide Formate ergänzen. Bei den weiteren Paaren T-/mVA-Aufgabe und VA/mVA-Aufgabe liegt der Schwerpunkt auf den experimentellen Aufgabenanteilen. Lösungsansätze sind in reduzierter Form als Formeln oder Diagramme angegeben. Zur Analyse der Videos wurde die Software measureDynamics⁴ verwendet.

3.1. T-/VA-Aufgabe zur Rotationskinematik

T-Aufgabe

Ein Objekt bewegt sich in der x - y -Ebene auf einer Kreisbahn mit Radius r_0 im Uhrzeigersinn. Für die Bahngeschwindigkeit gelte

$$v(t) = \begin{cases} v_0 - kt, & 0 \leq t \leq 10 \text{ s} \\ v_0 - k \cdot 10 \text{ s}, & t > 10 \text{ s} \end{cases} \quad \{1\}$$

mit $r_0, v_0, k > 0$.

- a) Bestimmen Sie die Winkelgeschwindigkeit $\omega(t)$ und die Winkelbeschleunigung $\alpha(t)$. Geben Sie die Richtung der Vektoren ω und α während der Bewegung an.

- b) Beschreiben Sie die Bewegung durch den Ortsvektor $\mathbf{r}(t)$ mit ebenen Polarkoordinaten (ρ, φ) und $\varphi(0) = 0$. Zeigen Sie, dass $\mathbf{a} = d^2\mathbf{r}/dt^2 = \alpha \times \mathbf{r} - \omega \times (\omega \times \mathbf{r})$ gilt.
- c) Skizzieren Sie für beide Bewegungsabschnitte den Beschleunigungsvektor \mathbf{a} zu verschiedenen Zeitpunkten. Fertigen Sie dazu zwei getrennte Bilder an und nennen Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede.

VA-Aufgabe

Das Video zeigt die Rotation von vier Markierungspunkten mit Abständen r_1 bis r_4 zum Kreismittelpunkt:

- a) Bestimmen Sie die Bahngeschwindigkeit $v(t)$ für den äußeren Markierungspunkt. Leiten Sie daraus die Winkelgeschwindigkeit $\omega(t)$ und die Winkelbeschleunigung $\alpha(t)$ ab. Unterteilen Sie die Bewegung begründet in zwei Phasen und geben Sie die Richtung von ω und α an.
- b) Zeigen Sie experimentell, dass $v(r, \omega = \text{konst.}) = \omega \times r$.
- c) Zeichnen Sie für jeweils eine Umdrehung der Kreisscheibe während beider Bewegungsphasen die Beschleunigungsvektoren $\mathbf{a}(t)$. Nennen und erklären Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Bilder. Kontrollieren Sie das Ergebnis durch Videoanalyse der Bewegung.

Hinweis zu a): Bestimmen Sie

$$v(t) = |v(t)| = \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t)} \quad \{2\}$$

mit Hilfe der automatischen Analyse (Schrittweite 10) und messen Sie r_4 .

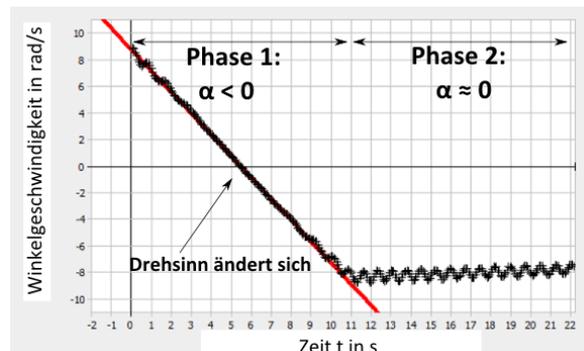


Abb. 1: $\omega(t)$ -Diagramm als Ergebnis der Videoanalyse: Messwerte (schwarz) und Regressionsgerade $\omega(t) = -1,6 \text{ s}^{-2}t + 8,8 \text{ s}^{-1}$ (Regressionskoeffizient $R^2 = 0,99$; rot). Phase 1: gleichförmige Kreisbewegung, Phase 2: gleichmäßige Kreisbewegung

Das Video zur Aufgabe zeigt eine zunächst im Uhrzeigersinn mit anfänglich großer Winkelgeschwindigkeit rotierende Kreisscheibe. Die Winkelgeschwindigkeit nimmt stetig ab, wird schließlich null und wächst in entgegengesetzter Richtung an. Schließlich ist die Winkelgeschwindigkeit näherungsweise konstant. Für den Betrachter des Videos unsichtbar ist die Ursache des Bewegungsvorgangs:

⁴ <http://www.phywe.com/489n379/>

Die Scheibe wickelt einen Faden auf, der über eine Umlenkrolle eine Masse anhebt, deren Gewichtskraft die konstante Winkelbeschleunigung erzeugt. Setzt diese wieder auf dem Boden auf, ist die Platte kräftefrei (Ausnahme: Reibung) und die Winkelgeschwindigkeit konstant. Die Abbildungen 1 bis 3 zeigen die Lösungsskizzen zu den Aufgaben. Typisches Merkmal von VA-Aufgaben ist der reduzierte Instruktionstext. Informationen wie Abstände, Geschwindigkeiten usw. können und sollen im Video gemessen werden und müssen daher nicht angegeben werden.

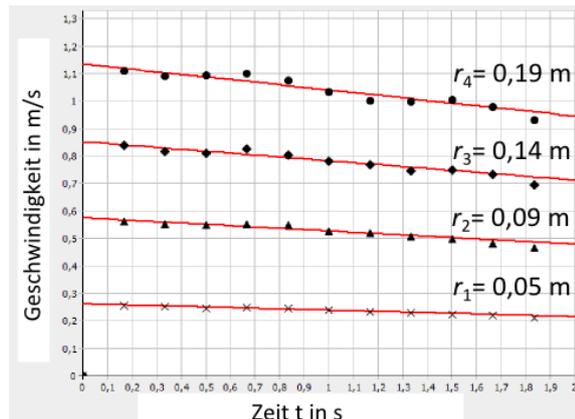


Abb. 2: Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm für 4 Bahnpunkte. Die Relation $v_i(t)/r_i = v_k(t)/r_k$ ($i \neq k$) ist für jeden Zeitpunkt t überprüfbar.

Beide Aufgaben thematisieren in (a) die Richtung der Winkelgeschwindigkeit ω und Winkelbeschleunigung α eines sich auf einer Kreisbahn mit zunehmender Bahngeschwindigkeit bewegendes Massenpunktes. Studierende zeigen hier oft die Fehlvorstellung, dass ω in der Bewegungsebene liegt oder wenden die „rechte-Hand-Regel“ falsch an [25]. Ein weiterer häufiger und wahrscheinlich aus der translatorischen Kinematik vererbter Fehler ist die Annahme, dass α den Betrag und/oder die Richtung ändert, wenn ω die Richtung ändert („Geschwindigkeit-Beschleunigung-Konfusion“). In der VA-Aufgabe wird das Verhalten von ω und α aus experimentellen Bewegungsdaten ($v(t)$ -Diagramme) abgeleitet, wohingegen die T-Aufgabe eine rechnerische Lösung verlangt.

Aufgabenteil (b) kontrastiert die verschiedenen Intentionen der Aufgaben, nämlich die formelle theoretische Beschreibung der Bahnkurve mit mathematischer Überprüfung einer Gesetzmäßigkeit (insbesondere Anwendung der Vektorrechnung) und der experimentelle Zugang zu der Gleichung mit doppeltem Argument:

$$v(\omega, r) = \omega \times r. \quad \{3\}$$

Letztlich wird in Aufgabenteil (c) das konzeptionelle Verständnis der Beschleunigung als Vektor (als Superposition von Tangential- und Normalanteil) diskutiert. Die VA-Aufgabe unterstützt den Lernen-

den durch die Möglichkeit, eigene Ergebnisse zu kontrollieren (Abb. 3).

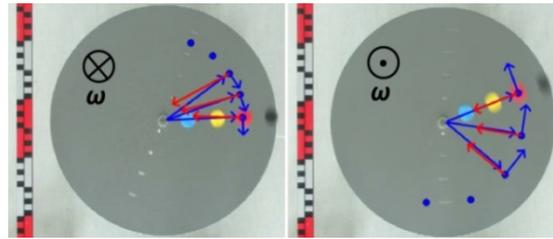


Abb. 3: Orts-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektor in den beiden Bewegungsphasen. Im Gegensatz zur gleichmäßigen Kreisbewegung (Phase 2, rechts) ändert der Beschleunigungsvektor (rot) in Phase 1 stets seine Länge und zeigt vom Rotationszentrum weg.

3.2. T-/mVA-Aufgabe zur Dynamik starrer Körper

T-Aufgabe

Drei Aluminium-Hohlzylinder (Radius R , Wandstärke d , Höhe h , Masse m) rollen, ohne zu gleiten, vom gleichen Startpunkt einen Hang mit Neigungswinkel β hinunter. Zylinder 1 ist leer, Zylinder 2 ist wassergefüllt und Zylinder 3 ist mit Eis gefüllt:

- Zeigen Sie, dass für das Trägheitsmoment von Voll- und Halbzylinder (VZ/HZ) bezüglich der Zylinderachse gilt $\Theta_{VZ} = 0,5 m R^2$ und $\Theta_{HZ} = m (R^2 - Rd + d^2/2)$.
- Bestimmen Sie das Verhältnis d/R , sodass die Näherungsformel $\Theta_{HZ} \approx m R^2$ mit einem Fehler $< 1\%$ angewendet werden kann.
- Leiten Sie die Schwerpunktsbeschleunigungen der drei Körper her. Ermitteln Sie die Reihenfolge des Eintreffens der Zylinder am Ende des Hangs.
- Skizzieren Sie die Geschwindigkeitsvektoren eines äußeren Zylinderpunktes auf halber Rollstrecke.

mVA-Aufgabe

Verschiedene Aluminiumzylinder rollen, ohne zu gleiten, vom gleichen Startpunkt einen Hang mit Neigungswinkel β hinunter. Zylinder 1 ist leer, Zylinder 2 ist wassergefüllt und Zylinder 3 ist mit Eis gefüllt:

- Führen Sie das Experiment mit geeigneten Alltagsmaterialien durch. Dokumentieren und erklären Sie qualitativ die Reihenfolge des Eintreffens der Zylinder am Ende des Hangs.
- Leiten Sie eine Formel für die Schwerpunktsbeschleunigung her und berechnen Sie diese. Schätzen Sie dazu die Massen der Zylinder / des Inhalts ab. Vergleichen Sie die experimentellen Schwerpunktsbeschleunigungen mit den theoretischen Daten.
- Führen Sie das Experiment mit einer geschüttelten Getränkedose (CO_2 -haltiges Getränk) und einer „ungeschüttelten“ Getränkedose durch. Bilden Sie eine Hypothese zur Erklärung der Be-

obachtung und überprüfen Sie diese durch geeignete Variation der Versuchsmaterialien.

d) Wie (d) in T-Aufgabe und visualisieren.

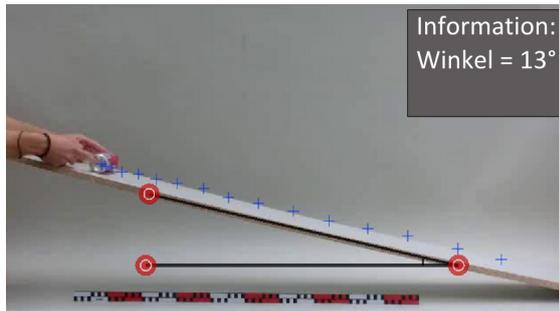


Abb. 4: Eine Getränkedose rollt eine schiefe Ebene hinunter. Punktspur der Bewegung (blau), Winkelmessung (rot-schwarze Schenkel) und Lage des Koordinatensystems. Tablet-Screenshot aus Android-Applikation „Video Analysis“.

Die theoretischen Aufgabenstellungen (a) und (b) der T-Aufgabe entfallen bei der mVA-Aufgabe wegen des erhöhten Zeitaufwands für das Experimentieren in Aufgabenteil (a). Hinweise zum Experimentiermaterial (Verwendung von Getränkedosen, schräg gestellter Tisch) schaffen Kapazitäten für theoretische Vertiefungen, schränken aber die Autonomie und Kreativität der Studierenden ein. Der mVA-Aufgabenteil (a) fördert sowohl die Selbstständigkeit als auch die Kooperation zwischen Lernenden durch notwendige gegenseitige Unterstützung beim Experimentieren. Die Herleitung der Schwerpunktbeschleunigung erfordert (1) Kenntnis über Energieformen (kinetische Energie der Rotation und Translation), (2) Anwenden der Rollbedingung und (3) Konkretisierung des Trägheitsmoments für die drei Zylinder und damit eine Anwendung deklarativen Wissens. Abb. 4 zeigt die experimentelle Umsetzung der Aufgabe und Tab. 1 vergleicht die gemessenen Beschleunigungswerte mit den Theoriewerten, die über die Formel

$$a_{\text{theo}} = \sin(\alpha) \left(1 + \frac{\Theta}{mR^2} \right)^{-1} \quad \{4\}$$

mit dem gemessenen Winkel $\alpha = 13^\circ$ berechnet wurden (siehe Abb. 4). Die experimentellen Werte ergeben sich aus der Analyse der Ort-Zeit- bzw. Geschwindigkeit-Zeit-Daten als Parameter einer quadratischen bzw. linearen Regression. Die Android-App „Video Analysis“ stellt diese Daten nach der Videoaufnahme und Bewegungsanalyse graphisch bereit, siehe Abb. 5.

Zur Interpretation des Experiments wird die volle, gefrorene Getränkedose als Vollzylinder behandelt (Rechnung mit mittlerer Dichte), die leere Dose als Hohlzylinder. Nach obiger Formel ergeben sich die Theoriewerte entsprechend Tabelle 1 in guter Übereinstimmung mit dem Experiment. Die Ergebnisse der gefüllten Dosen zeigen, dass der flüssige Inhalt auch – aber nicht vollständig – mitrotiert (der ange-

gebene Maximalwert $a = 2,21 \text{ m s}^{-2}$ entspricht der rein translatorischen Bewegung; der Minimalwert entspricht dem des gefrorenen vollständig mitrotierenden Inhalts). Die geschüttelte Getränkedose

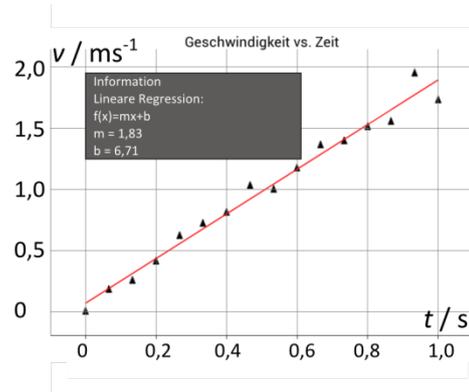


Abb. 5: Auswertung der Geschwindigkeit-Zeit-Daten der vollen Getränkedose mit Tablet-Computer (App „Video Analysis“). Die Steigung der Regressionsgerade entspricht der Beschleunigung.

erfährt eine kleinere Beschleunigung als eine „ungeschüttelte“ (diese Beobachtung mag abhängig sein von dem Doseninhalt – hier Coca-Cola – und dem Dosenmaterial) [26]. Eine Hypothese lautet, dass die erzeugten Luftblasen für eine stärkere Kopplung zwischen Flüssigkeit und Dosenrand sorgen als die Flüssigkeit allein und dadurch die Rotationsenergie besser übertragen wird. Aufgabenteil (c) der mVA-Aufgabe knüpft experimentell an den Aufgabenteil (a) an, indem eine weitere experimentelle Variation (geschüttelte Getränkedose) thematisiert wird. Die offensichtliche Hypothese, dass der Grund für die verschiedenen Schwerpunktbeschleunigungen einer geschüttelten und einer „ungeschüttelten“ Dose auf den CO_2 -Gehalt des Inhalts zurückgeführt werden kann, gilt es durch Variation der Materialien zu prüfen, beispielsweise indem eine gleiche Getränkedose identischen Inhalts ein wenig geöffnet und vor dem Versuch mehrfach geschüttelt wird, um den CO_2 -Gehalt zu reduzieren („abgestandenes“ Soda).

	Θ (theo.) [kg cm ²]	a (theo.) [m s ⁻²]	a (exp.) [m s ⁻²]
voll, gefroren	1,5	1,48	1,47
leer	0,2	1,10	1,02
voll	$0,2 \leq \Theta \leq 1,5$	$1,48 \leq a \leq 2,21$	1,83
geschüttelt	$0,2 \leq \Theta \leq 1,5$	$1,48 \leq a \leq 2,21$	1,68

Tab. 1: Ergebnisse des Experiments im Vergleich zu theoretischen Werten. Wandstärke der Getränkedose: $d = 0,07 \text{ mm}$; Radius: $R = 2,75 \text{ cm}$; Masse volle / leere Dose: $m = 370,4 \text{ g} / m_{\text{leer}} = 26,5 \text{ g}$.

Aufgabenteil (d) prüft das Konzeptverständnis der zusammengesetzten Bewegung aus Rotation und Translation [27]. Wie in der VA-Aufgabe zur Rotationskinematik werden theoretische Überlegungen experimentell verifiziert multiple Repräsentationen (z.B. Vektoren) den Lernprozess.

3.3. VA-/mVA-Aufgabe zur Newton'schen Reibungskraft

VA-Aufgabe

Das Video zeigt das Fallen einer Styroporkugel (Masse m) in Luft:

- Stellen Sie die Position $y(t)$, die Geschwindigkeit $v_y(t)$ und die Beschleunigung $a_y(t)$ in einem gemeinsamen Diagramm dar und erklären Sie den Zusammenhang zwischen den Kinematik-Graphen. Tragen Sie den Beschleunigungsvektor begründet in das Bild der Fallbewegung ein.
- Stellen Sie die Differentialgleichung für v unter Annahme einer i) Newton'schen und ii) Stokes'schen Reibungskraft FR auf. Zeigen Sie, dass die vorgegebene Lösungsfunktion (5) die Differentialgleichung erfüllt:

$$v(t) = v_E \tanh\left(\frac{g}{v_E} t\right) \quad \{5\}$$

Welche Bedeutung hat v_E ?

- Bestimmen Sie die Endgeschwindigkeit v_E und vergleichen Sie diese mit dem theoretischen Wert, den Sie nach (b) erwarten. Entscheiden Sie, ob Newton'sche oder Stokes'sche Reibung vorliegt.
- Ermitteln Sie den c_w -Wert der Kugel durch Parameteranpassung einer geeigneten Funktion an die experimentelle $y(t)$ -Kurve.

mVA-Aufgabe

Untersuchen Sie den Einfluss der Luftreibungskraft auf einen Fallkegel:

- Basteln Sie anhand der Anleitung einen Kegel. Beobachten und erklären Sie die Endgeschwindigkeit v_E beim Fallen. Videographieren Sie das Experiment und stellen Sie $v(t)$ dar.
- Zeigen Sie, dass die Bewegung des Fallkegels unter Newton'scher und nicht unter Stokes'scher Reibung erfolgt. Hinweis: Differentialgleichung für die Geschwindigkeit aufstellen und v_E abschätzen.
- Erstellen Sie eine Messreihe, um die Abhängigkeit $F_R \sim v^2$ zu zeigen. Hinweis: Halten Sie dazu die Querschnittsfläche A konstant und variieren Sie die Kegelmasse m .
- Bestimmen Sie den c_w -Wert des Fallkegels. Hängt dieser Wert von der Querschnittsfläche oder der Kegelmasse ab?

Dieses Aufgabenpaar zeigt, wie Zielsetzungen der Aufgabenformate akzentuiert sind: Teil (a) der VA-Aufgabe erfordert das Interpretieren von Diagram-

men (Graphenverständnis, [13]) und die kohärente Verbindung der Bewegung mit verschiedenen Repräsentationen (Graphen, Vektoren, Bilder), siehe Abb. 6.

Dazu eignet sich die Fallbewegung einer Styroporkugel über eine große Strecke (≈ 5 m) besser als die Bewegung des Fallkegels, die für Studierende einfacher durchzuführen ist (vgl. Bahrdtscher Fallkegel [28]). Der theoretische Anspruch an das Lösen der Differentialgleichung (Teil (b)) ist durch die Vorgabe der Lösungsfunktion verringert. Die letzten beiden VA-Aufgabenteile zeigen weitere Formen der Theorie-Experiment-Wechselwirkung, nämlich (c) das Verwerfen von Modellannahmen (Stokes-Reibung führt zu unrealistischen Endgeschwindigkeiten) anhand experimenteller Daten und (d) die Bestimmung eines Parameters durch bestmögliche Übereinstimmung der theoretischen Funktion für $y(t)$ mit den Messdaten:

$$y(t) = \frac{v_E^2}{g} \ln\left(\cosh\left(\frac{g}{v_E} t\right)\right) \quad \{6\}$$

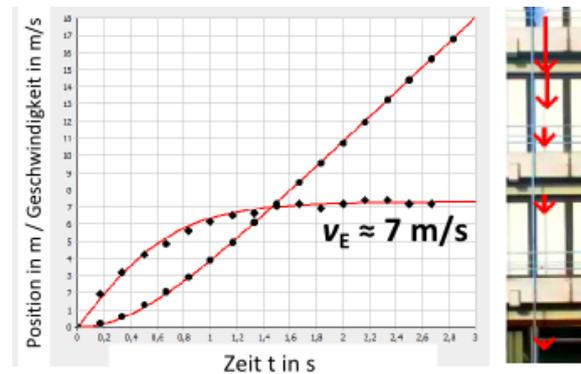


Abb. 6: Multiple, kohärente Repräsentationen am Beispiel des freien Falls mit Luftreibung. Links: Kinematik-Graphen mit Fitfunktionen, rechts: Beschleunigungsvektoren in realem Bild der Bewegung.

Im Gegensatz dazu reduziert sich der theoretische Anspruch der mVA-Aufgabe weiter (Differentialgleichung muss aufgestellt und umgeformt werden; konzeptionell: Gesamtbeschleunigung = 0 im Kräftegleichgewicht), d. h.

$$mg = \frac{1}{2} c_w \rho A v_E^2, \quad \{7\}$$

wobei ρ die Luftdichte ist. Dagegen ist der experimentell-motorische und -kognitive Anteil hoch: Das Experimentiermaterial erstellen die Studierenden selbst und der Versuch wird mehrfach unter Variation der Kegelmasse bei gleichem Querschnitt durchgeführt – um die Endgeschwindigkeit v_E zu bestimmen (geschickte experimentelle Lösung: mehrere Kegel übereinanderlegen).

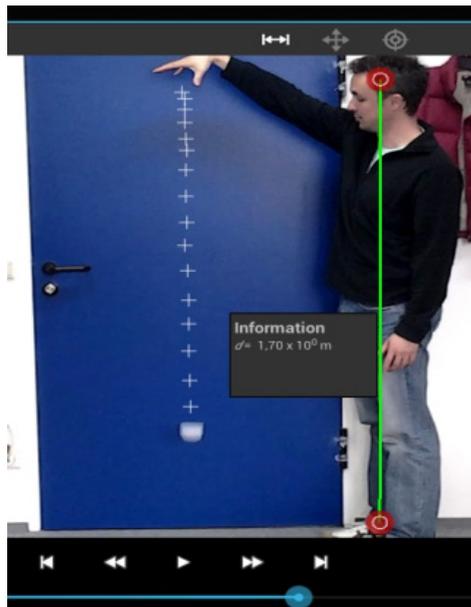


Abb. 7: Analyse des Fallkegalexperiments

m	v_E
[g]	[m/s]
0,36	1,52
0,72	2,41
1,08	2,83
1,44	3,27
1,80	3,64

Tab. 2: Messwerte zum Fallversuch.

Das Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment besteht nicht nur darin, berechnete und beobachtete Werte miteinander zu vergleichen, sondern durch analytische experimentelle Variationen (Verändern der Kegelmasse bei gleicher Fläche; Variablenisolierung), die theoretisch begründet sind, Wirkungszusammenhänge zu bestätigen bzw. herauszufinden ($v_E \sim \sqrt{m}$, siehe Tab. 2).

Zusammenfassend sind die wesentlichen Unterschiede der Aufgabenformate in Tab. 3 (Anhang) aufgeführt. Im Folgenden wird die Implementation der VA- und mVA-Aufgaben in die Hochschullehre dargestellt.

4. Implementation der neuen Aufgabenformate in die Hochschullehre an der TU Kaiserslautern

4.1. Organisatorischer Rahmen

An der Technischen Universität Kaiserslautern umfasst die Experimentalphysik 1 im ersten Studiensemester wie an vielen anderen deutschen Universitäten die klassische Mechanik (etwa 80%) und die Thermodynamik (etwa 20%). Der Vorlesungsumfang beträgt 4 SWS und 2 SWS Übung. Die Lehrveranstaltungen werden von Diplom-, Bachelor-, Lehr-

amt-, Biophysik- und Nebenfachstudenten besucht und mit einer Klausur abgeschlossen. Typischerweise absolvieren die Studierenden am Ende des Semesters ein physikalisches Praktikum (Anfängerpraktikum, zehn Versuche in vier Wochen).

Die wöchentlichen Übungsblätter umfassen 3-5 Problemstellungen, die an die Vorlesungsinhalte anknüpfen. Diese werden im Selbststudium bearbeitet, zur Korrektur abgegeben, bewertet und in den Präsenzübungen besprochen. Eine erfolgreiche Bearbeitung von mindestens der Hälfte aller Übungsaufgaben ist Bedingung für die Klausurzulassung. Der von den Studierenden wahrgenommene zeitliche Aufwand für das Bearbeiten der Aufgaben ist deutlich mehr als die doppelte Vorlesungszeit⁵.

4.2. VA- und mVA-Aufgaben in den Übungen

Im Projekt „physics.move“ beträgt der Anteil der neuen Aufgabenformate etwa 1–2 Aufgaben pro wöchentlichem Übungsblatt (im Semestermittel ca. 50–60%). Dabei führen in den ersten Wochen zunächst VA-Aufgaben an die Auswertemethodik heran, bevor mVA-Aufgaben das eigenständige Experimentieren fördern. Die verwendeten Videos werden als Ergänzungsmaterial online bereitgestellt. Zudem erhalten die Studierenden zu jeder VA-Aufgabe ein Bild des Versuchsaufbaus, welches auch online verfügbar ist. Die Erfassung der Messdaten erfolgt mit Hilfe einer Videoanalyse-Software⁶, mit deren Hilfe das Realexperiment vielfältig ausgewertet werden kann. Beispielsweise können Diagramme erstellt, Vektoren visualisiert, Kurven mit freien Parametern an die Messwerte angepasst und abgeleitete physikalische Größen wie Energie, Impuls oder Kraft berechnet werden [29]. Es ist natürlich möglich, die Daten auch mit weiteren Verarbeitungsprogrammen wie EXCEL oder MatLab auszuwerten, wenn die Kursstruktur dies vorsieht (Modellierung, numerische Verfahren). Es empfiehlt sich, den Studierenden technischen Support bzgl. einer Software anzubieten, aber auch die Entscheidung zu überlassen, mit welcher Software sie die Videodaten erfassen möchten.

Für eine erfolgreiche Implementation ist es notwendig, die Studenten in den ersten zwei Vorlesungswochen in den Umgang mit dem Videoanalyseprogramm oder dessen Applikation einzuführen, Tipps zur Videoaufnahme bereitzustellen und Regeln für die Abgabeformate zu besprechen (z. B. jeweils in Form einer ausgearbeiteten Musterlösung). Es hat sich bewährt, nach wie vor auf handschriftliche Abgaben (statt digitalen Dokumenten) zu bestehen – die Ergebnisse der video-experimentellen Analyse

⁵ Ergebnis einer freiwilligen Befragung aus drei Semestern. Der Aufgabentyp (traditionell, Videoanalyse, s. Kap. 2) hat keinen Einfluss auf das Ergebnis.

⁶ Zum Beispiel „MeasureDynamics“, „ViAna“ oder „Tracker“, siehe 4.4 für praktische Hinweise.

(Diagramme, Videoscreenshots) werden der Abgabe als ausgedruckte Bilder beigelegt. Die Besprechung der VA- und mVA Aufgaben erfolgt durch Präsentation in den Übungsgruppen mit Hilfe von Laptop und Beamer.

4.3. Erste qualitative Forschungsergebnisse

An der TU Kaiserslautern sind seit dem Wintersemester 2012/13 (mobile) Videoanalyse-Aufgaben durch eine enge Kooperation zwischen der Arbeitsgruppe für Physikdidaktik und experimentalphysikalischen Arbeitsgruppen ein fester Bestandteil der Übungen. Die Rückmeldungen von Studierenden sind trotz des verbundenen organisatorischen Mehraufwands (Erlernen der Software/App, Download von Videos) überwiegend positiv. Halboffene leitfadengestützte Interviews ergaben, dass die Studierenden (i) die physikalischen Inhalte wegen der Anschaulichkeit besser verstehen (Selbsteinschätzung!), (ii) durch experimentelle Aktivitäten einen leichteren Einstieg in die Aufgabenstellungen finden und (iii) ihre eigene Leistung besser einschätzen können, denn das Experiment verlange ein komplettes Verständnis der Inhalte. Außerdem äußerten sie, dass sich (iv) eine experimentelle Bestätigung der theoretischen Vorhersagen positiv auf das akademische Selbstkonzept (eigene Einschätzung der Leistungsfähigkeit) auswirkt. Letzteres konnte auch im Rahmen der Vergleichsstudie wiederholt quantitativ nachgewiesen werden (Stichprobengröße ≈ 50 , $p < 0.05$, mittelgroße Effektstärke), in welcher die Kontrollgruppe ausschließlich mit T-Aufgaben und die Interventionsgruppe mit einem Mix aus T-Aufgaben und parallelen VA- und mVA-Aufgaben arbeitete [16, 30]. Das konkrete Design und die Ergebnisse der empirischen Begleitforschung im Rahmen des Projekts werden in einem Nachfolgebeitrag dargestellt.

4.4. Praktische Hinweise

Um den Implementationserfolg der neuen Aufgabenformate zu gewährleisten wird Folgendes empfohlen:

- vor dem Einsatz die technischen Voraussetzungen prüfen (jede/r Studierende benötigt Zugang zu einem PC) und technische Hilfestellungen gewährleisten; Videos müssen den Studierenden zur Verfügung gestellt werden (Online-Plattform),
- die Videoanalyse als Mess- und Auswertungsmethode zu Semesterbeginn in den Übungsgruppen durch Experten (z.B. geschulte Übungsleiter) als essentieller Bestandteil der Übungen einführen,
- strikt zu regeln, wie die Bearbeitung der Aufgaben dokumentiert wird (Abgabe von USB-Sticks mit Messdaten oder Ausdruck der Ergebnisse, anfertigen eines kleinen Protokolls zu jedem Versuch usw.),

- mit geringer experimenteller Komplexität zu beginnen (erst VA-Aufgaben ohne selbstständige, experimentelle Tätigkeit) und diese schrittweise erhöhen; Tipps zur Aufnahme eigener Videos geben.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden VA- und mVA-Aufgaben als neue Aufgabenformate zur Ergänzung traditioneller T-Aufgaben in den Übungen zur Experimentalphysikvorlesung „Mechanik“ vorgestellt. Experiment-basierte Aufgabenstellungen, die den Umgang mit Messdaten schon frühzeitig im Studium fördern und das Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment einleiten, haben das Potential, die Leistung und die Motivation der Studierenden zu erhöhen.

Die Implementierbarkeit in bestehende Lehrstrukturen an anderen deutschen Universitäten ist mit praktikablen organisatorischem Aufwand verbunden, weshalb *physics.move* sowie das erweiterte Projekt ViPER-Physics⁷ im Vergleich zu anderen internationalen Ansätzen, die ähnliche Ziele verfolgen (Steigerung der Leistung und Motivation durch Selbsttätigkeit), ökonomischer ist: Die Aufgabenstellungen und Videos werden ab 2016 in einem Arbeitsbuch zum Einsatz in der universitären Lehre verfügbar sein (veröffentlicht bei Springer; Arbeitstitel „Smarte Aufgaben zur Experimentalphysik I“); Videoanalyseprogramme sind als Freeware verfügbar oder liegen im Preisbereich < 600 € (Mehrfach-Lizenzen); Mobile Videoanalyseaufgaben setzen Tablet-Computer oder Digitalkameras voraus, die weit verbreitet sind oder immer günstiger werden. Mit Hilfe spezieller Applikationen kann die Analyse auf dem mobilen Endgerät erfolgen⁸.

Die nächsten Schritte bestehen (1) in einer Erweiterung der Videoanalyse-Aufgaben zu sogenannten Videoaufgaben, in denen auch sensorbasierte Informationen zu einem Experiment videographiert werden (z. B. Spannungen und Feldstärken, um das Aufgabenformat auch in weiteren Lehrveranstaltungen fortzuführen⁹), (2) in einer Untersuchung tiefergehender Fragestellungen, z. B. zu der Rolle des Kontextes in den Experimentiervideos oder zu Dosis-Wirkungs-Beziehungen („welcher Anteil an VA-Aufgaben führt zu optimalem Lernerfolg?“), und (3)

7 <http://www.physik.uni-kl.de/kuhn/forschung/vip-video-based-problems/>

8 <http://www.vernier.com/products/software/video-physics/> (iOS Plattform)

<http://www.physik.uni-kl.de/kuhn/forschung/vip-video-based-problems/video-analysis-app/> (Android – Plattform)

9 <http://www.physik.uni-kl.de/kuhn/forschung/vip-video-based-problems/viper-physics/>

in einer langfristigen Untersuchung der Studienabbruchquoten.

6. Literatur

- [1] Rudolph, A.L.; Lamine, B.; Joyce, M.; Vignosses, H. & Consiglio, D. (2013). Introduction of interactive learning into French university physics classrooms. In: *Physical Review Letters Special Topics: Physics Education Research* 10, 010103
- [2] Heublein, U. & Wolter, A. (2011). Studienabbruch in Deutschland. Definition, Häufigkeit, Ursachen, Maßnahmen. In: *Zeitschrift für Pädagogik*, 57, 2, S. 214–236
- [3] Hake, R.R. (1998): Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics. In: *American Journal of Physics* 66, S. 64–74
- [4] Crouch, C.H. & Mazur, E. (2001). Peer Instruction: Ten years of experience and results. In: *American Journal of Physics* 69, 9, S. 970–977
- [5] Beichner, R.; Saul, J.; Abbott, D.; Morse, J.; Deardorff, D.; Allain, R.; ... & Risley, J. (2007). The Student-Centered Activities for Large Enrollment Undergraduate Programs (SCALE-UP) project. Research-Based Reform of University Physics. In: Redish, E.F. und Cooney, P.J. (Hrsg.). *American Association of Physics Teachers*, College Park, MD. Ausgabe 1.
- [6] Laws, P.W. (1991). Calculus-based physics without lectures. In: *Physics Today* 44, 8, S. 24–31.
- [7] Ruiz-Primo, M.A.; Briggs, D.; Iverson, H.; Talbot, R. & Shepard, L.A. (2011). Impact of undergraduate science course innovations on learning. In: *Science*, 331, 6022, S. 1269–1270
- [8] Finkelstein, N.D. & Pollock, S.J. (2005). Replacating and understanding successful innovations: implementing tutorials in introductory physics. In: *Physical Review Letters Special Topics: Physics Education Research* 1, 010101
- [9] Gröber, S.; Klein, P. & Kuhn, J. (2014). Video-based problems in introductory mechanics physics courses. In: *European Journal of Physics*, 35 (5), 0505019.
- [10] Klein, P. Gröber, S., Kuhn, J. & Müller, A. (2014). Video analysis of projectile motion using tablet computers as experimental tool. *Physics Education* 49 (1), S. 37–40.
- [11] Klein, P., Gröber, S., Kuhn, J. & Müller, A. (2014). Mobile Videoanalyse mit Tablet PC im Physikunterricht am Beispiel des freien Falls mit Luftreibung. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule (PdN-PhiS)* 63 (2014), Heft Nr. 6, 33–35.
- [12] Laws, P. (1998). Using digital video analysis in introductory mechanics projects. In: *The Physics Teacher* 5, 36, S. 282 ff.
- [13] Beichner, R. (1996). Impact of video motion analysis on kinematic graph interpretation skills. In: *American Journal of Physics* 64, S. 1272–1277.
- [14] Escalada, L. & Zollman, D. (1997). An investigation on the effects of using interactive digital video in a physics classroom on student learning and attitudes. In: *Journal of Research in Science Teaching*, 34, 5, S. 467–489.
- [15] Wilhelm, T. & Trefzger, T. (2010). Erhebung zum Computereinsatz bei Physik-Gymnasiallehrern. In: *PhyDid-B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 2010, S. 9.
- [16] Klein, P.; Gröber, S.; Kuhn, J. & Müller, A. (2013). Experimentelle Aufgaben in den Übungen zur Experimentalphysik 1. In D. Höttecke (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung zwischen Science- und Fachunterricht*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in München 2013 (S. 312 – 314). Kiel: IPN.
- [17] Klein, P.; Kuhn, J.; Müller, A. & Gröber, S. (2014). Video analysis exercises in regular introductory mechanics physics courses: Effects of conventional methods and possibilities of mobile devices. In: A. Kauertz, H. Ludwig, A. Müller, J. Pretsch & W. Schnotz (Hrsg.): *Multidisciplinary Research on Teaching and Learning*, Basingstoke: Palgrave Macmillan.
- [18] Pientka, H. (Hrsg.) (2002). *Aufgabenkultur [Themenheft]*. PdN-Physik, 4 (49).
- [19] Kuhn, J. (2010). *Authentische Aufgaben im theoretischen Rahmen von Instruktions- und Lehr-Lern-Forschung: Effektivität und Optimierung von Ankermedien für eine neue Aufgabenkultur im Physikunterricht*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- [20] Kuhn, J.; Müller, A.; Müller, W. & Vogt, P. (2010). Kontextorientierter Physikunterricht: Konzeptionen, Theorien und Forschung zu Motivation und Lernen. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule (PdN-PhiS)*, 5 (59), S. 13–25.
- [21] Watkins, J.; Coffey, J.E.; Redish, E.F. & Cooke, T.J. (2012). Disciplinary authenticity: Enriching the reforms of introductory physics courses for life-science students. In: *Physical Review Special Topics – Physics Education Research* 8, 1, S. 1–17.
- [22] Sacher, M. (2014). Dem “Gefühl für Physik” auf der Spur. In: *Physik Journal*, 13, 6, S. 3.
- [23] Crouch, C.H.; Fagen, A.P.; Callanc, J.P. & Mazurd, E. (2004). Classroom demonstrations: Learning tools or entertainment? In: *American Journal of Physics*, 72, S. 835–838.
- [24] Albrecht, A. & Nordmeier, V. (2010). Studiererfolg im Fach Physik. In: *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.

- [25] Mashood, K.K. & Singh, V.A. (2012). An inventory on rotational kinematics of a particle: unravelling misconceptions and pitfalls in reasoning. *European Journal of Physics*, 33(5), S. 1301–1312.
- [26] Kagan, D. (2001). The Shaken-Soda Syndrome. In: *The Physics Teacher* 39, S. 290–292.
- [27] Gray, G.L.; Evans, D.; Cornwell, P.; Costanzo, F. & Self, B. (2005) "The Dynamics Concept Inventory Assessment Test: A Progress Report," Proceedings of the 2005 American Society for Engineering Education Annual Conference, Portland, OR
- [28] T. Wilhelm, Der alte Fallkegel - modern behandelt, in: *Praxis der Naturwissenschaften* 6/49, 2000, S. 28 – 31, www.thomas-wilhelm.net/veroeffentlichung/Fallkegel.pdf
- [29] Wilhelm, T. (2011). Möglichkeiten der Videoanalyse, Habilitationsschrift: Universität Würzburg. www.thomas-wilhelm.net/veroeffentlichung/Habilitation.pdf
- [30] Klein, P.; Gröber, S.; Kuhn, J. & Müller, A (2014). Experimentelle Aufgaben in den Übungen zur Experimentalphysik 1. In D. Höttecke (Hrsg.), *Heterogenität und Diversität - Vielfalt der Voraussetzungen im naturwissenschaftlichen Unterricht*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Bremen 2014 (eingereicht). Kiel: IPN.

7. Anhang

Bsp.	T-Aufgabe	VA-Aufgabe	mVA-Aufgabe	
3.1	QK	<ul style="list-style-type: none"> - Richtung von Vektoren - Beschleunigte vs. konstante Kreisbewegung: Gemeinsamkeiten und Unterschiede 	<ul style="list-style-type: none"> - Richtung von Vektoren - Beschleunigte vs. konstante Kreisbewegung: Gemeinsamkeiten und Unterschiede 	
	MT	<ul style="list-style-type: none"> - formale Vektoralgebra (Kreuzprodukte, Ableitungen explizit) - formales Rechnen in Polarkoordinaten 	<ul style="list-style-type: none"> - Interpretation von Bewegungsgraphen 	
	Exp		<ul style="list-style-type: none"> - Messdaten aufnehmen und darstellen - lineare Regression zwecks Parameterbestimmung - Modellannahmen überprüfen / semiquantitativ argumentieren 	
3.2	QK	<ul style="list-style-type: none"> - Superposition von Geschwindigkeitsvektoren 		<ul style="list-style-type: none"> - Superposition von Geschwindigkeitsvektoren - Exp. Beobachtungen erklären
	MT	<ul style="list-style-type: none"> - Trägheitsmomente herleiten - Approximationen 		<ul style="list-style-type: none"> - Größen abschätzen
	Exp			<ul style="list-style-type: none"> - einfache Freihandexperimente planen und durchführen (Materialien suchen) - Hypothesenbildung und experimentelle Prüfung - Messdaten aufnehmen und vergleichen
3.3	QK		<ul style="list-style-type: none"> - Kurvenverläufe erklären - Richtung und Länge von Vektoren 	<ul style="list-style-type: none"> - Exp. Beobachtung erklären
	MT		<ul style="list-style-type: none"> - Nachweis einer vorgegebenen Lösungsfunktion für die Differentialgleichung 	<ul style="list-style-type: none"> - Größen abschätzen
	Exp		<ul style="list-style-type: none"> - Kinematik-Graphen aufnehmen und darstellen - Anpassung einer theoretischen Funktion an Messdaten (Parameterfit) 	<ul style="list-style-type: none"> - Versuchsmaterial finden - Messreihe erstellen - Konfirmatorisches Experimentieren, Variablenkontrolle

Tab. 3: Zusammenfassender Vergleich der Aufgabenformate aus 3.1-3.3. Einige Aufgabenanteile, die formatübergreifend Bestand haben, sind nicht aufgeführt (z. B. in 3.2: Schwerpunktbeschleunigung herleiten). QK = Qualitative Fragen und konzeptionelles Verständnis, MT = Mathematisch-theoretischer Anspruch, Exp = Experimentelle Anteile.