

Vergleichsstudie zum Computereinsatz in der Newton'schen Mechanik

Jannis Weber*, Thomas Wilhelm*

*Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt a. M.
weber@physik.uni-frankfurt.de, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Die Grundaussagen der Newton'schen Mechanik sind aufgrund vielfältiger und dazu scheinbar widersprüchlicher Alltagswahrnehmungen für Schülerinnen und Schüler nur schwer zu erlernen. Dies zeigt sich in einem nicht angemessenen Kraftverständnis und aus fachlicher Sicht hartnäckigen Fehlvorstellungen im Bereich der Mechanik.

Hier wird eine Vergleichsstudie vorgestellt, bei der die durchgeführten Interventionen die Verbesserung des Konzeptverständnisses der Newton'schen Mechanik zum Ziel haben. Es wird mit realen Experimenten gearbeitet und Reibungseinflüsse werden bewusst thematisiert und diskutiert. Vertieft werden dabei die grundlegenden Gesetze der Mechanik. Dabei wird einerseits der Ansatz gewählt, dass Lernende reale Bewegungen selbst am Computer modellieren und mit der Realität vergleichen und diese andererseits mit Videoanalyseprogrammen analysieren. Die vorläufigen Ergebnisse deuten an, dass die Interventionen wirksam für das Verbessern des Konzeptverständnisses sind. Außerdem wird auf die spezifischen Unterschiede zwischen beiden Interventionen eingegangen.

1. Einleitung

Schüler(fehl)vorstellungen halten sich in der Mechanik besonders hartnäckig und sind sehr gut erforscht [1]. Ein Erklärungsansatz dafür ist die Tatsache, dass die Mechanik sich mit der direkten Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler beschäftigt und sich die Schülervorstellungen somit im Laufe des Lebens der Lernenden festigen konnten.

Die Schulmechanik steht also vor der Aufgabe, den Schülerinnen und Schülern physikalisch korrekte und tragfähige Konzepte zu liefern, sodass sie neben ihren bestehenden Präkonzepten die physikalisch erwünschten aufnehmen und diese in Aufgaben nutzen. Dies erweist sich erfahrungsgemäß als schwierig.

Schülerinnen und Schüler gehen zu einem Großteil davon aus, dass eine Kraft in Bewegungsrichtung wirken müsse, damit sich etwas bewegen kann. Dies ist aus Alltagssicht naheliegend, da man z. B. auf dem Fahrrad dauerhaft in die Pedale treten muss, um mit einem bestimmten Tempo zu fahren und auch im Auto wird das Gaspedal konstant betätigt, wenn es sich mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit bewegt. Ohne eine Thematisierung der Reibung ist für Schülerinnen und Schüler die Notwendigkeit nicht ersichtlich von ihren Konzepten auf die der Newton'schen Mechanik überzugehen.

Eine Thematisierung von Reibung stellt den Physikunterricht aber vor mathematische Probleme. Es ist nicht möglich, reale Bewegungen, bei denen mehrere Kräfte wirken, die möglicherweise geschwindigkeits- oder ortsabhängig sind, ohne Hilfsmittel quan-

titativ zu betrachten. Ein solches Hilfsmittel kann hier der Computer darstellen.

Einerseits kann der Computer genutzt werden, um Bewegungen zu modellieren. Dabei kann sich der Nutzer bzw. die Nutzerin Gedanken über die auf einen Körper wirkenden Kräfte machen und so das zu einer Bewegung gehörende mathematische Modell erstellen. Es sollte selbst entschieden werden, ob Reibung in einem konkreten Fall einbezogen werden muss oder nicht. Es wird also ein theoretisches Modell erstellt, was dann mit der Realität verglichen werden kann.

Andererseits kann der Computer zur Messung und Auswertung von Experimenten genutzt werden. Dabei können Messdaten dargestellt und interpretiert werden, wobei der Einfluss von Reibung qualitativ besprochen werden kann. Ein Beispiel hierfür ist die Videoanalyse, die mit einfachen Mitteln eine Analyse von alltäglichen Bewegungen ermöglicht. Hier wird also von Messdaten eines Experiments ausgegangen und diese mit der dahinterliegenden Theorie verknüpft und erklärt.

2. Theoretischer Hintergrund

2.1. Mathematische Modellbildung

Mathematische Modellbildung bezeichnet die „Konstruktion eines Netzwerks physikalischer Begriffe und Beziehungen, mit denen das Verhalten eines physikalischen Systems beschrieben und vorhergesagt werden kann“ [2]. Mathematische Modellbildung für den Physikunterricht ist keine neue Idee und wurde schon in den 1980er-Jahren eingesetzt. Die Art und Weise und verwendete Software hat

sich seitdem grundlegend verändert [3]. In den frühen Jahren wurde das Programm nahezu ausschließlich von der Lehrkraft bedient. Dabei wurde meist auf die Nutzung von Programmiersprachen wie „Basic“ oder „Pascal“ zurückgegriffen. Möglich ist die mathematische Modellbildung auch mit Tabellenkalkulationsprogrammen wie Microsoft Excel, wobei in beiden Fällen die sogenannte „Methode der kleinen Schritte“ genutzt wird. Graphische Modellbildungsprogramme bieten hingegen den Vorteil, dass die zugrundeliegende Struktur des mathematischen Modells visuell dargestellt wird. Außerdem gibt es gleichungsbasierte Modellbildungssoftware, in der lediglich die wirkenden Kräfte, die Anfangsbedingungen und die Masse eines Objekts eingegeben werden müssen, was die Bedienung vereinfacht. Jede dieser Arten der Modellbildung bringt Vor- und Nachteile mit sich und muss je nach Zielsetzung des Unterrichts eingesetzt werden.

Forschungen zum Einsatz der mathematischen Modellbildung zeigen, dass insbesondere in der Sekundarstufe die zum Teil weitreichenden Erwartungen bisher nicht erfüllt werden konnten [4; 5]. Dennoch konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von graphischen Modellbildungsprogrammen im Vergleich zum normalen Unterricht eine Verbesserung der halb-quantitativen Beschreibung von mechanischen Bewegungen bewirkte [6]. Benacka konnte einen motivierenden Effekt von Modellbildung mit Excel bei Oberstufenschülern zeigen [7; 8; 9]. In Universitäten konnte sich „VPython“ [10], mit dem man mithilfe der Python-Programmiersprache einfach 3D-Animationen erstellen kann, zur Modellbildung etablieren [11]. In Schulen scheint dessen Einsatz mit mehr Problemen daherzukommen [12].

Gerade wenn Lernende die Software selbstständig nutzen sollen, ist eine intuitive und einfache Bedienung wichtig. Daher wird der Einsatz des gleichungsbasierten Modellbildungsprogramms „Newton-II“ [13] erforscht, zu dem es bisher keine empirischen Untersuchungen gibt. Hier steht der Zusammenhang zwischen Kräften und Bewegung im Mittelpunkt, während die kinematischen Zusammenhänge vom Programm automatisch berechnet werden.

2.2. Videoanalyse

Videoanalyse ist eine kontaktlose Messmethode, die es erlaubt, zweidimensionale Bewegungen auf eine einfache Art zu analysieren und die gewonnenen Daten auf vielfältige Weise darzustellen. Im Vergleich zu Messwerterfassungssystemen sind gerade diese einfach zu nutzenden Darstellungsmöglichkeiten ein großer Vorteil. Auch die Videoanalyse wird bereits seit vielen Jahren im Physikunterricht eingesetzt [14] und hat sich in den letzten Jahren, auch durch verbesserte Software, zunehmend etabliert [15; 16]. Videoanalyse kann an Laptops, Tablets und Smartphones durchgeführt werden, die unterschiedliche Vor- und Nachteile mit sich bringen.

Insgesamt haben Studien zur Videoanalyse bereits zeigen können, dass Probanden bei der Nutzung einen Vorteil beim Interpretieren von Bewegungsgraphen [17] und dem Konzeptverständnis zum Bremsvorgang haben [18]. Außerdem konnten positive Effekte auf Motivation und Neugierde gemessen werden [19]. Es konnte gezeigt werden, dass das Konzeptverständnis insbesondere bei anspruchsvollen Aufgaben in der Kinematik durch den Einsatz von Videoanalyse stärker als durch normalen Unterricht verbessert wird [20]. Die Nutzung von multiplen Repräsentationen [21], wie bspw. Graphen oder Vektorpfeilen in Kombination mit Videos, kann sich positiv auf den Lernzuwachs auswirken [22]. Insgesamt sind die Forschungsergebnisse zur Videoanalyse aber weitestgehend auf den Bereich der Kinematik beschränkt. In dieser Studie wird der Einsatz der Software „measure dynamics“ [23] für Laptops im Bereich der Dynamik erforscht.

3. Zielsetzung der Studie

Die Studie betrachtet Schülerinnen und Schüler, die bereits im normalen Schulunterricht die Newton'schen Gesetze behandelt haben. Sie soll untersuchen, inwiefern eine anschließende Intervention zur Newton'schen Dynamik mit mathematischer Modellbildung bzw. Videoanalyse wirksam für das weitere Erlernen bzw. Vertiefen der Dynamik ist.

Neben der Wirksamkeit der Interventionen ist außerdem eine differenziertere Betrachtung von Interesse, bei der es darum geht, ob sich die Interventionen im Lernzuwachs unterscheiden und ob es Unterschiede in verschiedenen inhaltlichen Bereichen gibt.

4. Studiendesign

Um die Forschungsfragen zu beantworten wurde eine quasi-experimentelle Studie im Prä-Post-Design durchgeführt [24]. Dazu wurde eine Intervention zur Dynamik mit mathematischer Modellbildung (mit „Newton-II“) und eine mit Videoanalyse (mit „measure dynamics“) erstellt, welche sich nur im Einsatz der Software unterscheiden. Dabei werden jeweils vier Experimente durchgeführt (Fallbewegung mit Reibung, abschnittsweise beschleunigte Bewegung eines Wagens, schiefer Wurf mit und ohne Reibung, Kreisbewegung), welche daraufhin in Partnerarbeit mit dem Computer modelliert oder analysiert werden. Die Probanden arbeiten nach einer Einführung in das Programm selbstständig mit der Software. Die Klassen (E-Phasen/11. Klassen) besuchen dazu das Schülerlabor der Goethe-Universität Frankfurt und werden klassenweise zu einer der beiden Interventionen zugeordnet. Der Vortest wird in der Schule durchgeführt, während der Nachtest direkt im Anschluss an die Intervention folgt. Die Interventionen nehmen dabei ca. 3,5 Stunden (mit einer Pause) in Anspruch, wonach sich direkt der Nachtest anschließt.

5. Vorläufige Ergebnisse

Für die Durchführung der Studie wurde für das erste Halbjahr 2020 eine Teilnahme von 33 Klassen mit insgesamt ca. 630 Schülerinnen und Schülern organisiert. Als die Hälfte der Klassen teilgenommen hatte, gab es in Folge der Corona-Krise eine Schulschließung und die Vorgabe, dass im ganzen Schuljahr keine außerschulischen Aktivitäten mehr stattfinden dürfen.

Nach der bisherigen Durchführung der Intervention mit 17 Klassen haben N = 246 Lernende (davon 106 weiblich) an Vortest, Intervention und Nachtest teilgenommen. Mit diesen Daten sollen einige Ergebnisse vorgestellt werden.

5.1. Konzeptverständnis

Zum Testen des Konzeptverständnisses wurde ein Test mit 19 Items erstellt und pilotiert [25]. Wenn man damit den Zuwachs im Konzeptverständnis betrachtet (siehe Abb. 1), können beide Interventionsformen als erfolgreich angesehen werden. Der Unterschied in diesen 19 Items zwischen Vor- und Nachtest war in beiden Gruppen höchst signifikant mit Effektstärken von $r = 0,74$ (Modellbildung) bzw. $r = 0,76$ (Videoanalyse), was jeweils einem großen Effekt entspricht und insbesondere erfreulich ist, da die Interventionen eine Vertiefung nach dem eigentlichen Unterricht der Newton'schen Gesetze darstellten.

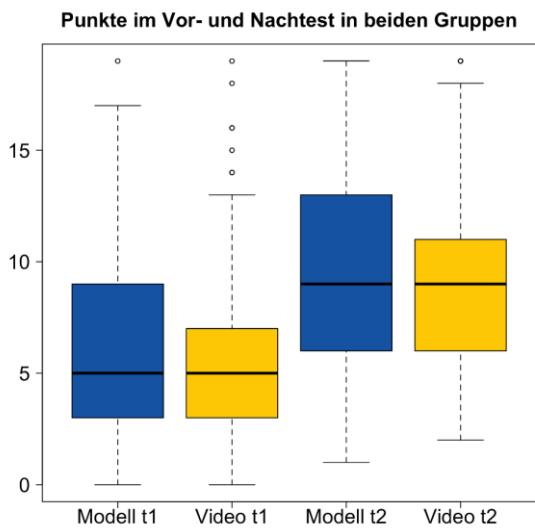


Abb. 1: Boxplots der Punktzahlen (von maximal 19) beider Gruppen in Vor- und Nachtest.

In der Pilotierung wurden vier inhaltliche Skalen gefunden [25], die eine differenziertere Betrachtung erlauben. Diese Skalen wurden „Beschleunigungsdiagramme“, „1. Newton'sches Gesetz“, „Bewegung bei bekannter Kraft“ und „Kraft bei bekannter Bewegung“ genannt. Dabei wurde bewusst eine rein kinematische Skala in den Test einbezogen, während die beiden letztgenannten sich zusammen als Verständnis des 2. Newton'schen Gesetzes interpretieren lassen. Bei allen Skalen gibt es höchst signifi-

kante Zugewinne in beiden Teilgruppen. Hinzu genommen wurde eine Skala zum 3. Newton'schen Gesetz aus dem FCI-Test [26], welche als inhaltliche Kontrollskala dient, da das Wechselwirkungsprinzip nicht Teil der Intervention ist. Während der Zugewinn bei den ersten vier Skalen den Erwartungen entspricht, erstaunt der Zugewinn bei der Kontrollskala „3. Newton'sches Gesetz“ zunächst (siehe Abb. 2).

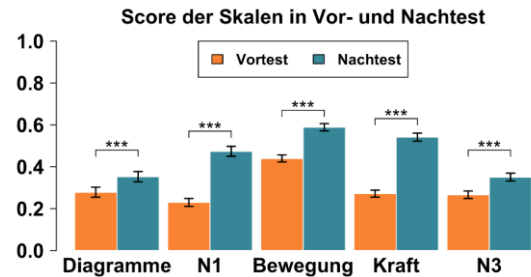


Abb. 2: Anteil an richtigen Antworten für beide Gruppen in den Skalen in Vor- und Nachtest mit Standardfehler. Signifikanzniveau: *** $p < 0,001$

Wenn man sich die Items einzeln anschaut, ergibt sich ein differenzierteres Bild. Es ist zu erkennen, dass die Veränderung der Skala nur auf ein Item zurückzuführen ist (siehe Abb. 3). In diesem Item wird nach den Kräften auf einen PKW und einen LKW gefragt, während der PKW den LKW mit konstanter Geschwindigkeit vor sich herschiebt. Eine Hypothese zur Erklärung des größeren Anteils richtiger Antworten ist hier, dass die Probanden durch die Intervention gelernt haben, dass eine konstante Geschwindigkeit immer mit einem Kräftegleichgewicht einhergeht und diese Erkenntnis fälschlicherweise auf die Gleichheit von zwei an unterschiedlichen Körpern angreifenden Kräften übertragen haben (Wechselwirkungsprinzip), was eine typische Schülerfehlvorstellung ist [1].

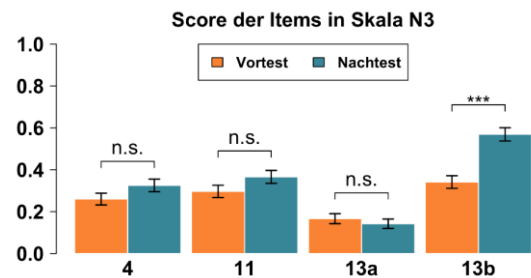


Abb. 3: Anteil an richtigen Antworten für beide Gruppen in den Skalen in Vor- und Nachtest mit Standardfehler. Signifikanzniveau: *** $p < 0,001$, n. s. nicht signifikant

Beim inhaltlichen Lernzuwachs scheint es zwischen den Gruppen keinen Unterschied zu geben. Es konnte weder ein Unterschied im gesamten Lernzuwachs (Abb. 4) noch in den Skalen „Beschleunigungsdiagramme“, „1. Newton'sches Gesetz“, „Kraft zu

Bewegung“, „Bewegung zu Kraft“ und „3. Newton'sches Gesetz“ gefunden werden.

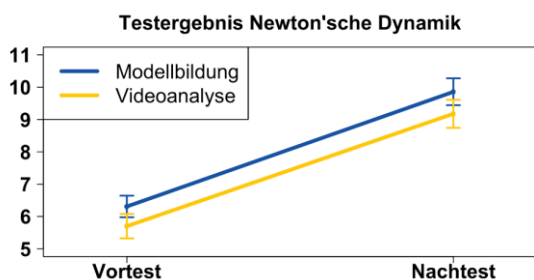


Abb. 4: Durchschnittliche Punktzahlen im gesamten Test (von 19) zur Newton'schen Dynamik in Vor- und Nachtest von beiden Gruppen mit Standardfehler.

5.2. Modellverständnis

Der durchschnittliche Score in der Skala zu Einstellungen zu Modellen in der Physik, in der verschiedene Items zu der Bedeutung von Modellen für die Physik enthalten sind, war bei der Gruppe der Modellbildung im Nachtest signifikant höher als im Vortest (mit Effektstärke von $d = 0,40$) während sich in der Gruppe der Videoanalyse nichts änderte (siehe Abb. 5). Es lässt sich also sagen, dass das eigenständige Modellieren von Bewegungen zu einer Veränderung der Ansichten über Modelle führt, auch wenn die Eigenschaften von Modellen nicht explizit thematisiert werden.

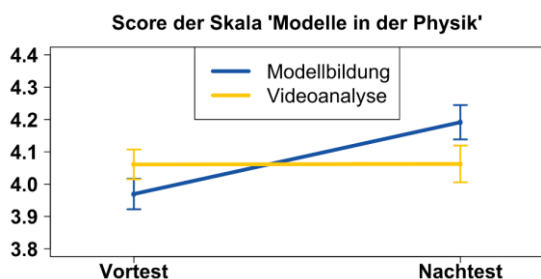


Abb. 5: Durchschnittlicher Score (von 5) in der Skala "Modelle in der Physik" in Vor- und Nachtest von beiden Gruppen mit Standardfehler.

6. Fazit

Es scheint, als seien beide Interventionen zum Vertiefen der Newton'schen Dynamik geeignet, wobei keine Unterschiede im Lernzuwachs zwischen den beiden Methoden gefunden werden konnten.

Das bedeutet auch, dass hier im Gegensatz zu vielen bisherigen Studien mit Software zur mathematischen Modellbildung auch bei der selbstständigen Nutzung des Programms keine großen, für den Lernprozess hinderlichen Schwierigkeiten beobachtet wurden. Das Programm „Newton-II“ und damit die gleichungsbasierte Modellbildung scheint bei Bereitstellung der nötigen Hilfen für den Einsatz im Schulunterricht geeignet zu sein.

Die Videoanalyse und deren Möglichkeiten zur Aufbereitung von Daten scheint ebenso für das Lernen der Dynamik geeignet. Auch wenn die Software die Verknüpfung zwischen Bewegung und Kräften nicht selbst herstellt, kann die Analyse der kinematischen Größen mit den richtigen Fragen zu einem besseren Kraftverständnis führen und Schülerfehlvorstellungen reduzieren.

7. Ausblick

Durch die Schulschließungen im Schuljahr 2019/20 konnten nicht so viele Klassen wie geplant teilnehmen. Um eine repräsentativere Stichprobe zu erhalten und gerade auch bei Subgruppen belastbare Aussagen treffen zu können, erscheint es sinnvoll, weitere Klassen an der Erhebung teilnehmen zu lassen.

Es wurden zudem weitere Daten erhoben, die es ermöglichen, die Interventionen differenzierter vergleichen zu können. Dazu gehören die Rückmeldungen der Lernenden zu verschiedenen Aspekten der Intervention. Weiterhin ist es interessant zu betrachten, ob aufgrund des erhobenen Interesses am Experimentieren und an theoretischen Zusammenhängen Schülertypen unterschieden werden können, die sich möglicherweise im Lernzuwachs unterscheiden und zu untersuchen, ob deren Lernzuwachs mit dem Gruppenfaktor wechselwirkt. Eine genauere und nicht ausschließlich dichotome Auswertung der Schülerantworten erlaubt außerdem Rückschlüsse auf die dahinterliegenden Präkonzepte.

Der in der Studie gemessene Cognitive Load kann einen Erklärungsansatz für den gemessenen Lernzuwachs bieten. Ein weiterer Punkt wird die Betrachtung sein, wie in den verschiedenen Interventionen mit dem Computer gearbeitet wird. Dies kann auch helfen, die durch die quantitativen Daten gewonnenen Aussagen zu begründen. Speziell beim Modellieren ist es von Interesse, wie zielgerichtet Schülerinnen und Schüler bei der Nutzung von Modellbildungssoftware vorgehen. Dazu wurden bei Durchführung der Interventionen Bildschirmvideos mit den Gesprächen in den Zweiergruppen aufgenommen, die noch ausgewertet werden müssen.

8. Literatur

- [1] Schecker, H.; Wilhelm, T. (2018): Schülervorstellungen in der Mechanik. In: Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M., Duit, R. (Hrsg.). Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis, Berlin: Springer Spektrum
- [2] Schecker, H. (1998): Physik-Modellieren. Grafikorientierte Modellbildungssysteme im Physikunterricht, Stuttgart: Klett-Verlag
- [3] Weber, J.; Wilhelm, T. (2020): The benefit of computational modelling in physics teaching: A historical overview. In: Eur. J. Phys. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ab7a7f>
- [4] Hucke, L. (1999): Handlungsregulation und Wissenserwerb in traditionellen und computer-

- gestützten Experimenten des physikalischen Praktikums. Berlin: Logos.
- [5] Sander, F.; Schecker, H.; Niedderer, H. (2001): Wirkungen des Einsatzes grafikorientierter Modellbildung im physikalischen Praktikum. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 7, 147-165.
- [6] Schecker, H.; Klieme, E.; Niedderer, H.; Ebach, J.; Gerdes, J. (1999): Abschlussbericht zum DFG-Projekt "Physiklernen mit Modellbildungssystemen". Förderung physikalischer Kompetenz und systemischen Denkens durch computergestützte Modellbildungssysteme. Bremen: Universität Bremen.
- [7] Benacka, J. (2015a): Projectile general motion in a vacuum and a spreadsheet simulation. In: Physics Education 50(1), S. 58-63. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/50/1/58>
- [8] Benacka, J. (2015b): Spreadsheet application showing the proper elevation angle, points of shot and impact of a projectile. In: Physics Education 50(3), S. 342-347 <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/50/3/342>
- [9] Benacka, J. (2016): Numerical Modelling with Spreadsheets as a Means to Promote STEM to High School Students. In: Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education 12(4), S. 947-964 <https://doi.org/10.12973/eurasia.2016.1236a>
- [10] Scherer, D.; Dubois, P.; Sherwood, B. (2000): VPython: 3D interactive scientific graphics for students. In: Computing in Science & Engineering 2(5), pp. 56-62 <https://doi.org/10.1109/5992.877397>
- [11] Caballero, M.; Kohlmyer, M.; Schatz, M. (2012): Implementing and assessing computational modeling in introductory mechanics. In: Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res. 8, 020106 <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.8.020106>
- [12] Caballero, M.; Burk, J.; Aiken, J.; Thoms, B.; Douglas, S.; Scanlon, E.; Schatz, M. (2014): Integrating Numerical Computation into the Modelling Instruction Curriculum. In: The Physics Teacher 52, pp. 38-42 <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1207/1207.0844.pdf>
- [13] Die Software „Newton-II“ ist kostenfrei downloadbar unter: https://did-apps.physik.uni-wuerzburg.de/Did-Apps-Site/newton-ii_info/index.html
- [14] Laws, P.; Pfister, H. (1998): Using digital video analysis in introductory mechanics projects. In: The Physics Teacher 36, 282-287. <https://doi.org/10.1119/1.880068>
- [15] Wilhelm, T.; Trefzger, T. (2010): Erhebung zum Computereinsatz bei Physik-Gymnasiallehrern: Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, Hannover 2010. In: Phydid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, Berlin.
- [16] Wenzel, M. (2018): Computereinsatz in Schule und Schülerlabor. Einstellungen von Physiklehrkräften zu Neuen Medien, Studien zum Physik- und Chemielernen, Vol. 251, Berlin: Logos-Verlag
- [17] Beichner, R. (1996): The impact of video motion analysis on kinematics graph interpretation skills. In: American Journal of Physics 64 (10), 1272-1277. <https://doi.org/10.1119/1.18390>
- [18] Hockicko, P.; Trpišová, B.; Ondruš, J. (2014): Correcting students' misconceptions about automobile braking distances and video analysis using interactive program tracker. In: Journal of Science Education and Technology, 23(6), 763-776. <http://dx.doi.org/10.1007/s10956-014-9510-z>
- [19] Zollman, D.; Escalada, L. (1996): Applications of interactive digital video in a physics classroom. In: Journal of Educational Multimedia and Hypermedia 5(1), 73-97.
- [20] Becker, A.; Klein, P.; Gößling, A.; Kuhn, J. (2019): Förderung von Konzeptverständnis und Repräsentationskompetenz durch Tablet-PC-gestützte Videoanalyse – Empirische Untersuchung der Lernwirksamkeit eines digitalen Lernwerkzeugs im Mechanikunterricht der Sekundarsufe 2. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 5. <https://doi.org/10.1007/s40573-019-00089-4>
- [21] Wilhelm, T. (2005): Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung. Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 46, Berlin: Logos-Verlag
- [22] Hochberg, K.; Becker, S.; Louis, M. Klein, P.; Kuhn, J. (2020) Using Smartphones as Experimental Tools—a Follow-up: Cognitive Effects by Video Analysis and Reduction of Cognitive Load by Multiple Representations. In: J Sci Educ Technol. <https://doi.org/10.1007/s10956-020-09816-w>
- [23] Eine Demonstrationsversion der Software „measure dynamics“ ist downloadbar unter <https://www.phywe.de/de/software-measure-dynamics-einzellizenz.html#tabs3>
- [24] Weber, J.; Wilhelm, T. (2019): Mathematische Modellbildung in einer vergleichenden Untersuchung. In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – DPG-Frühjahrstagung, S. 323 – 329, <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/958>
- [25] Weber, J.; Wilhelm, T. (2020): Eine vergleichende Untersuchung zur Newton'schen Mechanik. In: Habig, S. (Hrsg.): Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen, Gesellschaft für Didaktik der

Chemie und Physik, Jahrestagung in Wien
2019, Band 40

- [26] Hestenes, D.; Wells, M.; Swackhammer, G.
(1992): Force concept inventory. In: The Physics Teacher 30, S. 141-158.