

[15] H. Wiesner: Verbesserung des Lernerfolgs durch Untersuchungen von Lernschwierigkeiten im Physikunterricht, Habilitationsschrift, Universität Frankfurt/M., 1993

[16] A.A. diSessa: A Bird's Eye View of the „Pieces“ vs. „Coherence“ Controversy (From the „Pieces“ Side of the Fence). In: S. Vosniadou (Ed.): International Handbook of Research on Conceptual Change, Routledge, 2008, S. 35-60

[17] S. Vosniadou (Ed.): Conceptual Change Research: An Introduction. In: International Handbook of Research on Conceptual Change, Routledge, 2008, S. xiii-xxviii

[18] W. Jung, H. Reul, H. Schwedes: Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3-6. Diesterweg, Frankfurt am Main, 1975

[19] D. Herdt: Einführung in die elementare Optik. Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrgangs. Westarp, Essen 1989

[20] M. Bader: Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrganges „Einführung in die mechanische Energie und Wärmelehre“, Dissertation Universität München, 2001

[21] S. Späth: Überarbeitung und empirische Untersuchung eines Unterrichtskonzeptes zur Einführung in die Elektrizitätslehre. Zulassungsarbeit Universität München

[22] H. Wiesner, V. Tobias, C. Waltner, M. Hopf, Th. Wilhelm, A. I. Sen: Dynamik in den Mechanikunterricht, PhyDid B, 2010

[23] H. Wiesner, V. Tobias, C. Waltner, M. Hopf, Th. Wilhelm, Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Dynamik in der Mittelstufe, 2010, in diesem Heft

Anschrift der Verfasser

Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner, Dr. Verena Tobias, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Universität München, Theresienstraße 37, 80333 München, E-Mail:

hartmut.wiesner@physik.uni-muenchen.de

Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Dynamik in der Mittelstufe

Ch. Waltner, V. Tobias, H. Wiesner, M. Hopf, Th. Wilhelm

1. Grundlegende Entscheidungen und Ziele für eine Einführung in die Dynamik

In diesem Beitrag wird eine Einführung in die Mechanik beschrieben, die über viele Jahre in mehreren Zyklen mit Untersuchungen von Lernprozessen und Lernschwierigkeiten, darauf aufbauenden Weiterentwicklungen der Lernumgebungen und Evaluationen entstanden ist (s. [1] für einen Überblick über die Entwicklungsphasen seit 1970). Nachdem in den letzten Jahren eine sorgfältige empirische Untersuchung dieser Konzeption durchgeführt worden ist [2], mit der gezeigt werden konnte, dass deutliche Verbesserungen gegenüber verbreiteten Einführungen mit starker Betonung der Statik, der Kinematik und des Beschleunigungsbegriffs und einer Beschränkung auf eindimensionale Bewegungen erzielt worden sind, erscheint uns eine erneute Beschreibung des Konzeptes sinnvoll, die zudem einige neue methodische Verfeinerungen enthält.

Ein wesentlicher Anstoß für den letzten Entwicklungszyklus war die Verschiebung der Einführung in die Mechanik in die 7. Klasse im Zuge der Umstellung auf das 8jährige Gymnasium in Bayern und die dadurch artikulierte Forderung von Lehrkräften, geeignete Unterrichtsmaterialien zur Verfügung gestellt zu bekommen. Die früheren fachmethodischen Entscheidungen wurden beibehalten:

a) Die Mechanik soll dynamisch eingeführt werden und zwar über die Kraftstoßgleichung, weil der verbreitete Weg über die Statik und die (eindimensionale) Kinematik Lernschwierigkeiten bestärkt und erzeugt (s. z. B. [3]-[5] und das Vorwort in diesem Heft).

b) Die Geschwindigkeit ist vektoriell (mindestens zweidimensional) einzuführen, damit später ein allgemein gültiger Beschleunigungsbegriff entwickelt werden kann.

Das Konzept über die Kraftstoßgleichung stellt die Vermittlung der folgenden grundlegenden Ideen in das Zentrum des Lehrgangs:

- Bewegungen werden durch die vektorielle Geschwindigkeit beschrieben (symbolisch – bzw. ikonisch – dargestellt durch Geschwindigkeitspfeile);
- eine Einwirkung, z. B. ein Stoß, fügt zu der Anfangsgeschwindigkeit eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ hinzu bzw. führt zu einer Geschwindigkeitsänderung $\Delta\vec{v}$ in Einwirkungs- bzw. Stoßrichtung (entsprechendes gilt umgekehrt);
- die Endgeschwindigkeit ergibt sich aus der vektoriellen Addition von Anfangsgeschwindigkeit und Zusatzgeschwindigkeit;
- die Größe der Zusatzgeschwindigkeit bzw. Geschwindigkeitsänderung hängt von der Stärke der Einwirkung und ihrer Dauer ab;

- bei gleicher Einwirkung bzw. gleichstarkem Stoß auf verschiedene Körper hängt $\Delta\vec{v}$ von einer Eigenschaft des gestoßenen Körpers ab, nämlich von seiner „Massigkeit“ (träge Masse);

- die Newtonsche Bewegungsgleichung wird in der Form

$$\vec{F}\Delta t = m \Delta\vec{v}$$

eingeführt; sie stellt eine Definitionsgleichung für die Kraft dar.

Die Kraft \vec{F} über die Beziehung

$$\vec{F}\Delta t = m \Delta\vec{v}$$

zu definieren bzw. als physikalische Festlegung von Stärke und Richtung einer Einwirkung einzuführen ist eine der Möglichkeiten die Grundbeziehungen der Mechanik zu strukturieren (s. Mach 1912, Eisenbud, 1958; Westphal, 1967; Weinstock, 1961 [6]-[9]).

Eine logisch konsistente Durchführung greift dabei auf den Impulserhaltungssatz als empirisches Gesetz zurück, der auch die Messvorschrift für die träge Masse liefert.

Die obige Definition der Kraft ist aber unvollständig und wäre nutzlos (s. Feynman [10]), wenn Kräfte nicht auch von

$$\vec{F}\Delta t = m \Delta\vec{v}$$

Inhaltsverzeichnis des Mechaniklehrgangs

1. Zielsetzung der Mechanik
2. Beschreibung und Darstellung von Bewegungen
 - 2.1 Die Abhängigkeit der Bewegung vom Bezugssystem
 - 2.2 Aufzeichnung von Bewegungen
3. Der vektorielle Geschwindigkeitsbegriff
4. Die Zusatzgeschwindigkeit (bzw. Geschwindigkeitsänderung)
 - 4.1 Folge eines Kraftstoßes
 - 4.2 Zweidimensionale Konstruktionen
 - 4.3 Eindimensionale Konstruktionen
5. Die Newtonsche Bewegungsgleichung
 - 5.1 Einwirkungsstärke und Zusatzgeschwindigkeit
 - 5.2 Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit
 - 5.3 Masse und Zusatzgeschwindigkeit
 - 5.4 Die Newtonsche Bewegungsgleichung
6. Anwendung der Newtonschen Bewegungsgleichung
 - 6.1 Alltagsanwendungen
 - 6.2 Beharrungsprinzip
7. Wechselwirkungsprinzip (Impulserhaltungssatz)
8. Kraftgesetz und -arten
 - 8.1 Die Gravitationskraft
 - 8.2 Kräfteaddition
 - 8.3 Kräftegleichgewicht
 - 8.4 Messung von Kräften mit der Kompensationsmethode (Federkraft)
 - 8.5 Weitere Kraftarten

Tab. 1: Inhaltsverzeichnis des Mechaniklehrgangs

Abb. 1: Stroboskopbild eines springenden Fußballs



unabhängige Eigenschaften hätten. Diese Eigenschaften legen die speziellen Kraftgesetze (z. B. $\vec{F}_G = m\vec{g}$ oder $\vec{F}_F = -D\Delta\vec{x}$) fest. Diese können prinzipiell mithilfe von $\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$ experimentell gefunden werden. Sind sie bekannt, können mit ihnen wiederum theoretische Voraussagen über die Bewegung von Objekten gemacht werden.

Die (integrale) Produktform $\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$ ermöglicht den Schülern plausible Je-desto-Beziehungen zu formulieren, die ihnen wenig Schwierigkeiten bereiten. Z. B. ist eine einfache Folgerung, dass bei gleich starker Einwirkung und Masse die Geschwindigkeitsänderung (Zusatzgeschwindigkeit) umso größer ist, je länger die Einwirkung erfolgt. Auf den für Schüler schwierigen und missverständlichen Beschleunigungsbegriff kann zunächst verzichtet werden.

2. Beschreibung des Lehrgangs „Einführung in die Mechanik“

2.1 Übersicht über die Unterrichtseinheiten

Ausgehend von einer Lehrgangsstruktur, wie sie in [11]-[14] berichtet wurde, erprobte und evaluierte Sen im Rahmen einer Vergleichsuntersuchung eine überarbeitete Fassung in Ankara (mit deutlicher Überlegenheit des dynamischen Zugangs [15]). Eine weitere gründliche Überarbeitung und Anpassung an die Rahmenbedingungen in Bayern wurde im Rahmen einer umfassenden Studie in den Jahren 2007-2010 überprüft. In Abschnitt 3 werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Der derzeitige Unterrichtsvorschlag (als Schülertext abrufbar unter <http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/aktuelles/mechanik/index.html>) umfasst die in Tab. 1 aufgeführten Unterrichtseinheiten. Je nach länderspezifischen zeitlichen Vorgaben können die Kapitel 7 und 8 mehr oder weniger ausführlich behandelt werden. Der Grad an Formalisierung kann je nach Klassenstufe angepasst werden.

2.2 Beschreibung einzelner Unterrichtseinheiten

Einheit 1: Zielsetzung der Mechanik

Eine Motivation in Form eines Ausblicks steht am Anfang des Lehrgangs. Es wird beschrieben, mit welcher Art von Phänomenen sich der Inhaltsbereich der Mechanik befasst. Fragestellungen zu Bewegungen und Bewegungsänderungen, insbesondere der Zusammenhang der Einwirkung auf einen Gegenstand und seiner daraus resultierenden Bewegungsänderung, werden behandelt. Mit den Gesetzen der Mechanik kann man Bewegungsänderungen voraussagen oder umgekehrt eine Einwirkung erschließen. Einen geeigneten

Kontext dafür bieten zum Beispiel Ballsportarten wie Fußball, Volleyball etc.

Einheit 2: Beschreibung und Darstellung von Bewegungen

Einheit 2.1: Die Abhängigkeit der Bewegung vom Bezugssystem

Anhand von einigen Beispielen wird verdeutlicht, dass eine eindeutige Beschreibung von Bewegungen voraussetzt, dass man das Bezugssystem festlegt. Z. B. sieht die Fallbewegung von Schneeflocken von einem Auto aus betrachtet ganz anders aus als vom Straßenrand beobachtet. Im ersten Fall scheinen die Schneeflocken fast horizontal auf den Beobachter zuzukommen, im zweiten schweben sie bei Windstille senkrecht zum Boden.

Einheit 2.2: Aufzeichnungen von Bewegungen

Um die Bewegung eines Gegenstandes zu beschreiben, muss zu bestimmten Zeitpunkten festgestellt werden, wo sich der Gegenstand befindet. Als Einstiegsbeispiel dient die Flugroute eines Storches, die im Internet aktuell abrufbar ist (<http://www.fr.ch/mhn/de/weissstorch/max.htm>). Dabei wird diskutiert, dass die Bewegung umso genauer beschrieben ist, je näher die Zeitpunkte der Ortsmessung zusammen liegen.

Geeignete Möglichkeiten eine Bewegung im Rahmen des Schulunterrichts aufzuzeichnen und adäquat darzustellen bietet die Erstellung von Stroboskopbildern (Abb.1), Videos und Serienbildern. Die Schüler und Schülerinnen sollen dabei verstehen, dass eine gleiche Zeitdauer zwischen zwei Aufnahmen sinnvoll für eine Analyse der Bewegung ist.

Einheit 3: Der vektorielle Geschwindigkeitsbegriff¹

Die Geschwindigkeit \vec{v} eines Gegenstandes setzt sich zusammen aus dessen Tempo und Bewegungsrichtung. Sie kann durch einen Vektor bzw. einen Pfeil dargestellt werden. Seine Richtung gibt die Bewegungsrichtung, sein Betrag bzw. seine Länge gibt das Tempo der Bewegung an.

In einem ersten Schritt wird den Schülerinnen und Schülern bewusst gemacht, dass sie zur genauen Beschreibung einer Bewegung sowohl das Tempo, als auch die Richtung angeben müssen. Dazu eignet sich beispielsweise ein Spiel, bei dem eine Person mit verbundenen Augen ein ferngesteuertes Auto auf einer vorgegebenen Bahn lenkt und dabei von einer weiteren Person die entsprechenden Anweisungen erhält. Die Vektor/Pfeilnotation wird eingeführt. Geschwindigkeitsvektoren bzw. –

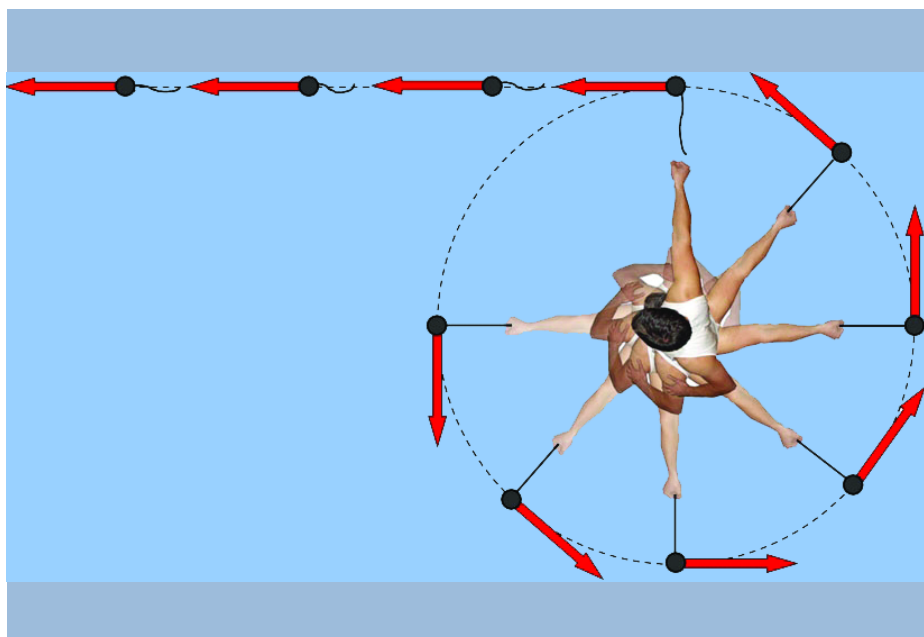


Abb. 2: Stroboskopbild eines springenden Fußballs mit eingezeichneten Geschwindigkeitsvektoren



Abb. 3: Aufgabe zur Unterscheidung von Tempo und Geschwindigkeit: Welche Autos haben die gleiche Geschwindigkeit und welche das gleiche Tempo?

Abb. 4: Geschwindigkeitspfeile beim Hammerwurf



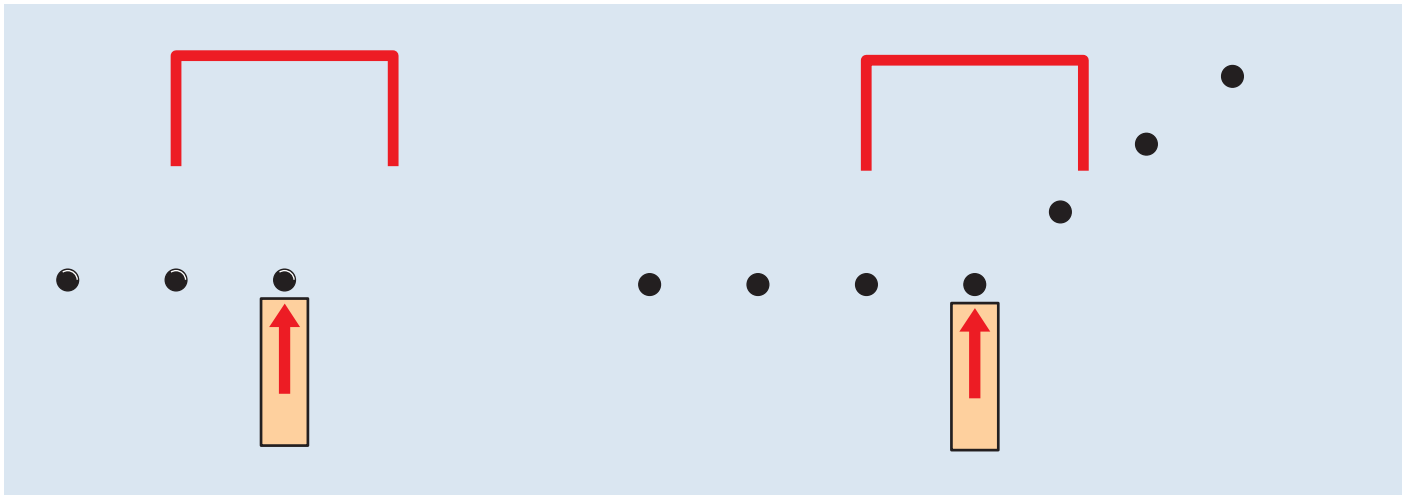


Abb. 5: Stroboskopbild der simulierten Torschussübung

pfeile können von den Schülerinnen und Schülern entsprechend in die Stroboskopbilder eingetragen werden (Abb. 2). Anhand von Aufgaben wird der Unterschied zwischen den Begriffen Geschwindigkeit

und Tempo eingeübt. Zum Beispiel sollen Autos mit gleicher Geschwindigkeit gekennzeichnet werden (Abb. 3). Bereits an dieser Stelle wird mit den Schülerinnen und Schülern diskutiert, dass sich die Ge-

schwindigkeit bei einer Kreisbewegung ständig ändert (Abb. 4).

Einheit 4: Die Zusatzgeschwindigkeit

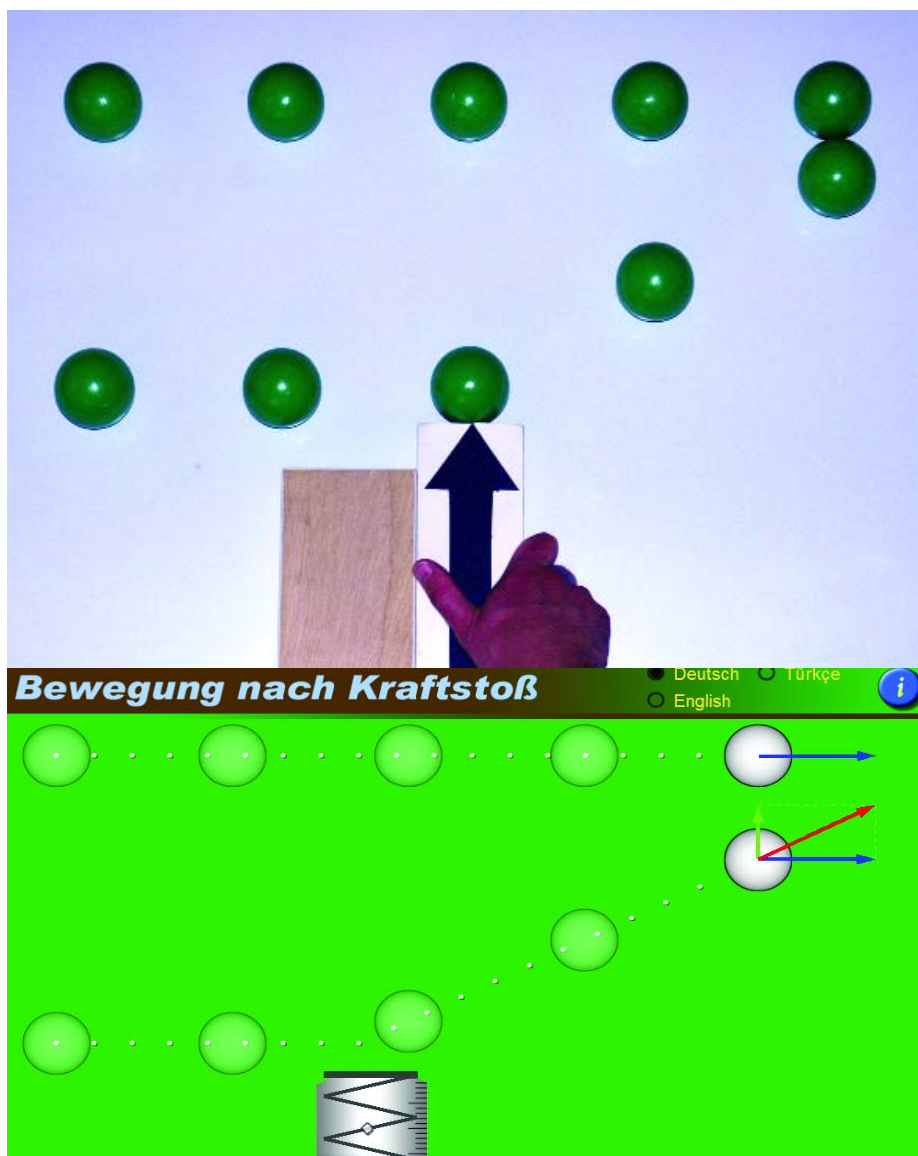
Die für die Mechanik grundlegende Idee, dass eine Einwirkung zu einer Geschwindigkeitsänderung/Zusatzgeschwindigkeit führt und umgekehrt eine beobachtete Geschwindigkeitsänderung auf eine Einwirkung schließen lässt, wird erarbeitet.

Als Einstieg in die Problematik wird eine Torschussübung herangezogen: Ein parallel zum Tor rollender Ball (Abb. 5) wird senkrecht zur ursprünglichen Geschwindigkeit gekickt. In einem Versuch wird dies im Klassenzimmer simuliert. Als Ball eignet sich eine schwere Kugel, die durch ein Brett senkrecht zur Anfangsbewegung mit der Hand gestoßen wird. Wegen der sehr verbreiteten Schülervorstellung, dass Kraft und Geschwindigkeit gleiche Richtung haben, ist für die Schülerinnen und Schüler verblüffend, dass die Kugel sich nicht in Stoßrichtung weiterbewegt und damit das Tor verfehlt.

Woran liegt das? Der Grund ist, dass die Kugel nach dem Stoß in einem gewissen Sinn zwei Bewegungen gleichzeitig ausführt. Die Bewegung in der Anfangsrichtung wird beibehalten. Zusätzlich wird eine Bewegung in der Stoßrichtung ausgeführt. Letztere wird als Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ eingeführt. Zur Veranschaulichung des Zusammenhangs von Anfangs-, Zusatz- und Endgeschwindigkeit wird ein weiterer Stoßversuch durchgeführt. Man lässt zwei identische Kugeln auf einer Unterlage mit gleicher Anfangsgeschwindigkeit nach rechts rollen, nur eine der beiden Kugeln wird senkrecht zur Bewegungsrichtung gestoßen (Abb. 6a und 6b).

Die gestoßene Kugel trifft immer auf die andere Kugel. Deutlich wird dabei, dass beide Kugeln zu jedem Zeitpunkt mit der

Abb. 6: Stroboskopbild zum Stoßversuch (real und als Computersimulation)



gleichen Geschwindigkeit (blau) nach rechts rollen und die gestoßene Kugel zusätzlich eine Geschwindigkeit in Stoßrichtung erhält (grün).

Dass eine senkrecht zur Anfangsrichtung gestoßene Kugel, ihre Anfangsgeschwindigkeit beibehält und in Stoßrichtung eine zusätzliche Geschwindigkeitskomponente erhält, kann durch folgenden Videofilm (Abb. 7, abrufbar unter: www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/aktuelles/mechanik/index.html) veranschaulicht werden. Bei diesem Film können durch entsprechende Kamerastellungen neben der Draufsicht, die beiden Seitenansichten eingeblendet werden. In diesen Perspektiven können die Geschwindigkeitskomponenten, Anfangs- und Zusatzgeschwindigkeit, jeweils einzeln beobachtet werden.

Die Endgeschwindigkeit der gestoßenen Kugel setzt sich durch Vektoraddition aus der Anfangs- und der Zusatzgeschwindigkeit zusammen (Abb. 8). Daneben kann durch Vektorsubtraktion aus der Anfangs- und der Endgeschwindigkeit, die Zusatzgeschwindigkeit und damit die Richtung der Einwirkung ermittelt werden. Diese Verknüpfung schreibt man in Anlehnung an die übliche Addition:

$$\vec{v}_E = \vec{v}_A + \Delta\vec{v}.$$

Nach Üben einiger Konstruktionsbeispiele (siehe Arbeitsblatt 1) für den senkrechten Stoß, sowie der Verallgemeinerung auf schräge Stöße werden anschließend eindimensionale Fälle untersucht.

Einheit 5: Newtonschen Bewegungsgleichung

In diesem Unterrichtsabschnitt geht es darum, den Zusammenhang zwischen den Aspekten Einwirkungsstärke, -richtung und -dauer, Geschwindigkeitsänderung und Masse zu diskutieren. In einer dafür entwickelten Computersimulation (s. Abb. 6b, abrufbar unter www.didaktik.physik.uni-muenchen.de, Unterrichtsmaterialien zur Mechanik) können die einzelnen Einflussfaktoren auf die Zusatzgeschwindigkeit variiert und die daraus folgende Bewegungsänderung beobachtet werden.

Einheit 5.1: Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit

Aus dem bisherigen Unterricht ist den Schülern bekannt, dass durch eine Einwirkung eine durch $\Delta\vec{v}$ beschriebene Zusatzbewegung hinzukommt und diese in Richtung der Einwirkung erfolgt.

In diesem Abschnitt werden Einwirkungsstärke und Einwirkungsrichtung als Kraft eingeführt und der Zusammenhang

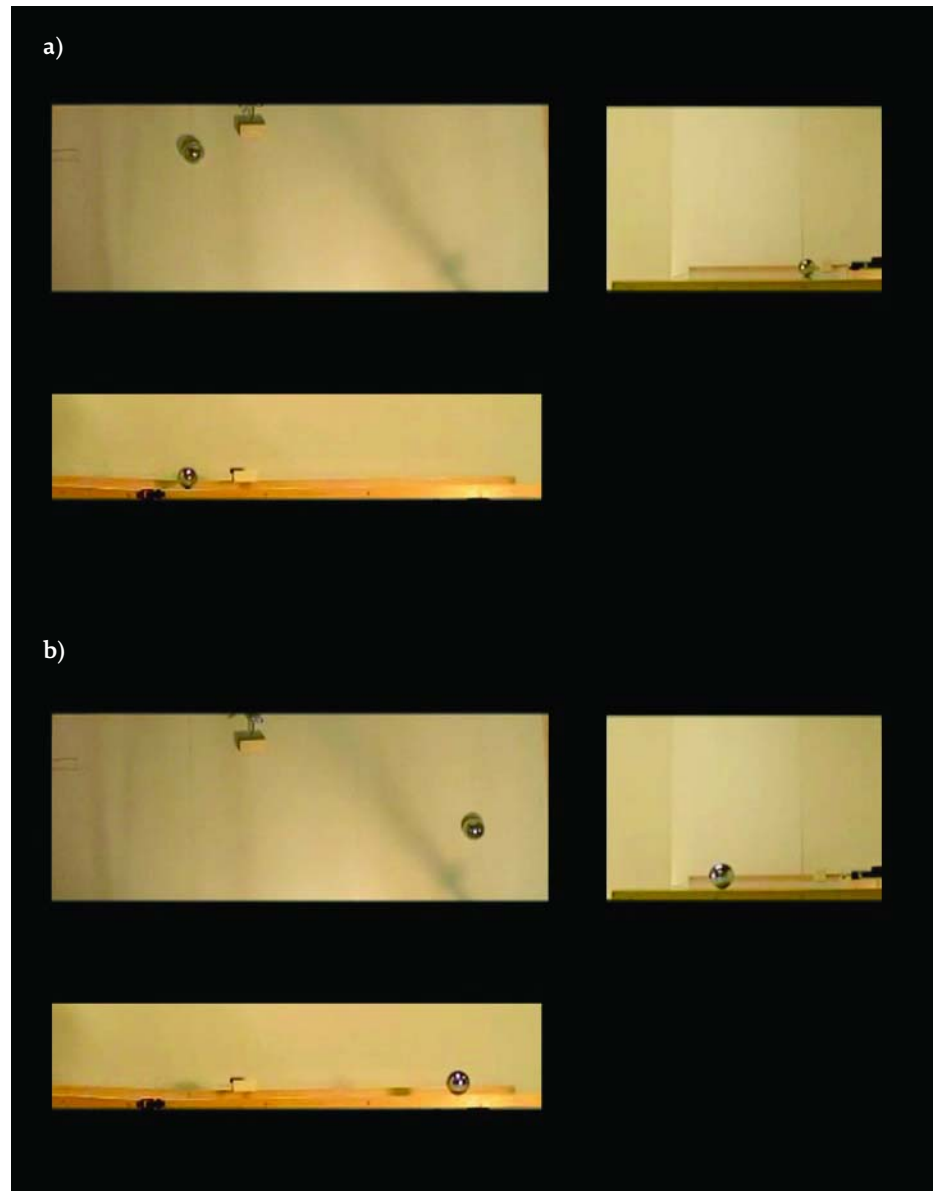
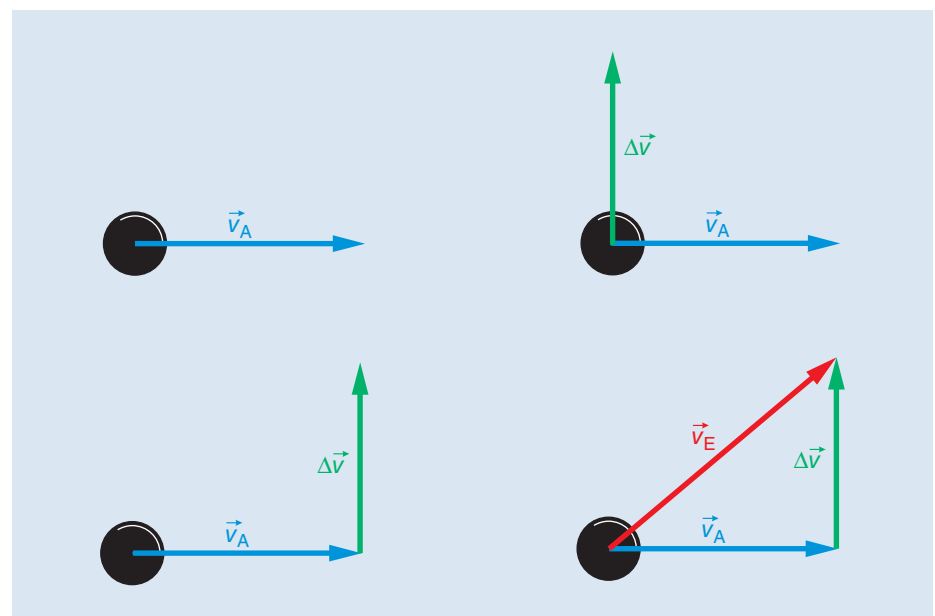


Abb. 7: Kugelstoß aus drei verschiedenen Perspektiven (screenshot von Video): Zusatzgeschwindigkeit (rechts) und Anfangsgeschwindigkeit (unten). (a) vor dem Stoß, (b) nach dem Stoß

Abb. 8: Vektorielle Addition der Anfangs- und der Zusatzgeschwindigkeit



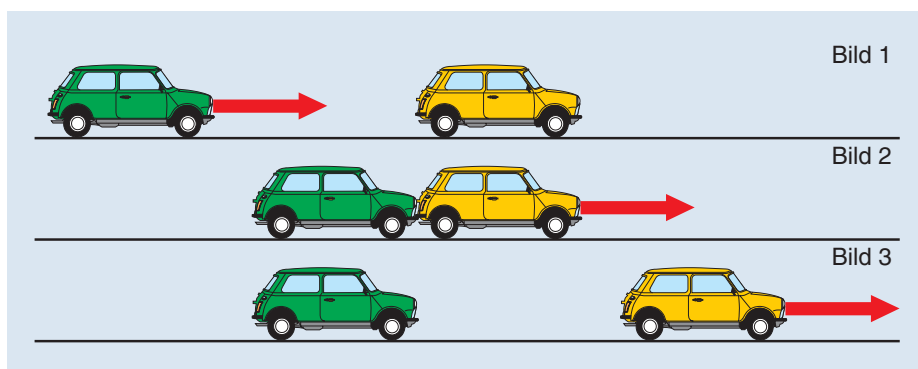


Abb. 9: Nach dem Zusammenstoß hat das zweite Auto genau die Geschwindigkeit, die das erste vor dem Crash hatte

zwischen Kraft und Zusatzgeschwindigkeit erarbeitet:

• Je größer die Einwirkungsstärke einer Kraft ist, die auf einen Körper ausgeübt wird, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit, die der Körper erhält. (Gleichwertig ist hier und bei den folgenden Je-desto-Aussagen die Formulierung: „... desto länger ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit.“)

Einheit 5.2: Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit

• Je länger die Einwirkungsdauer einer Kraft ist, die auf einen Gegenstand ausgeübt wird, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit.

Dieser Zusammenhang kann durch die Einwirkung eines Gebläses (Fön, Ventilator) auf die Bewegung einer rollenden Kugel veranschaulicht werden (am einfachsten anhand der Simulation).

Einheit 5.3: Masse und Zusatzgeschwindigkeit

• Je größer die Masse eines Gegenstandes ist, auf den eine Kraft ausgeübt wird, desto kleiner ist das

Tempo der Zusatzgeschwindigkeit, die der Körper erhält.

Intuitiv gleich starke Stöße werden auf unterschiedlich schwere Kugeln bzw. Bälle ausgeübt und die Bewegung jeweils beobachtet.

Einheit 5.4:

Die Newtonsche Bewegungsgleichung

An dieser Stelle kann nun die neue physikalische Größe *Kraft* präzise definiert werden.

Sie wird durch die folgende Gleichung, die die obigen Je-desto-Beziehungen enthält, physikalisch festgelegt:

$$\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$$

Das Vorgehen, eine physikalische Größe durch eine formale Definition festzulegen, kann mit den Schülerinnen und Schülern als eine Methode in den Naturwissenschaften diskutiert werden. Die Zweckmäßigkeit der Definition muss sich erst erweisen.

Einheit 6: Anwendungen der Newtonschen Bewegungsgleichung

Einheit 6.1: Alltagsanwendungen

Die Newton'sche Bewegungsgleichung wird anhand einiger Beispiele aus dem Alltag diskutiert: Muss der Torwart eine größere Kraft auf den Fußball ausüben um ihn zu stoppen oder zu fausten? Wie verringert die Knautschzone das Verletzungsrisiko der Insassen bei einem Autounfall? Warum werden Formel 1-Rennwagen möglichst leicht gebaut? Warum sollte man beim Abgang vom Reck in die Knie gehen? (siehe Arbeitsblatt 3: Sprung von einem Stuhl auf eine Kraftmessplatte auf S. 16 und Arbeitsblatt 4: Argumentieren mit der Newtonschen Bewegungsgleichung auf S. 17)

Einheit 6.2: Beharrungsprinzip (Trägheitssatz)

Wenn auf einen Körper keine Kraft ausgeübt wird, dann folgt aus der Newtonschen Bewegungsgleichung, dass der Körper keine Zusatzgeschwindigkeit erhält, sich seine Geschwindigkeit also nicht ändert. Beispielsweise verliert ein Lastwagen ein ungesichertes Paket, wenn er um die Kurve fährt, da auf das Paket keine (Zentripetal-) Kraft ausgeübt wird und es daher keine Zusatzgeschwindigkeit in radialer Richtung erhält. Dagegen muss auf den Lkw eine Kraft ausgeübt worden sein. Für Schülerinnen und Schülern ist nicht leicht nachzuvollziehen, dass die Straße die Kraft, die die Zusatzgeschwindigkeit für die Kurvenfahrt ermöglicht, auf den Lkw ausübt (siehe Wechselwirkung). Genauso wirkt auch auf die Funken bei einer schneidenden Flex keine Kraft und sie bewegen sich tangential zum runden Schneideblatt weg.

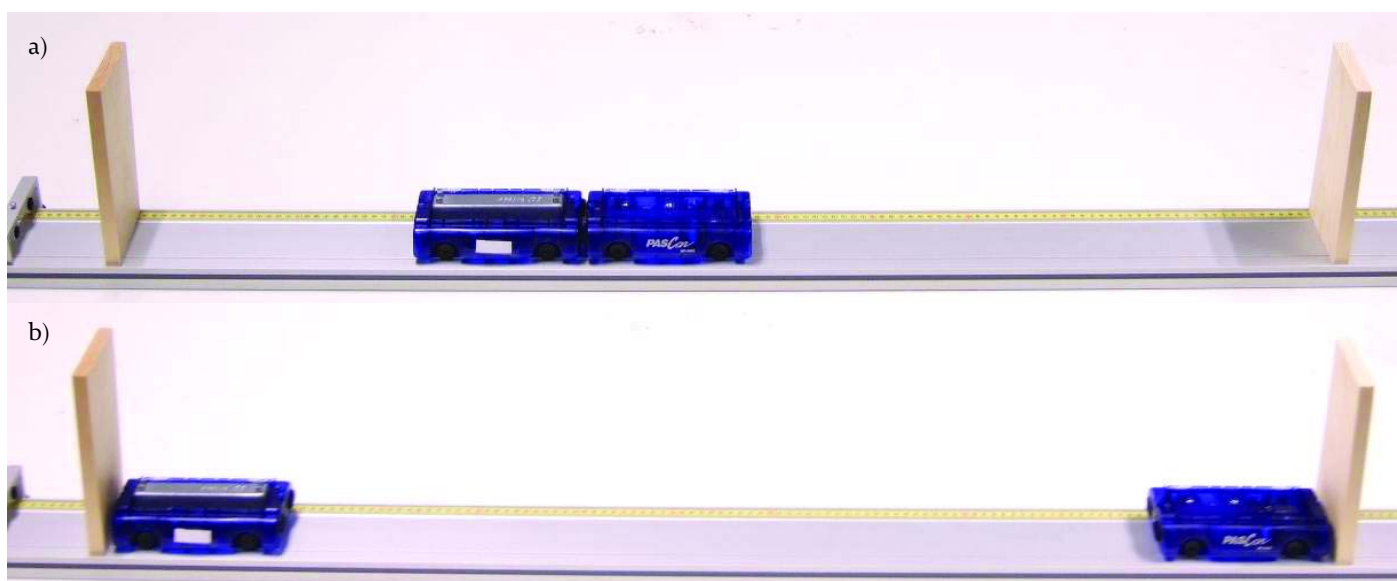


Abb. 10: Versuch zur Impulserhaltung – das Massenverhältnis ist 1:2. (a) unmittelbar vor der Enttarnung der Feder, (b) unmittelbar vor der Berührung der aufgestellten Brettchen

Einheit 7: Das Wechselwirkungsprinzip und der Impulserhaltungssatz

Sowohl das Wechselwirkungsprinzip als auch der Impulserhaltungssatz können mithilfe des folgenden Versuchs plausibel gemacht werden.

Auf ein ruhendes Spielzeugauto (2) fährt ein gleich gebautes Auto (1) mit der Geschwindigkeit \vec{v}_{1A} auf. Man beobachtet, dass das auffahrende Auto (1) stehen bleibt und das Auto (2) mit genau der Geschwindigkeit wegfährt, die Auto (1) vor dem Zusammenstoß hatte (Abb. 9):

$$\vec{v}_{2E} = \vec{v}_{1A} \quad (*)$$

Die Geschwindigkeiten beider Autos haben sich geändert, also hat Auto (1) auf Auto (2) eine Kraft $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ ausgeübt und umgekehrt Auto (2) auf Auto (1) die Kraft $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$. Unter der obigen Voraussetzung $m_1 = m_2 = m$ und gleiche Einwirkungsauern Δt auf beide Autos können beide Kräfte mithilfe der Bewegungsgleichung angegeben und miteinander verglichen werden. Unter Berücksichtigung von (*) und $\vec{v}_{1E} = 0$ und $\vec{v}_{2A} = 0$ ist

$$\begin{aligned} \vec{F}_{2 \rightarrow 1} \Delta t &= m_1 \Delta \vec{v}_1 = m(-\vec{v}_{1A}) \\ \vec{F}_{1 \rightarrow 2} \Delta t &= m_2 \Delta \vec{v}_2 = m \vec{v}_{1A} \quad (**) \end{aligned}$$

Daraus folgt $\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = -\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ als formale Aussage für das Wechselwirkungsprinzip. Diese Aussage gilt auch für den allgemeinen Fall, dass $m_1 \neq m_2$ ist (dann sind die beiden Zusatzgeschwindigkeiten ebenfalls nicht gleich groß).

Wechselwirkungsprinzip: Übt ein Körper 1 auf einen Körper 2 eine Kraft $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ aus, so übt Körper 2 auf Körper 1 gleichzeitig eine gleichgroße, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ aus.

Betont und in Beispielen eingeübt werden muss, dass die beiden Kräfte $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ und $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ an verschiedenen Körpern angreifen! Anwendungsbeispiele für das Besprechen im Unterricht sind Anfahren, Bremsen, Laufen, Anziehen und Abstoßen von Magneten, ...

Aus den beiden Gleichungen (**) folgt mit $\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = -\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ der **Impulserhaltungssatz**:

$$m_1 \vec{v}_1 = -m_2 \vec{v}_2.$$

Eine einfache aber für die Schülerinnen und Schüler sehr überzeugende Bestätigung für die Impulserhaltung liefert der folgende Versuch (Abb. 10). Zwischen zwei Wagen befindet sich eine gespannte Feder. Durch Zusatzgewichte ist das Massenver-

hältnis der Wagen 1:2 (oder auch 1:3) eingestellt. Zwei Brettchen werden so aufgestellt, dass ihr Abstandsverhältnis vom Mittelpunkt der Anordnung 2:1 (oder auch 3:1) ist. Nach Entarretierung der Feder werden beide Brettchen durch die Wagen gut hörbar zum selben Zeitpunkt umgestoßen, weil nach Impulserhaltungssatz der leichte Wagen die doppelte Endgeschwindigkeit hat wie der schwerere Wagen.

Einheit 8: Kraftgesetze und Kraftarten

Einheit 8.1: Gravitationskraft

Losgelassene Gegenstände erhalten eine Zusatzgeschwindigkeit senkrecht zum Erdboden, also muss ein anderer Körper eine Kraft auf den Gegenstand ausüben, die senkrecht zum Erdboden hin wirkt. Mit den Schülerinnen und Schülern wird geklärt, dass dies die Gravitationskraft ist, die die Erde auf alle Gegenstände in ihrer Nähe ausübt.

Zur experimentellen Bestimmung der Gravitationskraft der Erde wird von der Newtonschen Bewegungsgleichung ausgegangen:

$$\begin{aligned} \vec{F} \Delta t &= m \Delta \vec{v} \quad | : \Delta t \\ \vec{F} &= m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (1) \end{aligned}$$

Mithilfe einer Stroboskopaufnahme eines fallenden Gegenstandes (Arbeitsblatt 2: Stroboskopaufnahme eines Fußballwurfes, S. 15) kann der Betrag für $\Delta v / \Delta t$ bestimmt werden: Es wird abgelesen, dass in jeder aufeinanderfolgenden Aufnahme der Körper die gleiche Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ erhält. Die Zeitspanne zwischen zwei Aufnahmen, also die Einwirkungsdauer Δt , innerhalb der der Körper die Zusatzgeschwindigkeit Δv erhält, ist dabei bekannt (auf dem Arbeitsblatt beträgt $\Delta t = 0,075$ s).

Da das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit proportional zur Fallzeit ist, wird der Proportionalitätsfaktor g dafür eingeführt und berechnet:

$$g = \Delta v / \Delta t = 10 \text{ m/s}^2$$

Berücksichtigt man, dass die Zusatzgeschwindigkeit eine vektorielle Größe ist, muss auch g ein Vektor sein, der wie $\Delta \vec{v}$ senkrecht nach unten zum Erdboden hin zeigt:

$$\vec{g} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (2)$$

Einsetzen von $\vec{g} = \Delta \vec{v} / \Delta t$ in (1) liefert den Ausdruck für die Gravitationskraft der Erde:

$$\vec{F}_E = m \vec{g}.$$

Die Gravitationskraft der Erde \vec{F}_E ist proportional zur Masse des fallenden Gegenstandes. Die Kraft \vec{F} , die einwirken muss, um einem Körper in der Zeit Δt die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ zu geben, ist ebenfalls proportional zur Masse m . Daher ist die Zusatzgeschwindigkeit pro Zeit unabhängig von der Masse. Deutlich wird dies, wenn man den Ausdruck für die Gravitationskraft \vec{F}_E in der Newtonsche Bewegungsgleichung für \vec{F} einsetzt.

Ein erster Test könnte so aussehen: Man lässt zwei kleine Stahlkugeln gleichzeitig fallen, von denen eine zwei bis dreimal so schwer ist wie die andere. Man beobachtet, dass beide Kugeln gleichzeitig auf dem Fußboden auftreffen, also die gleiche Zusatzgeschwindigkeit pro Zeit erhalten hat.

Folgerungen für den freien Fall (Bewegungsgleichungen)

Die Bewegungsgleichungen für den freien Fall können deduktiv aus der Newtonschen Bewegungsgleichung und dem Ausdruck für die Gravitationskraft auf der Erde hergeleitet werden.

Durch Auflösen von Gleichung (2) und Einsetzen der Anfangsbedingung $v(t=0) = 0$ ergibt sich sofort für die z-Komponente das konventionelle "Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz":

$$v(t) = g t.$$

Ohne Integration kann das Weg-Zeit-Gesetz nicht abgeleitet werden. Aber mithilfe einer Plausibilitätsüberlegung kann man es erhalten. Da das Tempo gleichmäßig ansteigt, verwendet man das mittlere Tempo

$$\bar{v} = \frac{v(t) + v(t=0)}{2} = \frac{v(t)}{2}.$$

Durch Ersetzen von $v(t)$ durch das mittlere Tempo $v(t)/2$ in $s = v(t) t$ und Ersetzen von $v(t)$ durch $g t$, erhält man die korrekte Beziehung

$$s = g t^2 / 2.$$

Als ein weiterer Schritt kann das allgemeine Gravitationsgesetz und in diesem Zusammenhang die Gravitationskraft von Himmelskörpern aufeinander angesprochen werden. Beispiele sind die Gravitationskraft zwischen Sonne und Erde und anderen Planeten, zwischen Erde und Mond, Satellitenbahnen, der Gravity-Tractor (s. [16], in diesem Heft), Gezeiten usw. Die Diskussion unterschiedlicher Fallbewegungen kann zur Besprechung der Luftreibung überleiten.

Arbeitsblatt Nr. 1

Eishockey: Beim Eishockey schlagen die Spieler den Puck, der dabei zur Anfangsgeschwindigkeit \vec{v}_A eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ erhält. Die erreichten Endgeschwindigkeiten können bis zu 170 km/h betragen. Im Folgenden sind Situationen dargestellt, in denen der Puck unterschiedliche Zusatzgeschwindigkeiten $\Delta\vec{v}$ erhält. Ermittle jeweils graphisch den Pfeil der Endgeschwindigkeit \vec{v}_E , wenn jedes Mal gleich stark gegen den Puck geschlagen wird.

Graphische Ermittlung von \vec{v}_E :

1. \vec{v}_A (blue), $\Delta\vec{v}$ (green), \vec{v}_E (red)

2. \vec{v}_A (blue), $\Delta\vec{v}$ (green), \vec{v}_E (red)

direkt nach dem „Schlag“

vor dem „Schlag“

Puck

Eishockeyschläger

Minigolf: Hast du schon einmal Minigolf gespielt? Ziel dieses Spieles ist es, den Ball mit möglichst wenigen Schlägen ins Loch zu befördern. Manchmal ist es dabei hilfreich, den Ball gegen die Bande zu schlagen, so dass eine Ablenkung in die richtige Richtung erfolgt. Bestimme graphisch, welche Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ der Ball dabei von der Bande erhält.

Graphische Ermittlung von $\Delta\vec{v}$:

1. \vec{v}_A (blue), \vec{v}_E (red), $\Delta\vec{v}$ (green)

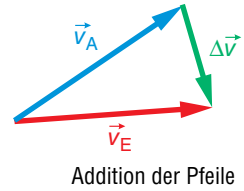
2. \vec{v}_A (blue), \vec{v}_E (red), $\Delta\vec{v}$ (green)

Arbeitsblatt Nr. 2

Stroboskopaufnahme eines Fußballwurfes: Im unteren Bild ist eine Stroboskopaufnahme eines Fußballwurfes zu sehen. Zwischen zwei Aufnahmen liegen immer 0,07 Sekunden. Weiter sind in drei Fällen die Geschwindigkeitspfeile bei zwei aufeinanderfolgenden Fußbällen eingezeichnet. (Maßstab: $1 \text{ cm} \hat{=} 0,7 \text{ m/s}$)

Die Zusatzgeschwindigkeit, welche der Ball zwischen zwei Zeitpunkten bekommt, bestimmt man folgendermaßen:

1. Markiere die Anfangsgeschwindigkeit \vec{v}_A mit einem blauen Stift.
2. Markiere die Endgeschwindigkeit \vec{v}_E mit einem roten Stift.
3. Nun verschiebe den Pfeil der Endgeschwindigkeit in den Pfeilfuß der Anfangsgeschwindigkeit.
4. Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ zeigt von der Pfeilspitze von \vec{v}_A zur Pfeilspitze von \vec{v}_E .

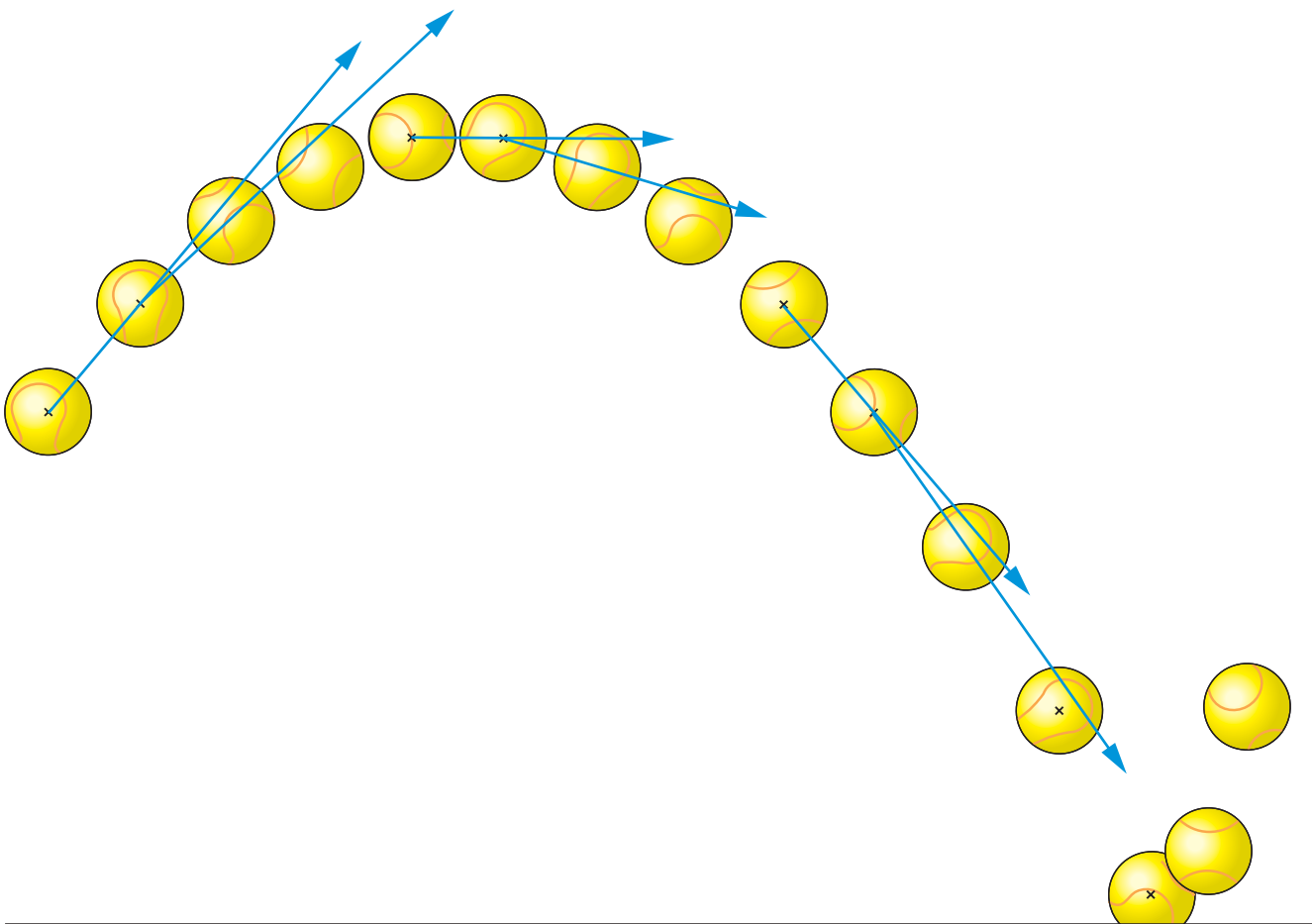


Aufgabe 1:

- a) Konstruiere nun den Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit in den drei Fällen.
- b) Bestimme mit Hilfe des Maßstabs das Tempo der drei Zusatzgeschwindigkeiten.
- c) Vergleiche die drei Pfeile der Zusatzgeschwindigkeit bezüglich Tempo und Richtung.
- d) Da der Ball eine Zusatzgeschwindigkeit erhält, muss auf den Ball durch einen anderen Körper eine Kraft ausgeübt werden. Diskutiere mit deinem Nachbarn, welcher Körper die Kraft ausübt und in welche Richtung sie ausgeübt wurde.

Aufgabe 2:

Berechne nun den Wert des Faktors $\vec{g} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$.



Arbeitsblatt Nr. 3

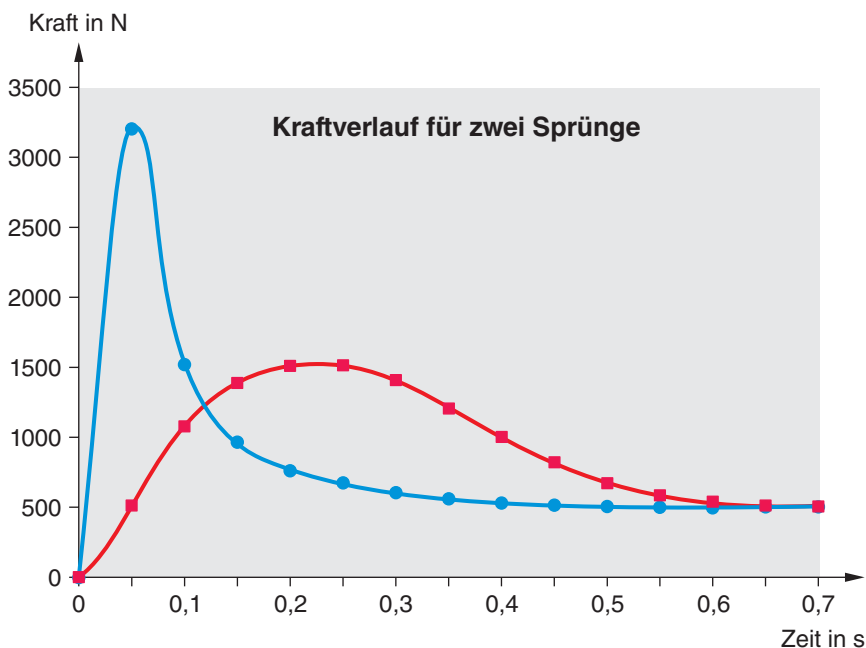
Sprung von einem Stuhl auf eine Kraftmessplatte: Die Fotoserien zeigen zwei unterschiedliche Sprünge auf eine Kraftmessplatte. Eine Kraftmessplatte zeichnet die Kräfte, die auf sie ausgeübt werden, über eine bestimmte Zeit auf. Daraus kann man ablesen, zu welchem Zeitpunkt welche Kraft ausgeübt wurde.

Es wurde der Kraftverlauf für zwei verschiedene Sprünge aufgezeichnet.

1. Sprung: Aufkommen „mit in die Knie zu gehen“



2. Sprung: Aufkommen „möglichst ohne in die Knie zu gehen“

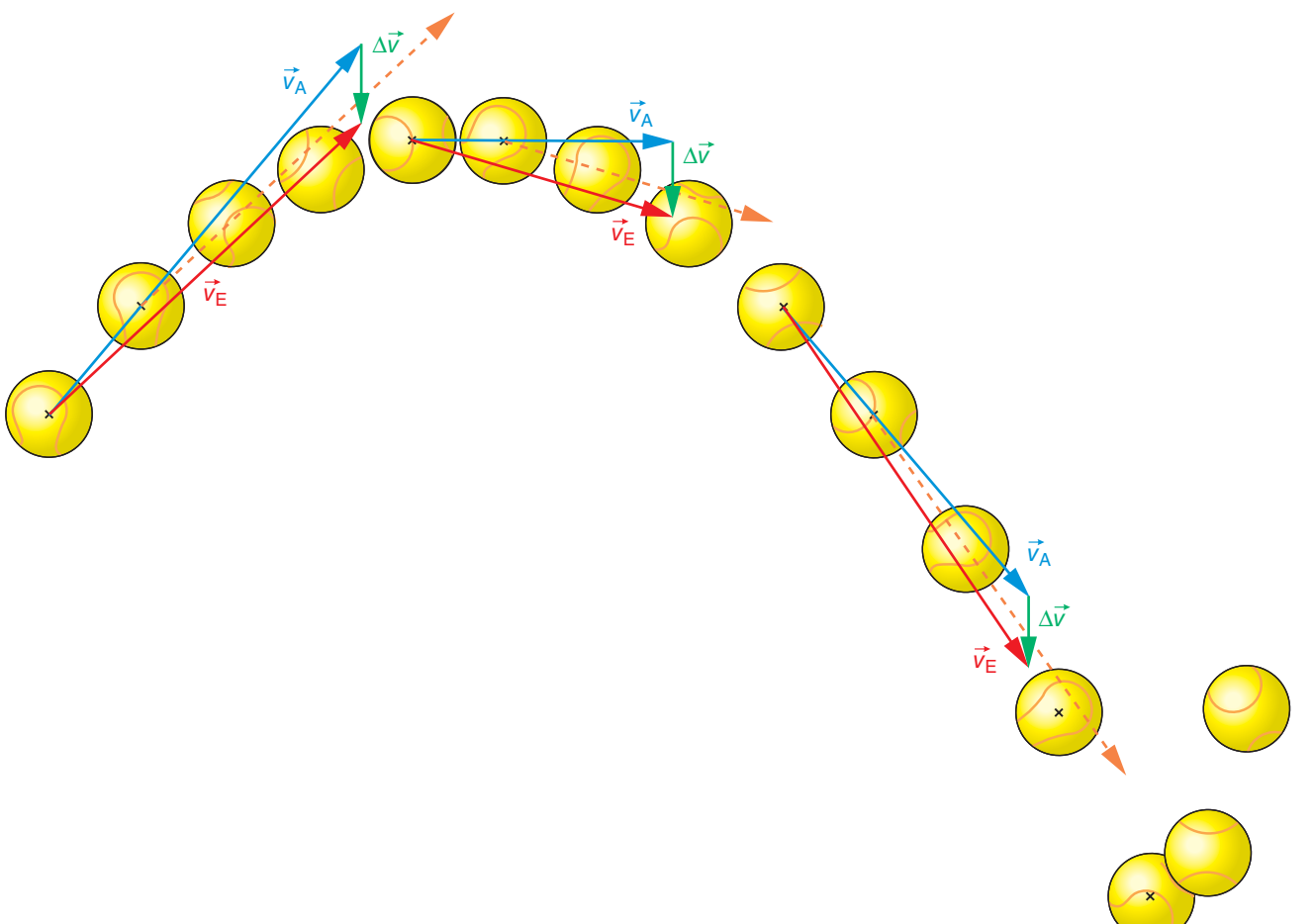


Überlege welcher Kraftverlauf zu welchem Sprung gehört. Begründe mit der Newtonschen Bewegungsgleichung, warum bei einem der beiden Sprünge die Kraft auf die Kraftmessplatte viel größer ist, als bei dem anderen Sprung.

Argumentieren mit der Newtonschen Bewegungsgleichung:

Verwende zum Argumentieren in den folgenden Aufgaben immer die Newtonsche Bewegungsgleichung:

1. Warum ist es so wichtig, beim Autofahren den Sicherheitsgurt anzulegen?
2. Erkläre, warum ein Airbag bei einem Unfall die Überlebenschancen von Fahrer und Beifahrer erhöht.
3. Erkundige dich, was beim Auto eine Knautschzone ist. Begründe, wozu sie hilfreich ist
4. Erkläre, weshalb in der Formel 1 bei einem Rennen Reifenstapel als Bande verwendet werden.
5. Mountainbiker fahren oft „Fullies“. Schau nach, was das bedeutet und erkläre, warum das beim Downhill hilfreich ist.
6. Beim Klettern ist es für den Stürzenden angenehmer, wenn er „dynamisch“ gesichert wird. Schau nach, wie man „dynamisch“ sichert und begründe, warum das angenehmer ist.

Lösung zur Aufgabe 1. a) des Arbeitsblattes Nr. 2

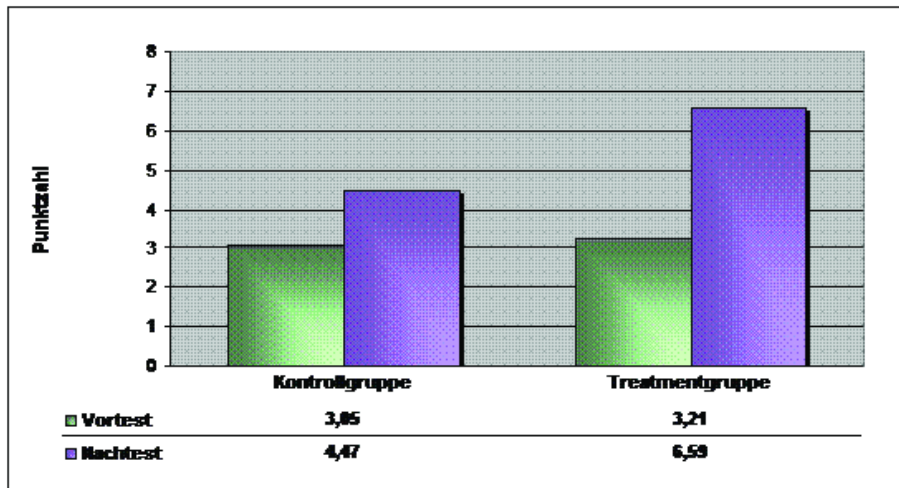


Abb. 11: Mittelwerte der Items zum allgemeinen Mechanik-Grundverständnis der Multiple Choice Tests

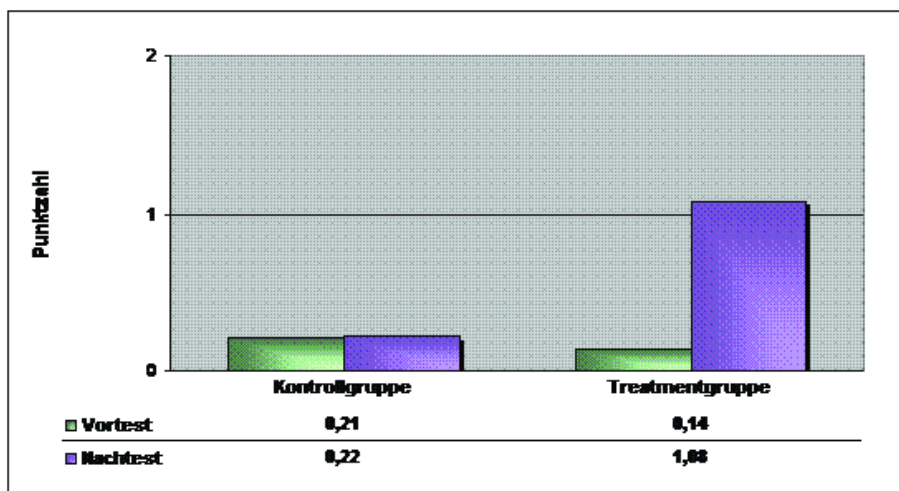


Abb. 12: Mittelwerte der Items zum zweidimensional-dynamischen Konzept der Multiple Choice Tests

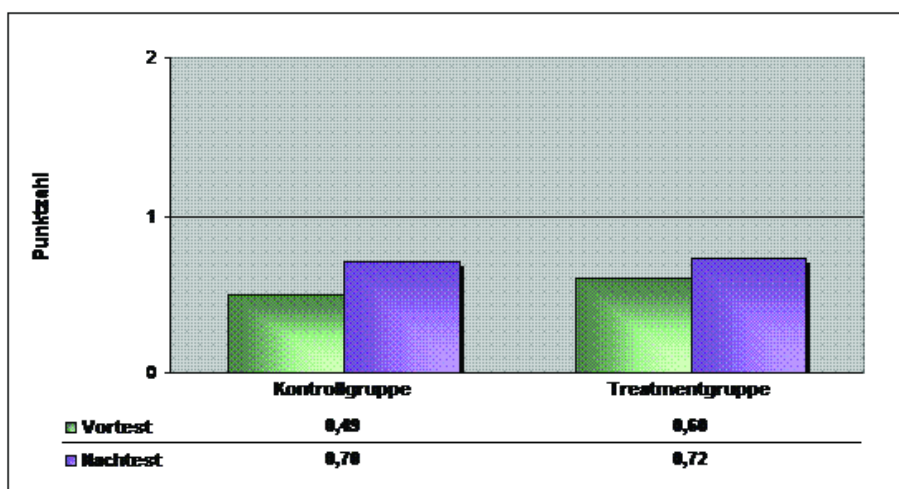


Abb. 13: Mittelwerte der Items zum traditionellen Konzept der Multiple Choice Tests

Einheit 8.2: Addition von Kräften

Nachdem alle Kräfte identifiziert wurden, die an einem Körper angreifen, werden diese mittels Vektoraddition (analog zur Addition der Geschwindigkeitsvektoren) zur resultierenden Kraft aufsummiert.

Einheit 8.3: Kräftegleichgewicht

Besprochen wird der Fall, dass auf einen Körper gleichzeitig zwei Kräfte ausgeübt werden, die den gleichen Betrag haben, aber entgegengesetzt wirken, z. B. ein Fallschirmspringer oder ein Fahrradfahrer, die sich mit gleich bleibendem Tempo bewegen.

Auf den Radfahrer wirkt die Antriebskraft und in entgegengesetzte Richtung die Reibungskraft. Der Radfahrer ändert seine Geschwindigkeit nicht, da die resultierende Kraft \vec{F}_{res} Null ist. Umgekehrt erhält man auch aus der Bewegungsgleichung durch Einsetzen der resultierende Kraft $\vec{F}_{\text{res}} = 0$ das beobachtete Ergebnis, die Zusatzgeschwindigkeit ist null.

Ist die Anfangsgeschwindigkeit Null, bleibt bei Kräftegleichgewicht der Körper weiterhin in Ruhe. Zur Übung können die Schülerinnen und Schüler z. B. physikalisch korrekt begründen, warum ein Glas auf dem Tisch in Ruhe stehen bleibt, wenn doch die Gravitationskraft nach unten zieht.

Einheit 8.4: Messung von Kräften mit der Kompensationsmethode: Beispiel Federkraft

Mithilfe der Newtonschen Bewegungsgleichung können unbekannte Kräfte bestimmt werden, wie es beispielsweise bei der Gravitationskraft erfolgt ist.

Eine einfachere, oft praktizierte Möglichkeit besteht darin, eine bekannte, gut kontrollierbare Kraft so entgegen der noch unbekanntes Kraft angreifen zu lassen, das Kräftegleichgewicht besteht. Typischerweise wird so der formale Ausdruck für die Federkraft mithilfe der bereits bekannten Gravitationskraft bestimmt.

Einheit 8.5: Weitere Kraftarten

In diesem Zusammenhang können weitere Kraftarten qualitativ angesprochen werden. Ausgehend von der Beobachtung, dass ein Körper seine Geschwindigkeit ändert, also eine Zusatzgeschwindigkeit erhalten hat, wird gefolgert, dass ein zweiter Körper auf den ersten Körper eine Kraft ausgeübt hat.

Diese Wechselwirkungspartner sollten jeweils identifiziert und so die Kraftarten klassifiziert werden (z. B. magnetische oder elektrische Wechselwirkung, Reibungskräfte, usw.).

3. Ergebnisse einer Vergleichsuntersuchung

Für den Inhaltsbereich der Mechanik sind laut Lehrplan in der siebten Jahrgangsstufe am bayerischen Gymnasium etwa 20 Unterrichtsstunden vorgesehen. An der aktuellen Studie nahmen 5 Lehrkräfte mit ihren Klassen teil. Sie unterrichteten im Schuljahr 08/09 nach dem traditionellen Konzept als Kontrollgruppe ($N = 140$), und im Schuljahr 09/10 nach dem zweidimensional-dynamischen Konzept als Treatmentgruppe ($N = 97$), so dass die Konstanz der Lehrpersonen in Kontroll- und Treatmentgruppe gesichert ist. Insgesamt ergab dies eine Stichprobe von $N = 237$ Schülerinnen und Schülern.

Es fand ein Vortreffen der Lehrpersonen statt, bei dem der ausgearbeitete Lehrtext als Klassensatz zur Verfügung gestellt wurde. Außerdem erhielten sie eine DVD mit weiteren Materialien, wie Arbeitsblättern, Filmen und einer Simulation, die passend zum zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept ausgearbeitet wurden.

Für die Unterrichtsgestaltung (Methoden und Medien, sowie zeitliche Einteilung) wurden den beteiligten Lehrpersonen keinerlei Empfehlungen gegeben.

Durch dieses Design sollte eine Feldstudie in wirklichkeitsnahem Rahmen gewährleistet werden (wobei durch den Verzicht auf eine Schulung der Lehrkräfte die lernförderlichen Möglichkeiten des Lehrgangs nicht vollständig ausgeschöpft werden konnten). Es sollte die Wirksamkeit des Lehrgangs unter realistischen Bedingungen angegeben werden.

Es wurde jeweils das gleiche Erhebungsinstrument – ein Multiple Choice Test – zu zwei Messzeitpunkten als Vortest (vor der gesamten Unterrichtseinheit) und Nachtest (nach der gesamten Unterrichtseinheit zur Mechanik) eingesetzt, der in [17] veröffentlicht ist. Enthalten waren 13 Items zum allgemeinen Mechanik-Grundverständnis, größtenteils dem FCI entnommen, sowie jeweils zwei Items zu spezifischen Inhalten des zweidimensional-dynamischen und des traditionellen Konzeptes, die gesondert ausgewertet wurden.

Es ergab sich das in den Abbn. 11-13 dargestellte Bild. In den Vortests bestanden keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. In den Nachtests war der Lernerfolg bei den Aufgaben zum allgemeinen Mechanik-Grundverständnis in der Treatmentgruppe gegenüber der Kontrollgruppe mit einer großen Effektstärke höchst signifikant besser. Ein höchst signifikanter Unterschied ist erwartungsgemäß bei den Aufgaben zum zwei-

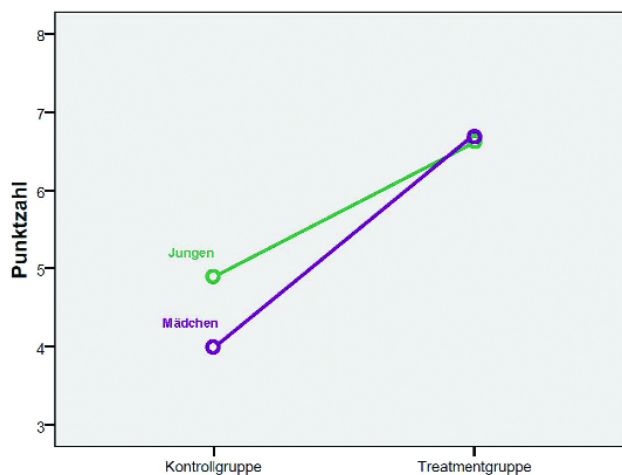


Abb. 14: Mittelwerte der Items zum allgemeinen Mechanik-Grundverständnis der Nach - Multiple Choice Tests

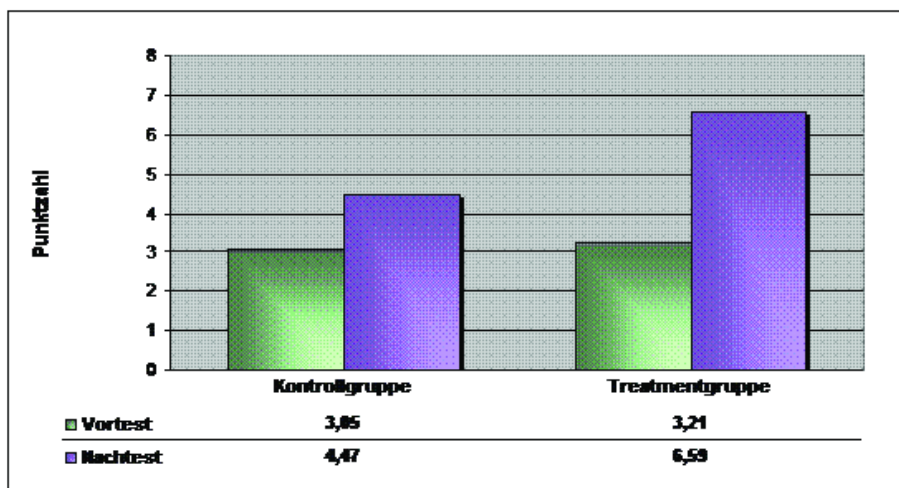


Abb. 11: Mittelwerte der Items zum allgemeinen Mechanik-Grundverständnis der Multiple Choice Tests

dimensional-dynamischen Konzept nachweisbar, da die Inhalte dieser Items lediglich in der Treatmentgruppe behandelt wurden. Es ist allerdings kein Unterschied bei den Aufgaben zum traditionellen Konzept festzustellen, die nur in der Kontrollgruppe Gegenstand des Unterrichts waren.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Aufgaben zum allgemeinen Mechanik-Grundverständnis nach Geschlecht ergibt (Abb. 14): In der Kontrollgruppe waren die Jungen den Mädchen im Nachtest signifikant überlegen; in der Treatmentgruppe waren diese Unterschiede nicht vorhanden.

In dem schriftlichen Mechaniktest waren keine Aufgaben zur Newtonschen Bewegungsgleichung (NBG) in der integralen Form $\vec{F}\Delta t = m \Delta \vec{v}$ enthalten. Deshalb wurden zusätzlich zu den Multiple Choice Tests mit zufällig ausgewählten Schülerinnen und Schülern ($N = 52$), die nach dem zweidimensional-dynamischen Konzept unterrichtet worden waren, Interviews zu Zu-

satzgeschwindigkeit und Kraft sowie dem Umgang mit der NGB durchgeführt [18]. Es war verblüffend, wie diese Konzepte durch die Siebtklässler auf Alltagssituationen angewendet werden konnten. In einer Aufgabenstellung sollten z. B. zwei Situationen verglichen werden: zwei Rennwagen kommen von der Fahrbahn ab. Der eine Wagen fährt in eine Betonmauer (Situation 1), der andere Wagen in einen Reifenstapel (Situation 2). Gefragt wurde nach den unterschiedlichen Auswirkungen auf die Fahrer der Wagen. Der Mehrzahl der Befragten gelingt es, die Größen Masse, Einwirkdauer und Zusatzgeschwindigkeit richtig auf die Situation zu übertragen. Mehr als 60% der Befragten können – zum Teil selbstständig, zum Teil auf Nachfrage – auch angeben, dass die Massen und Zusatzgeschwindigkeiten in beiden Situationen gleich groß sind, und die Einwirkdauer in der zweiten Situation größer ist als in der ersten Situation. Nachdem der Vergleich dieser Varia-

blen geklärt war, konnten insgesamt weniger (gut 40%) aber dennoch relativ viele Schülerinnen und Schüler aus der Gleichung durch mathematische Argumentation (!) richtig schließen, dass dann die Kraft in der zweiten Situation kleiner ist als in der ersten Situation (Abb. 15).

Das nachfolgende Interviewbeispiel belegt dies sehr eindrucksvoll.

I: Gibt es da unterschiedliche Auswirkungen auf die Fahrer?

S: Ja, also das (zeigt auf Mauer) gibt nicht nach, also das ist etwas Festes. Da (zeigt auf die Reifen) ist die Einwirkungsdauer länger, denn die Reifen geben ja nach. Und das kann man sich hiermit auch gut merken (zeigt auf die aufgeschriebene Gleichung), weil wenn die Einwirkungsdauer größer ist, dann muss die Kraft ja kleiner sein.

I: Warum denn?

S: Wenn das hier gleich bleibt (zeigt auf m und Δv der rechten Seite der Gleichung), dann muss das (zeigt auf die rechte Seite der Gleichung) das Gleiche sein wie das (zeigt auf die linke Seite der Gleichung). Und wenn das (zeigt auf Δt) jetzt größer wird, dann muss das (zeigt auf \vec{F}) kleiner werden, sonst bleibt es nicht gleich.

I: Ja, genau. Ist das hier jeweils gleich auf der rechten Seite in den beiden Fällen?

S: Ja, weil, es ist ja das gleiche Auto, also auch gleiche Masse. Und Sie haben ja gesagt, die Geschwindigkeit war auch gleich, und die Zusatzgeschwindigkeit – wenn das dieselbe Situation ist – auch.

Besonders erfreulich ist, dass auch die beteiligten Lehrkräfte durchweg von positiven Erfahrungen mit der unterrichtlichen Umsetzung des Konzeptes berichten. Fast alle Lehrkräfte wollen in ihrem Mechanikunterricht auch zukünftig nach dem zweidimensional-dynamischen Konzept vorgehen. Ein Beispiel für eine Aussage eines Lehrers:

„Man kann viele Dinge sehr gut thematisieren, die nie richtig klar waren. Bei Berechnungen tun sich die Schülerinnen und Schüler zwar schwer, dafür können sie Sachverhalte aus ihrem Umfeld mit physikalischen Konzepten erklären – besser als alle anderen Klassen zuvor. Vor allem ist der nebulöse Kraftbegriff anhand der Zusatzgeschwindigkeit greifbarer. [...]

Ich werde sicherlich große Teile meines Mechanikunterrichtes wieder an diesem Konzept orientieren. Vor allem hat es auch mir Spaß gemacht.“

4. Schlussbemerkungen

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Newtonsche Bewegungsgleichung in der Form

$$\vec{F}\Delta t = m \Delta \vec{v}$$

bei den Schülern im Gegensatz zur Form

$$\vec{F} = m \vec{a}$$

zum besserem Verständnis der Mechanik führt. Man betont damit u. a. die Beziehung zwischen der Kraft und der Geschwindigkeitsänderung. Die Beziehung zwischen \vec{F} und $\Delta \vec{v}$ (genauer $\vec{F} \sim \Delta \vec{v}$) kann man mithilfe von Medien besser verdeutlichen als $\vec{F} \sim \vec{a}$. Der qualitative („Je-Desto“-Beziehungen) und der quantitative Umgang (notwendiger Verzicht auf Infinitesimalrechnung) ist mit der Bewegungsgleichung in der Form

$$\vec{F}\Delta t = m \Delta \vec{v}$$

erheblich einfacher als

$$\vec{F} = m \vec{a}.$$

Auf die für das Verständnis der Mechanik wesentliche Unterscheidung von velocity and speed muss von Anfang an größter Wert gelegt werden, und dies ist nach unseren Erfahrungen mit einer konsequent vektoriellen Einführung erreichbar. Damit wird das Auftreten verbreiteter Misskonzepte stark reduziert. So benutzen besonders bei der Kurvenfahrt viele Schüler aus der Kontrollgruppe die falsche Vorstellung, dass das Auto immer dieselbe Geschwindigkeit hat, wenn es z. B. mit 40 km/h in die Kurve hineinfährt und damit auch wieder hinausfährt. Diese falsche Vorstellung trat bei den Versuchsgruppen sehr selten auf.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Behandlung zweidimensionaler Bewegungen bei den Schülern auf keinen Widerstand gestoßen ist. Auch bei den Lehrkräften wurde eine breite Akzeptanz nach eigenen Erfahrungen in der unterrichtlichen Umsetzung erreicht. ■

Literatur

- [1] Wiesner, H., Tobias, V., Waltner, C., Hopf, M., Wilhelm, T., Sen, A.: Dynamik in den Mechanikunterricht, PhyDid B (2010)
 [2] Tobias, V.: Newtonsche Mechanik im Anfangsunterricht – Die Wirksamkeit einer Einführung über die zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen, Universität München 2010.
 [3] Jung, W., Reul, H., Schwedes, H.: Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3-6. Diesterweg, Frankfurt am Main, 1975
 [4] Jung, W.: Mechanik für die Sekundarstufe I. Diesterweg, Frankfurt am Main 1980

[5] Jung, W., Wiesner, H., Engelhardt, P.: Vorstellungen von Schülern über Begriffe der Newtonschen Mechanik. Empirische Untersuchungen und Ansätze zu didaktisch-methodischen Folgerungen. Verlag Barbara Franzbecker, Bad Salzdetfurth 1981

[6] Mach E.: Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch kritisch dargestellt, F. A. Brockhaus, Leipzig, 9. Aufl. 1933

[7] Eisenbud, L.: On the classical laws of motion. American Journal of Physics, 26 (1958), 144-159

[8] Weinstock, R.: Laws of classical motion: What's F? What's m? What's a? American Journal of Physics, 29 (1961), 698-702.

[9] Westphal, W.: Die Grundlagen der Dynamik und Newton 2. Axiom. Physikalische Blätter, 48 (1967), 558-561.

[10] Feynman, R.: Feynman-Vorlesungen über Physik, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 2007

[11] Wiesner, H.: Zum Einführungsunterricht in die Newtonsche Mechanik: Statisch oder dynamisch? In: Naturwissenschaften im Unterricht, Heft 22 (1994), S.16-23

[12] Wodzinski, R., Wiesner, H.: Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Beschreibung von Bewegungen und Geschwindigkeitsänderungen. In: Physik in der Schule, (1994) S.164-168

[13] Wodzinski R., Wiesner H.: Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Zusatzbewegung und Newtonsche Bewegungsgleichung. In: Physik in der Schule, (1994) S.202-207

[14] Wodzinski, R., Wiesner, H.: Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Die Newtonsche Bewegungsgleichung in Anwendungen und Beispielen. In: Physik in der Schule, (1994) S.331-335

[15] Hopf, M., Sen, A., Waltner, C., Wiesner, H.: Dynamischer Zugang zur Mechanik, in: Nordmeier, V., Grötzebauch, H., (Hrsg.): Lehmanns Media, Didaktik der Physik – Berlin, Berlin 2008

[16] Tobias, V., Wiesner, H., Burkert, A.: Gravity-Tractor, Praxis der Naturwissenschaften-Physik in der Schule, in diesem Heft

[17] Wilhelm, T., Waltner, C., Hopf, M., Tobias, V., Wiesner, H.: Der Einfluss der Sachstruktur im Mechanikunterricht – quantitative Ergebnisse zu Verständnis- und Interessensentwicklung, in: Nordmeier, V., Grötzebauch, H., (Hrsg.): Didaktik der Physik – Bochum, Lehmanns Media, Berlin 2009

[18] Jetzinger, F., Tobias, V., Waltner, C., Wiesner, H.: Dynamischer Mechanikunterricht – Ergebnisse einer qualitativen Interviewstudie, PhyDidB (2010)

Anschrift der Verfasser

Dr. Christine Waltner, Dr. Verena Tobias, Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner, Prof. Dr. Martin Hopf, Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Universität München, Theresienstraße 37, 80333 München, E-Mail: hartmut.wiesner@physik.uni-muenchen.de