

Videostudie zum Einsatz von mathematischer Modellbildung und Videoanalyse - Einfluss der Methoden auf Argumentation und Schülervorstellungen -

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

Im Bereich der Newton'schen Mechanik sind vielfältige und hartnäckige Schülervorstellungen bekannt, die den Lernerfolg einer Unterrichtsmethode erheblich beeinflussen können. So verändern Schülervorstellungen in der Dynamik u. a. in unterschiedlicher Weise die Erfolgswahrscheinlichkeiten von Fragen, je nachdem ob von Kräften auf die Bewegung geschlossen werden muss oder andersherum. Während verschiedene Arten des Computereinsatzes zu einem erfolgreichen und adressatengerechten Unterricht führen können, ist allerdings noch wenig darüber bekannt, welche Schülervorstellungen durch unterschiedliche Arten des Computereinsatzes aktiviert werden und ob und inwiefern sich die Argumentationsstrukturen der eingesetzten Methode auf die Argumentationsstrukturen der Schüler*innen übertragen.

Als Teil einer Gesamtstudie zum Einsatz von mathematischer Modellbildung und Videoanalyse zur Vertiefung der ersten beiden Newton'schen Gesetze wird in diesem Artikel beleuchtet, ob sich die zugrundeliegende Argumentationsrichtung der beiden Methoden auf die Schüler*innen überträgt und ob die beiden Methoden unterschiedliche Schülervorstellungen aktivieren. Die Ergebnisse der Analyse von Videos von $N = 45$ Schüler*innen deuten darauf hin, dass die Argumentationsrichtungen im Gespräch zwar unterschiedlich oft gewählt werden und auch unterschiedlich schwierig sind, dies von der Methode aber nicht beeinflusst wird. Ein Unterschied zwischen den Methoden ließ sich aber im Hinblick auf die aktivierten Schülervorstellungen erkennen.

1. Einleitung

Im Bereich der Mechanik gibt es viele besonders hartnäckige Schülervorstellungen, die sich durch die Nähe dieses Themas zu der Alltagswelt der Schüler*innen über Jahre gefestigt haben [1]. Diese Schülervorstellungen beeinflussen den Lernprozess der Schüler*innen, wodurch es für eine Lehrkraft wichtig ist, einerseits die häufigsten Schülervorstellungen zu kennen und andererseits zu wissen, welche Schülervorstellungen durch den Unterricht aktiviert werden [2]. Computereinsatz kann dabei helfen, Schulunterricht zu gestalten, der Schülervorstellungen positiv verändern kann [3].

Beispielhaft kann dies an der Vorstellung begründet werden, dass eine Kraft in Bewegungsrichtung wirken muss, damit sich etwas überhaupt bewegen kann. Diese Vorstellung stammt aus der Alltagswelt und ist naheliegend, da in vielen Alltagsbewegungen eine konstante Kraft ausgeübt werden muss, um eine konstante Geschwindigkeit aufrecht zu erhalten (z. B. beim Fahrrad- oder Autofahren). Die Reibungskräfte, die zu einem Kräftegleichgewicht führen, sind nicht direkt ersichtlich. Dieses Problem bleibt bestehen, wenn im Unterricht Idealsituationen überbetont werden, die sich häufig gerade durch Reibungsfreiheit auszeichnen. Lernende haben einerseits Schwierigkeiten sich in diese Idealsituationen hineinzusetzen

und übertragen durch eine gefühlte Kluft zwischen Physikunterricht und Realität [3] die gelernten Konzepte nicht ausreichend auf Alltagsbewegungen. Andererseits wird die Bedeutung von Reibung, die der Schlüssel zu einer Newton'schen Interpretation von Alltagsbewegungen ist, so nicht ausreichend verstanden. Computereinsatz kann hier eine Hilfe darstellen, wie komplexe Bewegungen mit Reibungseinflüssen aufbereitet und analysiert oder modelliert werden können.

Die unterschiedlichen Arten des Computereinsatzes aktivieren möglicherweise unterschiedliche Schülervorstellungen, die den Lernprozess beeinflussen. Um dies zu untersuchen, wird – als Teil einer Gesamtstudie zum Einsatz von mathematischer Modellbildung und Videoanalyse in der Dynamik der gymnasialen Oberstufe – in der hier vorgestellten Teilstudie auf Argumentationen und Schülervorstellungen eingegangen.

2. Theoretischer Hintergrund

Die Aktivierung von Schülervorstellungen hängt vom Kontext, der Lernumgebung, der Formulierung einer Frage oder Aufgabe, der Unterrichtsmethode etc. ab [5-8]. Im Bereich der Mechanik gibt es bereits einige Untersuchungen zu dem Thema. Es wurde u. a. systematisch untersucht, inwiefern die Kraftrichtung relativ zur Bewegungsrichtung [9; 10] die Aktivierung

von Schülervorstellungen beeinflusst. Auch bei anderen Konzept- und Kontextänderungen konnten Einflüsse auf Schülervorstellungen nachgewiesen werden [11-15].

Just et al. haben im Bereich der Dynamik verschiedene Einflüsse von Testitems auf die Lösungswahrscheinlichkeiten bei Proband*innen untersucht, indem sie einzelne Charakteristika der Items systematisch verändert haben [16]. Unter anderem wurde betrachtet, ob es einen Einfluss auf die Erfolgswahrscheinlichkeit einer Aufgabe hat, ob von den bekannten Kräften auf die Bewegung geschlossen wird oder andersherum. Innerhalb von Fragen zum ersten Newton'schen Gesetz bei sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegendem Objekt ist es für Schüler*innen leichter, von den wirkenden Kräften auf die Bewegung zu schließen, als von der Bewegung auf die wirkenden Kräfte [16]. Die Autoren begründen das damit, dass bei Bekanntsein einer konstanten Geschwindigkeit die Schülervorstellung aktiviert wird, dass eine Kraft in Bewegungsrichtung wirken muss, damit sich überhaupt etwas bewegen kann. Dies führt dann zu der falschen Annahme, dass die Summe aller wirkenden Kräfte, also die resultierende Kraft, ungleich null ist. Wenn aber bekannt ist, dass diese Summe aller Kräfte null ist, wird eher die Vorstellung aktiviert, dass sich nichts ändert, wenn keine Kraft wirkt. Das Nichtvorhandensein einer Änderung wird dann auf die Geschwindigkeit übertragen, sodass es häufiger zu der korrekten Antwort kommt, dass die Geschwindigkeit dann konstant ist. Die Argumentationsrichtung spielt also insbesondere beim Zusammenhang zwischen Kräften und Bewegung eine Rolle. Dies wiederum hängt mit den aktivierten Schülervorstellungen zusammen [16]. Nicht erforscht ist bisher, ob die Argumentationsrichtungen auch in einem offenen Gespräch eine unterschiedliche Schwierigkeit besitzen und ob eine Richtung von Lernenden für die Argumentation bevorzugt verwendet wird.

Mathematische Modellbildung und Videoanalyse zeichnen sich gerade durch eine unterschiedliche Argumentationsrichtung aus [17]. Beim Modellieren von Bewegungen wird von den Kräften ausgegangen und diese begründen die Beschleunigung und darauf folgend die weiteren kinematischen Größen des Objekts. Die Videoanalyse geht wiederum von kinematischen Größen (beginnend beim Ort) aus, aus denen die Beschleunigung berechnet wird. Von der Beschleunigung kann dann auf die Summe aller Kräfte geschlossen werden. Auch wenn es zu beiden Methoden bereits Studien gibt, ist unklar, ob und wie sich diese unterschiedlichen Argumentationsrichtungen auf die Argumentationen von Schülerinnen und Schülern auswirken. Zudem ist unklar, ob durch die Methoden unterschiedliche Schülervorstellungen aktiviert werden, die den Lernerfolg beeinflussen.

3. Forschungsinteresse

Da es für Schüler*innen einen Unterschied macht, in welcher Richtung zwischen Kräften und Bewegung

argumentiert wird und dies an den aktivierten Schülervorstellungen liegen könnte, ist zu wenig darüber bekannt, inwiefern unterschiedliche Arten des Computereinsatzes diese Schülervorstellungen beeinflussen. Wie diskutiert, unterscheiden sich die mathematische Modellbildung und die Videoanalyse zudem in der zugrundeliegenden Argumentationsrichtung.

In diesem Artikel sollen also die Forschungsfragen diskutiert werden, welche Argumentationsrichtung Schüler*innen bei der Diskussion über physikalische Größen selbstständig häufiger wählen (1) und welche Richtung dabei erfolgreicher ist (2). Außerdem ist von Interesse, inwiefern die beiden besprochenen Arten des Computereinsatzes sich in der Aktivierung von Schülervorstellungen unterscheiden (3).

4. Forschungsdesign

Um die Forschungsfragen zu beantworten, wurde für beide Methoden eine Intervention konzipiert. Schulklassen der E-Phase (11. Jahrgangsstufe) von hessischen Gymnasien wurden in die Goethe-Universität Frankfurt a. M. eingeladen und klassenweise zu den Interventionen zugeteilt (siehe Abb. 1). Die etwa vierstündigen Interventionen unterschieden sich dabei nur in der Art des Computereinsatzes und verliefen sonst analog.

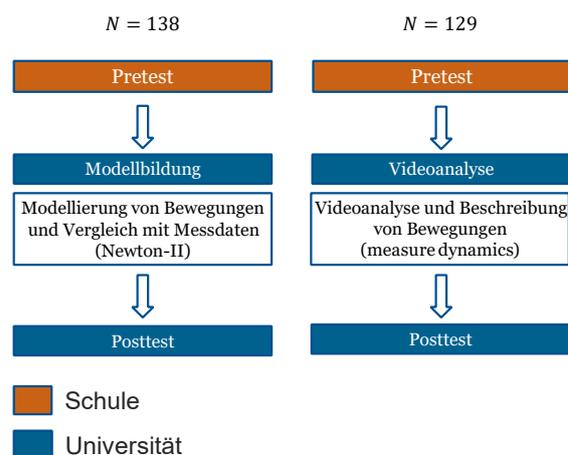


Abb.1: Studiendesign

In beiden Fällen wurden vier Experimente durchgeführt, die zu Beginn der jeweiligen Arbeitsphase durchgeführt wurden. Während der Interventionen wurden von einigen Schüler*innen (N = 45) während der Arbeitsphasen ca. 50-minütige Bildschirmvideos aufgenommen. Zusätzlich wurden gleichzeitig die Gespräche während der Partnerarbeit aufgezeichnet, sodass insgesamt die Arbeitsweise analysiert werden kann. Da die hier dargestellte Untersuchung Teil einer Gesamtstudie zum Einsatz von mathematischer Modellbildung und Videoanalyse ist, wurde zudem vor und nach der Intervention ein Test durchgeführt, in dem Konzeptverständnis, kognitive Belastung, Interesse am Fach Physik und weitere Variablen erhoben wurden. Vorläufige Ergebnisse dieses Tests werden in [18] berichtet.

Die Videos wurden in einem der vier durchgeführten Versuche angefertigt – einem schiefen Wurf mit einer Stahl- und einer Styroporkugel. Der Vergleich der beiden Kugeln dient der Einschätzung der Relevanz von Luftreibung. Die Gruppe der Modellbildung modelliert die wirkenden Kräfte, um dann Aussagen über die kinematischen Größen zu treffen und diese mit Realdaten zu vergleichen, während die Gruppe der Videoanalyse die Messdaten erzeugt und analysiert, um dann auf die wirkenden Kräfte zu schließen. Im Zentrum steht in beiden Fällen der Zusammenhang zwischen den Kräften und der Bewegung.

Für die Inhaltsanalyse der Videos wurde ein Kategoriensystem erstellt, welches die für die Forschungsfragen relevanten Aussagen systematisch darstellen und ordnen soll (siehe Tab. 1). Die Kategorien wurden dabei deduktiv aus der Theorie abgeleitet. Die Werte für Cohen's Kappa nach Brennan & Prediger [19] basieren auf einer 80 %-igen Überlappung der Codes und wurden durch die doppelte Kodierung von ca. 20 % des Datenmaterials und dem Vergleich der beiden Beurteiler gewonnen.

Dimension	Dynamik	Argumentation	Schülervorstellungen
Kappa	.82	.72	.83
Subkategorien	Kraft zu Bewegung	Argumentation auf höherer Ebene	Es muss eine Kraft in Bewegungsrichtung wirken.
	Bewegung zu Kraft	Argumentation auf gleicher Ebene	Eine Kraft setzt sich erst nach einiger Zeit durch.
		Argumentation auf niedrigerer Ebene	Der Effekt einer Kraft verpufft nach einer Zeit.
		Antwort ohne Argumentation	Kraft ist eine universelle Wirkungsfähigkeit.
			(weitere)

Tab.1: Relevante Kategorien für die Inhaltsanalyse der Videos.

5. Ergebnisse

5.1. Argumentation

Um zu beurteilen, welche Argumentationsrichtung Schüler*innen präferieren, wenn sie Kräfte und Bewegung argumentativ verknüpfen, werden zunächst die in die Subkategorien der Dimension „Dynamik“ kodierten Stellen quantitativ ausgewertet. Ausgewertet wurden dabei die Gespräche während der Beantwortung der Abschlussaufgabe des Versuchs. In dieser Aufgabe soll über die Eigenschaften der Summe aller Kräfte, der Beschleunigung und der Geschwindigkeit in x- und y-Richtung entschieden werden. Die

Schüler*innen können dabei frei diskutieren, die Reihenfolge der Größen ist in den jeweiligen Gruppen aber entsprechend der Argumentationsrichtung der Methode angeordnet. In der Gruppe der Modellbildung wird also erst nach den Kräften gefragt, während in der Videoanalyse zuerst die Geschwindigkeit diskutiert wird.

Die Aussagen der Schüler*innen werden nach den Gruppen unterschieden (siehe Tab. 2). Erkennbar ist, dass in beiden Gruppen häufiger die Kräfte genutzt wurden, um die Bewegung zu begründen als andersherum. Auffällig ist zudem ein Unterschied in dem Anteil richtiger Argumentationen. Von Kraft zur Bewegung zu argumentieren, scheint auch im offenen Gespräch leichter zu fallen als die Alternative.

	Modellbildung	Videoanalyse	Gesamt (davon richtig)
Kraft zu Bewegung	8	12	20 (85 %)
Bewegung zu Kraft	5	7	12 (58 %)
Gesamt	13	19	32 (75 %)

Tab.2: Anzahl kodierter Elemente pro Gruppe in den Kategorien der Dynamik.

Weiterhin gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen. Die Gruppe der Videoanalyse scheint insgesamt häufiger Kräfte und Bewegung argumentativ zu verknüpfen, wobei dies vor allem auf eine Zweiergruppe zurückzuführen ist, die viel diskutierte, das allgemeine Bild aber sonst nicht verzerrt.

Da es verschiedene kinematische Größen gibt, die in einer logischen Abfolge verknüpft sind, können diese mit in die Analyse einbezogen werden. Dazu werden alle Argumentationen einbezogen, die eine der physikalischen Größen begründen, egal ob überhaupt eine Begründung geliefert wird und welcher Art diese Begründung ist. Begründung auf höherer Ebene heißt dabei, dass eine kinematische Größe mit einer anderen Größe begründet wird, welche sich nach Abb. 2 auf einer höheren Ebene befindet. Dabei kann auch die Geschwindigkeit mit bspw. auch mit der Summe aller Kräfte begründet werden, ohne dass auf die Beschleunigung eingegangen wird. Ein Überspringen von Ebenen ist also möglich und wurde von den Proband*innen auch getan. Analog verhält sich die Begründung auf niedrigerer Ebene. Eine Größe kann auch durch reine Beschreibung (gleiche Ebene) oder gar nicht begründet werden.

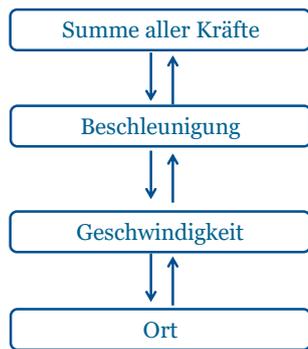


Abb.2: Ebenen der Argumentation.

Festzustellen ist zunächst, dass in den meisten Fällen gar nicht oder auf gleicher Ebene begründet wird (siehe Tab. 3). Der Fall, dass eine Größe mit einer anderen begründet wird, ist eher selten, was womöglich daran liegt, dass ein tiefergehendes Verständnis über die Zusammenhänge nötig ist, um diese argumentativ zu verknüpfen. Bei den Fällen, bei denen dies getan wurde, lässt sich abermals beobachten, dass häufiger auf der höheren Ebene argumentiert wird und diese Argumentation wieder erfolgreicher ist. Erneut gibt es keinen Unterschied zwischen den Gruppen, was die Arten der Argumentationen angeht.

	Modellbildung	Videoanalyse	Gesamt (davon richtig)
Begründung auf höherer Ebene	10	15	25 (88 %)
Begründung auf gleicher Ebene	21	16	37 (68 %)
Begründung auf niedrigerer Ebene	10	10	20 (55 %)
Antwort ohne Begründung	35	47	82 (70 %)
Gesamt	76	88	164 (70 %)

Tab.3: Anzahl kodierter Elemente pro Gruppe in den Kategorien der Argumentation (inklusive kinematischer Größen).

5.2. Schülervorstellungen

Von den aus der Theorie bekannten Schülervorstellungen wurden in dem in der Intervention analysierten Versuch nur einige von den Proband*innen genannt. Die relevantesten Schülervorstellungen werden in Tab. 4 dargestellt. Die häufigste Schülervorstellung ist, dass eine Kraft in Bewegungsrichtung wirken muss, damit sich ein Objekt überhaupt bewegen kann. Das ist nicht verwunderlich und es wurde bereits diskutiert, dass diese Schülervorstellung speziell für manche Aufgaben schwierigkeiterzeugend ist. Diese Schülervorstellung scheint in der Gruppe der Modellbildung häufiger aktiviert worden zu sein,

während es bei den anderen Vorstellungen keine Unterschiede zwischen den Gruppen zu geben scheint. In der letztgenannten Schülervorstellung ist der prozentuale Unterschied zwar noch größer, verliert durch die geringen Zahlen aber an Aussagekraft. Ein Erklärungsansatz für den Unterschied in der erstgenannten Schülervorstellung ist, dass beim Modellieren Kräfte aktiv eingegeben werden müssen. Wenn sich die Stahlkugel in x-Richtung mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegt, sind Schüler*innen geneigt, dennoch eine Kraft zu modellieren, können diese aber weder benennen noch in einer mathematischen Formel ausdrücken. Sie sehen im Laufe der Aufgabe dann, dass das Modell gerade ohne diese Kraft zur Realität passt. Es ist ein kognitiver Konflikt vorhanden. In der Gruppe der Videoanalyse wird von der in x-Richtung nicht vorhandenen Beschleunigung zwar auch darauf geschlossen, dass keine Kraft in x-Richtung wirkt, hier müssen die Proband*innen aber nicht aktiv modellieren. Der kognitive Konflikt ist als geringer einzuschätzen.

Vorstellung	Modellbildung	Videoanalyse	Gesamt
Es muss eine Kraft in Bewegungsrichtung wirken.	34	17	51
Kraft ist eine universelle Wirkungsfähigkeit.	13	10	23
Eine Kraft braucht eine Zeit, bis sie sich durchsetzen kann.	7	6	13
Der Effekt einer Kraft verpufft nach einer Zeit.	7	2	9

Tab.4: Anzahl der kodierten Stellen pro Gruppe in den aufgetretenen Schülervorstellungen.

Fraglich ist nun, ob dieser stärkere kognitive Konflikt zu einer Änderung der Vorstellung bei den Proband*innen führt. Ein Hinweis kann das Testinstrument liefern, man betrachtet den Anteil von Schüler*innen in beiden Gruppen, der in mindestens einem der Items entsprechend der Vorstellung antwortet, dass eine Kraft in Bewegungsrichtung wirken müsse. Es ist erkennbar, dass sich der Anteil derer, die im Sinne dieser Schülervorstellung antworten, in der Gruppe der Modellbildung signifikant reduziert und im Nachtest auch geringer ist als der in der Videoanalyse (siehe Abb. 3). Es könnte also sein, dass der genannte kognitive Konflikt zu einer Reduktion der Schülervorstellung führt.

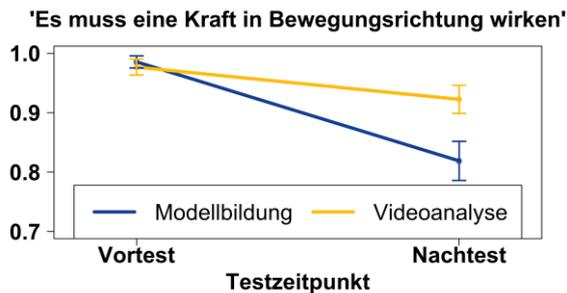


Abb. 3: Anteil an Schüler*innen, die im Test mindestens einmal so antworten, dass dies auf eine Aktivierung der Schülervorstellung zurückzuführen ist, dass eine Kraft in Bewegungsrichtung wirken muss, damit sich etwas bewegen kann (mit Standardfehler).

Nach Just et al. [16] ist diese Schülervorstellung hauptverantwortlich für die Schwierigkeit, bei einer gleichförmigen Bewegung zu erkennen, dass die Summe aller Kräfte null ist. Das verwendete Testinstrument enthält eine Subskala, die vier Items enthält, bei denen bei Bekanntsein einer konstanten Geschwindigkeit auf die Kräfte geschlossen werden soll. In dieser Subskala müsste sich dann bei der Gruppe der Modellbildung ein stärkerer Lernzuwachs einstellen (Abb. 4). In der Tat zeigt eine ANCOVA ($F(1,264) = 4,19$), dass sich die Nachtestergebnisse bei Kontrolle des Vortests signifikant ($p < 0,05$) unterscheiden. Das stützt die Hypothese, dass eine der Hauptschwierigkeiten in diesen Aufgaben die genannte Schülervorstellung ist.

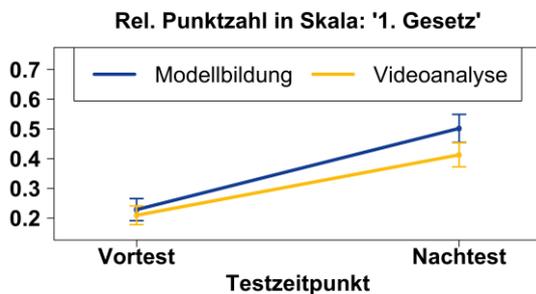


Abb.4: Anteil richtiger Antworten im Test im Inhaltsbereich „1. Newton'sches Gesetz“ mit 95 %-Konfidenzintervall.

6. Diskussion

Die gefundenen Ergebnisse, dass Schüler*innen bei der Argumentation von wirkenden Kräften zur Bewegung erfolgreicher sind als in der anderen Richtung, bestätigen die Theorie. Bisher wurde dieser Zusammenhang nur bei Aufgaben zum ersten Newton'schen Gesetz beobachtet. In dem hier vorliegenden Fall kommt in x-Richtung ebenfalls das erste Newton'sche Gesetz zur Anwendung (bei der Stahlkugel) während es sich bei der y-Richtung um eine beschleunigte Bewegung handelt. Um dies mit der Theorie vergleichen zu können, wäre es nötig, den Unterschied zwischen den Teilbewegungen deutlicher herauszuarbeiten.

Die Analyse am Computer selbst scheint die Argumentationsrichtung nicht zu beeinflussen, was daran liegen kann, dass in beiden Interventionen in den Aufgaben auch in die jeweils andere Richtung argumentiert wurde, wenngleich die Methode eine inhärente Argumentationsrichtung besitzt. Diese überträgt sich aber nicht zwangsläufig auf die Lernenden. Einen Unterschied zwischen den Methoden scheint es aber im Bereich der Schülervorstellungen zu geben. Das häufigere Vorhandensein der Vorstellung, dass eine Kraft in Bewegungsrichtung wirken muss, in Kombination mit der stärkeren Reduktion dieser Vorstellung in der Gruppe der Modellbildung spricht dafür, dass der auftretende kognitive Konflikt in diesem Fall lernförderlich ist. Es gibt viele Forschungen zu Konzeptwechselstrategien und die gefundenen Ergebnisse sollen nicht als verallgemeinerbar für den generellen Umgang mit Schülervorstellungen gesehen werden. Ob eine Konfliktstrategie erfolgreich oder sogar hinderlich ist, hängt u. a. von der Art der Vorstellung ab. Da es hier um eine Vorstellung geht, die nahezu jede/r Schüler*in in gewissen Kontexten häufig äußert, könnte die Strategie hier erfolgreicher als bei selteneren Schülervorstellungen sein. Außerdem ging es hier nicht um die Einführung eines neuen Themas, sondern um die Vertiefung eines bereits behandelten Themas.

Die Daten der Auswertung der Videos basieren auf der Analyse von $N = 45$ Schüler*innen, die in 21 Gruppen zusammengesetzt waren (drei Dreiergruppen) und sind kaum generalisierbar. Um statistisch abgesicherte Ergebnisse zu erhalten, müsste die Untersuchung mit weiteren Schüler*innen durchgeführt werden. Dennoch können die Ergebnisse einen Anhaltspunkt für eine Bestätigung von bereits bekannten Erkenntnissen sein und Anlass für eine weitere Untersuchung bieten.

7. Ausblick

Für den vorliegenden Artikel wurden die Videos quantitativ analysiert. Um weitere Einblicke in die Arbeitsweise der Proband*innen zu erhalten, soll eine qualitative Analyse folgen. Ziel dieser ist es, die größten Schwierigkeiten beim Arbeiten mit der Software zu identifizieren und die Arbeitsweise von erfolgreichen mit weniger erfolgreichen Schüler*innen zu vergleichen, um Empfehlungen für den Einsatz und die Weiterentwicklung der Software zu geben.

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, Springer Spektrum, Berlin.
- [2] Schecker, H.; Duit, R. (2018): Schülervorstellungen und Physiklernen. In: Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M., Duit, R. (Hrsg.): Schüler-

- vorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis, Springer Spektrum, Berlin.
- [3] 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.
- [4] Schecker, H. (1985): Das Schülervorverständnis zur Mechanik. Eine Untersuchung in der Sekundarstufe II unter Einbeziehung historischer und wissenschaftstheoretischer Aspekte, Dissertation. Universität Bremen.
- [5] Wodzinski, R. (1996): Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht. Münster: Lit Verlag.
- [6] Brown, D.; Hammer, D. (2008): Conceptual change in physics. In: Vosniadu, S. (Hrsg.): International Handbook of Research on Conceptual Change. New York: Routledge, S. 127-154
- [7] diSessa, A. A. (1988): Knowledge in pieces. In: G Forman, G.; Pufall, P. B. (Hrsg.): Constructivism in the Computer Age, Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Publishers, S. 49-70
- [8] Minstrell, J. (1992): Facets of students' knowledge and relevant instruction. In: Duit, R.; Goldberg, F.; Niedderer, H.: Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies - Proceedings of an International Workshop, University of Bremen, March 4-8, Kiel: IPN, S. 110-128
- [9] Palmer, D. (1997): The effect of context on students' reasoning about forces. In: International Journal of Science Education, 19, S. 681-696
- [10] Rosenblatt, R.; Heckler, A. F. (2011): Systematic study of student understanding of the relationships between the directions of force, velocity, and acceleration in one dimension. In: Physical Review Physics Education Research, 7, 020112
- [11] Lemmer, M. (2013): Nature, cause and effect of students' intuitive conceptions regarding changes in velocity. In: International Journal of Science Education, 35, S. 239-261
- [12] Ferreira, A.; Lemmer, M.; Gunstone, R. (2019): Alternative conceptions: turning adversity into advantage. In: Research in Science Education, 49, S. 657-678
- [13] Twigger, D.; Byard, M.; Driver, R.; Draper, S.; Hartley, R.; Hennessy, S.; Mohamed, R.; O'Malley, C.; O'Shea, T.; Scanlon, E. (1994): The conception of force and motion of students aged between 10 and 15 years: an interview study designed to guide instruction. In: International Journal of Science Education, 16, S. 215-229
- [14] Bao, L.; Hogg, K.; Zollman, D. (2002): Model analysis of fine structures of student models: an example with Newton's third law American. In: Journal of Physics, 70, S. 766-778
- [15] Maloney, D. (1984): Rule-governed approaches to physics-Newton's third law. In: Physics Education, 19, S. 37-42
- [16] Just, A.; von Aufschnaiter, C.; Vorholzer, A. (2021): Effects of conceptual and contextual task characteristics on students' activation of mechanics conceptions. In: European Journal of Physics, 42, 025702
- [17] 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, 2020, S. 375-380
- [18] Weber, J.; Wilhelm, T. (2020): Computereinsatz in der Newton'schen Mechanik – Vergleich von Modellbildung und Videoanalyse. In: Physik und ihre Didaktik in Schule und Hochschule (Phydid A), 19(1), S. 43-56
- [19] Brennan, R.; Prediger, D. (1981): Coefficient Kappa: Some Uses, Misuses, and Alternatives. In: Educational and Psychological Measurement, 41(3), S. 687-699