

Lehrerhandbücher zur zweidimensional-dynamischen Mechanik

Thomas Wilhelm*, Hartmut Wiesner⁺, Martin Hopf^o

* Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main

⁺ Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Ludwig-Maximilians-Universität, Theresienstr. 37, 80333 München

^o Universität Wien, Österr. Kompetenzzentrum f. Didaktik der Physik, Porzellangasse 4/2, A-1090 Wien
wilhelm@physik.uni-frankfurt.de; hartmut.wiesner@physik.uni-muenchen.de; martin.hopf@univie.ac.at

Kurzfassung

In den Jahren 2008 bis 2010 wurde das umfangreiche Forschungsprojekt „Zweidimensional-dynamische Einführung in die Mechanik“ in der Jahrgangsstufe 7 durchgeführt. Dieses Konzept wurde dann erweitert und dazu mittlerweile zwei Lehrerhandbücher erstellt (Mechanik I: 2011, Mechanik II: 2013), wofür viele verschiedene Vorarbeiten aufgegriffen wurden. Diese beiden Handbücher decken in etwa die gesamte Mechanik der Sekundarstufe I bis Jahrgangsstufe 10 ab und enthalten sehr umfangreiche Unterrichtsmaterialien. Da sie lehrplanunabhängig sein sollen, bieten sie vieles zur Auswahl an. U. a. gibt es zahlreiche Videos mit diversen Einblendungen wie z.B. Geschwindigkeitspfeile. Die didaktischen Entscheidungen des erweiterten Konzeptes werden vorgestellt.

1. Rückblick auf ein Forschungsprojekt

Das zweidimensional-dynamische Mechanikkonzept [1] wurde als Unterrichtskonzept zur Einführung in die Mechanik in der Sekundarstufe I entwickelt, wobei auf viele Vorarbeiten [2] aufgebaut werden konnte, und anschließend in der Jahrgangsstufe 7 des bayerischen Gymnasiums evaluiert [3-5]. Dieses Kooperationsprojekt der Universitäten München, Wien und Würzburg wurde schließlich mit einem zweiten Preis beim ersten Polytechnikpreis der Stiftung Polytechnische Gesellschaft Frankfurt am Main prämiert.

Dieses Unterrichtskonzept unterscheidet sich in vielerlei Hinsicht vom traditionellen Mechanik-Unterricht. Hier werden nur die zwei wesentlichen Unterschiede genannt:

- Die Dynamik wird hinsichtlich der Reihenfolge und der Gewichtung vor der Statik unterrichtet. Der Begriff „Kraft“ wird dazu nur über Bewegungsänderungen eingeführt. Erst viel später wird der Spezialfall behandelt, dass ein ruhender Körper bei Kräftegleichgewicht in Ruhe bleibt, und das Phänomen, dass zwei gegengleiche Kräfte, die an einem ausgedehnten Körper angreifen, diesen verformen können.
- Zweidimensionale Bewegungen werden in Reihenfolge und Gewichtung vor eindimensionalen Bewegungen behandelt, wobei die gerichteten Größen mit Pfeilen statt mit Diagrammen dargestellt werden.

Wenn man bestimmte Inhalte neu oder verstärkt unterrichten will, muss man auch überlegen, welche Inhalte man reduziert. Bei diesem Konzept wird bei der Einführung in die Mechanik in der Sekundarstu-

fe I auf die Größe „Beschleunigung“ sowie weitgehend auf Rechenaufgaben und Diagramminterpretationen verzichtet. Das zweite Newton'sche Axiom (Newton'sche Bewegungsgleichung) wird außerdem nicht induktiv im Experiment hergeleitet, sondern in der vereinfachten Produktform $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ mitgeteilt und mit Hilfe von Experimenten und Simulationen plausibel gemacht. Des Weiteren wird auf Momentanwerte verzichtet und nur Durchschnittswerte kleiner Zeitintervalle Δt betrachtet.

Zuerst wird im Unterricht thematisiert, wie man allgemeine zweidimensionale Bewegungen beschreiben kann. Dann wird das Tempo als zurückgelegter Weg durch die dazu benötigte Zeit sowie die Richtung als augenblickliche Bewegungsrichtung eingeführt. Tempo und Richtung werden schließlich zu einer neuen Größe Geschwindigkeit kombiniert, die durch einen Pfeil dargestellt wird.

Anschließend wird gezeigt, dass eine Einwirkung eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ zur Folge hat (siehe Abb. 1), die die gleiche Richtung wie die Einwirkung hat [1]. Einwirkungsstärke und Einwirkungsrichtung werden zum Begriff „Kraft“ zusammengefasst. Viele Versuche machen plausibel, dass allgemein das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit umso größer ist, je größer die Einwirkungsstärke, je länger die Einwirkungszeit und je kleiner die Masse des Gegenstandes ist. Dies wird zusammengefasst in $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$. Damit wird die Schülervorstellung, dass die (End-)Geschwindigkeit in Richtung und Betrag durch die Kraft bestimmt ist, umgedeutet in den Zusammenhang zwischen Kraft und Zusatzgeschwindigkeit.

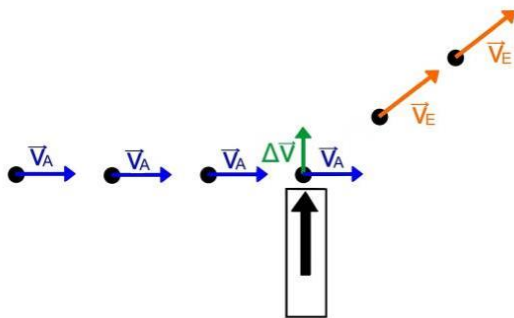


Abb. 1: Die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ zeigt in Einwirkungsrichtung. Anfangsgeschwindigkeit und Zusatzgeschwindigkeit ergeben die Endgeschwindigkeit

Die durchgeführte Forschungsstudie bestand aus einer Vorstudie zur Erprobung (14 Lehrkräfte in 19 Klassen), einer Hauptstudie und einer Nachfolgestudie mit acht Lehrkräften. In der Hauptstudie haben zehn Lehrkräfte zunächst traditionell (14 Klassen, 358 Schüler) und dann nach dem zweidimensional-dynamischen Konzept (13 Klassen, 370 Schüler) unterrichtet. Zur Evaluation wurde ein Mix aus verschiedenen quantitativen und qualitativen Forschungsmethoden verwendet.

Als Ergebnis wurde festgestellt, dass die Schüler der Treatmentgruppe signifikant mehr fachliches Verständnis erreichten [3-5]. Insbesondere die Mädchen profitierten stark, so dass die anfängliche Überlegenheit der Jungen ausgeglichen werden konnte. Interessanterweise waren diese Erfolge ohne intensive Lehrerschulung und ohne begleitendes Coaching nur durch Bereitstellen der Materialien möglich.

Das Unterrichtskonzept stieß außerdem bei den unterrichtenden Lehrkräften auf sehr hohe Akzeptanz. Diese war umso höher, ja mehr die Lehrkräfte über Lernschwierigkeiten beim Mechaniklernen wussten. Interessanterweise hatte dieses physikdidaktische Wissen aber keine Auswirkung auf den Lernerfolg der Schüler, wenn die Lehrkräfte nach den erarbeiteten Materialien unterrichteten.

Für das Forschungsprojekt wurde passend zum bayerischen Gymnasial-Lehrplan für die siebte Jahrgangsstufe ein Schülerbuch erstellt (siehe Abb. 2), das auch viele Experimente und Aufgaben enthält. Dieses Buch ist unter www.thomas-wilhelm.net/2dd.htm downloadbar. Weitere Unterrichtsmaterialien, die die Lehrkräfte erhielten, sind unter www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt_materialien/mechanikkonzept/index.html erhältlich. Später wurden dann zwei Lehrerhandbücher erstellt (siehe Abb. 3), die nötiges Fachwissen und didaktische Leitideen für Lehrkräfte darlegen, sowie Vorschläge für den Ablauf der Unterrichtseinheiten machen.



Abb. 2: Titelbild des Schülerbuches



Abb. 3: Titelbilder der beiden Lehrerhandbücher

2. Die Lehrerhandbücher

Das Lehrerhandbuch I [6] umfasst die Kernpunkte des erprobten Unterrichtskonzeptes. Dazu gehören neben der Einführung in den Themenbereich die Beschreibung von Bewegungen, die Geschwindigkeit, die Zusatzgeschwindigkeit und die Newton'sche Bewegungsgleichung. Ergänzend zum ursprünglichen Konzept wurde noch der Vergleich von trägen Massen mithilfe von Stoßversuchen aufgenommen. Das Buch enthält ausführliche Darstellungen des Unterrichts mit umfangreichen Unterrichtsmaterialien auf DVD, z.B. eine Simulation zum senkrechten Stoß (siehe Abb. 4). Die erste Auflage erschien im November 2011 und war schnell vergriffen, so dass seit Dezember 2012 die zweite Auflage verfügbar ist.



Abb. 4: Screenshot der Simulationssoftware, die dem ersten Lehrerhandbuch auf DVD beiliegt

Das Lehrerhandbuch II [7] (geplantes Erscheinungsdatum September 2013) ist die Fortsetzung des ersten Handbuches und erweitert das ursprünglich evaluierte Unterrichtskonzept. Beide Bücher decken damit die gesamte Mechanik der Sekundarstufe I ab. Zunächst geht es im zweiten Buch um Anwendungen der Newton'schen Bewegungsgleichung (2. Newton'sches Axiom), dem Beharrungsprinzip (1. Newton'sches Axiom) und dem Wechselwirkungsprinzip (3. Newton'sches Axiom), was Inhalte des Forschungsprojektes waren. Die Erweiterung betrifft den Impulserhaltungssatz, die Erdanziehungskraft, das Hooke'sche Gesetz, die Kräfteaddition, Reibungskräfte, den Energieerhaltungssatz und die eindimensionale Kinematik.

3. Entscheidungen zur Sachstruktur im zweiten Band

Beim Beharrungsprinzip wird betont, dass ein Körper ohne Krafteinwirkung sein Tempo und seine Richtung beibehält, während ein Beibehalten der Ruhe nicht betont werden muss, da dies den Schülern klar ist. Trägheitskräfte werden nicht explizit behandelt, sondern die Beschreibung aus der objektiven Sicht des außenstehenden Beobachters betont. Dennoch wird deutlich gemacht, dass es dem mitbewegten Beobachter anders erscheint.

Beim Wechselwirkungsprinzip wird ein Schwerpunkt auf die Anwendung Fortbewegungen gelegt [8]. So übt z.B. das anfangende Auto auf die Straße eine Kraft nach hinten aus und die Straße übt eine gleichgroße entgegengerichtete Kraft auf das Auto nach vorne aus (siehe Abb. 5). Eine besonders attraktive Anwendung sind Raketen, die ein Gas nach hinten hinausdrücken, während das Gas die Rakete nach vorne drückt.



Abb. 5: Ferngesteuertes Spielzeugauto auf einer Glasplatte und Papprollen

Der Impulserhaltungssatz wird beim Stoß zweier Körper aus dem Wechselwirkungsgesetz mit Hilfe von $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ abgeleitet und experimentell bestätigt.

Auch bei der Erdanziehungskraft wird konsequent auf die Beschleunigung verzichtet und stattdessen die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ in kleinen Zeitintervallen Δt betrachtet. Die Schülerinnen und Schüler lernen hier ein erstes Beispiel für eine allgemeine Kraftfunktion kennen und wie man diese mit Hilfe

der Newton'schen Bewegungsgleichung experimentell ermitteln kann.

Beim Thema Dehnung werden die Kräfte an beiden Enden des Körpers betrachtet: Greifen an einem Körper an verschiedenen Punkten zwei gleich große, entgegengerichtete Kräfte an, ändert sich seine Geschwindigkeit nicht, aber er kann verformt werden (siehe Abb. 6). Das Hooke'sche Gesetz „ $D = F/s = \text{konstant}$ “ wird dann nur als ein Spezialfall eines Dehnungsverhaltens vorgestellt, nachdem mit Gummiringen ein allgemeinerer Fall behandelt wurde.

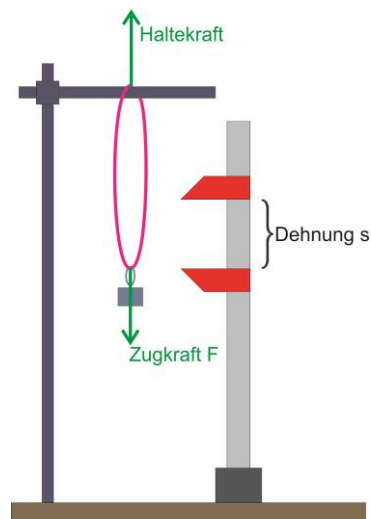


Abb. 6: Versuch zur Dehnung eines Gummiringes mit wirkenden Kräften auf den Gummiring

Ein wichtiges Thema ist die Kräfteaddition, wobei auf Kräftezerlegung konsequent verzichtet wird. So wird die Hangabtriebskraft auf einer schiefen Ebene als Resultierende von Erdanziehungskraft und Normalkraft durch die Unterlage behandelt (siehe Abb. 7). Im weiteren Verlauf wird die Wirkungslinie einer Kraft hervorgehoben, während Angriffspunkte nicht explizit thematisiert werden.

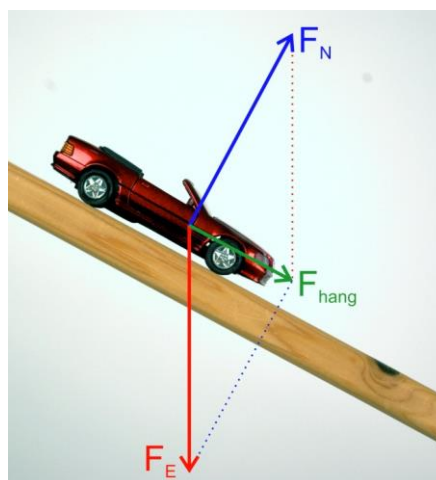


Abb. 7: Kräfte auf einen reibungsfrei auf einer schiefen Ebene bewegten Körper

Reibungskräfte werden als Tangentialkräfte eingeführt. Dies ist an einem Luftkissenpuck zu sehen, der nach einem Stoß an die Wand nicht nur eine Zusatzgeschwindigkeit senkrecht zur Wand bekommen hat, sondern auch eine Rotation zeigt (siehe Abb. 8). Großen Wert wird auf die qualitative Bedeutung der Haftkraft gelegt, die z.B. das Laufen ermöglicht.

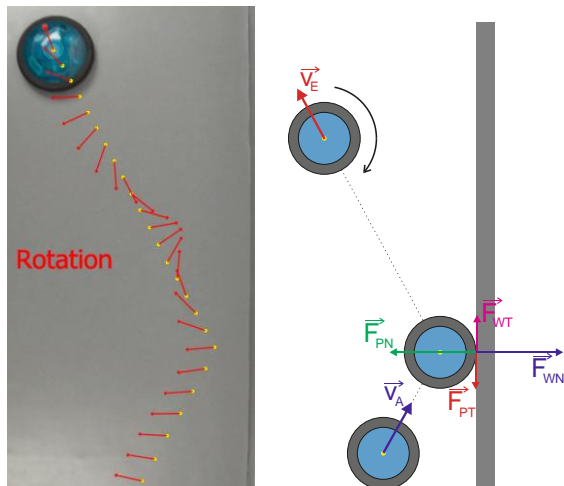


Abb. 8: Links: ein Luftkissenpuck stößt gegen die Wand und erhält eine Zusatzgeschwindigkeit und eine Rotation, rechts: \vec{F}_{PN} und \vec{F}_{PT} sind die Normal- und die Tangentialkraft von der Wand auf den Puck, \vec{F}_{WN} und \vec{F}_{WT} sind die vom Puck auf die Wand ausgeübten Kräfte.

Beim Thema Energie wird auf den Arbeitsbegriff weitgehend verzichtet und Energie nicht über Arbeit eingeführt. Erst nachdem die Energieerhaltung behandelt ist, wird Arbeit als die Änderung der Energie eines Systems definiert, die sich aufgrund einer Wechselwirkung über die Systemgrenzen hinweg ergibt. Im Zentrum steht die Energieerhaltung. Eine der angebotenen Varianten motiviert zuerst über den Impulserhaltungssatz die Suche nach einer weiteren Erhaltungsgröße, der kinetischen Energie. Dieser Zugang sieht die schrittweise Erweiterung des Energieerhaltungssatzes vor: Bei Vorgängen, bei denen der bisher formulierte Energieerhaltungssatz nicht mehr gilt, wird die Suche nach einem neuen Term motiviert, der additiv hinzugefügt wieder zu einem Erhaltungssatz führt [9].

Die eindimensionale Kinematik kommt erst an letzter Stelle, nachdem die Dynamik, verschiedene Kräfte und die Erhaltungssätze behandelt wurden. Da das Buch auf alle Lehrpläne anpassbar sein soll, gibt es hier auch Unterrichtsvorschläge zur Behandlung der Beschleunigung, auf die bis hierher verzichtet wurde. Dabei geht es aber nur um die mittlere Beschleunigung im Zeitintervall Δt . Der Grenzübergang zur momentanen Beschleunigung wäre ein weiterer, anspruchsvoller, aber unnötiger Schritt.

Da es sich bei der eindimensionalen Beschreibung einer geradlinigen Bewegung bei den beschreibenden Größen um Vektorkomponenten in x-Richtung eines gewählten Koordinatensystems handelt, wer-

den die Geschwindigkeit mit v_x und die Beschleunigung mit a_x bezeichnet.

Im ganzen Unterrichtshandbuch wurde versucht, nur spärlich und vorsichtig Graphen einzusetzen. Erst bei der Kinematik folgt eine langsame und systematische Hinführung zu Graphen und wird ihr Verständnis und ihre Interpretation geübt. Dabei wird kein Wert auf die spezielle Form von Graphen bei speziellen Bewegungen gelegt, wie konstante Geschwindigkeit oder konstante Beschleunigung. Entsprechend werden auch die speziellen Gleichungen nicht betont, z.B. die Bewegungsfunktionen bei gleichförmig beschleunigter geradliniger Bewegung. Viel wichtiger sind die grundlegenden Definitionen wie $v_x = \Delta x / \Delta t$ und $a_x = \Delta v_x / \Delta t$.

4. Besonderheiten bei den Materialien

Auf der den Büchern beiliegenden DVDs befinden sich viele Videos für den Einsatz im Unterricht. Bei jeder gefilmten Situation stehen drei Arten von Angeboten zur Verfügung:

- Videos ohne irgendwelche Einblendungen, die in jedem Videoanalyseprogramm geladen und analysiert werden können;
- Dateien für das Videoanalyseprogramm „measure dynamics“, in dem die Videos analysiert und mit vielen hilfreichen Einblendungen versehen wurden, so dass man in dieser Software selbst entscheiden kann, welche Einblendungen und welche Diagramme man zeigen will;
- mit verschiedenen Einblendungen exportierte Videos, die ohne ein Videoanalyseprogramm vorgeführt werden können.

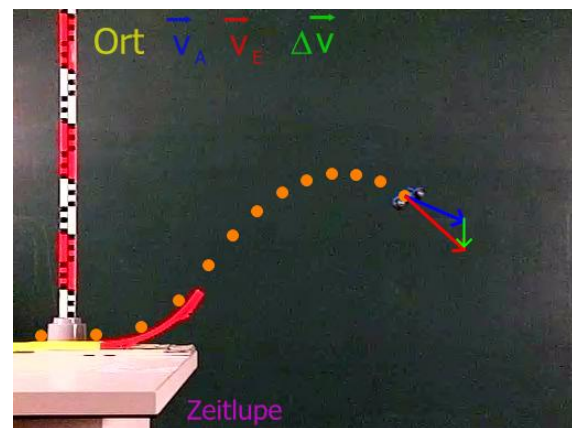


Abb. 9: Zeitlupenvideo eines „springenden“ Spielzeugautos mit eingeblendeter Anfangsgeschwindigkeit, Zusatzgeschwindigkeit und Endgeschwindigkeit für jedes Zeitintervall

An Einblendungen gibt es neben Texten und Hilfslinien insbesondere die Darstellung physikalischer Größen durch bewegte Pfeile und Säulen, auch dynamisch ikonische Repräsentationen genannt [8]. Zwei Beispiele aus dem ersten Lehrerhandbuch zeigen die Abbildungen 9 und 10. In den entsprechenden Videos wird vom bewegten Objekt eine Bahn-

kurve gestempelt und an das bewegte Objekt dynamisch Geschwindigkeitspfeile gezeichnet.

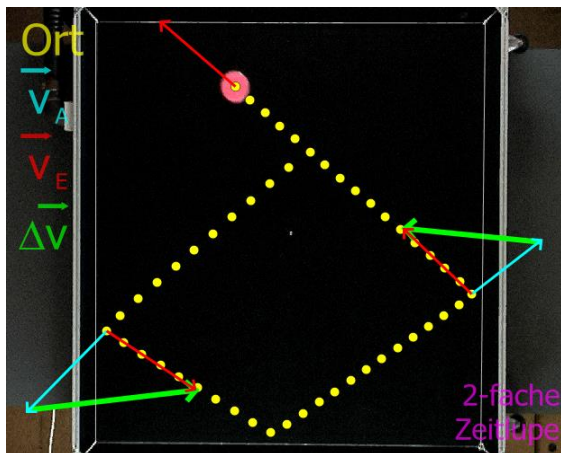


Abb. 10: Video eines Pucks auf einem Luftkissentisch mit Einblendung von Anfangsgeschwindigkeit, Zusatzgeschwindigkeit und Endgeschwindigkeit an zwei Punkten.

Die Abbildungen 11 und 12 zeigen zwei Beispiele zur Fallbewegung aus dem zweiten Lehrerhandbuch, die mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen wurden und in Zeitlupe abgespielt werden [10].

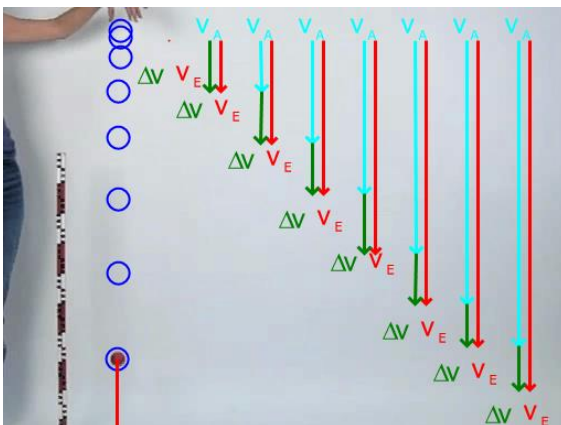


Abb. 11: Zeitlupenvideo einer fallenden Kugel mit einblendeter Anfangsgeschwindigkeit, Zusatzgeschwindigkeit und Endgeschwindigkeit für jedes Zeitintervall, die in gleichen Abständen nebeneinander gestempelt werden

Beim Filmen einiger Experimente wurde darauf geachtet, dass neben dem Experiment (siehe Abb. 11) oder unter dem Experiment (siehe Abb. 13) Platz für Einblendungen ist. Indem die Pfeile für relevante physikalische Größen mit der Zeit nach rechts verschoben werden, entstehen Vorstufen eines Zeit-Graphen, so dass die Schülerinnen und Schüler zu Graphen hingeführt werden.

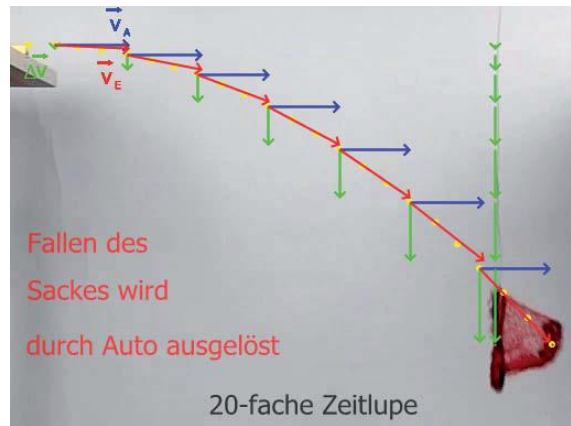


Abb. 12: Zeitlupenvideo eines Spielzeugautos („Affenschuss“) mit einblendeter Anfangsgeschwindigkeit, Zusatzgeschwindigkeit und Endgeschwindigkeit (Zeitintervall immer gerechnet von Beginn des Sprunges an)

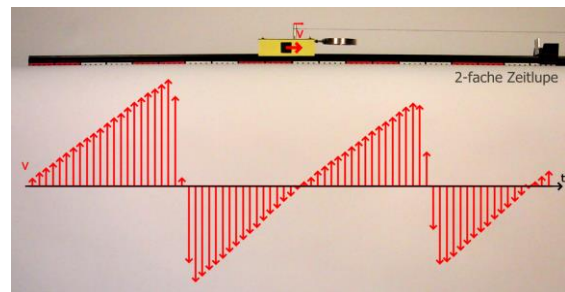


Abb. 13: Geschwindigkeitspfeil an einem Wagen, der sich nur eindimensional bewegen kann, und Geschwindigkeitspfeile gedreht und nebeneinander gestempelt

Viele Videos können im Unterricht auch leicht nachgemacht werden. Bei anderen ist das nur schwer möglich, so dass man auf die vorgefertigten Videos angewiesen ist. So wurden für das Video der Abbildung 14 die aufgezeichneten Messwerte beim Gehen über eine Kraftmessplatte zusammen mit dem gleichzeitig aufgenommenen Video in measure dynamics importiert [11]. Schließlich wurde die gemessene Kraft vom Boden auf die gehende Person als Pfeil in das Video einblendet. So wird die Bedeutung der Haftkraft für das Gehen deutlich.

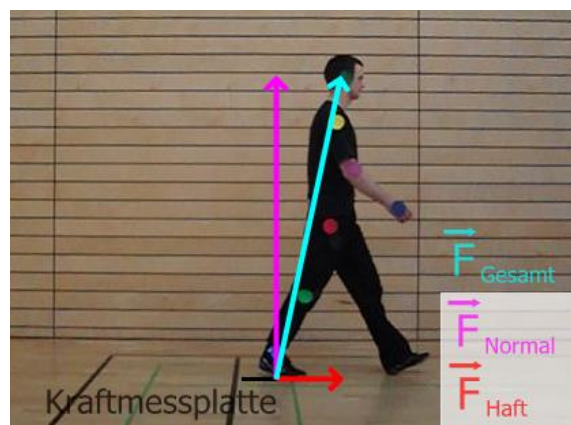


Abb. 14: Normalkraft und Haftkraft beim Abdrücken des Fußes: Der Boden drückt den Fuß nach vorne.

5. Literatur

- [1] 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 59, Nr. 7, S. 9 - 22
- [2] Wilhelm, T.; Tobias, V.; Waltner, C; Hopf, M.; Wiesner, H. (2012): Design-Based Research am Beispiel der zweidimensional-dynamischen Mechanik. In: Bernholt, S. (Hrsg.): Konzepte fachdidaktischer Strukturierung, Jahrestagung der GDCP in Oldenburg 2011, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 32, Lit-Verlag, Münster, S. 31 – 47
- [3] Tobias, V. (2010): Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht. Die Wirksamkeit einer Einführung über zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen, Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 105, Logos-Verlag, Berlin
- [4] Wilhelm, T.; Tobias, V.; Waltner, C.; Hopf, M.; Wiesner, H. (2011): Zweidimensional-dynamische Mechanik – Ergebnisse einer Studie. In: Höttecke, D. (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDCP in Potsdam 2010, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 31, Lit-Verlag, Münster, S. 438 - 440
- [5] Wilhelm, T.; Tobias, V.; Waltner, C; Hopf, M.; Wiesner, H. (2012): Einfluss der Sachstruktur auf das Lernen Newtonscher Mechanik. In: Bayrhuber, H.; Harms, U.; Muszynski, B.; Ralle, B.; Rothgangel, M.; Schön, L.-H.; Vollmer, H.; Weigand, H.-G. (Hrsg.): Formate Fachdidaktischer Forschung. Empirische Projekte – historische Analysen – theoretische Grundlagen, Fachdidaktische Forschungen, Band 2, Waxmann, Münster/New York/München/Berlin
- [6] Wiesner, H.; Wilhelm, T.; Rachel, A.; Waltner, C; Tobias, V.; Hopf, M. (2011): Mechanik I: Kraft und Geschwindigkeitsänderung, Reihe Unterricht Physik, Band 5, Aulis-Verlag
- [7] Wilhelm, T.; Wiesner, H.; Hopf, M.; Rachel, A. (2013): Mechanik II: Dynamik, Erhaltungssätze, Kinematik, Reihe Unterricht Physik, Band 6, Aulis-Verlag
- [8] Wilhelm, T. (2005): Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung, Dissertation, Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 46, Logos-Verlag, Berlin, und unter <http://www.opus-bayern.de/uni-wuerzburg/volltexte/2009/3955/>
- [9] Bader, M. (2001): Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrganges „Einführung in die mechanische Energie und Wärmelehre“, Dissertation Universität München, http://edoc.ub.uni-muenchen.de/191/1/Bader_Martin.pdf
- [10] Michel, M.; Wilhelm, T. (2010): Einsatzmöglichkeiten von Hochgeschwindigkeitskameras im Physikunterricht - In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Hannover 2010, <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/145/181>
- [11] Weidt, M.; Wilhelm, T.: Bewegungen des eigenen Körpers – Möglichkeiten der Messwerterfassung im Vergleich. In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Münster 2011, <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/260/415>