

Mechanik - zweidimensional und multicodal

Thomas Wilhelm

Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Am Hubland, 97074 Würzburg

Kurzfassung

Um bei Schülern mehr Verständnis für die newtonsche Mechanik zu erreichen, wurden bestehende Unterrichtsvorschläge weiterentwickelt und so lehrplankonforme Unterrichtskonzepte für die siebte und elfte Jahrgangsstufe erstellt. Im Vortrag werden einzelne Aspekte der beiden Unterrichtskonzepte vorgestellt. Ein wichtiger Aspekt ist, dass in der Kinematik die kinematischen Begriffe anhand von zweidimensionalen Bewegungen eingeführt werden. In der Dynamik der Oberstufe werden komplexere Versuche mit mehreren Kräften und Reibung sowie graphische Modellbildung mit Animationen eingesetzt.

Ein wesentlicher Aspekt sind die gewählten Codierungen, vor allem in Form von dynamisch ikonischen Repräsentationen, d.h. bildhaften, sich in Animationen oder Videos mitbewegenden Darstellungen physikalischer Größen - meist in Form von Pfeilen. Es werden verschiedene Softwareprogramme und verschiedene Messmöglichkeiten für zweidimensionale Bewegungen gezeigt, u.a. das Videoanalyseprogramm „measure Dynamics“, das dynamisch Pfeile einzeichnen kann.

Einzelne Aspekte der Evaluation werden ebenso vorgestellt. Dazu gehören Lehrermeinungen und einzelne Testergebnisse, die darauf hinweisen, dass die Schüler so mehr Verständnis erreichten. Schließlich wird ein Ausblick auf ein geplantes Forschungsprojekt gegeben.

1. Überblick über didaktische Ideen

1.1 Situation und Leitidee

Die Schülervorstellungsforschung hat Schülervorstellungen ausführlich untersucht, was auch zu Veränderungen in Lehrplänen führte. Trotzdem zeigen auch neuere Untersuchungen [1+2], dass immer noch die meisten Schüler auch nach dem Physikunterricht den newtonschen Kraftbegriff nicht verstanden haben. Häufig wurde auch keine physikalisch richtige Vorstellung des Beschleunigungsbegriffes erworben. Deshalb wurden neue Unterrichtskonzepte für den Kinematik- und Dynamikunterricht entwickelt, von denen hier nur wenige ausgewählte Gesichtspunkte vorgestellt werden. Die beiden Unterrichtskonzepte sind für verschiedene Lehrpläne des bayerischen Gymnasiums, aber jeweils lehrplankonform.

Die Gründe für die großen Lernschwierigkeiten in der Mechanik sind sicher zahlreich. Ein Grund sind ungeschickte Elementarisierungen, wie gezeigt wird (siehe 1.3). Ein anderer Grund ist, dass Alltagsvorstellungen von Oberflächenmerkmalen bestimmt werden, die der Beobachtung direkt zugänglich sind, wie Farbe oder Schnelligkeit. Die physikalische Sichtweise betrachtet dagegen Tiefenstrukturen, das heißt Zusammenhänge, die nicht direkt zu sehen sind.

Eine Leitidee war, verschiedene Darstellungsformen für die Darstellung physikalischer Größen und ihrer Zusammenhänge zu nutzen. Man spricht von verschiedenen Codierungen. Auf das Wesentliche reduzierte Animationen können auf dem Bildschirm

gleichzeitig mit der Messung dargestellt werden und erleichtern das Erinnern. Physikalische Größen und ihre Zusammenhänge können dann mit piktogramm-artigen Darstellungen wie Säulen, Vektoren und Verbindungslinien dargestellt werden, deren Aussagen leicht zu erfassen sind. Sie werden hier als dynamisch ikonische Repräsentationen bezeichnet [1]. Meist werden funktionale Abhängigkeiten physikalischer Größen nur durch Graphen wiedergeben. Dies ist aber nur ein effizientes Vorgehen für die, die bereits über angemessene physikalische Konzepte verfügen und Graphen sicher lesen können. Demgegenüber werden im Folgenden Vorteile bildlicher Darstellungen an einigen wenigen Beispielen dargestellt.

Hierzu wurden verschiedene Vorarbeiten mitgenutzt. Jung, Wiesner, Wodzinski u.a. [3-9] schlagen seit langem vor, den Kraftbegriff dynamisch einzuführen und dazu in der Mechanik zweidimensionale Bewegungen zu betrachten. Betont wird dabei die vektorielle Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$. Deren Darstellung wurde nun mit dynamischen Vektorpfeilen aufbereitet, die in Echtzeit mit einer Messung gezeigt werden können. Durch die kontinuierliche Messung ist auch eine kontinuierliche Betrachtung möglich anstatt nur die eines einzigen Stoßes.

Schecker u.a. [10-14] schlagen die Nutzung graphischer Modellbildung vor. Dies wurde aufgenommen und in sofern verändert, dass die Ergebnisse nicht nur als Graphen, sondern mit Animationen mit dynamisch ikonischen Repräsentationen gezeigt werden.

1.2 Beispiel Geschwindigkeit

Im Alltag und bei vielen Schülern wird Geschwindigkeit auf eine Betragsgröße reduziert, die man mit Schnelligkeit oder Tempo bezeichnen könnte [15]. Beim physikalischen Geschwindigkeitsbegriff handelt es sich dagegen um eine vektorielle Größe. Um im Unterricht den vektoriellen Charakter der Größe Geschwindigkeit von Anfang an deutlich zu machen, ist es sinnvoll, schon bei der Einführung der Geschwindigkeit von zweidimensionalen Bewegungen auszugehen.

In der siebten Jahrgangsstufe wurden hier Spiele durchgeführt (siehe Abb. 1), mit Spielzeug (siehe Abb. 2) und mit Videos derselben gearbeitet und deutlich gemacht, dass es sinnvoll ist, Geschwindigkeit mit einem Pfeil darzustellen [16]. Dessen Länge gibt wie ein Tachometer das Tempo an; dessen Richtung, die Richtung, in der sich der Körper bewegt oder weiterbewegen würde, wenn er nicht daran gehindert wird. In den Videos waren solche gezeichneten Pfeile an den realen Objekten zu sehen (siehe Abb. 5).



Abb. 1: Grunderfahrungen zur Beschreibung von Bewegungen: Damit der blinde Fänger den vorauslaufenden Schüler fangen kann, braucht er Informationen über die nötige Bewegungsrichtung



Abb. 2: Die Bewegungsrichtung von Spielzeugfahrzeugen wird mit aufgeklebten Pfeilen verdeutlicht

In der elften Jahrgangsstufe wurden Bewegungen, die mit der normalen Computermaus auf dem Versuchstisch durchgeführt werden, betrachtet [15; 17, S. 8]. Entsprechend der Bewegung der PC-Maus

erhält man auf dem Bildschirm eine Bahnkurve, an die in festen Zeitintervallen Zeitmarken oder Ortsvektoren \vec{x} gezeichnet werden. Hier wird deutlich, dass „Ort“ einen Punkt im Bezugssystem meint, während „Weglänge“ für die Länge der Bahnkurve steht. Die Änderung des Ortes in einem Zeitintervall Δt kann nun mit einem zusätzlichen Ortsänderungsvektor deutlich gemacht werden, der die Bewegungsrichtung angibt. Dividiert man den Ortsänderungsvektor durch das Zeitintervall, erhält man einen Vektor der Durchschnittsgeschwindigkeit (siehe Abb. 3). Der Ortsänderungsvektor ist eine sinnvolle Vorstufe des Geschwindigkeitsvektors und hat natürlicherweise eine Richtung.

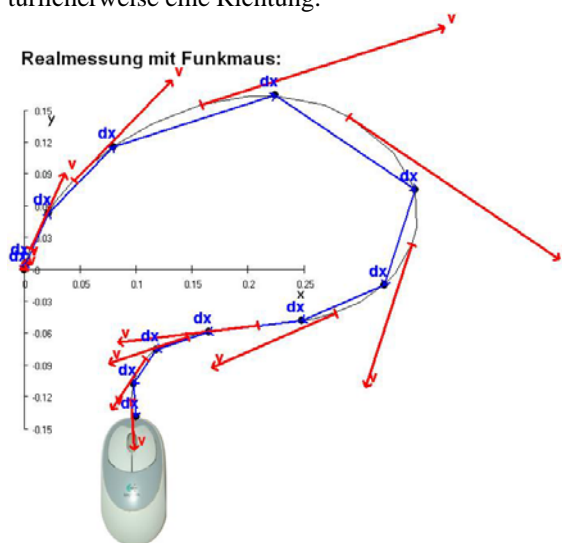


Abb. 3: Bahnkurve einer Mausbewegung mit Ortsänderungsvektoren und Geschwindigkeitsvektoren (Screenshot aus „PAKMA“)

1.3 Beispiel Beschleunigung

Der Begriff „Beschleunigung“ wird von den Schülern in seiner Komplexität auch oft reduziert [15]. Am Drastischsten ist die Reduktion auf Geschwindigkeit. Dies entspricht dem Alltagsgebrauch, in dem eine beschleunigte Bewegung eine schnelle Bewegung ist. Bei qualitativen Aufgaben zur Beschleunigung antworten Schüler dann so, als wäre nach der Geschwindigkeit gefragt worden.

Von mehr Verständnis zeugt die Reduktion der vektoriellen Beschleunigung auf eine skalare Größe, nämlich die Änderung des Geschwindigkeitsbetrages. „Beschleunigen“ heißt demnach „schnellerwerden“, auch als „positive Beschleunigung“ bezeichnet; „negative Beschleunigung“ bedeutet dann „langsamerwerden“.

Dies führt in der Schule solange nicht zu Problemen, wie sich ein Körper eindimensional in positive Richtung bewegt. Erst bei Bewegungen in negative Richtung - wie sie bei Bewegungen mit Richtungswechsel auftreten - führt diese Vorstellung zu entgegengesetzten Ergebnissen wie das physikalische Konzept. Besonders schwierig wird es aber bei der zweidimensionalen Bewegung, da eine Kreisbewegung mit konstantem Geschwindigkeitsbetrag nach dieser

Vorstellung dann keine Beschleunigung ergibt und eine Zentripetalbeschleunigung nicht verstehbar ist. Als Elementarisierung ist diese Reduktion ungeeignet, da sie nicht die Forderung nach „Erweiterbarkeit“ erfüllt [18, S. 105], da es spätestens bei der Behandlung der Kreisbewegung zum Bruch kommt. Auch bei der Einführung der Beschleunigung ist es deshalb sinnvoll, von allgemeinen zweidimensionalen Bewegungen auszugehen. Die Änderung des Geschwindigkeitsvektors in einem Zeitintervall wird nun mit einem zusätzlichen Geschwindigkeitsänderungsvektor $\Delta\vec{v}$ deutlich gemacht, der angibt, was an Geschwindigkeit „dazukam“ (siehe Abb. 4). Der aktuelle Geschwindigkeitsvektor (in der Abb. 4 hellblau) wird dabei parallel verschoben bis zum nächsten Zeitpunkt (dort dunkelblau) und so die Differenz konstruiert (rot). Es entsteht der Geschwindigkeitsänderungsvektor des Zeitintervalls. Man müsste ihn nur jeweils in die Mitte des betrachteten Intervalls zeichnen. Dividiert man den Geschwindigkeitsänderungsvektor durch das Zeitintervall Δt , erhält man den Vektor der Durchschnittsbeschleunigung. Dieses Vorgehen, die Beschleunigung \vec{a} zu bestimmen, ist natürlich nichts weiter als die Umsetzung der Definition des Beschleunigungsvektors in Konstruktionsschritte. So werden die Größen aber als Vektoren erkannt.

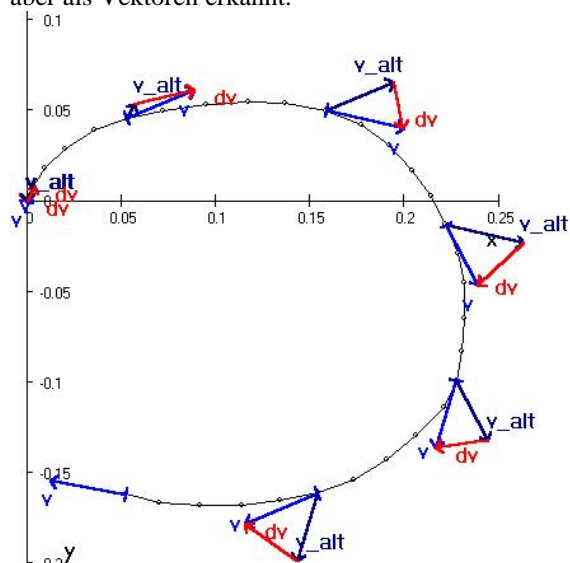


Abb. 4: Entstehung des Geschwindigkeitsänderungsvektors (Bewegung einer PC-Maus)

In der elften Jahrgangsstufe wurde hier mit der Maus gearbeitet. In der siebten Jahrgangsstufe wurde zunächst mit Hilfe der unterschiedlichsten Medien gezeigt, dass eine neue Geschwindigkeit entsteht, wenn zur alten eine Zusatzgeschwindigkeit dazu kommt: $\vec{v}_{neu} = \vec{v}_{alt} + \vec{v}_{Zusatz}$ [16]. Aus dieser Zusatzgeschwindigkeit erhält man dann die Beschleunigung. Dazu wurden wieder viele Videos mit Spielsachen (siehe Abb. 5) gezeigt, bei denen die Größen vorher durch eine Videoanalyse (mit „AVA“) ermittelt wurden. Das Erstellen dieser Videos war dabei

aufwändig. Mittlerweile geht so etwas ganz einfach mit der neuen Software „measure Dynamics“ (siehe 1.4).

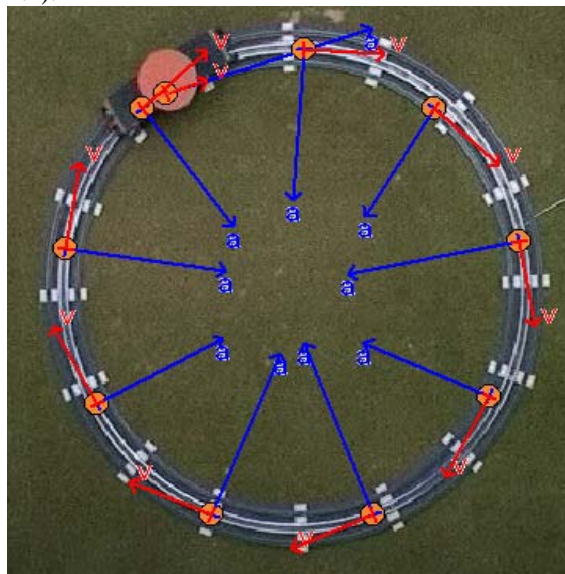


Abb. 5: Das Videoprojekt (in PAKMA) zeigt eine Lego-Eisenbahn mit simultaner Darstellung von Geschwindigkeit und Beschleunigung

1.4 Verwirklichte Messalternativen für zweidimensionale Bewegungen

Die ungünstige Elementarisierung auf eindimensionale Bewegungen in traditionellen Unterricht liegt vielleicht daran, dass man früher keine Messverfahren für zweidimensionale Bewegungen kannte. Heute gibt es verschiedene Messmöglichkeiten [19]. Neben der PC-Maus ist eine andere Messmöglichkeit das Grafiktablett [20] (siehe Abb. 6). Mit beiden Varianten sind nicht nur Demonstrationsexperimente, sondern auch Schülerübungen im Computerraum möglich [21]. Die Schüler können die Geschwindigkeits- und insbesondere Beschleunigungspfeile sofort gleichzeitig mit der Bewegung der eigenen Hand sehen und Zusammenhänge zwischen der Bewegung und der Darstellung herstellen.

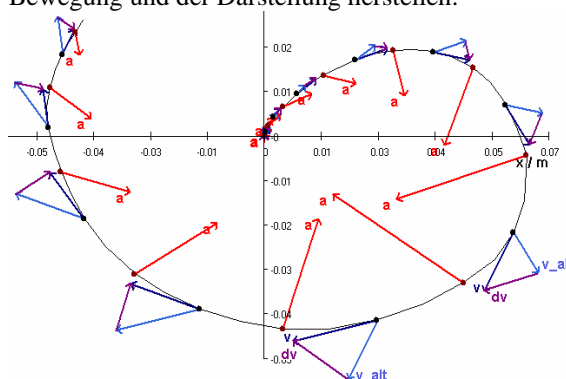


Abb. 6: Bahnkurve mit Vektoren, aufgenommen mit einem Grafiktablett

Größere Bewegungen im Bereich von zehn bis hundert Meter kann man gut mit einem GPS-Gerät aufnehmen [22+23]. Die Abbildung 7 zeigt eine Bewegung, die mit einem Fahrrad gefahren wurde. Leider

muss dazu ein GPS-Empfänger gekauft werden und die Betrachtung der physikalischen Größen ist erst nach der Bewegung möglich, denn die Daten müssen erst eingelesen werden.

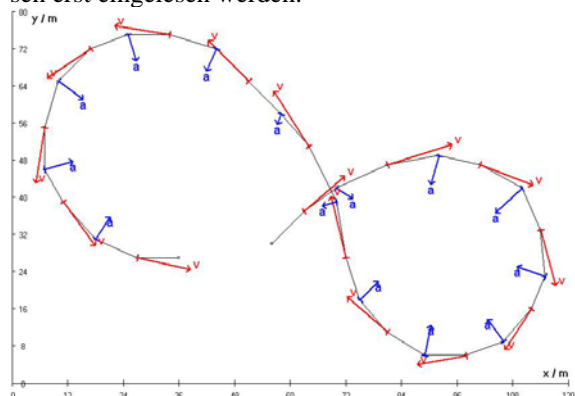


Abb. 7: Bahnkurve einer Fahrradfahrt mit Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren (Vektoren alle 10 Sekunden eingezeichnet) (mit GPS gemessen, in PAKMA dargestellt)

Ganz ohne Computer geht es mit der altmodischen Schwefelplatte, bei der man mit dem Finger Spuren in Schwefelstaub malt [20+24]. Der auf eine schwarze Metallplatte gestreute Schwefelstaub ist negativ aufgeladen. Über einen Sicherheitstrenntrafo legt man an die Platte die Phase des 50 Hz-Wechselstromnetzes. Nun zeichnet man mit einem trockenen Finger zweidimensionale Bahnkurven in den Schwefelstaub, der abwechselnd angezogen und abgestoßen wird. Die Auswertung geschieht am Besten auf einem Papier, nämlich auf dem Ausdruck eines Fotos (siehe Abb. 8). Nachteilig ist, dass die Schüler immer alle Pfeile selbst konstruieren müssen und sie nicht gleichzeitig mit der Bewegung sehen können.



Abb. 8: Auswertung der Fingerbewegung im Schwefelstaub mit Ortsänderungsvektoren und Geschwindigkeitsvektoren

Eine weitere Möglichkeit ist die Aufnahme einer zweidimensionalen Bewegung mit einer Videokamera [25+26], denn die Bilder eines Videos sind stets zweidimensional und haben feste Zeitabstände. So können interessante Bewegungen aus der Alltagswelt analysiert werden. Sinnvoll ist eine automatische Analyse, wie in der Software „measure Dynamics“ (der Firma Phywe) [27]. In dieser Software können die dynamischen Darstellungen nach

Wunsch einfach zu- und abgeschaltet werden oder auch gestempelt werden (siehe Abb. 9).

Die Videos mit den dynamischen Darstellungen können mit der Software recht unterschiedlich im Unterricht eingesetzt werden [28]. Ein Video kann im Unterricht mit der Software manuell oder automatisch analysiert werden, was in Gruppenarbeit im Computerraum oder von einer Person im Fachraum geschehen kann. Anschließend können die gewünschten Darstellungen erstellt oder einfacher aus einer Liste zugeschaltet werden. Da alle Einstellungen mit allen Darstellungen und Daten als ein „Projekt“ abgespeichert werden können, kann für weitere Beispiele auch einfach ein solches Projekt geöffnet werden. Dann kann die Software ohne erneute Analyse das Video gleich mit allen voreingestellten Repräsentationen darstellen. Und schließlich kann das Video auch mit den dynamisch ikonischen Repräsentationen als avi-Datei exportiert werden und so von jedermann ohne die Originalsoftware verwendet und als Lehrvideo gezeigt werden [28] (siehe Abb. 10).

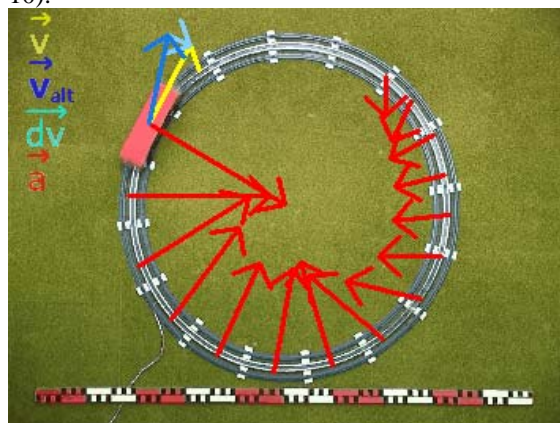


Abb. 9: Gestempelte Beschleunigung bei steigendem Tempo (Video in „measure Dymancis“)

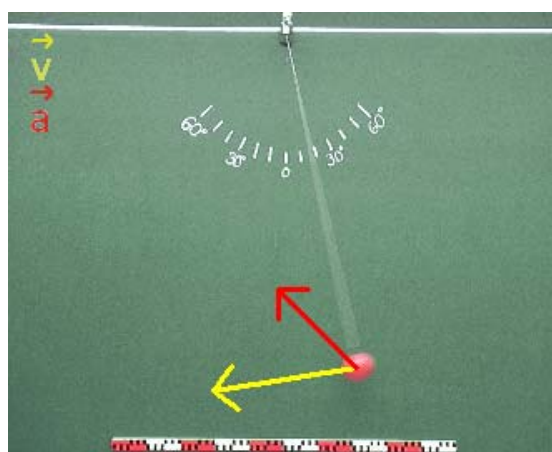


Abb. 10: Fadenpendel kurz vor dem Ruhepunkt als exportierte avi-Datei

1.5 Beispiel Kraft

Auch zum Begriff „Kraft“ gibt es viele stabile Schülervorstellungen, die den physikalischen Vorstellungen widersprechen. In der elften Jahrgangsstufe

wurde mit einer kontinuierlichen Messung mit dem Computer gearbeitet [29]. So ist es nun möglich, zu jedem Zeitpunkt alle interessanten Größen zu sehen und zu vergleichen. Damit kann man zeigen, dass das zweite newtonsche Gesetz $\vec{a} = \vec{F} / m$, also die Proportionalität zwischen Beschleunigung und Kraft, selbst bei veränderlicher Kraft in jedem Augenblick gilt - nicht etwa nur im Mittel -, wobei als veränderliche Kraft die Hangabtriebskraft auf einer kippbaren Luftkissenfahrbahn gewählt wurde (siehe Abb. 11).

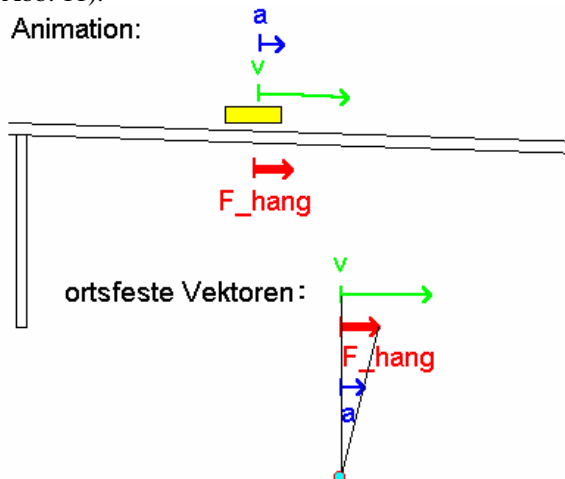


Abb. 11: Animation und ortsfeste Pfeile beim Versuchsablauf mit variabler Hangabtriebskraft (Realmessung und Darstellung in Echtzeit)

In der Vorstellung der Schüler reduziert sich die Aussage des zweiten newtonschen Gesetzes außerdem in der Regel auf das Wirken einer Kraft. Der genannte Versuch lässt sich so erweitern, dass man in einem weiteren Versuchsdurchlauf die Wirkung mehrerer äußerer Kräfte zeigen kann. Hier wurde mit einem zusätzlichen Propeller bzw. mit zusätzlicher Reibung gearbeitet (siehe Abb. 12). Man erkennt in der ikonischen Darstellung, dass die Beschleunigung immer proportional zur vektoriellen Summe aller angreifenden Kräfte ist.

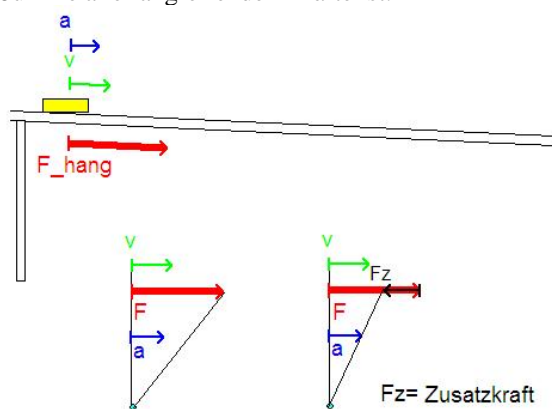


Abb. 12: Animation und ortsfeste Pfeile beim Ablauf mit einer zusätzlichen Kraft (Reibungskraft durch ein Schaumstoffstück)

In der siebten Jahrgangsstufe wurde alltagsnäher und schülernäher mit vielen Schülerübungen gearbeitet (siehe Abb. 13), in denen die Schüler Erfahrungen mit Stößen machen konnten [16]. Daraus wurde dann der Kraftbegriff entwickelt. Zur Veranschaulichung wurden verschiedene Medien eingesetzt, z.B. Simulationen (siehe Abb. 14).



Abb. 13: Schülerübung zum Kugelstoßen zum Sammeln eigener Erfahrungen zu Einwirkungen und Geschwindigkeitsänderungen

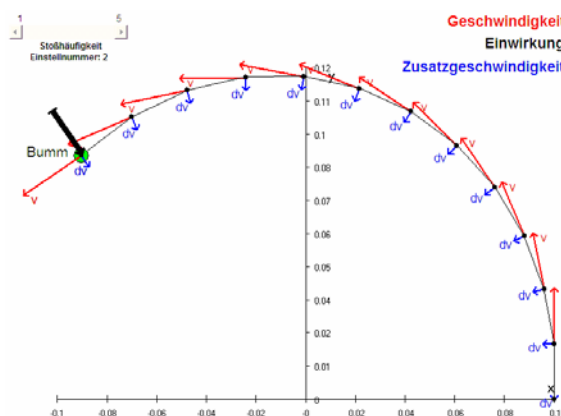


Abb. 14: Simulation einer Kurvenfahrt als Folge ständiger Einwirkungen in Richtung Kurveninneres

Ein weiterer Aspekt, auf den Wert gelegt wurde, ist, dass von Schülern häufig Vorhersagen über relevante Größen und über die sie darstellenden Pfeile mit ihren Richtungen verlangt wurden [30]. Ein anderer Punkt ist der stärkere Einsatz von qualitativen, Verständnis verlangende Aufgaben mit ikonischen Darstellungen.

Um Vorstellungen beim Lernenden noch weiter zu unterstützen, wie Einzelabhängigkeiten untereinander verknüpft sind, kann man Wirkungszusammenhänge in der Dynamik auch dadurch visualisieren, dass in einer Skizze an der Tafel die Beziehungen zwischen den Größen durch Wirkungspfeile wiedergegeben werden [29, S. 8] (siehe Abb. 15).

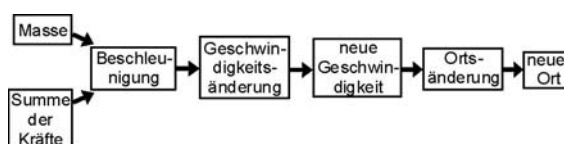


Abb. 15: Wirkungszusammenhang in der Dynamik

Werden solche graphischen Wirkungszusammenhänge nicht auf Papier sondern am Bildschirm mit einer Modellbildungssoftware erstellt (siehe Abb. 16), so können sie automatisch in ein Rechenprogramm umgesetzt werden, das den physikalischen Ablauf berechnet und ihn mit einer Animation und mit dynamisch ikonischen Repräsentationen darstellt. Die Abbildung 17 zeigt ein Beispiel einer solchen Animation. Lernprozesse beim Erstellen des Modells helfen, eigene Vorstellungen über die Zusammenhänge zu klären [1, 29].

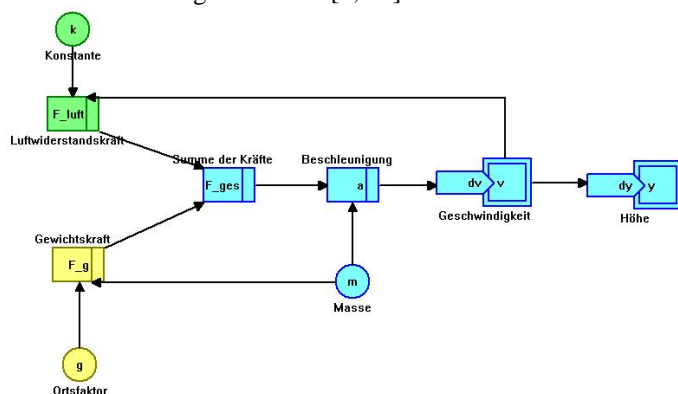


Abb. 16: Modell der Fallbewegung eines Fallkegels (in „VisEdit 1.5d“) [31+32]

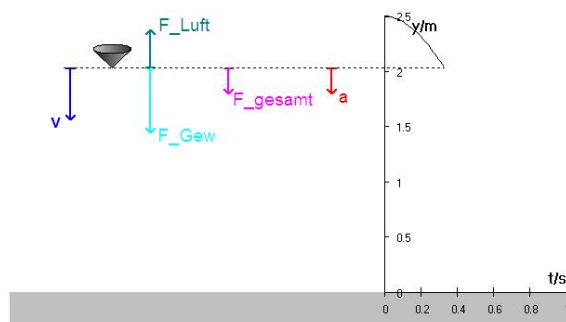


Abb. 17: Modellablauf mit einer Animation

Die Schüler gaben bei den Kräften oft das falsche Vorzeichen, also die falsche Richtung an. Beim Ablauf des Modells wurde das an der Animation sofort deutlich. Da flog ein Fallkegel nach oben statt nach unten oder ein Wagen wurde schneller statt abgebremst. Die Schüler erkannten an der Animation, wo der Fehler steckte, so dass diese sehr hilfreich war, schnell und ohne Grapheninterpretation Fehler im Modell zu erkennen.

2. Evaluation

2.1 Zielsetzung und Ablauf

Unter Berücksichtigung all dieser Aspekte wurde ein Gesamt-Unterrichtskonzept für die elfte Jahrgangsstufe entwickelt [1]. Eine Zielsetzung der summativen Evaluation war festzustellen, inwieweit das gesamte Unterrichtskonzept von Lehrern durchführbar ist und wie diese es einschätzen. Ein weiteres Ziel war, mit Hilfe von Tests festzustellen, inwieweit es Veränderungen in den Schülervorstellungen

gab und diese Veränderungen mit konventionell unterrichteten Klassen zu vergleichen.

Während der Evaluation haben insgesamt 13 Lehrer in 17 Klassen nach diesem Konzept unterrichtet. Für die teilnehmenden Lehrer wurde ein Vorbereitungs- bzw. Begleit-Seminar zu diesem Unterrichtskonzept angeboten [33]. Außerdem erhielten die Lehrer sehr umfangreiche Unterrichtsmaterialien – auf einer CD und in einem Ordner mit über 200 Seiten.

2.2 Erfahrungen der Lehrer

Es zeigte sich, dass das Kinematikkonzept in der vorgeschlagenen Zeit durchführbar ist. Einige Lehrer haben neue gute Ideen mit eingebracht. Letztlich lobten die Lehrer das Konzept, das als inhaltlich geschlossen mit erkennbarem rotem Faden beschrieben wurde. Als besonders positiv wurde genannt, dass hier im Gegensatz zur Einführung in die Kinematik über eindimensionale Bewegungen Ort und Weglänge klar unterscheidbar seien sowie Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsbetrag. Das Herausarbeiten des zentralen Beschleunigungsbegriffes in Abgrenzung zur Geschwindigkeit gelänge hier deutlich besser als beim traditionellen Vorgehen. Insgesamt habe es den meisten Schülern gut gefallen und fast alle Lehrer waren überzeugt, dass die Schüler bei diesem Vorgehen die Begriffe Geschwindigkeit und insbesondere Beschleunigung besser als nach traditionellem Vorgehen verstanden hätten.

Im Gegensatz zur Kinematik wurde die Dynamik in den beteiligten Klassen etwas unterschiedlich unterrichtet. Die Lehrer meinten aber, das Konzept sei insgesamt schlüssiger als konventioneller Unterricht. Es wurde z.B. geschätzt, dass beim zweiten newtonschen Gesetz in der Form $\vec{a} = \Sigma \vec{F} / m$ nun die Summe aller angreifenden Kräfte betont wird, da dies realitätsnäher ist und in Wirklichkeit immer mehrere Kräfte angreifen. Insgesamt meinten die Lehrer, dass die Schüler bei diesem Unterrichtskonzept den Begriff „Kraft“ und insbesondere den Zusammenhang mit der Beschleunigung besser als nach einem traditionellen Vorgehen verstanden hätten. Konkret werde im Unterrichtsgespräch mehr Verständnis gezeigt.

Die Lehrer waren der Meinung, dass die Visualisierungsmöglichkeiten, insbesondere die Darstellung der Größen und ihrer Änderungen durch Vektoren hilfreich seien: Diese anschaulichen Darstellungen auch bei komplexen Versuchen trügen viel zum Verständnis bei und seien Grundlage für gute Diskussionen. Die Darstellungen mit Pfeilen leuchten angeblich allen Schülern sofort ein.

Das Prinzip, von den Schülern konkrete Vorhersagen über relevante Größen und über die sie darstellenden Pfeile mit ihren Richtungen zu fordern, war zunächst für Lehrer und Schüler neu [30]. Anfangs waren die Schüler hier mit Vorhersagen zögerlich, was sich aber änderte. Häufig bildeten sich dann zwei Lager mit zwei unterschiedlichen Vorhersagen.

Nach dem Ablauf waren die Vorhersagen dann eine gute Grundlage für Diskussionen. Nach Lehrerangaben hat das Vorhersagenmachen den Schülern gefallen, wodurch ein sportlicher Aspekt hinzukam.

Die Modellbildung wurde zwar nicht von allen Lehrern unterrichtet. Aber die Lehrer, die Modellbildung einsetzten, waren davon ohne Ausnahme begeistert. Besonders gefiel, dass man die Konsequenzen der gemachten Fehler an der Animation schnell sieht und gemeinsam versuchen kann, dies zu analysieren, ohne dass der Lehrer die Fehler benennt. Gerade die Fehlersuche wurde als wertvoll eingeschätzt. Geschätzt wurde auch, dass man interessante Probleme wie Luftreibung behandeln kann, die ohne Modellbildung nicht so gut zugänglich sind.

2.3 Testergebnisse Kinematik

Neben der Erhebung der Lehrermeinungen wurden auch verschiedene Verständnistests als Vor- und Nachtests durchgeführt, woran die meisten Klassen teilnahmen. Zu den Tests wurden Vergleichswerte von konventionell unterrichteten Klassen erhoben. Aus der Fülle der Daten können hier nur wenige vorgestellt werden.

Bei einer kleinen Aufgabe waren für eine Rennstrecke die Bewegungsrichtung des Autos und die Änderung der Schnelligkeit angegeben und es sollte jeweils der Beschleunigungsvektor eingezeichnet werden, so dass die Schüler nicht „+“ bei Schnellerwerden und „-“ bei Langsamerwerden angeben konnten (siehe Abb. 18). Die beiden Items zur geradlinigen Bewegungen und die drei Items zu Kurvenbewegungen hatten jeweils hohe Reliabilitäten ($\alpha = 0,82$ bzw. $\alpha = 0,91$).

Auf einer Rennstrecke fährt ein Auto unter normalen Bedingungen (schneller werden, abbremsen, abschnittsweise konstante Geschwindigkeit). Die Fahrweise in den einzelnen Streckenabschnitten kannst du der Graphik entnehmen. Zeichne an den fünf markierten Stellen der Bahn den Beschleunigungsvektor ein.

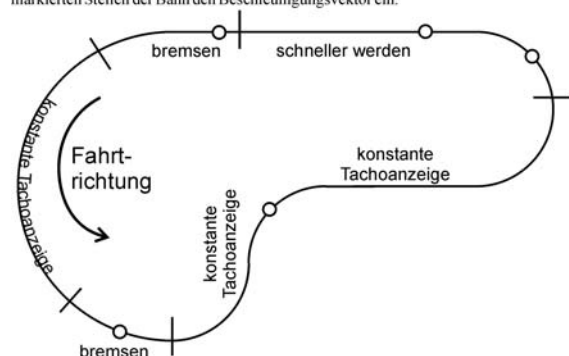


Abb. 18: Testaufgabe zur Beschleunigung bei einer zweidimensionalen Bewegung

Nach einem traditionellen Mechanikunterricht in Jahrgangsstufe 11 gaben bei geradlinigen Bewegungen durchschnittlich 90 % der Schüler eine richtige Lösung an, während bei Kurvenfahrten nur durchschnittlich 9 % die richtige Lösung angaben. Dagegen gaben durchschnittlich 59 % einen Pfeil an, der mehr oder weniger die tangentielle Beschleunigung angibt, wobei man annehmen kann, dass häufig eine „Schneller-/Langsamer-Vorstellung“ in Pfeile umge-

setzt wurde. Bei den geradlinigen Bewegungen konnte kein großer Unterschied zwischen der Treatmentgruppe und der Kontrollgruppe festgestellt werden. Aber bei Kurvenfahrten ergaben sich sehr große und höchst signifikante Unterschiede: 77 % der getesteten Schüler der Treatmentgruppe gaben im Durchschnitt eine richtige Antwort im Gegensatz zu nur 9 % bei der Kontrollgruppe, was eine sehr große Effektstärke von fast 3 ergibt.

Die Frage war, ob die Schüler so viel Verständnis gewonnen haben, dass sie auch Testaufgaben zur eindimensionalen Kinematik mit Grapheninterpretation genauso wie konventionell unterrichtete Klassen lösen können, denn die eindimensionale Kinematik und die Grapheninterpretation kam in diesem Unterrichts-konzept kürzer vor als es in konventionellen Klassen der Fall ist. Oder anders gefragt: Hilft ihnen ihr größeres Verständnis sogar zu besseren Ergebnissen? Dazu wurde ein Test des Amerikaners Ronald Thornton [34-37] übersetzt, neu formatiert und ergänzt [1]. In den Aufgaben war zu beschriebenen eindimensionalen Bewegungen jeweils der passende Zeit-Beschleunigungs-Graph auszuwählen. Die betrachteten sechs Aufgaben haben erfreulicherweise eine hohe Reliabilität ($\alpha = 0,84$). Zu Beginn der elften Jahrgangsstufe werden diese nur von durchschnittlich 12 % der Schüler richtig gelöst, während durchschnittlich 71 % so antworten als wäre nach der Geschwindigkeit gefragt worden. Nach einem traditionellen Unterricht antworten durchschnittlich 47 % der Schüler richtig und 37 % noch entsprechend der Geschwindigkeit. Bei der Treatmentgruppe ist kein signifikanter Unterschied nachweisbar. Dass in diesem Konzept eindimensionale Bewegungen weniger als im herkömmlichen Unterricht behandelt wurden und stattdessen das Verständnis für die Größen an zweidimensionalen Bewegungen geschult wurde, wirkt sich also nicht auf das Lösen der Aufgaben zu eindimensionalen Bewegungen aus. Man kann dies als Erfolg, dass sie nicht schlechter sind, oder als Misserfolg, dass sie nicht besser sind, deuten.

Interessant ist eine Aufgabe zur Beschleunigung beim senkrechten Münzwurf, bei dem natürlicherweise eine Bewegung mit Richtungsumkehr auftritt [38, S. 283]. Sollte das Vorzeichen der Beschleunigung bei gegebenem Koordinatensystem angegeben werden, gaben nur 7 % der Schüler nach dem herkömmlichen Unterricht für alle drei Phasen (hoch, oben, herunter) die richtige Antwort, 10 % wenigstens für die Auf- und Abwärtsphase (siehe Tab. 1). Eine Antwort, die der Änderung des Geschwindigkeitsbetrages entspricht, gaben 36 % der Schüler und 41 % gaben eine der Geschwindigkeit entsprechende Antwort. Hier waren die Schüler der Treatmentgruppe signifikant besser: Beim Vorzeichen gaben 39 % eine richtige Antwortkombination (7 % in der Kontrollgruppe). Interessant sind außerdem die Ergebnisse, wenn die Antworten mit Pfeilen gegeben werden sollten, denn dann haben die Schü-

ler Probleme, für die die Beschleunigung nur eine skalare Größe ist. In der Treatmentgruppe gaben 42% eine richtige Antwortkombination gegenüber 9% in der Kontrollgruppe. Pfeile, die der Geschwindigkeit entsprechen, wurden nur von 27 % angegeben gegenüber 62 % in der Kontrollgruppe.

Untersuchung Antwort	Kontrollgruppe WILHELM 1994 <i>nach trad.</i> U. N = 188 10 Klassen	Treatment WILHELM 2003 <i>nach Konzept</i> N = 151 7 Klassen
Vorzeichen richtig	7 %	39 % *
Vorzeichen fast-richtig	10 %	10 %
+ = schneller - = langsamer	36 %	14 % *
Vorzeichen wie \vec{v}	41 %	25 % *
restliche Vorzeichen	6 %	12 %
Pfeile richtig ↓↓↓	9 %	42 % *
Pfeile fast-richtig ↓0↓	19 %	18 %
Pfeile wie +/- ↓0↑	4 %	7 %
Pfeile wie \vec{v} ↑0↓	62 %	27 % *
restliche Pfeile	6 %	6 %

Tab. 1: Auswahlhäufigkeiten bei der Aufgabe „Beschleunigung beim Münzwurf“ abhängig vom Unterricht (χ^2 -Test, 0,01-Niveau).

So wird insgesamt gefolgert, dass in den nach diesem Unterrichtskonzept unterrichteten Klassen mehr Schüler ein physikalisch angemessenes Beschleunigungskonzept erreicht haben und eine Vorstellung von der Richtung der Beschleunigung haben.

2.4 Lehrererhebung zu Schülervorstellungen in der Kinematik

In einer anderen Untersuchung wurde ermittelt, inwieweit Physiklehrer typische Schülerfehlvorstellungen kennen [39]. Mit staatlicher Unterstützung wurde versucht, dass möglichst alle Physik-Gymnasiallehrer in Unterfranken einen Fragebogen ausfüllen. Auf diese Weise antworteten 244 unterfränkische Physik-Gymnasiallehrer von 41 Gymnasien. Bezüglich Beschleunigungsgraphen bei eindimensionalen Bewegungen wählte die Hälfte der Lehrer richtigerweise die Antwort, dass nach dem Unterricht nur die Hälfte der Schüler den richtigen Graph zu einer beschriebenen Bewegung angeben kann. Ganz anders sieht es aber bei zweidimensionalen Bewegungen aus. Entsprechend den Erhebungen geben nach herkömmlichem Unterricht ca. 12 % der Schüler bei Kurvenfahrten mit konstantem Tempo die Beschleunigung radial nach innen an. Dies wird aber nur von 4 % der Lehrer angegeben. 49 % mei-

nen, dass dies 50 bis 85 % richtig angeben und 7 % schätzten sogar über 85 %.

Die Lehrer kennen also die Schwierigkeiten im Umgang mit Graphen, haben aber keine Vorstellung von den Problemen bei zweidimensionalen Bewegungen, die nach einem herkömmlichen Unterricht vorhanden sind. Offensichtlich denken die Lehrer, die Schüler könnten ihr Wissen über eindimensionale Bewegungen auf zwei Dimensionen erweitern. Das ist nicht der Fall. Eine eindimensionale Behandlung der Kinematik steht sogar dem Verstehen bei zwei Dimensionen im Wege. Umgekehrt ließe sich aber leicht von zwei Dimensionen auf eine reduzieren.

2.5 Testergebnisse Dynamik

Zum Abprüfen des Verständnisses des newtonschen Kraftkonzeptes wurde der „Force Concept Inventory“, kurz FCI, verwendet [40-45, 12]. Der Test besteht aus Denkaufgaben zur newtonschen Mechanik, bei denen Antwortalternativen auf bekannte Schülervorstellungen abgestimmt sind und eine Entscheidung zwischen dem newtonschen Konzept und den Alltagsvorstellungen erzwungen wird. Der Test beansprucht für sich, das newtonsche Kraftkonzept mit allen drei newtonschen Gesetze für ein- und zweidimensionale Bewegungen abzutesten.

Der Test wurde im Gegensatz zu den USA in Deutschland bisher nur wenig eingesetzt, während er von Wilhelm erstmals einer größeren Anzahl von Schülern gestellt wurde [46]. Es haben 13 herkömmlich unterrichtete elfte Klassen aus fünf bayerischen Gymnasien die erste Version des FCI-Tests am Schuljahresbeginn und im letzten Schuljahresdrittel durchgeführt.

Herkömmlich unterrichtete Schüler lösen am Beginn der elften Jahrgangsstufe 28 % der 29 qualitativen Items richtig und nach dem Mechanikunterricht 41%, was ein relativer Zugewinn von nur 18 % ist. Besonders geringe relative Zugewinne liegen bei den Subskalen „zweites newtonsches Axiom“ und „Superposition“ vor. Hier macht sich auch bemerkbar, dass im herkömmlichen Unterricht fast nur eindimensionale Bewegungen betrachtet werden. Korrelationen, Faktorenanalyse und Reliabilitäten bestätigen allerdings die in der Literatur geäußerte Kritik an dem FCI-Test, d.h. an der Einteilung in die einzelnen Subskalen [42, 45, 47-50].

In der Treatmentgruppe wurden im Nachtest 53 % der Aufgaben richtig gelöst, was ein höchst signifikanter Unterschied ist und eine relativ hohe Effektstärke von $d = 0,77$ ergibt [46]. Auch der relative Zugewinn der Schüler ist mit 31 % höchst signifikant höher als in der Vergleichsgruppe mit 18 %. Der Anteil der Schüler, die mehr als ca. 60 % richtig beantworteten (17 oder mehr der 29 Items), was als Schwelle für ein newtonsches Verständnis angesehen werden kann, liegt mit 42 % deutlich höher als in der Vergleichsgruppe mit 16 %. Der größte relative Zugewinn wurde dabei in der Subskala „drittes

newtonsches Axiom“ erreicht. Die größte Effektstärke im Vergleich zur Vergleichsgruppe wurde in der Subskala „Kraftverständnis“ erzielt. Damit kann man sagen, dass deutlich mehr Schüler der Treatmentgruppe ein qualitatives Verständnis des newtonschen Kraftbegriffes erreicht haben.

Betrachten wir noch die Items, bei welchen sich die relativen Zugewinne bei Kontroll- und Treatmentgruppe um mehr als 20 Prozentpunkte unterscheiden. Das sind fast alle Items zum dritten newtonschen Gesetz, das auch anders als herkömmlich unterrichtet wurde [51]. Außerdem wurden alle Items zur Kinematik, die Items zu zweidimensionalen Bewegungen, Items zu vektoriellen Summe von Kräften und Wurfbewegungen besser gelöst, was jeweils auf das Unterrichtskonzept zurückgeführt werden konnte.

Zum Verständnis des ersten und zweiten newtonschen Gesetzes bei eindimensionalen Bewegungen wurden ähnliche Testaufgaben wie in der eindimensionalen Kinematik gestellt [1, 34]. Die Schüler sollten in mehreren Items jeweils die Kraft herausuchen, die eine beschriebene Bewegung bewirkt. Reliabilitäten und Faktorenanalyse sprechen für diesen Test (siehe Tab. 2). Waren die Kräfte mit Worten beschrieben, gaben nur durchschnittlich 32% der herkömmlich unterrichteten Schüler nach dem Mechanikunterricht der Oberstufe eine richtige Antwort. Dagegen gaben noch durchschnittlich 51 % der Schüler eine Antwort, bei der sich die Kraft wie die Geschwindigkeit verhält. In der Treatmentgruppe haben mit 39 % der Schüler signifikant mehr Schüler als in der Kontrollgruppe entsprechend der newtonschen Vorstellung geantwortet. Aufgrund der sehr hohen Standardabweichung ergibt sich trotzdem nur eine kleine Effektstärke.

Aufgabengruppe	Kontrolle 188 Schüler	Treatment 211 Schüler	Effektstärke
7 Items zu Kräften (Texte) ($\alpha = 0,9$)	richtig: 32 % F wie v: 51 %	richtig: 39 %* F wie v: 29 %	0,20
7 Items zu Kräften (Grafen) ($\alpha = 0,9$)	richtig: 21 % F wie v: 65 %	richtig: 34 %* F wie v: 51 %	0,34

Tab. 2: Ergebnisse bei Aufgaben zur Kraft bei eindimensionalen Bewegungen ($p = 0,05$)

Werden dagegen die möglichen Antworten statt als Text mit Zeit-Kraft-Graphen angegeben, geben deutlich weniger Schüler eine newtonsche Antwort. Nach einem herkömmlichen Unterricht sind es nur 21 %. Der Anteil der „aristotelischen“ Antworten liegt dagegen im Durchschnitt bei 65 %. Obwohl die Schüler bei Zeit-Geschwindigkeits-Graphen bewiesen haben, dass sie Graphen lesen können, ist das Ergebnis hier deutlich schlechter als beim Antwortformat in Textform. Die Kombination aus Grapheninterpretation und Überlegung der richtigen Kraft ist offensichtlich deutlich schwerer als jede dieser Aufgaben allein. In der Treatmentgruppe haben mit 34 % ebenfalls signifikant mehr Schüler als in der Kontrollgruppe entsprechend der newtonschen Vorstel-

lung geantwortet. Allerdings ist die Effektstärke mit 0,34 nur schwach.

Schüler wurden auch gebeten, nach dem Dynamikunterricht Concept Maps, also Begriffsnetze, mit vorgegebenen kinematischen und dynamischen Begriffen zu erstellen [1, 29]. Aus den einzelnen Concept Maps wurden so genannte Modalmaps erstellt, die die häufigsten Verbindungen der Gruppe wiedergeben [52].

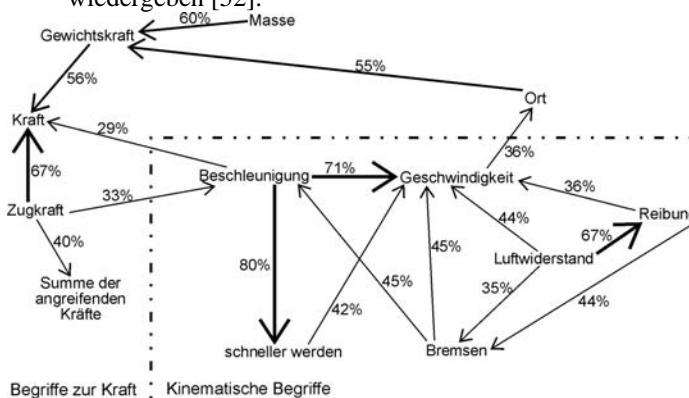


Abb. 19: Modalmap von drei Klassen nach traditionellem Unterricht

Bei den traditionell unterrichteten Schülern wurde als zentralste Größe die Geschwindigkeit verwendet, während die Beschleunigung erst an zweiter Stelle kommt (siehe Abb. 19). Die Kraftgrößen und die Bewegungsgrößen sind wenig miteinander vernetzt, wobei Luftwiderstand und Reibung aber anscheinend nicht als Kräfte angesehen werden, sondern im kinematischen Zusammenhang mit Geschwindigkeit verwendet werden. Wenige geben richtig an, welche Größen auf die Beschleunigung einwirken. Dagegen findet sich bei einem Drittel der Schüler die falsche Aussage „Beschleunigung wirkt auf Kraft“ und bei einem Fünftel „Masse beeinflusst Kraft“. D.h. diese Schüler haben das zweite newtonsche Gesetz in der Form $F = m \cdot a$ nicht verstanden, sondern nur eine Formel gelernt.

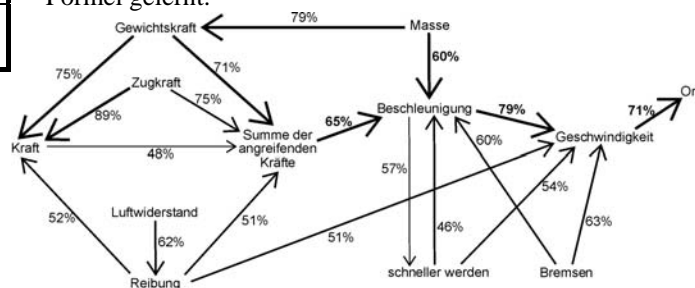


Abb. 20: Modalmap von drei Klassen nach dem Unterricht entsprechend dem Konzept einschließlich Modellbildung

Die Klassen, in denen nach dem Gesamtunterrichtskonzept einschließlich Modellbildung unterrichtet wurde, entwarfen am Schuljahresende bessere Concept Maps als konventionell unterrichtete Klassen (siehe Abb. 20). So hat der Begriff „Summe der angreifenden Kräfte“ eine hohe Bedeutung. Der zentralste Begriff ist die Beschleunigung, während

z.B. die Geschwindigkeit nicht mehr als so zentraler Begriff gesehen wird. Reibung und Luftwiderstand werden hier als spezielle Kräfte angesehen. Nicht nur physikalisch falsche Aussagen kommen deutlich seltener vor. Die aus physikalischer Sicht wesentlichen Verbindungen kommen viel häufiger vor, wie z.B. $\Sigma F \rightarrow a$, $m \rightarrow a$ oder $a \rightarrow v$. Vor allem, wenn man schaut, wo die zentrale newtonsche Argumentationskette ganz vertreten ist, findet man große Unterschiede (siehe Tab. 3). Offen bleibt allerdings noch, ob es sich bei dem Wissenszuwachs, der sich in den Modalmaps zeigte, um ein deklaratives Wissen, also Informationswissen, handelt oder um operatives Wissen und Verständnis, wie es die Schüler selbst behaupteten. Man kann aber vermuten, dass die Schüler der Treatmentklassen ein größeres strukturelles Verständnis erreichten als herkömmlich unterrichtete bayerische Schüler.

	Nach trad. Unterricht ohne Modellbildung (drei Klassen, 55 Schüler)	Nach dem Konzept mit Modellbildung (drei Klassen, 63 Schüler)
$\Sigma F \rightarrow a$	9%	65%
$m \rightarrow a$	22%	60%
$a \rightarrow v$	71%	79%
$v \rightarrow x$	36%	71%
$\Sigma F \rightarrow a \rightarrow v \rightarrow x$	4%	46%
$\Sigma F \rightarrow a \rightarrow v \rightarrow x$ + $m \rightarrow a$	0%	38%

Tab. 3: Vergleich der Häufigkeiten wichtiger Verbindungen in den Concept Maps

2.6 Lehrerhebung zu Schülervorstellungen in der Dynamik

In der Lehrerhebung fanden sich auch bei Items zur Kraft zu positive Einschätzungen der Lehrer [39]. Nur 30 % der Lehrer geben richtig an, dass nach dem Unterricht nur ein Drittel der Schüler den richtigen Kraft-Graphen zu einer beschriebenen Bewegung angeben kann. Die anderen Lehrer gehen von viel höheren Anteilen aus. Die Hälfte der Lehrer meint fälschlich, es sind zwei Drittel der Schüler oder mehr Schüler, die es richtig machen. Bei der Golfballaufgabe des FCI-Tests (siehe Abschnitt 2.5) geben ca. 80 % der Schüler am Schuljahresbeginn und ca. 70 % am Schuljahresende eine falsche Antwort mit einer Abschlagskraft an, was aber nur 5 % der Lehrer vermuten. 29 % der Lehrer geben für den Schuljahresbeginn die richtige Antwort, aber eine sehr optimistische für das Schuljahresende. Weitere 62 % geben nicht nur fürs Schuljahresende sogar für den Schuljahresanfang optimistischere Ergebnisse an. 44 % meinen sogar, dass nur noch 10 % der Schüler am Schuljahresende so falsch antworten. Die FCI-Aufgabe, bei der ein Lastwagen frontal mit einem Kleinwagen zusammenstößt, wird von ca. 10% der Schüler am Schuljahresbeginn und von ca.

20 % am Schuljahresende richtig beantwortet. So vermuten es aber nur 9 % der Lehrer. 36 % vermuten zwar solche Werte für den Schuljahresanfang, aber viel bessere Ergebnisse für das Schuljahresende. Die restlichen 53 % geben für den Jahresanfang und das Ende viel bessere Werte an.

Dass Schüler mit typischen Schülervorstellungen in den Physikunterricht kommen, ist vielen Lehrern bekannt. Auffällig ist aber, dass die Lehrer mehrheitlich das Auftreten der Schülerfehlvorstellungen sowohl am Schuljahresanfang als auch an Schuljahresende für seltener halten als es die Ergebnisse in empirischen Schülertests zeigen. Insbesondere bei der Situation nach dem Physikunterricht sind die Lehrer optimistischer, als es tatsächlich der Fall ist. Diese Diskrepanz lässt sich aber auch mit der Erklärungsvielfalt bei Schülern [53], also dem Nebeneinander verschiedener Vorstellungen erklären. Sicherlich werden aber auch zu wenig solche qualitativen Aufgaben im Unterricht gestellt und zu viel Rechenaufgaben, so dass die Lehrer diese Probleme ihrer Schüler nicht bemerken.

2.7 Kurzevaluation in der siebten Jahrgangsstufe

Der anfangs erwähnt Unterricht in der siebten Jahrgangsstufe wurde bisher nur in einer siebten Klasse durchgeführt [16]. Er hat den Schülern viel Spaß gemacht und es entstand der Eindruck, dass sie die Grundideen verstehen. Geschwindigkeit war für sie ein Pfeil und Beschleunigung bedeutet, dass er sich ändert, nämlich länger wird, kürzer wird oder die Richtung ändert. Die Lehrer der Schule waren auch sehr an dem Konzept interessiert. Schließlich wurde ein Test mit qualitativen Verständnisaufgaben durchgeführt, den die Schüler sehr gut lösten. Einige Aufgaben bei zweidimensionalen Bewegungen wurden sogar besser als von herkömmlich unterrichteten Elftklässlern gelöst.

3. Ausblick

Deshalb planen Wiesner, Hopf und Waltner von der LMU München und Wilhelm von der Universität Würzburg zusammen ein gemeinsames Forschungsprojekt in der Jahrgangsstufe 7. Auch hier sollen von Anfang an zweidimensionale Bewegungen betrachtet werden und die Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$ betont werden, die eine geeignete Elementarisierung der Beschleunigung ist. Die Darstellung der dynamischen Pfeile soll mit „measure Dynamics“ geschehen. Die Kraft wird dynamisch über Stoßfahrten eingeführt.

Zum Design der Studie: Von den Osterferien bis zu den Sommerferien 2008 unterrichten Lehrer die Mechanik in der siebten Jahrgangsstufe in ihrer gewohnten Form, ohne das Konzept zu kennen (siehe Abb. 21, rotes Feld). Im Folgejahr unterrichten dieselben Lehrer zur gleichen Jahreszeit nach dem veränderten Konzept.

2008:											
1	2	3	Kontrollgruppe				8	9	10	11	12
Fragebögen		Materialienentwicklung					Erprobungsgruppe				
2009:											
Schulung		Treatmentgruppe									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Abb. 21: Zeitplan des geplanten Forschungsprojektes

Prätest, Posttest und Follow-Up-Test werden jeweils so durchgeführt, dass die Lehrer die Tests nicht sehen. Vorher müssen die kognitiven und nicht-kognitiven Tests entwickelt werden und Materialien erstellt werden, insbesondere ein eigenes Schulbuch für die Schüler. Um die Lehrermaterialien und das Schülerbuch vorher auf Unterrichtstauglichkeit zu testen, soll eine Erprobungsgruppe von Lehrern im Herbst 2008 in einer anderen Stadt danach unterrichten, um festzustellen, was noch fehlt oder zu ändern ist (siehe Abb. 21, grün).

4. Zusammenfassung

Mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen am Computer, insbesondere den Vektorpfeilen, sind neue Elementarisierungen möglich – und zwar in jeder Jahrgangsstufe. So ist die Vereinfachung des Geschwindigkeits- und Beschleunigungsbegriffes durch die Darstellung mit Pfeilen eine bessere Elementarisierung als die Reduzierung auf eindimensionale Bewegungen. Außerdem ermöglichen diese Darstellungsformen neue Unterrichtsstrategien, wie z.B. das häufige Fordern von Vorhersagen. Die entwickelten Gesamtkonzepte werden von Lehren sehr positiv beurteilt und haben das Verständnis bei den Schülern gefördert.

Überblickt man die dargestellte Forschung und sieht sie im Rahmen sowohl der Vorarbeiten als auch des geplanten neuen Forschungsprojektes, kann man diese andauernde Weiterentwicklung als Design-Based Research auffassen [54+55].

5. Literatur

- [1] WILHELM, T. (2005): Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung, Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 46, Logos-Verlag, Berlin, ISBN 3-8325-1046-X
- [2] WILHELM, T. (2007): Vektorverständnis und vektoriell Kinematikverständnis von Studienanfängern – In: Nordmeier, V.; Oberländer, A.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Regensburg 2007, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2007, ISBN 978-3-86541-255-3
- [3] JUNG, W.; REUL, H.; SCHWEDES, H. (1977): Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3 – 6, Beiträge zur Methodik und Didaktik der Physik, Diesterweg, Frankfurt am Main
- [4] JUNG, W. (1980): Mechanik für die Sekundarstufe I, Verlag Moritz Diesterweg, Frankfurt, Berlin, München
- [5] SPILL, L.; WIESNER, H. (1988): Zur Einführung des dynamischen Kraftbegriffs in der Sekundarstufe I. Bericht über Unterrichtsversuche - In: Kuhn, W. (Hrsg.): Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1988 Gießen (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 412 – 417
- [6] WIESNER, H. (1994): Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Mechanik. Schüler-vorstellungen, Lernschwierigkeiten und fachdidaktische Forschungen – In: Physik in der Schule 32, Nr. 4, S. 122 – 127
- [7] WODZINSKI, R.; WIESNER, H. (1994): Einführung in die Mechanik über die Dynamik. Beschreibung von Bewegungen und Geschwindigkeitsänderungen – In: Physik in der Schule 32, Nr. 5, S. 164 - 169
- [8] WODZINSKI, R.; WIESNER, H. (1994): Einführung in die Mechanik über die Dynamik. Zusatzbewegung und Newtonsche Bewegungsgleichung – In: Physik in der Schule 32, Nr. 6, S. 202 – 207
- [9] WODZINSKI, R. (1996): Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht, Lit Verlag, Münster
- [10] SCHECKER, H.; NIEDDERER, H.; BETHGE, T. (1989): Computerunterstützte Modellbildung im Physikunterricht - In: Kuhn, W. (Hrsg.): Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1989 Bonn (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 360 - 364
- [11] SCHECKER, H. (1993): The Didactic Potential of Computer Aided Modeling for Physics Education – In: Ferguson, D. L. (Hrsg.): Advanced educational technologies for mathematics and science NATO ASI Series, Serie F: Computer and Systems Sciences, Vol. 107, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, S. 165 - 207
- [12] GERDES, J.; SCHECKER, H. (1998): Physiklernen mit Modellbildungssystemen – Erste Ergebnisse - In: Behrendt, H. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Potsdam, September 1997, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 227 – 229
- [13] SCHECKER, H. (1998): Physik-Modellieren. Grafikorientierte Modellbildungssysteme im Physikunterricht, Klett-Verlag, Stuttgart
- [14] SCHECKER, H.; KLIEME, E.; NIEDDERER, H.; EBACH, J.; GERDES, J. (1999): Physiklernen mit Modellbildungssystemen. Förderung physikalischer Kompetenz und systemischen Denkens durch computergestützte Modellbildungssysteme

- me, Abschlussbericht zum DFG-Projekt, Institut für Didaktik der Physik an der Universität Bremen und Max-Planck-Institut für Bildungsforschung Berlin
- [15] WILHELM, T.; HEUER, D. (2002): Fehlvorstellungen in der Kinematik vermeiden - durch Beginn mit der zweidimensionalen Bewegung - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 51, Nr. 7, S. 29 - 34
- [16] SCHÜLLER, F.; WILHELM, T. (2008): Mechanik in Jahrgangsstufe 7 - Zweidimensional und multimedial – In: Nordmeier, V.; Oberländer, A.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, auf dieser CD
- [17] REUSCH, W.; GÖBWEIN, O.; KAHMANN, C.; HEUER, D. (2000): Mechanikversuche mit der PC-Maus – Ein präziser Low-Cost-Bewegungssensor – In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 49, Nr. 6, S. 5 – 8
- [18] KIRCHER, E., GIRWIDZ, R.; HÄUBLER, R. (Hrsg.) (2007): Physikdidaktik. Theorie und Praxis, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- [19] WILHELM, T. (2006): Zweidimensionale Bewegungen - Vergleich von vier verschiedenen Möglichkeiten der Messwerterfassung und Evaluationsergebnisse eines Unterrichtseinsatzes – In: Nordmeier, V.; Oberländer, A. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Kassel 2006, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [20] WILHELM, T.; KOCH, C. (2004): Die alte Schwefelplatte neu genutzt. Qualitative Schülerübungen zur Kinematik – In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 53, Nr. 2, S. 32 – 37
- [21] REUSCH, W.; GÖBWEIN, O.; KAHMANN, C.; HEUER, D. (2000): Computerunterstützte Schülerversuche zur Mechanik mit der Computermaus als Low-Cost-Bewegungssensor – In: Physik in der Schule 38, Nr. 4, S. 269 – 273
- [22] BACKHAUS, U. (2005): Alltagsmechanik mit GPS – In: Nordmeier, V.; Oberländer, A. (Hrsg.): Didaktik der Physik – Berlin 2005, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [23] BRAUN, M. (2007): Das GPS-System - Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten im Physikunterricht, Staatsexamensarbeit, downloadbar unter: <http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/GPS.htm>
- [24] BERGMANN, L. (1952): Der Nachweis elektrischer Wechselspannung mittels Staubfiguren - In: Praxis der Physik / Chemie und Photographie im Unterricht der Schulen 1, Aulis Verlag Frankenberg/Eder, S. 6 – 9
- [25] WILHELM, T.; GEBNER, T.; SULEDER, M.; HEUER, D. (2003): Sportaktivitäten vielseitig analysieren und modellieren – Video und Messdaten multimedial aufbereitet - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 52, Nr. 2, S. 23 - 30
- [26] GRÖBER, S.; POTH, T.; WILHELM, T. (2005): Zweidimensional-vektorielle Kinematik mit Videoanalyse - Vorstellung eines Unterrichtsganges im MultiMechanics Project - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 54, Nr. 8, S. 41 - 47
- [27] BENZ, M.; WILHELM, T. (2008): measure Dynamics – Ein Quantensprung in der digitalen Videoanalyse – In: Nordmeier, V.; Oberländer, A.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, auf dieser CD
- [28] MICHEL, C.; WILHELM, T. (2008): Lehrvideos mit dynamisch ikonischen Repräsentationen zu zweidimensionalen Bewegungen – In: Nordmeier, V.; Oberländer, A.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, auf dieser CD
- [29] WILHELM, T.; HEUER, D. (2002): Interesse fördern, Fehlvorstellungen abbauen - dynamisch ikonische Repräsentationen in der Dynamik - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 51, Nr. 8, S. 2 - 11
- [30] WILHELM, T.; HEUER, D. (2006): Vorhersagen - ein Mittel zur Intensivierung von Lernprozessen – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 55, Nr. 4, S. 25 – 28
- [31] WILHELM, T. (2000): Der alte Fallkegel - modern behandelt - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 49, Nr. 7, S. 28 – 31
- [32] WILHELM, T. (2002): Beispiele für Freihandversuche zu ausgewählten Themen des Physikunterrichts am Gymnasium (Physik), Beiträge zur Gymnasialpädagogik 26, herausgegeben von der Referendarvertretung im Bayerischen Philologenverband, München
- [33] WILHELM, T. (2007): Konzeption einer erfolgreichen Lehrerfortbildung - In: Höttecke, D. (Hrsg.): Naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich, Jahrestagung der GDGP in Bern 2006, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 27, Lit-Verlag, Münster, S. 530 – 532
- [34] THORNTON, R. (1996): Using Large-Scale Classroom Research to Study Conceptual Learning in Mechanics and to Develop New Approaches to Learning – In: Tinker, R. F. (Hrsg.): Microcomputer-Based Labs: Educational Research and Standards, NATO ASI Series, Serie F: Computer and Systems Sciences, Vol. 156, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, S. 89 - 114
- [35] THORNTON, R. (1990): Tools for Scientific Thinking: Learning Physical Concepts with Real-Time Laboratory Measurement Tools - In: Redish, E. F.; Risley, J. S. (Hrsg.): The Conference on Computers in Physics Instruction: proceedings, Addison-Wesley Publishing Company, S. 177 - 189

- [36] THORNTON, R. (1992): Enhancing and Evaluating Students' Learning of Motion Concepts - In: Tiberghien, A.; Mandl, H. (Hrsg.): Intelligent Learning Environments and Knowledge Acquisition in Physics, NATO ASI Series, Serie F: Computer and Systems Sciences, Vol. 86, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, S. 265 - 283
- [37] THORNTON, R.; SOKOLOFF, D. (1990): Learning motion concepts using real-time micro-computer-based laboratory tools - In: American Journal of Physics 58, Nr. 9, S. 858 - 867
- [38] HEUER, D.; WILHELM, T. (1997): Aristoteles siegt immer noch über Newton. Unzulängliches Dynamikverstehen in Klasse 11 - In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 50, Nr. 5, S. 280 - 285
- [39] WILHELM, T. (2008): Vorstellungen von Lehrern über Schülervorstellungen - In: Höttecke, D. (Hrsg.): Kompetenzen, Kompetenzmodelle, Kompetenzentwicklung, Jahrestagung der GDPC in Essen 2007, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 28, Lit-Verlag, Münster, S. 44 - 46
- [40] HESTENES, D.; WELLS, M.; SWACKHAMER, G. (1992): Force Concept Inventory - In: The physics teacher 30, S. 141 - 158
- [41] GIRWIDZ, R.; KURZ, G.; KAUTZ, C. (2003): Zum Verständnis der newtonschen Mechanik bei Studienanfängern - der Test 'Force Concept Inventory - FCI' - In: Nordmeier, V. (Red.): Didaktik der Physik. Beiträge der Frühjahrstagung der DPG - Augsburg 2003, Berlin
- [42] SCHECKER, H.; GERDES, J. (1999): Messung der Konzeptualisierungsfähigkeit in der Mechanik - Zur Aussagekraft des Force Concept Inventory - In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 5, Heft 1, S. 75 - 89
- [43] HAKE, R. (1998): Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses - In: American Journal of Physics 66, Nr. 1, S. 64 - 74
- [44] SAVINAINEN, A.; SCOTT, P. (2002): The Force Concept Inventory: a tool for monitoring student learning - In: Physics Education 37 (1), S. 45 - 52
- [45] GERDES, J.; SCHECKER, H. (1999): Der Force Concept Inventory - Ein diagnostischer Test zu Schülervorstellungen in der Mechanik - In: Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht 52, Heft 5, S. 283 - 288
- [46] WILHELM, T. (2005): Verständnis der newtonschen Mechanik bei bayerischen Elftklässlern - Ergebnisse beim Test 'Force Concept Inventory' in herkömmlichen Klassen und im Würzburger Kinematik-/Dynamikunterricht - In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule PhyDid 2/4, 2005, www.phydid.de, S. 47 - 56
- [47] HUFFMAN, D.; HELLER, P. (1995): What Does the Force Concept Inventory Actually Measure? - In: The Physics Teacher 33, S. 138 - 143
- [48] HESTENES, D.; HALLOUN, I. (1995): Interpreting the Force Concept Inventory. A Response to March 1995 Critique by Huffman and Heller - In: The Physics Teacher 33, S. 502 + 504 -506
- [49] HELLER, P.; HUFFMAN, D. (1995): Interpreting the Force Concept Inventory. A Reply to Hestenes and Halloun - In: The Physics Teacher 33, S. 503 + 507 - 511
- [50] MCCULLOUGH, L.; MELTZER, D. (2001): Differences in male/female response patterns on alternative-format versions of FCI items - In Franklin, S.; Marx, J.; Cummings, K. (Hrsg.): Proceedings of the 2001 Physics Education Research Conference, Rochester, NY, S. 103 - 106
- [51] WILHELM, T.; HEUER, D. (2004): Experimente zum dritten Newtonschen Gesetz zur Veränderung von Schülervorstellungen - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 53, Nr. 3, 2004, S. 17 - 22
- [52] PEUCKERT, J.; FISCHLER, H. (2000): Concept Maps als Diagnose- und Auswertungsinstrument in einer Studie zur Stabilität und Ausprägung von Schülervorstellungen - In: Fischler, H.; Peuckert, J. (Hrsg.): Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie, Studien zum Physiklernen, Band 1, Logos-Verlag, Berlin, S. 91 - 116
- [53] HARTMANN, S. (2004): Erklärungsvielfalt, Studien zum Physiklernen, Band 37, Logos-Verlag, Berlin
- [54] HOPF, M.; WIESNER, H. (2008): Design-Based Research - In: Höttecke, D. (Hrsg.): Kompetenzen, Kompetenzmodelle, Kompetenzentwicklung, Jahrestagung der GDPC in Essen 2007, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 28, Lit-Verlag, Münster, S. 68 - 70
- [55] HOPF, M.; SEN, A. I.; WALTNER, C.; WIESNER, H. (2008): Dynamischer Zugang zur Mechanik - In: Nordmeier, V.; Oberländer, A.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media - LOB.de, Berlin, auf dieser CD

6. Adresse

AR Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut der Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, Tel. 0931/888-5788, wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de, www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm