

## Elementarisierung der Mechanik in der Sekundarstufe I

– Ergebnisse einer Studie –

Marco Seiter\*, Heiko Krabbe\*, Thomas Wilhelm<sup>+</sup>

\*Arbeitsgruppe Didaktik der Physik, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum

<sup>+</sup>Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt

[marco.seiter@rub.de](mailto:marco.seiter@rub.de)

(Eingegangen: 14.07.2020; Angenommen: 07.03.2021)

### Kurzfassung

Die Forschung zeigt, dass SchülerInnen große Lernschwierigkeiten beim Lernen des physikalischen Kraftbegriffs haben. Auch nach dem Unterricht verfügen sie über kein angemessenes Verständnis (Schecker et al., 2018). Mit dem zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept nach Wiesner wurde ein alternativer Zugang entwickelt, der zweidimensionale Bewegungen unter Kraftstößen betrachtet und anstelle der Beschleunigung die Zusatzgeschwindigkeit verwendet. Das Mechanikkonzept nach Wiesner wurde in mehreren Studien im Vergleich zu nicht genauer spezifiziertem „konventionellem“ Unterricht erfolgreich evaluiert (Wodzinski, 1996; Tobias, 2010). Dabei wurden weitere Parameter (bspw. Medien) verändert, wodurch der Erfolg nicht allein der Elementarisierung zugeordnet werden kann. Eine Konsolidierungsstudie soll nun den Einfluss der Elementarisierung im Vergleich zu einem standardisierten Lehrgang untersuchen. Dem zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept (2D-Mechanikkurs) nach Wiesner wird ein Lehrgang mit eindimensionalen Bewegungen und mit konstanten Kräften gegenübergestellt (1D-Adaption), der alle anderen Parameter so gut wie möglich gleich hält. Im Schuljahr 2019/20 unterrichtete eine Gruppe von Lehrkräften (N = 11) mit insgesamt 14 Klassen nach dem zweidimensionalen und eine andere Gruppe (N = 11) mit 16 Klassen nach dem eindimensionalen Konzept. Im Artikel werden das Studiendesign und die beiden Lehrgänge erläutert sowie Ergebnisse vorgestellt.

### Abstract

Research shows that students have many learning difficulties when learning the physical concept of force. Even after having been taught about the concept of force, they do not have an adequate understanding of Newton's mechanics (Schecker et al., 2018). With the two-dimensional dynamic approach to mechanics according to Wiesner, an alternative approach has been developed. It considers two-dimensional movements under force impacts, using additional velocity instead of acceleration. This course concept has been evaluated in several studies in comparison to unspecified "conventional" teaching of mechanics (Wodzinski, 1996; Tobias, 2010). In these studies, additional parameters (e.g. media) were changed, so that the success cannot be attributed to the elementarization alone. A consolidation study will now examine the influence of elementarization in comparison to a standardized course. The two-dimensional, dynamic mechanics concept (2D mechanic course) according to Wiesner is contrasted with a course using one-dimensional movement and constant forces (1D adaption), keeping all the other parameters as similar as possible. In the 2019/20 school year, one group of teachers (N = 11) taught according to the 2D mechanic course with a total of 14 classes, while another group (N = 11) taught according to the 1D course with 16 classes. This article explains the design of the study, the two mechanics course concepts and presents the results.

### 1. Motivation

Die Newton'sche Mechanik ist eines der am schwierigsten zu unterrichtenden Inhaltsgebiete der Physik in der Sekundarstufe I. SchülerInnen haben große Lernschwierigkeiten in Bezug auf den physikalischen Kraftbegriff. Sie entwickeln aus ihren Alltagserfahrungen mit mechanischen Vorgängen alternative, stabile Schülervorstellungen, die vielfach den

Physikunterricht überdauern (Schecker et al. 2018). Ein möglicher Grund dafür könnte eine ungeeignete Sachstruktur im Unterricht sein (Wilhelm, 2018). Der Kraftbegriff wird zum Teil immer noch über die Statik eingeführt, und es wird erst später zur Dynamik übergegangen. Die Statik fördert aber physikalisch falsche Vorstellungen zum Kraftbegriff, so dass eine Erweiterung des Kraftbegriffs beim Übergang zur Dynamik erschwert wird. Auch ungeeigne-

te Darstellungsformen können eine Ursache für Lernschwierigkeiten der SchülerInnen sein, wenn z. B. zu früh im Unterricht mit  $s(t)$ -,  $v(t)$ - und  $a(t)$ -Diagrammen gearbeitet wird (Wilhelm, 2018). Aufgrund der eben genannten Punkte wurden verschiedene Unterrichtskonzepte zur Einführung der Mechanik entwickelt und positiv evaluiert (Jung et al., 1975; Wilhelm, 2005; Tobias, 2010). Die bisherigen Evaluationen fanden immer im Vergleich zu unklar definiertem „konventionellem“ Unterricht statt, wobei immer eine gleichzeitige Veränderung verschiedener Variablen (Elementarisierung, Unterrichtsstruktur, Medien, etc.) stattfand. Diese Studie soll nun speziell den Einfluss der Elementarisierung auf den Lernzuwachs von SchülerInnen untersuchen, indem die anderen Variablen durch das Studiendesign kontrolliert werden. Damit können zum einen die positiven Ergebnisse der bisherigen Studien, in diesem Fall speziell die des zweidimensional-dynamischen Mechaniklehrgangs nach Wiesner, gegenüber einer „konventionellen“ Elementarisierung nochmals genauer geprüft werden, indem mögliche konfundierende Variablen wie der Medieneinsatz ausgeschlossen werden. Zum anderen liefert diese Studie einen Beitrag zur Grundlagenforschung, indem allgemein Einblick in den Einfluss von Elementarisierungen auf den Lernzuwachs von SchülerInnen gegeben wird.

## 2. Theoretische Grundlagen

Unter einer Elementarisierung versteht man die Zerlegung eines komplexen Sachverhalts in einzelne Bestandteile (Sinneinheiten) sowie dessen Vereinfachung, so dass der komplexe Sachverhalt von einer bestimmten Adressatengruppe gelernt werden kann (Kircher, Girwidz & Häußler, 2015; Wiesner, Schecker & Hopf, 2013). Die so entstehenden Sinneinheiten werden auch als das Elementare bezeichnet. Dabei muss die Elementarisierung gewissen Kriterien genügen. Die Elementarisierung muss fachgerecht, schülergerecht und zielgerecht sein (Kircher et al., 2015; Wiesner et al., 2013), was im Folgenden weiter ausgeführt wird.

Eine Elementarisierung muss fachgerecht sein, das heißt, es dürfen keine grundlegend physikalisch falschen Aussagen enthalten sein. Aufgrund von Vereinfachung können aber nicht immer alle Aspekte berücksichtigt werden. So werden in der Schule beispielsweise Bewegungen und Kräfte oft eindimensional eingeführt, wobei die Ablenkung von der Bewegungsbahn als Bewegungsänderung ausgeblendet wird. Entscheidend ist hierbei dann die Klärung der fachlichen Relevanz, also die Frage danach, ob die Aussagen in der betrachteten Modellvorstellung oder Analogie als gültig erachtet werden können. Darüber hinaus muss eine Elementarisierung auch anschlussfähig oder erweiterbar sein (Jung, 1973). Damit ist gemeint, dass grundlegende Bedeutungen erhalten bleiben, auch wenn neue Begriffe oder Zusammenhänge hinzugefügt werden. Ein

Beispiel hierfür ist die Erweiterung des Beschleunigungsbegriffs bei senkrecht zur Bewegungsbahn wirkenden Kräften in der Kreisbewegung, wenn zusätzlich zur Änderung des Geschwindigkeitsbetrags auch die Richtungsänderung als Beschleunigung aufgefasst wird. Als zweites Kriterium muss die Elementarisierung schülergerecht (adressatengerecht) sein. Sie muss auf dem Vorwissen der SchülerInnen aufgebaut werden und insbesondere vorhandene inadäquate Alltagsvorstellungen berücksichtigen. Zum Beispiel gehen viele SchülerInnen bei der Kreisbewegung von einem Kräftegleichgewicht zwischen der Zentrifugalkraft und der Zentripetalkraft aus und begründen damit, dass es nicht zu einer Beschleunigung im Sinne einer Änderung des Geschwindigkeitsbetrags kommt. Des Weiteren soll es für die SchülerInnen auch motivierend sein, z. B. indem Kontexte aus dem Erfahrungsbereich der SchülerInnen aufgegriffen werden. Als letztes Kriterium muss eine Elementarisierung zielgerecht (didaktisch relevant) sein, also eine das Lernen unterstützende Schrittfolge vorgeben. So stellt sich beispielsweise die Frage, ob bei der Einführung in den Kraftbegriff statische Situationen als Hinführung zu dynamischen Situationen dienen oder besser nachträglich als Spezialfall dynamischer Situationen betrachtet werden sollen.

## 3. Vorarbeiten und aktueller Stand der fachdidaktischen Forschung

### 3.1. Frankfurter Vorarbeiten

Wiesner und später Wodzinski (1994 a+b) entwickelten ein zweidimensional-dynamisches Mechanikkonzept (2D-Mechanikurs) mit direktem Zugang zur Dynamik. Die Ideen zu diesem Unterrichtskonzept basierten auf Arbeiten von Jung et al. (1976). Wesentliche Merkmale dieses Unterrichtskonzepts sind, dass alle Größen an zweidimensionalen Bewegungen eingeführt werden mit besonderer Betonung auf den Richtungscharakter der Geschwindigkeit. Da stets Zeitintervalle statt Zeitpunkte betrachtet werden, kann an Stelle der Beschleunigung die Geschwindigkeitsänderung durch Kräfte betrachtet werden, die die Bezeichnung „Zusatzgeschwindigkeit“ erhält. Außerdem wird der Kraftbegriff als Ursache einer Bewegungsänderung, also über die Dynamik und nicht über die Statik eingeführt. Hierbei werden vor allem Kraftstöße statt Vorgänge mit konstanten Kräften behandelt. Die Statik bildet bewusst einen Spezialfall.

### 3.2. Würzburger Vorarbeiten

Wilhelm (2005) entwickelte einen entsprechenden Mechaniklehrgang für die Sekundarstufe II, der in der Kinematik zweidimensionale Bewegungen betrachtet und vektorielle Größen wie die Geschwindigkeit durch Vektorpfeile ikonisch und dynamisch am PC darstellt. Die Dynamik wurde allerdings anders behandelt als in dem Konzept von Wiesner, da hier der Beschleunigungsbegriff thematisiert

wurde. In einem Trainings-/ Kontrollgruppen-Design mit Vor- und Nachtest wurden die Veränderungen von Schülervorstellungen im Laufe des neuen Mechaniklehrgangs erfasst und mit denen in „konventionell“ unterrichteten Klassen verglichen. Bei einem Fachwissenstest zur Kinematik und Dynamik wurden jeweils  $N = 10$  Klassen der Trainings- und Kontrollgruppe untersucht. Der Vor- und Nachtest war dabei identisch und auf das Diagnostizieren von Schülervorstellungen ausgelegt. Eine Gruppe ohne Unterricht wurde nicht getestet. In einem Training wurde den Lehrkräften das neue Mechanikkonzept vorgestellt und mit den bekannten Schülervorstellungen begründet. Außerdem wurde Material für die Unterrichtsstunden bereitgestellt, das gegenüber dem „konventionellen“ Unterricht auch veränderte Unterrichtsmethoden und neue Medien in Form von Messwerterfassungsprogrammen und Simulationen enthielt. Die Lehrkräfte bekamen einen detaillierten Unterrichtsverlauf als Vorschlag, durften davon aber methodisch abweichen, solange sie die Sachstruktur beibehielten. Das Ergebnis war, dass die SchülerInnen, die nach dem neuen Konzept unterrichtet wurden, einen höchst signifikant höheren Lernzuwachs aufwiesen als diejenigen der Kontrollgruppe.

### 3.3. Münchner Vorarbeiten

Das zweidimensional-dynamische Mechanikkonzept von Wiesner wurde anschließend für die Sekundarstufe I, genauer für die 7. Jahrgangsstufe des Gymnasiums in Bayern, in München und Würzburg angepasst (Waltner et al., 2010). Zu diesem Unterrichtskonzept wurde ein Lehrtext in Form eines Schulbuches mit dem Titel *Einführung in die Mechanik* erstellt (Hopf et al., 2009). Auch der Effekt dieses Mechaniklehrgangs für die Sekundarstufe I wurde in einem Vor- und Nachtest-Design im Vergleich zu einer Kontrollgruppe empirisch erhoben (Tobias, 2010; Wilhelm et al., 2011).

In der Hauptstudie unterrichteten zehn Lehrkräfte in zwei aufeinanderfolgenden Jahren zunächst in der Kontrollgruppe 14 Klassen mit 358 SchülerInnen (im Sommer 2008) und im darauffolgenden Jahr in der Trainingsgruppe 13 Klassen mit 367 SchülerInnen (im Sommer 2009). Als Instrumente wurden ein für Prä- und Postzeitpunkt identischer Test zum fachlichen Verständnis und Fragebögen zum fachspezifischen Selbstkonzept, zum Interesse an Physikunterricht und zur Selbstwirksamkeitserwartung eingesetzt (Wilhelm et al., 2011). Der Fachwissenstest enthielt dabei für beide Gruppen vergleichbare Aufgaben sowie Aufgaben, die eine der beiden Gruppen bevorzugten, um mögliche Transferleistungen messen zu können. Für die Lehrkräfte wurde im Verlauf dieser Studie, im Unterschied zur Studie von Wilhelm, keine Schulung der Lehrkräfte durchgeführt. An die Hauptstudie schloss sich ein Jahr später eine Nachfolgestudie an, in der acht weitere Lehrkräfte in Kontroll- und Trainingsgruppen unterrichteten. In Bezug auf das fachliche Verständnis er-

reichten die Trainingsgruppen in den vergleichbaren Aufgaben wiederum höchst signifikant bessere Ergebnisse bei mittleren Effektstärken (Tobias, 2010). Sowohl Kontroll- als auch Trainingsgruppen wiesen dabei einen höchstsignifikanten Lernzuwachs innerhalb der Gruppe auf. Die Effektstärken lagen hierbei für die Kontrollgruppen im mittleren ( $d = 0.77$ ) und für die Trainingsgruppen sogar im hohen Bereich ( $d = 1.37$ ). Das heißt: Alle Gruppen hatten in ihrem Unterrichtsgang dazugelernt. Dabei waren im Laufe eines Schulhalbjahres Effektstärken im mittleren Bereich bezogen auf den Lernzuwachs zu erwarten, was die Befunde sowohl statistisch als auch praktisch bedeutsam macht. Die SchülerInnen in den Trainingsgruppen konnten sich in der gleichen Zeit mehr konzeptuelles Verständnis aneignen als die SchülerInnen in den Kontrollgruppen. Schülerinterviews bestätigten, dass das Verständnis des neuen Mechanikkonzepts den Lernenden weniger Schwierigkeit bereitete. Bei den Variablen Interesse und Selbstkonzept wurden keine Unterschiede festgestellt. Unterschiede zwischen den Gruppen gab es hingegen bei der Selbstwirksamkeitserwartung. In Bezug auf das Einzeichnen einer Kraft und der Vorhersage einer Bewegung fühlten sich die Trainingsgruppen signifikant kompetenter, beim Rechnen und dem Lesen von Diagrammen dagegen die Kontrollgruppen (Tobias, 2010). Zu diesem „Münchener Mechanikkurs“ erschienen später zwei Lehrerhandbücher (Wiesner et al., 2011; Wilhelm et al., 2013).

### 4. Kritikpunkte und offene Fragen der bisherigen Forschung

In der Münchener Vergleichsstudie für die Sekundarstufe I sind die Unterschiede zwischen der Kontrollgruppe und der Trainingsgruppe nicht eindeutig auf die Elementarisierung zurückzuführen. Zusätzlich zur Elementarisierung der Kinematik und Dynamik nach dem zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept von Wiesner wurden beispielsweise spezielle Simulationen als Medien zur Verfügung gestellt. Ebenso kann ein im Vergleich zu konventionellen Schulbüchern anderes Aufgabenangebot im Schülerheft Veränderungen in der Unterrichtsgestaltung bewirkt haben. Die Studie war so aufgebaut, dass die Lehrkräfte in der Kontrollgruppe erst nach eigenem Ermessen „konventionell“, das heißt nur mit der Vorgabe durch den bayerischen Lehrplan, anhand eines Schulbuchs unterrichtet haben. Anschließend haben die selben Lehrkräfte im folgenden Schuljahr mit Unterstützung durch das oben genannte Material nach dem 2D-Mechanikkurs unterrichtet. Somit können die positiven Ergebnisse nicht eindeutig der Elementarisierung zugeordnet werden. Ebenso können auch Veränderungen in der Unterrichtsstruktur und im Mediengebrauch zum verbesserten Lernzuwachs beigetragen haben sowie ein durch das Studiendesign bewirkter Neuheitseffekt, weil sich die Lehrkräfte mit dem neuen Material intensiver auseinandersetzen mussten.

In allen bisherigen Arbeiten bleibt außerdem offen, was unter einem „konventionellen“ Mechanikunterricht verstanden werden soll. In der Würzburger Studie sollte bewusst „[...] nicht erforscht werden, was ‚konventioneller‘ Unterricht bedeutet und inwieweit der Unterricht in den Kontrollklassen ‚konventionell‘ war“ (Wilhelm, 2005, S. 139). Um eine Aussage über mögliche Gründe für den positiven Lernzuwachs der SchülerInnen in den Trainingsgruppen zu machen, müsste zuvor eine Charakterisierung des „konventionellen“ Unterrichts in der Kontrollgruppe vorgenommen werden.

Ein weiterer Kritikpunkt bildet die bisherige Leistungsmessung der SchülerInnen durch die Fachwissenstests. Die Aufgaben wurden nicht auf Grundlage von Kriterien erstellt, die eine gleichwertige Messung der beiden zu vergleichenden Unterrichtskonzepte ermöglichen. Es gab zwar Aufgaben, die eher auf SchülerInnen zugeschnitten waren, die entweder nach „konventionellen“ Unterrichtsgängen oder nach dem 2D-Mechanikkurs nach Wiesner unterrichtet wurden. Diese waren aber nicht symmetrisch angelegt, so dass beispielsweise in sonst analogen Aufgaben einmal eindimensionale bzw. zweidimensionale Bewegungen betrachtet wurden, um den Transfer der Kompetenzen vom einen in das andere Konzept erfassen zu können. Ebenso wurden die Aufgaben nicht zu übergeordneten latenten Konstrukten zusammengestellt.

Aufgrund der oben genannten Kritikpunkte soll in einer Konsolidierungsstudie dem 2D-Mechanikkurs nach Wiesner in der Vergleichsgruppe eine 1D-Adaption gegenübergestellt werden, die einen eindimensionalen dynamischen Zugang über Vorgänge mit konstanten Kräften und der Beschleunigung verfolgt, sich also in diesen Punkten nah an dem „konventionellen“ Unterricht orientiert. Alle übrigen Gestaltungsmerkmale wie die Strukturierung, der Medieneinsatz oder die ikonische Repräsentation durch Vektorpfeile sollen möglichst gleichbleiben. Dazu muss das Unterrichtskonzept für die Vergleichsgruppe jedoch in einigen Aspekten der Elementarisierung vom „konventionellen“ Unterricht abweichen und Ideen des 2D-Mechanikkurses übernehmen (Seiter, 2018; Seiter et al., 2020). Auf diese Weise kann ein Unterschied im Lernzuwachs der SchülerInnen allein auf die unterschiedlichen Elementarisierungen zurückgeführt werden. Die Forschungsfragen für die Konsolidierungsstudie lauten also:

1. Führen die beiden Elementarisierungen der Kinematik und Dynamik in beiden Treatmentgruppen zu einem Lernzuwachs der SchülerInnen in der Sekundarstufe I?
2. Welche Unterschiede im Lernzuwachs der SchülerInnen gibt es zwischen den beiden Elementarisierungen der Kinematik und Dynamik in der Sekundarstufe I, wenn die anderen Gestaltungsmerkmale kontrolliert werden?

## 5. Elementarisierungen des zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzepts nach Wiesner für die Sekundarstufe I

Im Folgenden werden zunächst die Elementarisierungen des zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzepts nach Wiesner dargestellt, wie sie im Schülerheft *Einführung in die Mechanik* (Hopf et al., 2009) für die Sekundarstufe I zu finden sind. Diesen werden in den nachfolgenden Abschnitten die „konventionellen“ und die für die Vergleichsgruppe adaptierten Elementarisierungen der Konsolidierungsstudie gegenübergestellt.

Im Schülerheft zur Münchener Version des 2D-Mechanikkurses nach Wiesner werden für die Darstellung und Beschreibung von Bewegung Stroboskopbilder verwendet. In den Stroboskopbildern werden von Beginn an zweidimensionale Bewegungen gezeigt. Die Bewegung eines Gegenstands wird zunächst dadurch beschrieben, dass zu bestimmten Zeitpunkten der Ort des Gegenstands festgelegt wird. An Beispielen wird dann veranschaulicht, dass zusätzlich an jedem Punkt der Bewegung angegeben werden kann, wie schnell und in welche Richtung sich ein Gegenstand bewegt. Die Geschwindigkeit wird zu diesem Zweck als vektorielle Größe mit Richtung und Betrag eingeführt, wobei der Betrag der Geschwindigkeit als Tempo bezeichnet wird. Auch die Geschwindigkeit wird somit direkt für zweidimensionale Bewegungen betrachtet. Das Tempo wird über den Quotienten aus zurückgelegter Strecke  $\Delta s$  und der dafür benötigten Zeit  $\Delta t$  ermittelt. Beide Größen werden dabei als eine Differenz bezogen auf einen Start- und Endpunkt eines Intervalls gebildet.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad \{1\}$$

Die Geschwindigkeit wird in Form von Geschwindigkeitspfeilen in die Stroboskopbilder eingezeichnet. Es handelt sich dabei um Pfeile für die Durchschnittsgeschwindigkeit im Zeitintervall. Der Pfeilfuß (d. h. der Ausgangspunkt des Geschwindigkeitspfeils) liegt jeweils in der Mitte zwischen zwei Aufnahmen des Stroboskopbildes. Die Richtung des Pfeils zeigt parallel zur Verbindungslinie zwischen den beiden Punkten und die Länge des Pfeils ergibt sich aus  $\{1\}$ , wobei ein geeigneter Maßstab festgelegt werden muss. Im weiteren Verlauf werden auch Geschwindigkeitspfeile gezeichnet, die im Schwerpunkt des Körpers beginnen und von der Richtung her tangential an die Bahnkurve angelegt sind. Diese wären als Momentangeschwindigkeit zum betreffenden Zeitpunkt zu interpretieren. Wilhelm spricht sich aber mit Rückbezug auf Hermann bewusst gegen die Thematisierung von Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeiten im Anfangsunterricht aus (Wilhelm 2018; Hermann, 2002).

Im gesamten Schülerheft des 2D-Mechanikkurses für die Sekundarstufe I wird auf den Begriff der Beschleunigung als Änderungsrate der Geschwin-

digkeit verzichtet. Stattdessen wird das Konzept der Zusatzgeschwindigkeit verwendet. „Die Geschwindigkeitsänderung  $\Delta\vec{v}$  in einem Zeitintervall  $\Delta t$  ist besonders einfach zu verstehen, wenn man eine zweidimensionale Bewegung hat, die abschnittsweise linear ist und nur durch eine sehr kurze Einwirkung, auch Stoß genannt, verändert wird [...]“ (Wilhelm, 2016, S. 23). Die Geschwindigkeit des Objekts vor einem Stoß wird als Anfangsgeschwindigkeit  $\vec{v}_A$  und die Geschwindigkeit nach dem Stoß als Endgeschwindigkeit  $\vec{v}_E$  bezeichnet. Der Pfeil, der die Pfeilspitze des Anfangs- mit der Pfeilspitze des Endgeschwindigkeitspfeils verbindet, während beide am Pfeilfuß verbunden sind, wird als Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta\vec{v}$  eingeführt (Abb. 1).

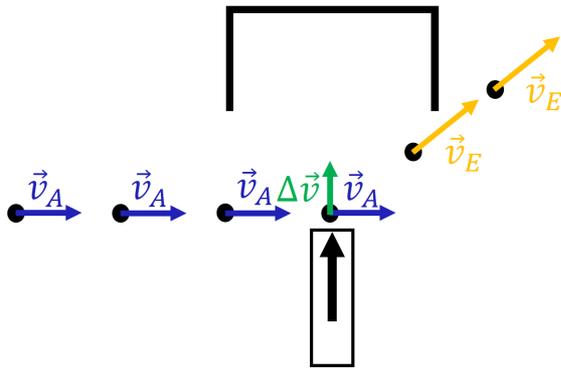


Abb. 1: Zusatzgeschwindigkeit (Hopf et al., 2009)

Die Newton'sche Bewegungsgleichung wird nach der Idee von Wiesner dadurch erarbeitet, dass der Einfluss von Masse und Einwirkdauer auf den Zusammenhang von Kraft und Zusatzgeschwindigkeit getrennt diskutiert wird. Dazu wird zu Beginn der Begriff der Kraft  $\vec{F}$  als vektorielle Größe eingeführt, die sich aus der Kombination von Einwirkungsstärke und Einwirkungsrichtung ergibt. Dann wird plausibel veranschaulicht: Je größer die Einwirkungsstärke einer Kraft ist, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit; je länger die Einwirkdauer einer Kraft ist, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit; je größer die Masse eines Gegenstands ist, auf den eine Kraft ausgeübt wird, desto kleiner ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit. Somit ergibt sich schließlich die Newton'sche Bewegungsgleichung als Produktgleichung in der Form:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta\vec{v}. \quad \{2\}$$

Über diese Gleichung wird schließlich die Einheit *Newton* aus den anderen Größen abgeleitet und definiert. Im Schülerheft *Einführung in die Mechanik* wird im Anschluss das erste und dritte Newton'sche Axiom behandelt. Da sich die Konsolidierungsstudie auf den bisher dargestellten Inhalt beschränkt, werden diese Teile hier nicht vorgestellt.

## 6. Elementarisierungen im „konventionellen“ Unterricht

Wie „konventioneller“ Unterricht aufgebaut ist, wird hier anhand zweier in NRW zugelassener Schulbücher rekonstruiert, nämlich *Universum Physik 2 Nordrhein-Westfalen* (Alboteanu-Schirner et al., 2016) und *Impulse Physik 2 Nordrhein-Westfalen G8* (Feldmann, Janzen, Kirschbaum, Kohl, 2009).

Als Darstellungsform von Bewegungen werden darin  $s(t)$ -,  $v(t)$ - und  $a(t)$ -Diagramme verwendet. Der vergangenen Zeit  $t$  wird die in dieser Zeit zurückgelegte Strecke  $s$  zugeordnet, analog für  $v$  bzw.  $a$ . Eine Darstellung von zwei- oder mehrdimensionalen Bewegungen ist mithilfe dieser Diagramme nicht möglich, weil diese nicht in der Lage sind, Richtungsveränderungen abzubilden. Es werden daher fast ausschließlich eindimensionale Bewegungen betrachtet, die zum Zeitpunkt  $t_0 = 0$  im Ursprung ( $s_0 = 0$ ) beginnen und von links nach rechts ablaufen. Entsprechend entfällt bei der geradlinig gleichförmigen Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit die Differenzbildung in Bezug auf die Anfangszeit und den Anfangsort.

Die Geschwindigkeit wird als skalare Größe über den Quotienten von zurückgelegter Strecke  $s$  und der dafür benötigten Zeit  $t$ , eingeführt:

$$v = \frac{s}{t} \text{ bzw. } v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad \{3\}$$

Die Richtung der Bewegung wird ebenso wenig thematisiert wie ein mögliches negatives Vorzeichen der Geschwindigkeit bei Bewegungsumkehr. In *Universum Physik 2* wird in Gleichung {3} zwar von  $\Delta t$  bzw.  $\Delta s$  gesprochen und auf den Unterschied zwischen der momentanen und der durchschnittlichen Geschwindigkeit eines Körpers Wert gelegt. Die Unterscheidung ist in der Regel aber nicht notwendig, weil überwiegend Prozesse mit konstanten Geschwindigkeiten betrachtet werden, in denen die zurückgelegte Strecke und die dafür benötigte Zeit proportional zueinander sind.

Eine beschleunigte Bewegung wird dadurch charakterisiert, dass die Punkte in einem  $s(t)$ -Diagramm nicht auf einer Geraden liegen. Dies schließt auch Bewegungen ein, in denen die Geschwindigkeit abnimmt. Analog zur Geschwindigkeit existieren in den beiden Schulbüchern zwei verschiedene Definitionen der Beschleunigung:

$$a = \frac{v}{t} \text{ bzw. } a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad \{4\}$$

Auch hier werden meist Bewegungen betrachtet, in denen ein Körper von  $v_0 = 0$  auf eine Endgeschwindigkeit  $v$  beschleunigt wird. In *Universum Physik 2* kommen auch negative Vorzeichen vor, wobei die Beschleunigung dadurch keinen Richtungscharakter erhält. Positive Beschleunigung bedeutet „schneller werden“ und negative „langsamer werden“. Auch hier wird der Fokus auf den Spezialfall der gleichmäßig beschleunigten Bewegung ge-

legt, bei dem sich die Punkte in einem  $v(t)$ -Diagramm auf einer Ursprungsgeraden befinden.

Der Kraftbegriff wird in beiden Schulbüchern nicht wie im dynamischen 2D-Mechanikkurs nach Wiesner aufbauend auf die Kinematik behandelt, sondern aus der Statik heraus entwickelt. Dabei wird bei der Begriffseinführung an die Alltagserfahrungen der SchülerInnen (wie z.B. die Muskelkraft) angeknüpft. Das Hooke'sche Gesetz bildet die Grundlage für die Kraftmessung, indem über die Verformung der Feder die Rückstellkraft bestimmt wird. Die Newton'sche Bewegungsgleichung wird nicht explizit behandelt, die einzige Form der Mathematisierung bildet die Definition der Gewichtskraft. Dabei wird die Kraft als skalare Größe behandelt und die Fallbeschleunigung  $g$  nur als Proportionalitätsfaktor zwischen der Masse  $m$  und der Kraft  $F$  eingeführt und als Ortsfaktor bezeichnet. Im weiteren Verlauf wird auch die Kraft als Ursache einer Bewegungsänderung betrachtet, aber nicht explizit mit der Beschleunigung in Verbindung gebracht.

## 7. Elementarisierungen der 1D-Adaption

Ziel bei der Entwicklung der eindimensional-dynamischen Elementarisierungen war es, für die Vergleichsgruppen einen Lehrgang zu entwickeln, der hinsichtlich Struktur, Mediennutzung, Darstellungsform etc. möglichst identisch mit dem 2D-Mechanikkurs nach Wiesner ist und zugleich als Stellvertreter für „konventionellen“ Unterricht gelten kann. Es wird somit ein Mittelweg zwischen den beiden zuvor thematisierten Elementarisierungen gesucht.

Als Darstellungsform von Bewegungen werden auch hier Stroboskopbilder verwendet, allerdings nur für eindimensionale Bewegungen, die sich entweder entlang der  $x$ - oder  $y$ -Achse abspielen. Dadurch werden wie im 2D-Mechanikkurs verschiedene Zeitintervalle betrachtet. In Analogie zum 2D-Mechanikkurs sollen sowohl Geschwindigkeit als auch Beschleunigung mit Hilfe von Vektorpfeilen ikonisch dargestellt werden. Da dies im Eindimensionalen sehr schnell unübersichtlich wird, wird die Darstellungsform der Stroboskopbilder durch sogenannte Stroboskoptabellen erweitert (siehe Abb. 2). Diese unterstützen auch die Unterscheidung zwischen verschiedenen Pfeilarten.

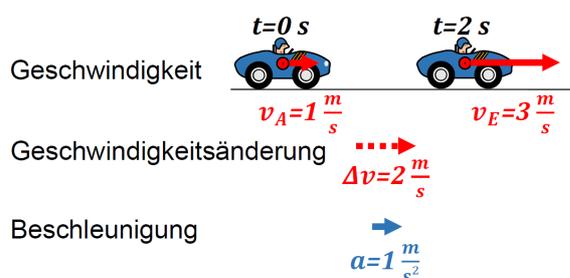


Abb. 2: Stroboskoptabelle (Seiter et al., 2020)

Eine Stroboskoptabelle besteht, wie der Name andeutet, aus mehreren Zeilen. Die erste Zeile enthält

das eigentlichen Stroboskopbild, in das wie schon beim 2D-Mechanikkurs nach Wiesner, Geschwindigkeitspfeile eingezeichnet werden. In den Zeilen darunter erfolgt die Darstellung der Geschwindigkeitsänderung und der Beschleunigung als Pfeile.

In Gegenüberstellung zu den Stroboskopbildern mag die Darstellung durch die Stroboskoptabellen komplexer erscheinen. Vergleicht man diese allerdings mit der Darstellung einer eindimensionalen Bewegung in einem Stroboskopbild, in das zusätzlich Beschleunigungspfeile eingezeichnet werden, fällt die Darstellung in einer Stroboskoptabelle durchaus übersichtlicher aus. Auch die Pfeilkonstruktion, wie sie im 2D-Mechanikkurs nach Wiesner direkt in den Stroboskopbildern vorgenommen wird, würde in einem eindimensionalen Stroboskopbild unübersichtlicher ausfallen, weil die Pfeile sich überlagern. Aus diesem Grund haben wir uns für die Darstellung durch Stroboskoptabellen entschieden. Da beide Darstellungsformen die Visualisierung von gerichteten Größen durch Pfeile als ikonische Repräsentation gemeinsam haben, wird die dadurch entstehende Einschränkung in Hinblick auf die Vergleichbarkeit der beiden Elementarisierungen als nicht gravierend angenommen.

Die Definition der eindimensionalen Geschwindigkeit erfolgt zwar als skalare Größe, orientiert sich allerdings an der Einführung des Tempos im 2D-Mechanikkurs nach Wiesner. Im Unterschied zum „konventionellen“ Unterricht wird hier das Vorzeichen zusätzlich als Richtungsinformation verwendet. Die Geschwindigkeit kann als Pfeil entlang der festgelegten Achse dargestellt werden, dessen Länge den Betrag der Geschwindigkeit und dessen Orientierung die Richtung bzw. das Vorzeichen der Geschwindigkeit repräsentieren.

Anstelle der Bezeichnung Zusatzgeschwindigkeit wird in Anlehnung an den „konventionellen“ Unterricht der Begriff Geschwindigkeitsänderung gewählt. Die Größe und Richtung der Geschwindigkeitsänderung kann analog zur Zusatzgeschwindigkeit des 2D-Mechanikkurses aus den Geschwindigkeitspfeilen grafisch konstruiert werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Geschwindigkeitsänderung durch einfache Addition oder Subtraktion der Geschwindigkeitsbeträge zu berechnen. Die Beschleunigung wird schließlich aus dem Begriff der Geschwindigkeitsänderung erarbeitet und in Form einer Produktgleichung eingeführt:

$$\Delta v = a \cdot \Delta t. \{5\}$$

Der Richtungscharakter der Beschleunigung ergibt sich automatisch aus dem Richtungscharakter der Geschwindigkeitsänderung.

In der 1D-Adaption werden ausschließlich Vorgänge mit konstanten Kräften und keine Kraftstöße betrachtet. Die Kraft wird im Gegensatz zum „konventionellen“ Unterricht nicht über die Statik, sondern dynamisch mit Bezug auf Bewegungsänderungen

„Konventioneller“ Mechanikunterricht	1D-Adaption	Zweidimensional-dynamisches Mechanikkonzept nach Wiesner
Alle Größen werden zuerst an eindimensionalen Bewegungen eingeführt. Später wird das evtl. kurz auf zweidimensionale Bewegungen erweitert.	Alle Größen werden an eindimensionalen Bewegungen eingeführt.	Alle Größen werden zuerst an zweidimensionalen Bewegungen eingeführt. Später wird das auf eindimensionale Bewegungen reduziert.
Die erste verwendete Größe ist der Weg $s$ (teilweise unklar definiert).	Die erste verwendete Größe ist der Ort.	Die erste verwendete Größe ist der Ort.
Wie man Bewegungen erfasst, wird nicht thematisiert, oder es wird nur der zurückgelegte Weg thematisiert.	Es wird thematisiert, dass zur Erfassung einer Bewegung zu bestimmten Zeiten der Ort festgehalten werden muss.	Es wird thematisiert, dass zur Erfassung einer Bewegung zu bestimmten Zeiten der Ort festgehalten werden muss.
Darstellung durch $s(t)$ -, $v(t)$ - und $a(t)$ -Diagramme	Darstellung von Bewegung in Stroboskoptabellen	Darstellung von Bewegungen in Stroboskopbildern
Keine Thematisierung der Richtung	Thematisierung der Richtung	Thematisierung der Richtung
Geschwindigkeit als positive skalare Größe: $v = \frac{s}{t}$ bzw. $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	Geschwindigkeit als skalare Größe: $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	Geschwindigkeit $\vec{v}$ als vektorielle Größe: Tempo $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$
Ergebnisse werden mit Zahlen oder Diagrammen angegeben.	Geschwindigkeiten werden mit Geschwindigkeitspfeilen dargestellt.	Geschwindigkeiten werden mit Geschwindigkeitspfeilen dargestellt.
Unterscheidung zwischen Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeit	Unterscheidung zwischen Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeit	Keine Unterscheidung zwischen Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeit
Thematisierung der Beschleunigung: $a = \frac{v}{t}$ bzw. $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	Thematisierung der Beschleunigung, Einführung der Geschwindigkeitsänderung $\Delta v$ : $\Delta v = a \cdot \Delta t$	Keine Thematisierung der Beschleunigung, Einführung der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ : $\vec{v}_E = \Delta \vec{v} + \vec{v}_A$
Die Beschleunigung wird anhand einer schneller werdenden, geradlinigen Bewegung mit konstanter Beschleunigung eingeführt.	Die Geschwindigkeitsänderung sowie die Beschleunigung werden bei konstanten Einwirkungen eingeführt.	Die Zusatzgeschwindigkeit wird anhand eines senkrechten Stoßes eingeführt.
Bei der Einführung der „Kraft“ wird an Alltagserfahrungen angeknüpft (z. B. Muskelkraft). Das Wort „Kraft“ fällt frühzeitig.	Bei der Einführung der „Kraft“ wird bewusst nicht an Alltagserfahrungen angeknüpft und anfangs nur von Einwirkung gesprochen. Das Wort „Kraft“ wird erst spät verwendet.	Bei der Einführung der „Kraft“ wird bewusst nicht an Alltagserfahrungen angeknüpft und anfangs nur von Einwirkung gesprochen. Das Wort „Kraft“ wird erst spät verwendet.
Bei der Einführung der "Kraft" werden Situationen mit konstanter Kraft verwendet (und Bewegung aus der Ruhe heraus).	Bei der Einführung der "Kraft" werden Situationen mit konstanter oder abschnittsweise konstanter Kraft verwendet. (Bewegung aus der Ruhe heraus, mit Anfangsgeschwindigkeit)	Bei der Einführung der "Kraft" wird ein kurzer Kraftstoß senkrecht zur Bewegungsrichtung verwendet.
„Kraft“ wird anhand von dynamischen und statischen Situationen eingeführt, d.h. die Verformung wird als Wirkung einer Kraft vorgestellt und behandelt.	„Kraft“ wird nur anhand von dynamischen Vorgängen eingeführt; die Verformung wird nicht behandelt.	„Kraft“ wird nur anhand von dynamischen Vorgängen eingeführt.
Zweites Newton'sches Axiom (meist erst in den höheren Jahrgangsstufen): $F = m \cdot a$ (Differentielle Form für Zeitpunkte)	Zweites Newton'sches Axiom: $F = m \cdot a$ Nicht für Zeitpunkte, sondern für Intervalle, also Durchschnittsbeschleunigung (entspricht bei konstanten Kräften aber genau der Momentanbeschleunigung)	Zweites Newton'sches Axiom: $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ (Integrale Form für Zeitintervalle)

Tab. 1: Gegenüberstellung der Elementarisierungen (vgl. Seiter et al., 2020)

eingeführt. Dies ermöglicht die gleiche Strukturierung wie im 2D-Mechanikkurs. Die Newton'sche Bewegungsgleichung wird in ihrer klassischen Form mit der Masse als Proportionalitätsfaktor zwischen Kraft und Beschleunigung eingeführt:

$$F = m \cdot a. \quad \{6\}$$

In Tabelle 1 sind abschließend die verschiedenen Merkmale der drei Elementarisierungen gegenübergestellt. Dabei wurde farblich gekennzeichnet, aus welchen Elementen sich die 1D-Adaption zusammensetzt.

## 8. Studiendesign

Für die Konsolidierungsstudie unterrichteten im Schuljahr 2019/20 jeweils  $N = 11$  Lehrkräfte nach dem 2D-Mechanikkurs nach Wiesner und nach der 1D-Adaption. Die Lehrkräfte kamen dabei aus dem Bereich Bochum (NRW) und dem Bereich Frankfurt am Main (Hessen). Die Stichprobe umfasste ca. 1300 SchülerInnen in 30 Klassen aus Gymnasien und Gesamtschulen. Die genaue Aufteilung auf die Bundesländer und die Treatments kann Tabelle 2 entnommen werden.

	1D-Adaption	2D-Mechanikkurs nach Wiesner
Lehrkräfte	11 Lehrkräfte	11 Lehrkräfte
Klassen	16 Klassen (10 aus NRW und 6 aus Hessen)	14 Klassen (7 aus NRW und 7 aus Hessen)
Schüler	637 SuS (374 aus NRW und 263 aus Hessen)	657 SuS (340 aus NRW und 317 aus Hessen)

**Tab. 2:** Konstellation der Gesamtstichprobe

Zu Beginn erhielten beide Gruppen von Lehrkräften getrennt eine Fortbildung im Umfang von vier Stunden zum jeweiligen Mechaniklehrgang. In der Fortbildung wurden zum einen typische Schülervorstellungen aus der Kinematik und Dynamik und zum anderen Kritikpunkte bezogen auf den „konventionellen Unterricht“ vorgestellt, um daraus die Ideen hinter dem jeweiligen Mechaniklehrgang zu begründen. Im Anschluss wurden die Elementarisierung des Mechaniklehrgangs sowie alle bereitgestellten Materialien vorgestellt. Beide Lehrergruppen wurden bewusst getrennt voneinander fortgebildet, so dass die beteiligten Lehrkräfte nichts von der anderen Art der Elementarisierung erfahren haben. Damit sollte verhindert werden, dass Lehrkräfte sich möglicherweise im Nachhinein für die (von ihnen präferierte) Elementarisierung entscheiden, oder es zu Vermischungen zwischen beiden Konzepten kommt.

Ein Kritikpunkt der bisherigen Forschung war, dass beide Gruppen nicht über die gleiche Art und Menge von Material verfügten. Aus diesem Grund erhielten die Lehrkräfte für den 1D-Adaption ebenfalls Schü-

lerhefte, die in der Reihenfolge der Themen und der Lernprozessstruktur analog zum Schülerheft *Einführung in die Mechanik* aufgebaut sind. Die Schülerhefte zum 2D-Mechanikkurs sind eine leicht abgewandelte Form der Version von Hopf et al. (2009), um die Strukturgleichheit und ein gleiches Layout zu garantieren. Außerdem wurde die Kapitel entfernt, welche nicht Bestandteil der Studie waren.

Als Ergänzung zu den Schülerheften wurden zusätzlich sowohl für den 2D-Mechanikkurs als auch für die 1D-Adaption Workbooks mit gleichartigen Erarbeitungs- und Übungsaufgaben bereitgestellt. Die Workbooks enthalten zum einen die Aufgaben aus den Schülertexten und zum anderen weitere vertiefende Aufgaben zu den Konzepten, die auch auf den in den Schülerheften behandelten Beispielen anknüpfen. Die Workbooks sollten einerseits bei der Durchführung der Lehrgänge durch die Lehrkräfte für eine gleichbleibende Strukturierung sorgen, indem bestimmte Pflichtaufgaben vorgeschrieben wurden. Andererseits sollte für jede Klasse eine Stichprobe der Workbooks anonym für einen Treatment-Check eingesammelt werden. Anhand der Workbooks kann analysiert werden, in welchem Umfang die Materialien von den Lehrkräften eingesetzt wurden und wie gut die Aufgaben von den SchülerInnen gelöst wurden. Zuletzt wurden für die Mediengleichheit Simulationen für beide Lehrgänge bereitgestellt, für die in den Workbooks Anleitungen und Aufgaben konzipiert wurden. Für den 2D-Mechanikkurs existierte bereits eine entsprechende Simulation „Bewegung nach Kraftstoß“<sup>1</sup>. Für die 1D-Adaption wurde die Phet-Simulation „Kräfte und Bewegung: Grundlagen“<sup>2</sup> verwendet.

Zu den Schülerheften wurden ergänzend Unterrichtsverlaufspläne angefertigt, die die in den Schülerheften angelegten Strukturierungen der Lernprozesse unterstreichen. Den Lehrkräften wurde in der Fortbildung diese Tiefenstruktur der Lernprozesse als verpflichtender Rahmen vorgegeben. Der Unterricht selbst konnte bezogen auf Sozialform oder Methoden frei gestaltet werden. Bei den Unterrichtsverlaufsplänen wurde darauf geachtet, dass beide Lehrgänge den gleichen Stundenumfang von ca. 7 Doppelstunden umfassen und die gleiche Zeit auf analoge Themen verwenden (Seiter, 2018). Da in der 1D-Adaption zusätzlich zur Geschwindigkeitsänderung die Beschleunigung thematisiert wird, laufen die Lehrgänge in einem Kapitel auseinander. Der 2D-Mechanikkurs nach Wiesner kompensiert dies durch die Thematisierung der Einwirkungsdauer. Somit kann für beide Gruppen von einer gleichen Interventionsdauer ausgegangen werden.

In der Evaluation sollte das Fachwissen der SchülerInnen bzw. der Lernzuwachs (Differenz zwischen Prä- und Posttest) gemessen werden. Hierzu wurde ein Fachwissenstest zu Kraft und Bewegung anhand

<sup>1</sup> [www.thomas-wilhelm.net/simu\\_stoss.zip](http://www.thomas-wilhelm.net/simu_stoss.zip)

<sup>2</sup> <https://phet.colorado.edu/de/simulation/forces-and-motion-basics>

eines Aufgabenkonstruktionsmodells entwickelt, das unterschiedliche Kompetenzen in diesem Themengebiet beschreibt. In dem Modell wurde zwischen den inhaltlichen Kategorien und besonderen Merkmalen der Aufgaben bezogen auf die Elementarisierungen der Lehrgänge unterschieden. Daraus ergaben sich aber keine eigenständigen latenten Konstrukte bzw. Faktoren, so dass nur die Gesamtsumme über alle Aufgaben gebildet wurde. Bei den Aufgaben handelte es sich um Multiple-Choice Aufgaben mit vier Antwortmöglichkeiten, wobei immer nur eine Antwort korrekt war. Jede Aufgabe wurde dichotom mit null (falsch) oder eins (richtig) bewertet. Der Test wurde vorab im Schuljahr 2018/19 pilotiert und die Items anhand einer Rasch-Analyse ausgewählt. Der Test umfasste insgesamt 27 Items.

### Inhaltliche Kategorien

<b>Bewegungsaufgaben</b>	<b>(B)</b>
Berechnung (3)	(B1)
Stroboskopbilder (4)	(B2)
Veränderung der Geschwindigkeit (2)	(B4)
<b>Trägheit und Scheinkräfte (2)</b>	<b>(N1)</b>
<b>Kraft und Bewegung</b>	<b>(N2)</b>
Keine (resultierende) Kraft -> Bewegung (3)	(KKB)
Keine Bewegung -> Kraft (3)	(KBK)
Kraft -> Bewegung (5)	(KB)
Bewegung -> Kraft (1)	(BK)
Bewegungsvergleich: Bewegung -> Kraft (2)	(VBK)
Bewegungsvergleich: Kraft -> Bewegung (2)	(VKB)

### Merkmale

<b>Eindimensional (5)</b>	<b>(E)</b>
<b>Zweidimensional (5)</b>	<b>(Z)</b>
<b>Stoß (2)</b>	<b>(S)</b>
<b>Statisch (3)</b>	<b>(0)</b>
<b>Kräftegleichgewicht (3)</b>	<b>(G)</b>
<b>Alonzo Item (OMS) (6)</b>	<b>(A)</b>

Tab. 3: Konstruktionsmodell des Fachwissenstests

In Tabelle 3 sind das Konstruktionsmodell sowie die Aufteilung der ausgewählten 27 Aufgaben auf die inhaltlichen Kategorien und Merkmale dargestellt. Aufgabenquellen sind dabei das Force Concept Inventory (Hestenes et al., 1992), Ordered Multiple Choice Aufgabenaus der Arbeit von Alonzo & Steedle (2009) sowie Eigenentwicklungen. Um bei der Leistungsmessung keinen der beiden Mechaniklehrgänge zu bevorzugen, wurden gleichartige Aufgaben zu eindimensionalen und zweidimensionalen Bewegungen sowie für Vorgänge mit konstanten Kräften bzw. Stoßprozessen entwickelt (siehe Merkmale in Tab. 3). Bei der Auswertung soll damit ermöglicht werden, Transferleistungen in die Elementarisierung des jeweils anderen Lehrgangs zu bewerten, ob z.B. die SchülerInnen, die nach dem 2D-Mechanikkurs nach Wiesner unterrichtet wurden, ihr Wissen auch auf eindimensionale Aufgaben übertragen können und umgekehrt. In Abb. 3 sind

zwei analog konstruierte Beispielimts zum Inhaltsfeld Stroboskopbilder (B2) abgebildet.

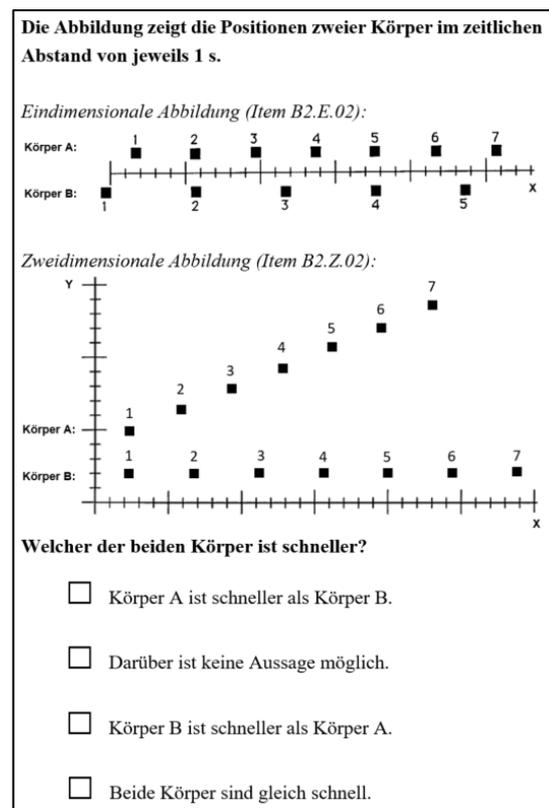


Abb. 3: Analog konstruierte Beispielimts (ein-/zweidimensional)

Die Aufgaben fragen das gleiche Konzept ab, nämlich die Beziehung zwischen den Abständen der Bilder im Stroboskopbild und dem Geschwindigkeitsbetrag. An dieser Stelle wurde bewusst von „schneller“ gesprochen, da es in den beiden Elementarisierungen verschiedene Bezeichnungen für den Geschwindigkeitsbetrag (nämlich Tempo im 2D-Kurs) gibt. Beide Aufgaben haben die gleiche Aufgabenstellung, die gleichen Antwortmöglichkeiten sowie die gleiche Lösung und unterscheiden sich lediglich in der Dimension der Bewegung von Körper A in den Abbildungen. Der Fachwissenstest wurde auf Grundlage des Konstruktionsmodells erstellt, um Konstruktvalidität zu gewährleisten. In der Pilotstudie im Schuljahr 2018/19 wurde der Test bei zwei Schülergruppen eingesetzt, wovon die eine Gruppe bereits Mechanikunterricht hatte, die andere jedoch nicht. Die anschließende Rasch-Analyse lieferte eine deutliche Verschiebung der Personenfähigkeit zugunsten der Schülergruppe mit Mechanikunterricht hinsichtlich der Itemschwierigkeit, was als Argument für die ökologische Validität des Testinstruments angebracht werden kann. Ein weiteres Argument hierfür ist die zunehmende Reliabilität zwischen der Schülergruppe ohne Mechanikunterricht (Cronbach's  $\alpha = .301$ ) und der mit Mechanikunterricht (Cronbach's  $\alpha = .549$ ). Die interne Konsistenz wird hierbei nicht als Gütemaß des Instruments, sondern als Grad der konsistenten Konzept-

entwicklung bei den SchülerInnen verstanden (Taber, 2018). Der niedrige Wert der Schülergruppe ohne Mechanikunterricht ist zu erwarten, da hier die physikalischen Konzepte noch nicht stabil verankert sind.

Als eine weitere Variable wird erfasst, wie viele Stunden die Lehrkräfte insgesamt mit dem Material unterrichtet haben, um die Time-On-Task zu kontrollieren. Als nicht kognitive Variablen werden zusätzlich das Interesse im Fach Physik und das fachspezifische Selbstkonzept (Frey et al., 2009) der SchülerInnen erfasst sowie ein Intelligenztest (Heller & Perleth, 2000) durchgeführt.

## 9. Forschungsergebnisse

Der Unterricht in vielen hessischen Klassen konnte aufgrund des Lockdowns während der Corona-Krise nicht beendet werden und Nachtests konnten nicht oder nur online durchgeführt werden. Deshalb beziehen sich die hier vorgestellten Ergebnisse ausschließlich auf die gymnasialen Klassen aus Nordrhein-Westfalen, deren Unterrichtsreihen wegen des früheren Beginns schon beendet waren.

Die Stichprobe besteht insgesamt aus 288 Schülerinnen und Schülern mit einem durchschnittlichen Alter von 13.3 ( $\sigma = 0.68$ ). SchülerInnen, die nur an einem Testtermin (also nur Prä- oder Posttest) teilgenommen haben, wurden für die Auswertung nicht weiter berücksichtigt. Die genaue Aufteilung der Stichprobe bezogen auf die Anzahl von Lehrkräften, Klassen sowie die Aufteilung auf die verschiedenen Klassenstufen kann Tabelle 4 entnommen werden.

	1D-Adaption	2D-Mechanikkurs nach Wiesner
Lehrkräfte	6 Lehrkräfte	4 Lehrkräfte
Klassen	6 Klassen (83.3 % Stufe 8, 16.7 % Stufe 9)	7 Klassen (57.1 % Stufe 8, 42.9 % Stufe 9)
Schüler	123 SuS (61 % weiblich, 35.8 % männlich)	165 SuS (45,5 % weiblich, 52.1 % männlich)

**Tab. 4:** Konstellation der ausgewerteten Stichprobe

Eine Poweranalyse für die Studie liefert für einen zweiseitigen t-Test mit unabhängigen Stichproben bei der Annahme eines mittleren Effekts ( $d = 0.5$ ) mit einem  $\alpha$ -Niveau von  $\alpha = .05$  eine Teststärke von  $1 - \beta = .99$ . In den Fällen, in denen keine Normalverteilung der Daten vorlag, wurde die Signifikanz der Ergebnisse mit non-parametrischen Verfahren verifiziert. Da der t-Test bei ausreichend großer Stichprobengröße ( $N \geq 30$ ) robust gegenüber einer Verletzung der Voraussetzung der Normalverteilung ist (siehe z.B. Bortz & Schuster, 2012), werden für die Einheitlichkeit der Darstellung im Folgenden nur diese parametrischen Auswertungen präsentiert. Durch die Raschanalyse des Fach-

wissenstests wird die Intervallskalierung der abhängigen Variablen hergestellt. Auf die Testung der Varianzhomogenität mittels Levene-Test wird – falls diese verletzt sein sollte – immer bei den betreffenden t-Tests eingegangen, da als Korrekturmöglichkeit bei einem signifikanten Levene-Test die Freiheitsgrade des t-Tests reduziert werden. Wenn nicht anders erwähnt, ist die Varianzhomogenität erfüllt.

Zunächst soll durch den Vergleich der Prätest-Ergebnisse die Gegebenheit der gleichen Eingangsvoraussetzung beider Treatmentgruppen überprüft werden. Ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben zeigt, dass sich die beiden Schülergruppen hinsichtlich ihrer Prätest-Ergebnisse im Fachwissenstest signifikant unterscheiden. Die mittlere Punktzahl im Fachwissenstest der SchülerInnen, die nach dem 2D-Mechanikkurs nach Wiesner unterrichtet wurden, beträgt ( $\mu = 10.04, \sigma = 2.91$ ) gegenüber den SchülerInnen, die nach der 1D-Adaption unterrichtet wurden ( $\mu = 9.20, \sigma = 2.48$ ). Ein signifikanter Levene-Test zeigte die Verletzung der Varianzhomogenität auf, weshalb die Freiheitsgrade reduziert wurden. Die Punktzahl der SchülerInnen in der 1D-Adaption ist also durchschnittlich um 0.84 Punkte (95 % – CI[0.22, 1.47]) niedriger,  $t(280.77) = 2.65, p^* = .026 < .05$  (signifikant auch nach Bonferroni-Korrektur  $p^* = 3p$ , wenn die Prätest- im Weiteren mit den Posttest-Ergebnissen in beiden Treatmentgruppen verglichen werden). Die Effektstärke nach Cohen's  $d^3$  ergibt einen kleinen Effekt mit  $d = 0.31$ . Da sich die beiden Treatmentgruppen bereits im Prätest signifikant voneinander unterscheiden, wird für den Vergleich der beiden Mechaniklehrgänge im Weiteren der Lernzuwachs (Differenz von Post- und Prätest-Ergebnissen) und nicht nur die Posttest-Ergebnisse betrachtet.

Im nächsten Schritt wird getestet, ob für die beiden Treatmentgruppen generell ein Lernzuwachs vorliegt. Für die SchülerInnen in der 1D-Adaption zeigt ein zweiseitiger t-Test für verbundene Stichproben einen statistisch höchst signifikanten Lernzuwachs von ( $\mu = 9.20, \sigma = 2.48$ ) Punkten im Prätest auf ( $\mu = 10.73, \sigma = 3.17$ ) im Posttest. Die SchülerInnen in der 1D-Adaption erreichen somit durchschnittlich im Posttest 1.53 Punkte (95 % – CI[1.05, 2.01]) mehr als im Prätest,  $t(122) = 6.32, p < .001$  (signifikant auch bei Bonferroni-Korrektur). Die Effektstärke ergibt einen mittleren Effekt  $d = 0.54$ . Analog zeigt sich ein ebenfalls höchst signifikanter Lernzuwachs für die SchülerInnen im 2D-Mechanikkurs nach Wiesner. Dort steigt die Punktzahl von ( $\mu = 10.04, \sigma = 2.91$ ) im Vortest auf ( $\mu = 12.05, \sigma = 3.42$ ) im Posttest. Die SchülerInnen erreichen durchschnittlich im Posttest 2.01

$${}^3d = \frac{\mu_A - \mu_B}{SD_{pooled}} \quad \text{mit}$$

$$SD_{pooled} = \sqrt{\frac{(N_A - 1) \cdot \sigma_A^2 + (N_B - 1) \cdot \sigma_B^2}{(N_A - 1) + (N_B - 1)}}$$

Punkte (95 % – CI[1.48, 2.55]) mehr als im Prätest,  $t(164) = 7.45, p < .001$  (signifikant auch bei Bonferroni-Korrektur). Auch hier liegt ein mittlerer Effekt mit  $d = 0.63$  vor. Beide Lehrgänge führen also zu einem höchst signifikanten Lernzuwachs mit mittleren Effektstärken.

Mit Hinblick auf die Forschungsfrage für den Vergleich der Lernzuwächse zwischen den beiden Mechaniklehrgängen wäre grundsätzlich eine ANCOVA mit den Prätest-Ergebnissen als Kovariate möglich. Allerdings ist eine Voraussetzung, dass sich die Kovariate in den Gruppen nicht unterscheiden darf, was in diesem Fall aber für die Prätest-Ergebnisse zutrifft. Darüber hinaus wird durch die ANCOVA nicht nur die Varianz der Kovariaten aus der unabhängigen, sondern auch aus der abhängigen Variablen entfernt (Miller & Chapman, 2001), in diesem Fall aus dem Lernzuwachs. Entsprechend würde getestet werden, wie sich der Lernzuwachs unter der Annahme, dass alle SchülerInnen das gleiche Vorwissen hätten, verhält. Diese Annahme spiegelt allerdings nicht die realistische Verteilung des Vorwissens in der Stichprobe wider (siehe Abb. 5), weshalb sich die ANCOVA als Analyseverfahren nicht empfiehlt.

Um zu untersuchen, inwiefern SchülerInnen in einem der beiden Mechaniklehrgänge einen größeren Lernzuwachs haben, wird daher ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben gerechnet. Es ergibt sich kein statistisch signifikanter Unterschied im Lernzuwachs zwischen der 1D-Adaption ( $\mu = 1.53, \sigma = 2.68$ ) und dem 2D-Mechanikkurs nach Wiesner ( $\mu = 2.01, \sigma = 3.47$ ). Der Unterschied im Lernzuwachs beträgt durchschnittlich 0.48 Punkte (95 % – CI[–0.23, 1.20]),  $t(285.60) = 1.33, p = .183$ . Der Levene-Test auf der Verletzung der Varianzhomogenität ist dabei signifikant geworden. Nach Cohen läge mit  $d = 0.15$  auch nur ein sehr schwacher Effekt vor. (Die Teststärke für diese Effektstärke reduziert sich bei der vorliegenden Stichprobe auf  $1 - \beta = .24$ .) Damit muss vorläufig die Nullhypothese angenommen werden: Die SchülerInnen unterscheiden sich in ihrem Lernzuwachs zwischen den beiden verschiedenen Mechaniklehrgängen nicht voneinander. Die t-Tests sind in Abb. 4 noch einmal zusammengefasst.

Bei der oben durchgeführten Analyse wurde ein möglicher Einfluss der unterschiedlichen Prätest-Ergebnisse auf den Lernzuwachs nicht berücksichtigt. Ein Indiz für einen möglichen Zusammenhang liefert die höchst signifikante Korrelation nach Pearson zwischen den Prätest-Ergebnissen und dem Lernzuwachs ( $r(288) = -.356, p < .001$ ). Demnach lernen SchülerInnen weniger dazu, wenn sie bereits im Vortest höherer Punktzahlen erreichen. Um den Einfluss der unterschiedlichen Prätest-Ergebnisse auf die Analysen auszuschließen, wird im Folgenden eine Parallelisierung der Stichprobe mit Hilfe von „matched samples“ vorgenommen (Bortz und Döring, 2006). Hierbei wird so vorge-

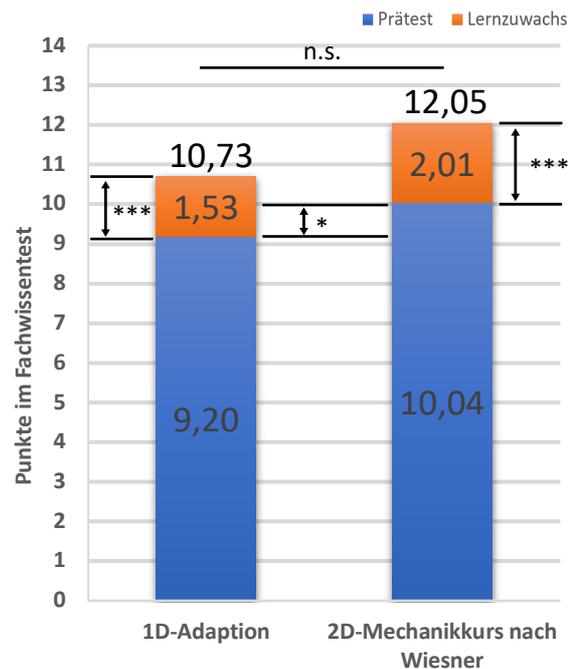
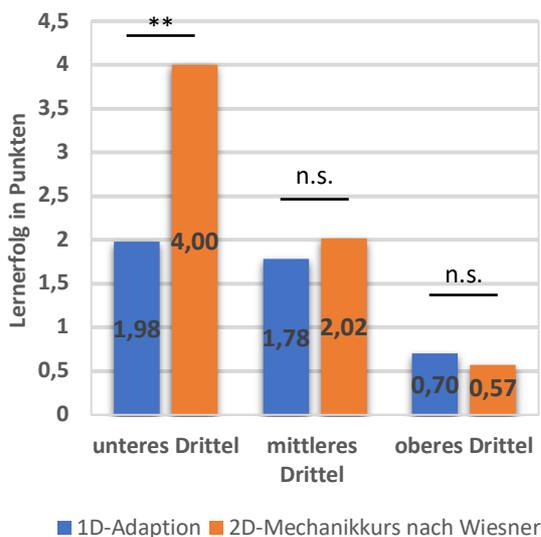


Abb. 4: Darstellung der Testergebnisse beider Treatmentgruppen im Vergleich (Signifikanzniveaus  $*** p < .001$ ,  $** p < .01$ ,  $* p < .05$ )

gangen, dass von den SchülerInnen einer Klasse mit gleichen Prätest-Werten diejenigen aus der größeren Treatment-Klasse entfernt werden, die den größten bzw. kleinsten Lernzuwachs bei dem jeweiligen Prätest-Ergebnis haben. Damit wird erreicht, dass die Anzahl der Schüler in beiden Gruppen identisch ist und beide Treatmentgruppen im Anschluss den gleichen Mittelwert und die gleiche Varianz aufweisen. Dadurch wird die Stichprobe auf 208 SchülerInnen reduziert ( $n = 104$  pro Treatment), wobei beide Gruppen den gleichen Mittelwert ( $\mu = 9.32$ ) und die gleiche Varianz ( $\sigma = 2.42$ ) aufweisen. Ein erneuter t-Test für unabhängige Stichproben liefert nun einen statistisch höchst signifikanten Unterschied im Lernzuwachs zwischen der 1D-Adaption ( $\mu = 1.27, \sigma = 2.25$ ) und dem 2D-Mechanikkurs nach Wiesner ( $\mu = 2.41, \sigma = 2.60$ ). Der Unterschied im Lernzuwachs beträgt durchschnittlich 1.14 Punkte (95 % – CI[–1.81, –0.48]),  $t(206) = 3.39, p < .001$ . Die Effektstärke nach Cohen beträgt  $d = 0.47$ .

Eine weitere Möglichkeit die unterschiedlichen Prätest-Ergebnisse in die Analyse miteinzubeziehen, besteht darin, die Treatmentgruppen bezogen auf die Prätest-Ergebnisse in Untergruppen aufzuteilen und diese jeweils miteinander zu vergleichen. In diesem Fall werden beide Treatmentgruppen bezüglich der Prätest-Ergebnisse als gemeinsame Stichprobe in Terzile aufgeteilt, d. h. für beide Gruppen die gleiche Punktzahl als Grenze der Terzile festgelegt. Für die Festlegung der Schwellenwerte wurde in der Häufigkeitsverteilung der Gesamtstichprobe der Wert gewählt, der bezogen auf die kumulierten Prozente näher an  $33.\bar{3}\%$  bzw.  $66.\bar{6}\%$  lag. Für die Terzile ergaben sich damit die Intervalle von 0-8

(unteres Drittel), 9-10 (mittleres Drittel) und 11-18 (oberes Drittel) in den Prätest-Ergebnissen. Die sich daraus ergebende Aufteilung beträgt aufsteigend geordnet nach Terzilen für die 1D-Adaption 46, 40 und 47 SchülerInnen sowie beim 2D-Kurs 52, 41 und 72 SchülerInnen. Da die beiden Treatmentgruppen bezüglich ihrer Prätest-Ergebnisse gegeneinander verschoben sind, ist die Besetzung der Terzile in den beiden Gruppen unterschiedlich, es werden aber jeweils Lernende bis zum gleichen Fähigkeitsniveau zusammengefasst. Für jedes Terzil wird im Anschluss der mittlere Lernzuwachs der beiden Treatmentgruppen mittels t-Tests für unabhängige Stichproben verglichen. Die Ergebnisse sind in Abb. 5 zusammengefasst.



**Abb. 5:** Vergleich der Lernzuwächse beider Treatmentgruppen nach Terzilen im Prätest (Signifikanzniveaus \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ )

Wegen der drei Vergleiche muss eine Bonferroni-Korrektur vorgenommen werden ( $p^* = 3p$ ). Lediglich im unteren Drittel erzielen die SchülerInnen im 2D-Mechanikkurs nach Wiesner ( $\mu = 4.00$ ,  $\sigma = 3.46$ ) einen hoch signifikant größeren Lernzuwachs als in der 1D-Adaption ( $\mu = 1.98$ ,  $\sigma = 2.07$ ). Der Levene-Tests wird dabei signifikant. Der Unterschied im Lernzuwachs zwischen den beiden Treatmentgruppen beträgt hier durchschnittlich 2.02 Punkte (95 % - CI[0.89, 3.15]),  $t(84.84) = 3.55$ ,  $p^* = .0019 < .01$ . Nach Cohen liegt dabei mit  $d = 0.70$  ein mittlerer Effekt vor. Für das mittlere und das obere Drittel erhalten wir keinen statistisch signifikanten Unterschied im Lernzuwachs. Im mittleren Drittel beträgt der Unterschied zwischen der 1D-Adaption ( $\mu = 1.78$ ,  $\sigma = 2.79$ ) und dem 2D-Mechanikkurs nach Wiesner ( $\mu = 2.02$ ,  $\sigma = 2.70$ ) im Durchschnitt 0.24 Punkte (95 % - CI[-0.96, 1.46]),  $t(79) = 0.41$ ,  $p = .492$  (Bonferroni-Korrektur irrelevant),  $d = 0.09$ . Im oberen Drittel beträgt der Unterschied im Lernzuwachs zwischen der 1D-Adaption ( $\mu = 0.70$ ,  $\sigma = 3.01$ ) und dem 2D-Mechanikkurs nach Wiesner

( $\mu = 0.57$ ,  $\sigma = 3.18$ ) im Durchschnitt 0.13 Punkte (95 % - CI[-1.13, 1.40]),  $t(107) = 0.21$ ,  $p = .806$  (Bonferroni-Korrektur irrelevant),  $d = 0.04$ . Nach Cohen liegt für das mittlere und obere Drittel kein Effekt vor. Die Teststärke für einen mittleren Effekt und der vorgenommenen Bonferroni-Korrektur läge bei der aufgeteilten Stichprobe für das mittlere Drittel bei  $1 - \beta = .43$  und für das obere Drittel bei  $1 - \beta = .59$ .

## 10. Diskussion

Beide Lehrgänge führen unabhängig vom Vergleich der beiden Elementarisierungen jeweils zu einem höchst signifikanten Lernzuwachs bei mittleren Effektstärken. In beiden Treatmentgruppen gab es also eine deutliche Verbesserung der SchülerInnen im Fachwissenstest zwischen dem Prä- und dem Posttest. Damit ist die erste Forschungsfrage beantwortet.

Bezüglich der Prätest-Ergebnisse unterscheiden sich die beiden Treatmentgruppen jedoch voneinander, weshalb diese unterschiedlichen Eingangsvoraussetzungen in weiteren Analysen berücksichtigt werden mussten. Die Auswertung zeigt, dass, wenn der Einfluss der verschiedenen Prätest-Ergebnisse nicht berücksichtigt wird, der Unterschied in der Elementarisierung der Kinematik und Dynamik zwischen beiden Lehrgängen keinen signifikanten Unterschied im Lernzuwachs der SchülerInnen zur Folge hat, wenn alle anderen Gestaltungsmerkmale (Strukturierung, Medien, etc.) kontrolliert werden. Insgesamt fällt der Lernzuwachs im 2D-Mechanikkurs nach Wiesner zwar höher aus, aufgrund der mangelnden Signifikanz sollte hier aber die Nullhypothese gewählt werden, dass es also keinen Unterschied im Lernzuwachs gibt. Für eine mittleren Effekt ( $d = 0.5$ ) ist bei der gegebenen Stichprobe die Teststärke  $1 - \beta = .99$  sehr hoch, d. h. ein solcher Effekt wäre mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% entdeckt worden. Bei der aus den Daten berechneten tatsächlichen Effektstärke von  $d = 0.15$  reduziert sich die Teststärke auf 24%. Dies besagt jedoch nur, dass eine größere Stichprobe nötig wäre, um diesen sehr kleinen Effekt nachzuweisen. Für das Anliegen dieser Studie kann aber festgehalten werden, dass kein bedeutsamer Unterschied zwischen den beiden Kursen festgestellt wurde. Der Vergleich im Fall der parallelisierten Stichprobe liefert hingegen einen höchst signifikanten mittleren Effekt im Unterschied der Lernzuwächse zugunsten des 2D-Mechanikkurses. Die Parallelisierung hat dabei diejenigen SchülerInnen mit extremen Lernzuwachs (positiv und negativ) aus der Stichprobe entfernt. Dieser Eingriff in die Stichprobenkonstellation muss in jedem Fall diskutiert werden, da hierdurch die externe Validität stark vermindert wird. Eine Stichprobe ohne Extremwerte bildet nicht die realen Gegebenheiten ab, wodurch dieses Ergebnis im Vergleich mit den anderen Analysen kritisch gesehen werden sollte. Besseren Aufschluss gibt hier die Einteilung der

Stichprobe in Terzile. Bei der Betrachtung der Terzile bezüglich der Prätest-Ergebnisse zeigt sich, dass der Lernzuwachs lediglich für das untere Drittel im 2D-Mechanikkurs signifikant höher ausfällt. Der gesamte Unterschied im Lernzuwachs aus den vorherigen Analysen ergibt sich also fast ausschließlich aufgrund des Unterschieds im unteren Drittel, was bedeutet, dass die SchülerInnen mit einem niedrigen Prätest-Ergebnis mit dem 2D-Mechanikkurs besser gelernt haben, wohingegen die restlichen Schüler in beiden Lehrgängen gleich gut gelernt haben. Die Teststärke für das mittlere und untere Drittel fällt durch die verminderte Stichprobe in den Terzilen für eine mittlere Effektstärke ( $d = 0.5$ ) auf 49 % bzw. 58 %, weshalb nicht ausgeschlossen werden kann, dass mit einer größeren Stichprobe hier entsprechende Effekte hätten nachgewiesen werden können. Die berechneten Effektstärken deuten aber auch hier auf eher unbedeutende Unterschiede hin. Für die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage lässt sich abschließend feststellen, dass zwischen den beiden Lehrgängen bezüglich der Gesamtstichprobe kein Unterschied im Lernzuwachs nachgewiesen werden konnte, bei Betrachtung der Terzile es aber einen Unterschied im Lernzuwachs bei den schwächeren SchülerInnen zugunsten des 2D-Mechaniklehrgangs gibt.

## 11. Fazit

Die beiden Mechaniklehrgänge führen für die ausgewerteten Klassen in NRW zu einem höchst signifikanten Lernzuwachs bei einer mittleren Effektstärke, was als ein gutes Ergebnis bewertet werden kann. Die Analyse liefert einen Eindruck davon, wie sich die Ergebnisse der beiden Mechaniklehrgänge bezüglich des Fachwissenstests voneinander unterscheiden. In Bezug auf weitere erfasste Kontrollvariablen wie die Unterrichtszeit, das Interesse oder die kognitiven Fähigkeiten sind weitere Analysen geplant. Die Stichprobe wurde durch den Corona-Lockdown leider reduziert, so dass auf der bisherigen Datengrundlage noch keine eindeutige Aussage gemacht werden kann, inwiefern die Unterschiede in der Elementarisierung einen Effekt auf den Lernzuwachs haben. Da beide Kurse einen signifikanten Lernzuwachs aufweisen, kann festgestellt werden, dass der dynamische Zugang zur Mechanik, unabhängig ob ein- oder zweidimensional, erfolgreich ist. Einen Vergleich mit einem statischen Zugang, wie er in den Schulbüchern noch die Regel ist, bietet die Studie nicht. Dies lässt sich methodisch kaum adäquat realisieren, weil dabei grundsätzlich eine andere Strukturierung und andere Darstellungsformen zum Einsatz kommen. Entsprechend lassen sich aus der Studie keine Schlüsse in Hinblick auf den „konventionellen“ Schulunterricht ziehen, zumal in der schulischen Praxis auch Mischformen aus einem dynamischen Zugang mit statischen Elementen (Kräfte erkennt man an der Verformung) zu finden sind. Außerdem liefert die Statik keine Verbindung zu den

Begrifflichkeiten der Kinematik, da sich ein solcher Zugang in Bezug auf die Strukturierung der Themen stark von einem dynamischen Zugang unterscheiden würde.

## 12. Literatur

- Alboteanu-Schirner, A.; Buric R.; Burisch, C.; Emse, A.; Geck, E.; Käbbe, K.; Lauterjung, D.; Lauterjung, S.; Schöpfer, J. & Trendel, G. (2016). *Universum Physik Band 2 Gymnasium Nordrhein-Westfalen*. Berlin: Cornelsen Schulverlag GmbH, 1. Auflage.
- Alonzo, A. C. & Steedle, J. T. (2009). Developing and assessing a force and motion learning progression. *Science Education*, 93, 389-421.
- Bortz, J. & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. 4. Auflage. Berlin: Springer.
- Bortz, J., & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Feldmann, C.; Janzen U.; Kirschbaum T. & Kohl R. (2009): *Impulse Physik 2 für die Klassen 7-9 im achtjährigen Bildungsgang der Gymnasien in Nordrhein-Westfalen*. Stuttgart: Ernst Klett Verlag GmbH.
- Frey, A. et al. (Hrsg.). (2009). *PISA 2006 Skalendokumentation der Erhebungsinstrumente*. Münster: Waxmann.
- Heller, K. A. & Perleth, C. (2000). *Kognitiver Fähigkeitstest für 4.-12. Klassen, Revision KFT 4-12 + R*. Göttingen: Hogrefe.
- Hermann, F. (2002). *Altlasten der Physik (61): Momentan- und Durchschnittsgeschwindigkeit*. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik und Schule* 51, S. 46.
- Hestenes, D.; Wells, M. & Swackhamer, G. (1992). *Force Concept Inventory*. *The Physics Teacher* 30, 141-158.
- Hopf, M.; Wilhelm, T.; Waltner, C.; Tobias, V. & Wiesner, H. (2009). *Einführung in die Mechanik*, 4. Auflage, München, veröffentlicht unter: [www.thomas-wilhelm.net/Mechanikbuch\\_Druckversion.pdf](http://www.thomas-wilhelm.net/Mechanikbuch_Druckversion.pdf)
- Jung, W. & Callsen, H. (1976). *Newton'sche Mechanik*. Versuch eines neuen Zugangs für den Unterricht. *Naturwissenschaften im Unterricht* 6/24, S. 231-236.
- Jung, W. (1973). *Fachliche Zulässigkeit aus didaktischer Sicht*. Kiel: IPN Seminar II.
- Miller, G. A. & Chapman, J. P. (2001). *Misunderstanding analysis of covariance*. *Journal of abnormal psychology*, 110(1), 40-48.
- Kircher, E.; Girwidz, R. & Häußler, P. (Hrsg.). (2015). *Physikdidaktik*. Springer Berlin Heidelberg.
- Schecker, H.; Wilhelm, T.; Hopf, M.; Duit, R., & Fischler, H. (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht*. Berlin Heidelberg: Springer.

- Seiter, M. (2018). Vergleichende Rekonstruktionen von Zugängen zur Kinematik und Dynamik in der Sekundarstufe I. Masterarbeit an der Ruhr-Universität Bochum.
- Seiter, M.; Krabbe, H. & Wilhelm, T. (2020). Vergleich von Zugängen zur Mechanik in der Sekundarstufe I. In: S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen* (S. 1051-1054). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Wien 2019.
- Taber, K. S. (2018). The use of Cronbach's alpha when developing and reporting research instruments in science education. *Research in Science Education*, 48(6), 1273-1296.
- Tobias, V. (2010). Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht. Die Wirksamkeit einer Einführung über zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen. In: *Studien zum Physik- und Chemielernen*. Band 105, Berlin: Logos-Verlag.
- Waltner, C.; Tobias, V.; Wiesner, H.; Hopf, M. & Wilhelm, T. (2010). Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Dynamik in der Mittelstufe. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*. Heft 7, 59. Jahrgang, S. 9-22.
- Wiesner, H.; Schecker, H. & Hopf M. (Hrsg.). (2013). *Physikdidaktik kompakt*. Aulis-Verlag.
- Wiesner, H.; Wilhelm, T.; Rachel, A.; Waltner, C.; Tobias, V. & Hopf, M. (2011). *Mechanik I: Kraft und Geschwindigkeitsänderung*. In: *Reihe Unterricht Physik*, Band 5, Aulis-Verlag (später erschienen unter: Wiesner, H.; Wilhelm, T.; Waltner, C.; Tobias, V.; Rachel, A.; Hopf, M. (2016). *Kraft und Geschwindigkeitsänderung*. Aulis-Verlag.)
- Wilhelm, T. (2005). Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung. In: *Studien zum Physik- und Chemielernen*. Band 46, Berlin: Logos-Verlag.
- Wilhelm, T. (2016). Elementarisierung in der Mechanik - Weglassen ist eine Kunst. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*. Heft 6, 65. Jahrgang, S. 22-24.
- Wilhelm, T.; Tobias, V.; Waltner, C.; Hopf, M. & Wiesner, H. (2011). Zweidimensionale dynamische Mechanik – Ergebnisse einer Studie. In: Höttecke, D. (Hrsg.). *Konzepte fachdidaktischer Strukturierung*. Jahrestagung der GDGP in Potsdam 2010, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 31, Münster: Lit-Verlag, S. 438-440.
- Wilhelm, T.; Wiesner, H.; Hopf, M. & Rachel, A. (2013). *Mechanik II: Dynamik, Erhaltungssätze, Kinematik*. In: *Reihe Unterricht Physik*, Band 6, Aulis-Verlag.
- Wilhelm, T. (2018). *Stolpersteine überwinden im Physikunterricht: Anregungen für fachgerechte Elementarisierung*. Aulis-Verlag.
- Wodzinski, R. (1996). *Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht*. Dissertation Universität Frankfurt am Main, LIT, Münster.
- Wodzinski, R. & Wiesner, H. (1994a). Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Beschreibung von Bewegungen und Geschwindigkeitsänderungen. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*. Heft 5, 32. Jahrgang, S. 164-169.
- Wodzinski, R. & Wiesner, H. (1994b). Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Zusatzbewegung und Newton'sche Bewegungsgleichung. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*. Heft 6, 32. Jahrgang, S. 202-207.