

Die folgenden Seiten sind so in einem DPG-Tagungsband erschienen und dürfen auch unter www.thomas-wilhelm.net wiedergegeben werden.

Die exakte Quellenangabe des Artikels ist:

WILHELM, T.

Zweidimensionale Bewegungen - Vergleich von vier verschiedenen Möglichkeiten der Messwerterfassung und Evaluationsergebnisse eines Unterrichtseinsatzes

NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Kassel 2006, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2006, ISBN 3-86541-190-8, ISBN-13: 9783865411907

Zweidimensionale Bewegungen – Vergleich von vier verschiedenen Möglichkeiten der Messwerterfassung und Evaluationsergebnisse eines Unterrichtseinsatzes

Thomas Wilhelm

Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Am Hubland, 97074 Würzburg

Kurzfassung

Aus einem Überblick über Schülervorstellung zu den kinematischen Begriffen folgt die Notwendigkeit, den vektoriellen Charakter der kinematischen Größen herauszustellen, wozu die Betrachtung zweidimensionaler Bewegungen nötig ist. Deshalb werden vier verschiedene Messwerterfassungsmöglichkeiten für zweidimensionale Bewegungen vorgestellt: 1. Die PC-Maus bzw. das Graphiktableau, 2. die Videoanalyse, 3. der GPS-Empfänger und 4. die „Spurenplatte“. Die vier Messvarianten werden mit ihren Vor- und Nachteilen verglichen.

In einem Evaluationsprojekt wurden in 17 Klassen der elften Jahrgangsstufe des Gymnasiums die kinematischen Größen anhand zweidimensionaler Bewegungen eingeführt. Es wird von Lehrererfahrungen und von Testergebnissen der Studie berichtet.

1. Einführung

Schülervorstellungen zu den kinematischen Begriffen sind vielfach erforscht und bekannt. Eine genaue Betrachtung zeigt, dass diese durch die Behandlung eindimensionaler Bewegungen kaum verändert, sondern eher verstärkt oder sogar erst erzeugt werden [1].

Im traditionellen Unterricht wird z.B. oft nicht klar zwischen Ort und Weglänge unterschieden. Da sich hier alle Körper in der Regel eindimensional in positive Koordinatenrichtung bewegen und beim Nullpunkt beginnen, haben der Ort und die zurückgelegte Weglänge identische Werte. Erst bei zweidimensionaler Bewegung kann hier sinnfällig unterschieden werden: Ort nennt man einen Punkt im Bezugssystem. Weglänge nennt man die Länge der Bahnkurve.

Im Alltag wird außerdem Geschwindigkeit (englisch: velocity) auf eine positive skalare Größe (Betragsgröße) reduziert, die man mit Schnelligkeit oder Tempo (englisch: speed) bezeichnen könnte. Beim physikalischen Geschwindigkeitsbegriff handelt es sich dagegen um eine vektorielle Größe, die Schnelligkeit und Bewegungsrichtung angibt. Bei eindimensionalen Bewegungen äußert sich der Richtungscharakter der Geschwindigkeit nur noch im Vorzeichen.

Die Schüler meinen aus dem Alltagsgebrauch auch bereits zu wissen, was Geschwindigkeit ist und im Unterricht nur die entsprechenden Formeln dazu lernen zu müssen. So wird auch die Richtung nur der „eigentlichen“ Geschwindigkeit, die für die Schüler die Schnelligkeit ist, hinzugefügt, ohne dass Schnelligkeit und Richtung zu einer neuen Größe verschmelzen [2, S. 254]. Sie aktualisieren diesen Sachverhalt nur, wenn sie gezielt danach gefragt werden, sonst wird ihnen das in der Regel nicht

bewusst. So liegt normalerweise für Schüler bei der gleichförmigen Kreisbewegung eine konstante Geschwindigkeit (statt konstante Schnelligkeit) und folglich keine Beschleunigung vor.

Als zweite Ableitung des Ortes nach der Zeit - als Veränderung der Veränderung des Ortes mit der Zeit - ist der Begriff „Beschleunigung“ der Erfahrung nicht so leicht zugänglich und wird deshalb von den Schülern in seiner Komplexität oft reduziert (siehe Abb. 1). Am Drastischsten ist die Reduktion auf Geschwindigkeit. Dies entspricht dem Alltagsgebrauch, bei dem man unter einer beschleunigten Bewegung „nur“ eine schnelle Bewegung versteht, wie es beispielsweise bei dem Begriff der „beschleunigten Bearbeitung eines Aktenstückes“ deutlich wird [3, S. 14]. Bei qualitativen Aufgaben zur

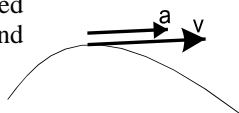
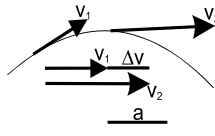
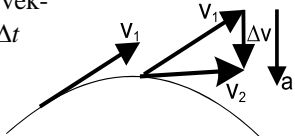
- ⊕ Kein prinzipieller Unterschied zwischen Beschleunigung und Geschwindigkeit $\vec{a} \sim \vec{v}$, nur verschiedene Formeln 
- ⊖ Beschleunigung ist Änderung des Geschwindigkeitsbetrages (pro Zeit): $a = \Delta|\vec{v}|$ oder $a = \Delta|\vec{v}| / \Delta t$ ist eine Zahl (positive) Beschleunigung = schnellerwerden
negative Beschleunigung = langsamerwerden 
- ⊕ Beschleunigung ist eine vektorielle Größe: $\vec{a} = \Delta\vec{v} / \Delta t$ hat eine Richtung. 

Abb. 1: Überblick über verschiedene Vorstellungen zur Beschleunigung

Beschleunigung antworten Schüler dann so, als wäre nach der Geschwindigkeit gefragt worden [1+4]. Dykstra [5, S. 42 – 44] legt dar, dass Schüler vor dem Unterricht nur eine undifferenzierte Sicht von Bewegung haben und nicht zwischen verschiedenen Bewegungsformen und nicht zwischen den verschiedenen Bewegungsgrößen (Geschwindigkeit/Beschleunigung) unterscheiden.

Von mehr Verständnis zeugt die Reduktion der vektoriellen Beschleunigung auf eine skalare Größe, nämlich die Änderung des Geschwindigkeitsbetrages (als absolute Größe $\Delta|\vec{v}|$ oder als auf ein Zeitintervall Δt bezogene Größe $\Delta|\vec{v}|/\Delta t$). Wird Beschleunigung so verstanden, bereiten nach dem entsprechenden Unterricht auch negative Beschleunigungen meistens kaum Probleme. „Beschleunigen“ heißt demnach „schnellerwerden“, auch als „positive Beschleunigung“ bezeichnet; „negative Beschleunigung“ bedeutet dann „langsamerwerden“, „verzögern“, „bremsen“.

Wird nun Beschleunigung als eine solche skalare Größe betrachtet, die die Änderung des Geschwindigkeitsbetrages (pro Zeiteinheit) angibt und deren Vorzeichen die Zu- bzw. Abnahme des Geschwindigkeitsbetrages anzeigt, führt dies zunächst kaum zu Problemen, da sich ein Körper in der Schule meist in positive Richtung bewegt. Erst bei Bewegungen in negative Richtung - wie sie bei Bewegungen mit Richtungswechsel auftreten - führt diese Vorstellung zu entgegengesetzten Ergebnissen als das physikalische Konzept, bei dem die vektorielle Beschleunigung der Quotient aus der Änderung des Geschwindigkeitsvektors durch zugehöriges Zeitintervall ist (Beispiel: In negative Richtung schneller werden ist eine negative Beschleunigung). Besonders schwierig wird es dann bei der zweidimensionalen Bewegung, da eine Kreisbewegung mit konstantem Geschwindigkeitsbetrag dann keine Beschleunigung ergibt und eine Zentripetalbeschleunigung nicht verstehbar ist. Entsprechend wird bei einer Kurvenfahrt mit veränderlicher Geschwindigkeit von den Schülern nur die tangentielle Komponente der Beschleunigung angegeben. Diese unangemessene Reduktion findet man sogar in Universitätslehrbüchern, in denen beim mathematischen Pendel die tangentielle Beschleunigung als die (gesamte) Beschleunigung dargestellt wird, ohne darauf zu verweisen, dass die Bewegung auf dem Kreisbogen einen radialen Beschleunigungsanteil ergibt [6, S. 349].

Zur Veränderung der Schülervorstellung ist es also notwendig, den vektoriellen Charakter der kinematischen Größen herauszustellen. Dies gelingt kaum mit eindimensionalen Bewegungen, sondern erst mit zweidimensionalen Bewegungen. Dies wurde früher u.a. deshalb wenig gemacht, da man im Physikunterricht für zweidimensionale Bewegungen im Gegensatz zu eindimensionalen Bewegungen keine Messwerterfassungsmöglichkeiten hatte. Deshalb sollen

im Folgenden vier verschiedene Messmöglichkeiten vorgestellt werden.

2. Vier Messmöglichkeiten

2.1 Messung mit Maus oder Graphiktableau

Eine normale PC-Maus ist ein leistungsfähiges, präzises und günstiges Messgerät zur Erfassung zweidimensionaler Bewegungen. In der Software PAKMA gibt es zwei Realisierungsmöglichkeiten: 1. Die von einer von Windows erkannten Maus gesendeten Daten werden vom Windows-Maustreiber bearbeitet und von PAKMA übernommen [7, S. 5]. 2. Eine in der Systemsteuerung abgemeldete oder erst nach Systemstart angemeldete serielle Maus kann als serielles Messgerät ausgelesen werden [8, S. 20]. Für die Erfassung zweidimensionaler Bewegungen eignet sich die erste Variante mehr, da man nur eine Maus zur Bedienung und zur Messung braucht.

Statt einer PC-Maus kann auch ein Graphiktableau verwendet werden [9, S. 36] (Graphiktableaus wurden bereits zur Aufnahme von Schwingungen empfohlen [10, S. 14; 11, S. 39]). Während man bei der Maus darauf achten muss, dass sie nicht verdreht wird, also immer in die gleiche Richtung ausgerichtet ist, hat man beim Graphiktableau nicht dieses Problem.

Wenn die Bewegung von einer Software aufgenommen wird sowie die jeweils gewünschten Vektoren sofort konstruiert und dargestellt werden (siehe Abb. 2), spart man Zeit, die man für weitere Versuche nutzen kann. Für eine schriftliche Übung kann man aber auch nur die Bahnkurve mit Zeitmarken erstellen und ausdrucken, so dass die Schüler selbst die Vektoren konstruieren müssen.

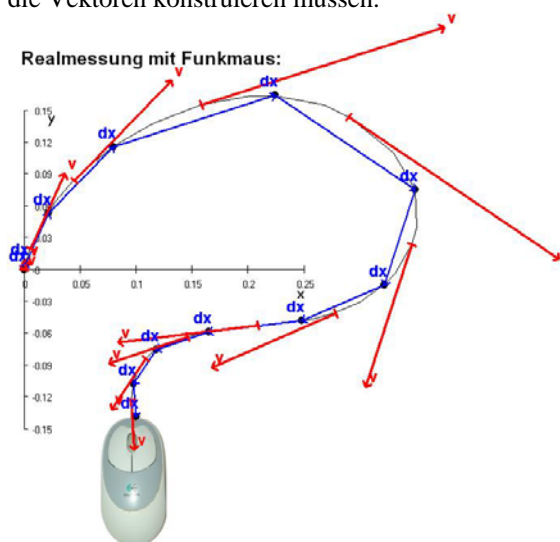


Abb. 2: Bahnkurve einer Mausbewegung mit Ortsänderungsvektoren und Geschwindigkeitsvektoren

Vorteile: Mit allen diesen Varianten sind nicht nur Demonstrationsexperimente, sondern auch Schülerübungen im Computerraum möglich [12, S. 270 f.]. Die Messung mit Maus oder Graphiktableau hat hier

entscheidende Vorteile gegenüber den anderen drei Messmöglichkeiten: Die Schüler können - falls gewünscht - die Geschwindigkeits- und insbesondere Beschleunigungspfeile sofort gleichzeitig mit der Bewegung der eigenen Hand sehen und Zusammenhänge zwischen der Bewegung und der Darstellung herstellen. Es kann versucht werden, bestimmte Bewegungen zu erzeugen und wenn das Ergebnis nicht dem Wunsch entspricht, kann die Messung sofort wiederholt werden. Man gewinnt dadurch Unterrichtszeit, dass man nicht jedes Mal selbst die Geschwindigkeits- und insbesondere Beschleunigungspfeile zeichnen muss, sondern dies von der Software übernommen wird.

Nachteile: Wie oben bereits erwähnt, darf die Maus während der Bewegung nicht verdreht werden, da damit die Werte verfälscht werden; man würde damit das Bezugssystem der Maus gegenüber dem Tisch verdrehen. Verwendet man die Messvariante, bei der die Messdaten vom Windows-Maustreiber übernommen werden, müssen erst sinnvolle Einstellungen im Maustreiber vorgenommen werden; dennoch kann es zu Verfälschungen durch den Maustreiber kommen. Die genauere Messvariante, eine serielle Maus direkt auszulesen, geht nicht an Computern ohne serielle Schnittstelle. Man braucht dann einen Adapter Seriell-USB.

2.2 Messung durch Videoanalyse

Eine andere Möglichkeit ist die Aufnahme einer zweidimensionalen Bewegung mit einer Videokamera. Die Bilder eines Videos sind stets zweidimensional und haben feste Zeitabstände (bei Videokameras 0,04 s). Zu beachten ist, dass eine Videokamera normalerweise in einer Sekunde nicht 25 ganze Frames aufnimmt, sondern jedes Bild wird in zwei Halbbilder aufgeteilt, die in Abständen von $1/50$ s abwechselnd aufgenommen werden (Zeilensprungverfahren). Bei einer schnellen Bewegung ergibt sich damit das Problem, dass sich das Objekt in diesen 0,02 s merklich weiterbewegt und somit bei den geraden Zeilen an einer anderen Stelle als bei den ungeraden Zeilen ist (Kammeffekt). Günstig ist, wenn die Kamera einen Modus für Vollbilder hat (Bezeichnung z.B. „Progressiv Mode“, 12,5 Frames pro Sekunde in 0,08 s Zeitabstand). Damit das Objekt nicht unscharf wird, ist evtl. zusätzlich noch eine kurze Belichtungszeit für die einzelnen Frames zu wählen.

Am einfachsten erhält man die Zeit-Ort-Marken mit einer auf dem Bildschirm gelegten Folie, auf der man dann auch alle Vektoren konstruieren kann. Alternativ kann am Computer mit einem Videoanalyseprogramm zu jedem Bild der Ort ermittelt werden. So ergeben sich Zeitmarken, die zu einer Bahnkurve verbunden werden können.

Als Beispiel wurde hier die Bewegung eines Federballs im Hörsaal gefilmt und mit AVA und PAKMA ausgewertet (siehe Abb. 3). Man sieht, dass hier die Beschleunigung nicht konstant ist und so kein Spe-

zialfall vorliegt und. Während Ort und Geschwindigkeit bei der Videoanalyse noch recht gut bestimmt werden, zeigen sich bei der Beschleunigung als zweite Ableitung des Ortes die Grenzen dieser Vorgehensweise in der großen Messgenauigkeit der ermittelten Beschleunigung.

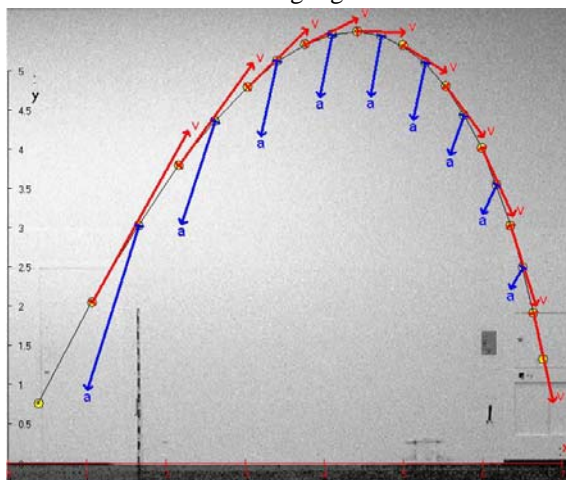


Abb. 3: Video eines Federballfluges in PAKMA mit Vektorpfeilen entsprechend den Daten der Videoanalyse

Vorteile: Es können interessante Bewegungen aus der Alltagswelt, z.B. aus dem Bereich Sport [13, S. 23 ff.] analysiert werden, die anders nur schwierig zu messen sind.

Nachteile: Alle Videoanalyseprogramme zeichnen über das Video die Zeitmarken und sind in der Lage einen x - y -Graphen mit den Messpunkten, also eine Bahnkurve, zu zeichnen. Man kann nun einen Screenshot des Videos mit Zeitmarken oder den x - y -Graphen mit den Messpunkten auf Papier ausdrucken und darauf Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren konstruieren [14]. Wünschenswert wäre aber, wenn das Konstruieren der Vektoren vom Videoanalyseprogramm übernommen werden würde und eine Anzeige von Geschwindigkeits- und Beschleunigungspfeilen zusammen mit dem Video möglich wäre.

In PAKMA kann man das Video (als avi-Datei) und die Analysedaten des Videoanalyseprogramms (als Textdatei) laden und von PAKMA können aus den Ortsdaten Geschwindigkeiten und Beschleunigungen berechnet werden. Im Hintergrund werden nacheinander die einzelnen Frames des Videos gezeigt und davor kann das bewegte Objekt auf dem Video seine Bahnkurve, d.h. den x - y -Graphen, aufzeichnen und seinen Ort in festen Zeitabständen stempeln. An das bewegte Objekt des Videos kann man Vektoren für die Darstellung seiner augenblicklichen Geschwindigkeit oder für seine augenblickliche Beschleunigung anheften (siehe Abb. 3), die sich mitbewegen und gestempelt werden können. PAKMA zeichnet also einen Vektor mit dem Anfangspunkt an den Ort, der aus der Videoanalyse ermittelt wurde mit der berechneten Länge und Richtung. Voraussetzung ist, dass der Graph richtig skaliert und an die richtige

Stelle gesetzt wurde. Dies ist allerdings zu aufwändig, als dass es in der Unterrichtsstunde oder von Schülern gemacht werden kann. Einfacher, aber weniger anschaulich ist es, wenn man nur die Videoanalysedaten lädt und darstellt und auf die Darstellung des Videos verzichtet.

In jedem Fall ist eine Betrachtung der physikalischen Größen erst nach der Bewegung, nicht gleichzeitig mit der Bewegung möglich.

2.3 Messung mit einem GPS-Empfänger

Für den Sport- und Freizeitbereich gibt es GPS-Empfänger, die kostengünstig sind, am Handgelenk befestigt werden und die zurückgelegte Bahnkurve mit Zeitinformationen aufzeichnen können, was am PC ausgelesen werden kann [15]. Für die hier aufgezeichneten Bewegungen wurde der GPS-Empfänger „Garmin Foretrex 101“ verwendet, der eine Ortsauflösung von meist unter 10 m und eine Zeitauflösung von 1 s hat sowie bis zu 10.000 Bahnpunkte speichern kann. Nachdem man ein sinnvolles Kartengitter („Grid“), am Besten „Gauss-Krüger“, das metrische System sowie eine Aufzeichnung in gleichen kleinen Zeitintervallen eingestellt hat, kann man Bahnkurven aufzeichnen.

Zu Fuß oder mit einem Fahrrad kann man nun auf einem großen Platz Kreisbögen oder Schlangenlinien zurücklegen und speichert die Bahnkurve ab. Dabei ist darauf zu achten, dass große Bahnkurven mit großem Krümmungsradius (> 20 m) verwendet werden. Mit der Freeware-Software „GPS Utility“ können die Daten anschließend als Textdatei vom GPS-Empfänger heruntergeladen werden. In Excel werden die interessanten Daten ausgewählt (x -Koordinate, y -Koordinate, Zeit in Sekunden). Hier ist bereits eine Anzeige mit Zeitmarken möglich (siehe Abb. 4). Um sechs- bzw. siebenstellige Ortskoordinaten zu vermeiden, ist es sinnvoll, die Differenz zu einem willkürlich festgelegten Punkt zu bilden. Diese Daten werden als csv-Datei gespeichert und in PAKMA eingelesen. Hier können nun

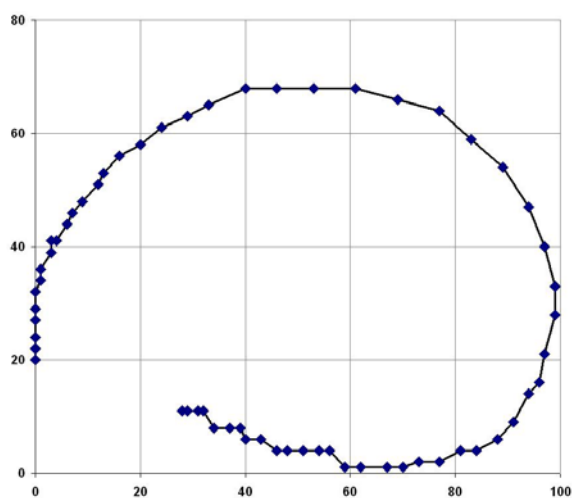


Abb. 4: Excel-Diagramm einer Bahnkurve einer Fahrradfahrt (Zeitmarken jede Sekunden)

je nach Wunsch Ortsänderungs-, Geschwindigkeits-, Geschwindigkeitsänderungs- oder Beschleunigungsvektoren an die Bahnkurve gezeichnet werden (siehe Abb. 5).

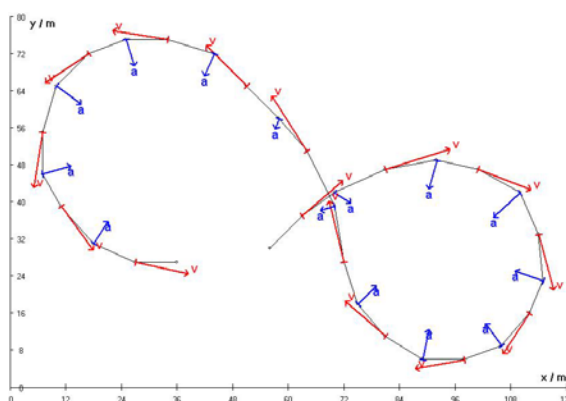


Abb. 5: Bahnkurve einer Fahrradfahrt mit Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren (Vektoren alle 10 Sekunden eingezeichnet)

Vorteile: Es wird damit ein weiterer Messbereich erschlossen: Während man bei der Messung mit der Maus oder dem Graphiktableau Bewegungen im Dezimeterbereich und bei der Videoanalyse Bahnkurven im Meterbereich aufnimmt, haben die Bahnkurven bei der GPS-Messung eine Länge von über hundert Metern.

Nachteile: Zunächst muss ein GPS-Empfänger gekauft werden (ab ca. 140 €). Eine Betrachtung der physikalischen Größen ist außerdem erst nach der Bewegung, nicht gleichzeitig mit der Bewegung möglich, denn die Daten müssen erst ausgewählt und eingelesen werden. Benutzt man ein vorgefertigtes „PAKMA-Projekt“ ist das Datenaufarbeiten und -darstellen bei geübten Benutzern in einigen Minuten möglich, aber doch aufwendiger als die Messung mit der Maus, bei der eine Darstellung in Echtzeit möglich ist. Während also die Mausmessung wegen ihrer Einfachheit für die Erarbeitung der kinematischen Begriffe sowohl für Demonstrations- als auch Schülerexperimente das geeignetste Mittel ist, ist die Videoanalyse und die GPS-Messung als Ergänzung und für Projekte attraktiv, da reale Alltagsbewegungen außerhalb der Schule betrachtet werden können.

2.4 Messung mit der Spurenplatte

Die Spurenplatte ist ein historisches Messgerät, das früher im Physikunterricht zur Messung eindimensionaler Bewegungen und kleiner Zeiten verwendet wurde [9, S. 32]. Diese Platte wird nun nach einer Idee von Koch nicht für die quantitative Ermittlung einzelner Werte, sondern für die Ermittlung der Richtung der kinematischen Größen benutzt [9, S. 32 f.]. Der auf eine eloxierte Metallplatte gestreute Schwefelstaub wird beim Verteilen mit dem Pinsel und beim Darüberstreichen mit dem Finger durch Reibung negativ aufgeladen [16, S. 7]. Über einen noch kaufbaren Sicherheitstrenntrafo, genannt

„Taktgeber und Transformator“, legt man an die Platte die Spannung des 50 Hz-Wechselstromnetzes (anderen Pol am Besten in eine Hand nehmen). Nun zeichnet man mit einem trockenen Finger zweidimensionale Bahnkurven in den Schwefelstaub. Wenn der Finger positiv geladen ist, zieht er den Staub an, die Platte stößt ihn ab. 1/100 s später ist der Finger negativ, die Platte positiv - der Staub wird abgestoßen und bleibt liegen. Dadurch entstehen die Spuren, die als ästhetisch ansprechend empfunden werden (siehe Abb. 6).

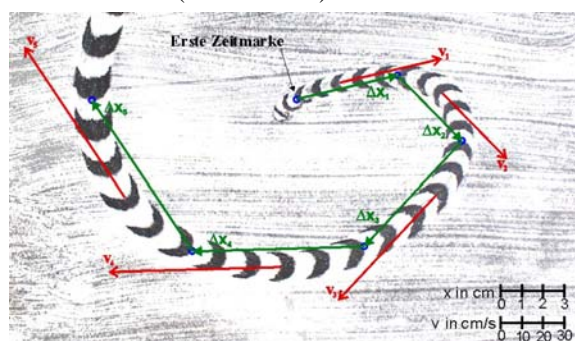


Abb. 6: Auswertung der Bewegung mit Ortsänderungsvektoren und Geschwindigkeitsvektoren

Da die Streifen recht eng beieinander liegen, zählt man von einem Startpunkt aus immer zehn Streifen ab und zeichnet mit der Pinselrückseite eine Zeitmarke, womit die Zeitmarken dann jeweils einen Abstand von 0,1 s haben. Die Änderung des Ortes in den 0,1 s macht man nun mit einem Ortsänderungsvektor $\Delta\vec{x}$ oder $\Delta\vec{r}$ deutlich. Dieser Vektor gibt die Bewegungsrichtung an und seine Länge hängt von der durchschnittlichen Schnelligkeit in dem Zeitintervall ab. Um einen von Δt unabhängigen Geschwindigkeitsvektor zu erhalten, müsste man den Vektor durch das Zeitintervall $\Delta t = 0,1$ s dividieren. Die Länge des Ortsänderungsvektors wird aber hier nicht durch 0,1 dividiert, da die Vektoren damit zu lange werden. Man erklärt, dass für die Geschwindigkeitsvektoren ein solcher Maßstab gelten soll, dass sie die gleiche Länge wie die Ortsänderungsvektoren haben. Der Ortsänderungsvektor wird quasi einfach als Geschwindigkeitsvektor \vec{v} an die Bahnkurve ungefähr in der Mitte des betrachteten Intervalls gezeichnet (siehe Abb. 6). Den Betrag einer Größe erhält man stets aus der Länge des Vektors zusammen mit dem entsprechenden Maßstab.

Etwas mehr zu tun ist, wenn man die Beschleunigungsvektoren ermitteln will. Man verschiebt einen Geschwindigkeitsvektor parallel an den „Fuß“ des nächsten Geschwindigkeitsvektors, um so den Geschwindigkeitsänderungsvektor $\Delta\vec{v}$ zu erhalten. Er gibt an, was in dem Zeitintervall an Geschwindigkeit „dazukam“. Um einen von Δt unabhängigen Beschleunigungsvektor zu erhalten, müsste man wieder den Vektor durch das Zeitintervall $\Delta t = 0,1$ s dividieren. Das Dividieren der Länge des Geschwindigkeitsänderungsvektors durch 0,1 entfällt wie oben. Der Geschwindigkeitsänderungsvektor wird als Be-

schleunigungsvektor \vec{a} an die Bahnkurve ungefähr in der Mitte des Intervalls zwischen den beiden Geschwindigkeitsvektoren gezeichnet (siehe Abb. 7). Man erkennt an den gezeichneten Vektoren, dass die Beschleunigung bei einer Kurvenfahrt nach innen zeigt, beim Schnellerwerden einen Anteil nach vorne und beim Langsamerwerden einen Anteil nach hinten hat.

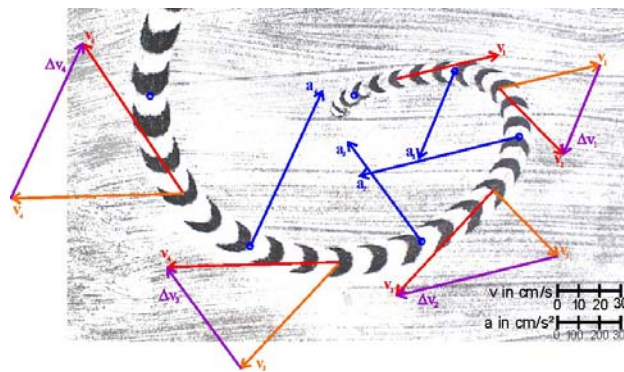


Abb. 7: Auswertung der Bewegung mit Geschwindigkeitsänderungsvektoren und Beschleunigungsvektoren

Die Vektoren direkt in den Schwefel auf die Spurenplatte zu zeichnen, ist eine Möglichkeit. Eine andere Möglichkeit ist, ein Foto mit einer Digitalkamera zu machen und auf dem Ausdruck zu zeichnen. So können auch Arbeitsblätter für Übungen und Prüfungsaufgaben erstellt werden [9, S. 34 f.].

Von der Firma Kröncke gab es auch Kugeln an einer langen Kette mit einem in der Höhe verschiebbaren Schreibstift. Wo diese Kugel noch vorhanden ist oder ein entsprechender Pendelkörper angeschafft wird, kann damit gut die Zentripetalbeschleunigung gezeigt werden. Man gibt dem ausgelenkten, hängenden Körper so eine Anfangsgeschwindigkeit, dass sie sich auf einer Kreisbahn bzw. wegen der Reibung auf einer Spirale bewegt und mit dem Metallstift eine Spur zeichnet. Die gezeichneten Beschleunigungsvektoren weisen dann stets ungefähr zur Mitte. Im allgemeineren Fall einer Ellipse bzw. elliptischen Spirale haben die Beschleunigungsvektoren auch eine Komponente in Bewegungsrichtung, die auch das Tempo ändert.

Vorteile: Der wesentliche Vorteil dieser Messmöglichkeit ist, dass sie sich wie die Mausmessung für Schülerübungen eignet. Im Gegensatz zur Mausmessung braucht man aber keinen Computerraum und keine Software.

Nachteile: Der Nachteil liegt darin, dass die Schüler immer alle Pfeile selbst konstruieren müssen und nicht gleichzeitig mit der Bewegung sehen. Außerdem lassen sich die Pfeile schlecht in den Schwefelstaub zeichnen. Bei Geschwindigkeitsvektoren (als Ortsänderungsvektoren) ist das noch einfach möglich, so dass man deren Richtung und Veränderung betrachten kann. Beschleunigungsvektoren (als Geschwindigkeitsänderungsvektoren) sind dagegen eher auf Ausdrucken von Fotos zu zeichnen.

2.5 Vergleich der vier Messmöglichkeiten

Die vier Messmöglichkeiten unterscheiden sich zunächst in der Größe der betrachtbaren Bahnkurven. Bei Maus, Graphiktableau und Spurenplatte werden Bewegungen in der Größe von ein paar Dezimeter betrachtet. Bei der Videoanalyse werden Bewegungen von einigen Metern behandelt, während man mit GPS Bewegungen im Bereich von 100 Metern verwendet.

Bei der Maus und dem Graphiktableau können die Pfeile für die kinematischen Größen in Echtzeit mit der Bewegung gezeigt werden. Bei GPS, Videoanalyse und Spurenplatte ist dagegen einiger Aufwand nötig, um diese Darstellungen zu erhalten.

Maus, Graphiktableau und Spurenplatte eignen sich auch gut für arbeitsgleiche Schülerübungen. Bei der Videoanalyse und dem GPS ist das aufgrund des größeren Aufwandes nicht zu empfehlen. Um Zeit zu sparen könnten aber die Schüler z.B. die Messwertaufnahme übernehmen und der Lehrer übernimmt die Darstellung der Messdaten in der Software.

2.6 Ergänzung: Das Spiel „Autorennen“

Letztlich sei noch als interessante Alternative das Spiel „Autorennen“ genannt, das national und international mehr oder weniger bekannt ist [17, S. 46]. Dieses Spiel wird von manchen Lehrern schon ab der fünften Klasse in Vertretungsstunden eingesetzt, wobei keine physikalische Interpretation der vorkommenden Vektoren erfolgt. Im Rahmen des Kinematikunterrichts können dagegen diese Vektoren interpretiert und die Erfahrungen beim Spielen diskutiert werden.

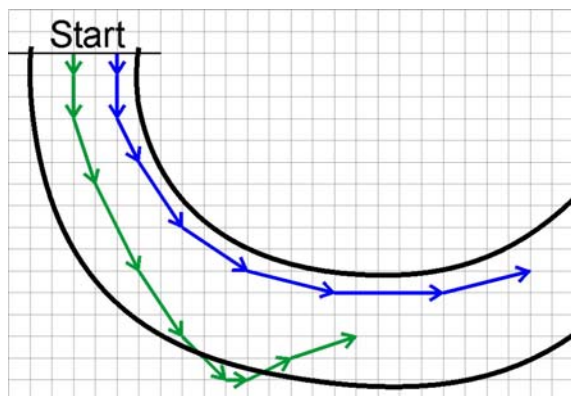


Abb. 8: Beispiel für das Spiel "Autorennen", eigene Erstellung (auch für das Schulbuch Geipel, Reusch [18, S. 61] zur Verfügung gestellt)

Es spielen immer zwei (evtl. auch drei oder vier) Schüler gegeneinander. Sie haben einen DIN A4-Bogen kariertes Papier (Gitterabstand 0,5 cm), auf das sie eine Rennstrecke zeichnen, die ca. vier bis sieben Kästchen breit ist (siehe Abb. 8) und eine Start- und Ziellinie hat. Die Spieler befinden sich am Anfang an unterschiedlichen Positionen auf der Startlinie und auf Gitterkreuzungspunkten und benutzen Stifte unterschiedlicher Farbe. Die Schüler

sind nun abwechselnd an der Reihe mit ihrem virtuellen Auto ein Stück zu fahren, was als Verschiebungspfeil eingezeichnet wird. Sie dürfen dabei entweder genauso weit fahren wie im vorhergehenden Zug oder den Verschiebungspfeil in x - und y -Richtung um ein Kästchen vergrößern oder verkleinern (am Anfang wird mit dem Nullvektor begonnen). Somit haben sie bei jedem Zug nur neun Möglichkeiten, auf welches Gitterkreuz sie ziehen. Es ist sowohl erlaubt, die Bahnkurve der anderen Spieler zu schneiden, als auch, auf dem gleichen Punkt zu enden. Wer als erstes an der Ziellinie ist, hat gewonnen. Gerät jemand außerhalb der Rennstrecke, wird er dafür bestraft. Wieder von der Startlinie beginnen zu müssen, ist eine zu harte Strafe. Stattdessen wird vereinbart, dass er wieder wie am Anfang mit dem Nullvektor beginnen muss. Zusätzlich kann man noch vereinbaren, dass sein Verschiebungspfeil außerhalb der Rennstrecke, auf dem Rasen, nicht länger als ein Kästchen sein darf, bis er wieder auf der Rennstrecke ist. Das Spiel wird interessanter und schwerer, wenn die Fahrbahn teilweise recht verengt wird (bis auf ein oder zwei Kästchen breit) und scharfe Kurven (d.h. kleiner Kurvenradius) enthält.

Entscheidend ist nun die physikalische Interpretation: Jede Runde entspricht einem Zeitintervall Δt . Der jeweilige Verschiebungspfeil ist ein zweidimensionaler Ortsänderungsvektor (angegeben in Kästchen). Da das Zeitintervall Δt als konstant betrachtet wird, entspricht dieser Vektor auch dem Geschwindigkeitsvektor (angegeben in Kästchen); eine Längenänderung durch ein $\Delta t \neq 1$ wird wie bei der Spurenplatte nicht berücksichtigt. Die Schüler zeichnen also Geschwindigkeitsvektoren. Das Entscheidende ist nun, dass der Geschwindigkeitsänderungsvektor, der dem Beschleunigungsvektor entspricht, in jedem Zeitintervall beschränkt ist (nämlich nur ein Kästchen pro Komponente groß sein darf) und außerdem die Rennbahn nicht verlassen werden darf, was durch Stillstand bestraft wird, so dass man vorplanen muss. Zusätzlich kann man vereinbaren, dass nicht nur der jeweilige Geschwindigkeitsvektor, sondern auch der jeweilige Beschleunigungsvektor eingezeichnet werden muss.

Beim Erklären des Spiels und beim Diskutieren über das Spiel werden also gleich die physikalischen Begriffe verwendet. Man erlebt, dass ein „Auto“ bei zu großer Schnelligkeit „aus der Kurve hinausfliegt“, weil die notwendige, nach innen gerichtete Beschleunigung für die gewünschte Kurve nicht groß genug sein kann/darf. Theoretisch wäre es auch möglich, dass die Schüler jeweils die Koordinaten des Geschwindigkeitsvektors und/oder des Beschleunigungsvektors auf dem Spielplan notieren.

3. Ergebnisse aus dem Unterrichtseinsatz

Die vorgestellten Messmöglichkeiten erlauben nicht nur, bei der Behandlung zweidimensionaler Bewegungen reale Bewegungen zu analysieren. Sie stellen auch die übliche Abfolge der Themen in Frage. Im

herkömmlichen Physikunterricht werden erst nach der Kinematik und Dynamik geradliniger Bewegungen zweidimensionale Bewegungen behandelt und dabei werden fast nur einfache Spezialfälle wie Wurfbewegungen und Kreisbewegungen betrachtet. Um Fehlvorstellungen zur Beschleunigung zu verändern bzw. nicht entstehen zu lassen, ist es sinnvoll, die kinematischen Größen zunächst anhand allgemeiner zweidimensionaler Bewegungen einzuführen und erst später auf eindimensionale Bewegungen zu spezialisieren.

Ein Grund für das herkömmliche Vorgehen ist die Notwendigkeit zur Elementarisierung: So wird als Elementarisierung zunächst die Beschleunigung bei eindimensionalen Bewegungen in positive Richtung

betrachtet: $a = \frac{dv}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}$, so dass Beschleunigung

Schnellerwerden und negative Beschleunigung Langsamerwerden bedeutet und Fehlvorstellungen entstehen. Diese Elementarisierung erfüllt nicht die Forderung nach „Erweiterbarkeit“ [19, S. 101]: Bei der Behandlung der Beschleunigung beim waagrecht Wurf oder der Kreisbewegung kommt es zum Bruch.

Deshalb wurde ein Unterrichtskonzept für den Kinematikunterricht der Sekundarstufe II entwickelt, in dem die kinematischen Größen an zweidimensionalen Bewegungen eingeführt werden [1]. In diesem Konzept wird als Elementarisierung der Beschleunigung zunächst die Geschwindigkeitsänderung betrachtet, was fachlich erweiterbar ist. Außerdem werden hier Grenzprozesse nicht betont und als Elementarisierung zunächst eine Darstellung vektorieller Größen mit Pfeilen benutzt [19, S. 114].

In einem Evaluations-Projekt haben insgesamt 13 Lehrer in 17 Klassen nach diesem Konzept unterrichtet (Ausführliche Darstellungen der Lehrererfahrungen sowie der Testergebnisse einschließlich der Originaltestbögen sind unter [1] zu finden). Für die teilnehmenden Lehrer wurde ein Vorbereitungs- bzw. Begleit-Seminar zu diesem Unterrichtskonzept angeboten und sie erhielten sehr umfangreiche Unterrichtsmaterialien. Als Messverfahren wurde dabei fast ausschließlich die PC-Maus verwendet (siehe 2.1) – sowohl für Demonstrationsversuche als auch für Schülerübungen.

3.1 Lehrererfahrungen

Die teilnehmenden Lehrer haben sich in der Regel eng an das vorgegebene Kinematikkonzept gehalten. Es zeigte sich, dass das Konzept in der vorgeschlagenen Zeit von 14 Unterrichtsstunden für ein- und zweidimensionale Kinematik durchführbar ist. Man kann außerdem feststellen, dass die Lehrer das Konzept verstanden haben. So haben einige Lehrer neue gute Ideen mit eingebracht [1, S. 148 ff.].

In manchen Klassen entstand am Anfang Entsetzen, dass nun von ihnen auch Vektorrechnung verlangt wird, denn diese kann zu Beginn der Sekundarstufe II leider nicht vorausgesetzt werden. Es zeigte sich

dann aber, man hier nicht mehr als das Wissen braucht, wie man zwei „Pfeile“ graphisch addiert („Pfeilzeichnungsalgorithmus“). Das Arbeiten mit den Vektorpfeilen wurde so schließlich als einfach eingeschätzt.

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 sei 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.

3.2 Testaufgabe zweidimensionale Bewegung

Als Vergleichsbasis wurden 217 Schüler aus zwölf herkömmlich unterrichteten Klassen am Schuljahresende gebeten, bei der qualitativen Aufgabe aus Abb. 9 bei fünf verschiedenen Situationen den Beschleunigungsvektor einzuzeichnen (ähnliche Aufgaben findet man in [20-22]). Alle Schüler hatten also bereits die Kinematik und Dynamik zweidimensionaler Bewegungen behandelt, ein Großteil erst kurz davor.

Insgesamt haben hier nur sehr wenige Schüler einen Pfeil gezeichnet, der der Geschwindigkeitsrichtung entspricht (= Vorstellung 1 in Abb. 1). Dabei wurde beim Schnellerwerden ein langer und beim Langsamerwerden ein kurzer Pfeil in Bewegungsrichtung gezeichnet.

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.

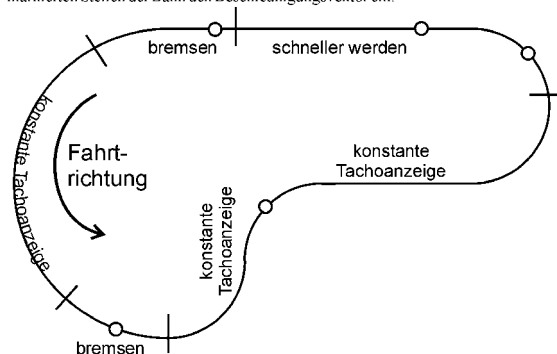


Abb. 9: Testaufgabe zur Beschleunigung bei einer zweidimensionalen Bewegung (aus [1]).

Bei den geradlinigen Bewegungen haben die meisten Schüler (siehe Tab. 1) die richtigen Pfeile eingezeichnet. Das heißt aber nicht, dass diese Schüler ein

vektorielles Verständnis der Beschleunigung haben. Viele haben wohl nur ihre „Schneller-/Langsamer-Vorstellung“ (+ ist schneller, - ist langsamer) in Pfeile umgesetzt. So haben einige Schüler zusätzlich „ $\vec{a} > 0$ “, „ $-\vec{a}$ “ oder das Vorzeichen „+“ oder „-“ dazugeschrieben. 2 % der Schüler haben sogar keine Pfeile, sondern nur Vorzeichen auf das Blatt geschrieben.

	traditioneller Unterricht	Unterricht nach Konzept
	Test am Jahresende (kurz nach Unterricht)	Test am Jahresende (8 Monate nach Unterricht)
	12 Klassen, 217 Schüler	2 Klassen, 35 Schüler
gerade schnellerwerdend	93 %	97 %
geradeausbremsend	88 %	97 %
Kurve konstantes Tempo	12 %	86 % *
Kurve schnellerwerdend	9 %	66 % *
Kurvenfahrt bremsend	6 %	80 % *
Subgruppe „geradeaus“	90 %	97 % ($d = 0,26$)
Subgruppe „Kurve“	9 %	77 % * ($d = 2,95$)

Tab. 1: Vergleich der Anteile der richtigen Antworten bei der Aufgabe zur Richtung des Beschleunigungsvektors (abhängig vom Unterricht) mit Effektstärke d . Signifikante Unterschiede sind mit einem Stern markiert (einzelne Items: χ^2 -Test, Subgruppen: Mann-Whitney-U-Test, jeweils 0,001-Niveau).

Bei der Kurvenfahrt haben dagegen nur wenige Schüler eine richtige Antwort gegeben (siehe Tab. 1). Obwohl Kreisbewegungen mit konstanter Winkelgeschwindigkeit und die Zentripetalkraft längere Zeit unterrichtet wurden, haben hier nur 12 % richtig geantwortet (in sechs Klassen: 0 %). Noch schwieriger ist es, wenn die Bewegung während der Kurvenfahrt schneller oder langsamer wird. Dass sich die Beschleunigung hier aus einer Tangential- und einer Normalkomponente zusammensetzt, wurde den Schülern im Unterricht sicher mitgeteilt, aber von den Schülern nicht verinnerlicht. Deshalb werden hier nur von 9 % bzw. 6 % richtige Pfeile gezeichnet. Sehr häufig wird bei der Kurvenfahrt der Nullvektor bei konstantem Tempo (48 %) bzw. ein Pfeil in oder gegen die Bewegungsrichtung je nach Schneller- oder Langsamerwerden gezeichnet (56 % bzw. 73 %). Zusätzlich ist dabei zu beachten, dass einige dieser Schüler (10 % bzw. 6 % aller Schüler) einen deutlich gebogenen Pfeil (wie die Fahrbahn) zeichnen. Viele zeichnen den Pfeil leider so kurz, dass nicht entscheidbar ist, ob sie an eine echte Tangente oder an einen gebogenen Pfeil dachten. Ca. ein

Drittel der Schüler geben einen deutlich tangentialen Pfeil an.

Aufgaben zur zweidimensionalen Bewegung wurden nach den Angaben der Lehrer des Forschungsprojektes von den Schülern der Treatmentgruppe gut gelöst. In zwei Klassen (35 Schüler) wurde am Jahresende der gleiche Test gestellt. Im Gegensatz zu den konventionellen Klassen lag der Unterricht dazu bereits acht Monate zurück, so dass also nicht kurzzeitig Angelerntes, sondern langfristig verfügbares Wissen abgefragt wurde (siehe Tab. 1). Dabei haben nicht nur 97 % der Schüler bei eindimensionalen Bewegungen eine richtige Antwort gegeben, sondern auch 86 % bei Kurvenfahrt mit konstantem Tempo und 66 % bzw. 80 % bei veränderlichem Tempo, was weit mehr als bei herkömmlichen Klassen ist. Die Unterschiede sind bei gerader Strecke nicht signifikant (0,05-Niveau), aber bei Kurvenfahrten signifikant (0,001-Niveau).

Aus den beiden Items mit geradliniger Bewegung wurde eine Subgruppe „geradeaus“ und aus den drei Items mit Kurvenfahrt wurde eine Subgruppe „Kurve“ geschaffen (siehe Tab. 1). Unter Einbeziehung aller vorhandener Schülerantworten ($N = 315$) ergeben sich bei einem Reliabilitätstest mit $\alpha = 0,82$ bzw. $\alpha = 0,81$ hohe Cronbachs Alphas für die beiden Subgruppen. Hier ergibt sich bei der Subgruppe „geradeaus“ bei der Treatmentgruppe ($N_{\text{Treat}} = 35$) gegenüber der Kontrollgruppe ($N_{\text{Kontroll}} = 217$) eine Effektstärke von nur $d = 0,26$, die pädagogisch nicht interessant ist. Aber bei der Subgruppe „Kurve“ ergibt sich eine extrem große Effektstärke von $d = 2,95$. Die Treatmentgruppe hat bei der Subgruppe „Kurve“ über achtmal so viele richtige Antworten gegeben (77 % versus 9 %) und der Unterschied entspricht ca. drei gemittelte Standardabweichungen. Wünschenswert wäre aber gewesen, dass dieser Test mit mehr Schülern der Treatmentgruppe durchgeführt worden wäre.

3.3 Testaufgabe: Senkrechter Münzwurf

Die Münzaufgabe wurde schon häufig unter dem Aspekt der wirkenden Kraft gestellt ([23], [24, S. 110], [25, S. 111+117], [2, S. 107+113+300], [26, S. 148 f.], [27, S. 67], [28-30]), aber nur selten unter dem Aspekt der Beschleunigung [4, S. 283], höchstens für eine Teilphase [31]. Beim senkrechten Wurf tritt natürlicherweise eine Richtungsumkehr auf, so dass bei der Aufgabe die im Wesentlichen drei verschiedenen Vorstellungen ($\vec{a} \sim \vec{v}$, $a \sim \Delta|\vec{v}|$ und $\vec{a} \sim \Delta\vec{v}$) gleichzeitig in einer Klasse auftreten. Nach dem konventionellen Unterricht gaben nur 7 % der Schüler die vollständig richtige Antwortkombination (siehe Tab. 2). 10 % gaben eine Antwortkombination, bei der zwar für die Aufwärts- und Abwärtsbewegung die richtige Lösung angegeben wurde, aber zum höchsten Punkt die Beschleunigung null angegeben wird, also wohl eine statische Vorstellung überwiegt. Bezeichnet man in einem vereinfachten Beschleunigungskonzept Schnellerwerden als posi-

Vorzeichen Richtung	richtig: - - -	fast- richtig: - 0 -	„schneller/ langsamer“: - 0 +	\bar{v} statt \bar{a} : + 0 -	sonstiges	Summe
↓↓↓ (=richtig)	6,4%	-	2,1%	0,5%	-	9,0%
↓ 0 ↓ (=fastrichtig)	-	7,4%	10,1%	1,1%	-	18,6%
↓ 0 ↑ (=nach +/-)	-	-	2,7%	1,1%	-	3,7%
↑ 0 ↓ (wie v)	-	2,1%	18,6%	36,7%	4,8%	62,2%
sonstiges	0,5%	0,5%	2,7%	1,6%	1,1%	8,5%
Summe	6,9%	10,1%	36,2%	41,0%	5,9%	100%

Tab. 2: Häufigkeit der angegebenen Vorzeichen, Pfeilrichtung und Kombinationen nach konventionellem Unterricht, N = 188

tive und Langsamerwerden als negative Beschleunigung, gaben 36 % der Schüler in diesem Sinne eine richtige Antwort. Einige Lehrer bestätigten in Gesprächen, dass sie im Unterricht positive Beschleunigung als Schnellerwerden und negative Beschleunigung als Langsamerwerden einführen und Beschleunigung nicht als vektorielle Größe behandeln. Eine Schülerantwort in diesem Sinne muss dann als Lernerfolg verstanden werden. Wenn man die drei ersten, bisher diskutierten Antwortkombinationen, die alle wenigstens ein Teilverständnis des Beschleunigungsbegriffes zeigen, zusammenfasst, ergibt sich ein Anteil von 53 %. Circa die Hälfte der Schüler hat also wenigstens zum Teil den Beschleunigungsbegriff verstanden. 41 % der Schüler verfügen jedoch anscheinend über keinen Beschleunigungsbegriff, da sie eine Antwortkombination gaben, die der Geschwindigkeit, aber nicht einer Beschleunigung entspricht. Für sie ist wohl Beschleunigung etwas, das mit der Geschwindigkeit, nicht mit deren Änderung zu tun hat.

Interessant ist - insbesondere wenn im Sinne von „schneller/langsamer“ geantwortet wurde -, wie die Schüler antworten, wenn anstatt nach dem Vorzeichen der Beschleunigung nun nach der Richtung der Beschleunigung gefragt wird. Deshalb sollten die Schüler zusätzlich mit einem Pfeil die Richtung der Beschleunigung angeben. Die Frage nach der Richtung wurde von den Schülern, die richtig oder fastrichtig antworteten, und denen, die der Geschwindigkeit entsprechend antworteten, meist passend zur Vorzeichenangabe gelöst (siehe Tab. 2). Dagegen wurden die Schüler, die beim Vorzeichen entsprechend der Änderung des Geschwindigkeitsbetrages antworteten, von dieser Fragestellung häufig verwirrt und änderten ihre Antwort mehrmals. Etliche Schüler gaben explizit an, mit der Frage der Richtung Probleme zu haben, was wohl daran liegt, dass Beschleunigung für sie ein Zahlenwert ist. 28 % dieser Schüler gaben schließlich die fast-richtige Richtungsantwort ↓0↓ und 52 % dieser Schüler die Geschwindigkeitsantwort ↑0↓, so dass insgesamt von 62 % der Schüler die Richtung der Geschwin-

digkeit statt die der Beschleunigung angegeben wurde, während nur 9 % die richtige und 19 % die fast-richtige Antwort gaben.

Ein Vergleich der Beantwortung der Aufgabe „Beschleunigung beim Münzwurf“ und der Aufgabe „Kraft beim Münzwurf“ ergibt, dass aus der richtigen Antwort der einen Aufgabe nicht auf die richtige Beantwortung der anderen geschlossen werden kann. Die Beantwortung der beiden Aufgaben ist weitgehend unabhängig voneinander; es werden wohl unterschiedliche Argumentationen benutzt, so dass die Aufgabe „Beschleunigung beim Münzwurf“ als kinematische Aufgabe betrachtet werden muss.

In sieben Treatmentklassen haben 39 % der Schüler die Aufgabe richtig gelöst (siehe Tab. 3). Damit liegt deren Anteil fast sechsmal so hoch wie in den herkömmlich unterrichteten Klassen (Unterschied auf 0,01-Niveau signifikant). Zusammen mit den fastrichtigen Lösungen hat damit die Hälfte aller Schüler die Aufgabe richtig gelöst. Die Antworten gemäß einem Schneller-/Langsamer-Konzept bzw. gemäß der Geschwindigkeit werden signifikant seltener gewählt (0,01-Niveau).

Unter- suchung	<i>Gruppe 1</i> TREFFER 1988 <i>nach trad. U.</i> N = 426	<i>Gruppe 2</i> WILHELM 1994 <i>nach trad. U.</i> N = 188 10 Klassen	<i>Treatment</i> WILHELM 2003 <i>nach Konzept</i> N = 151 7 Klassen
Antwort			
Vorzeichen richtig	3 %	7 %	39 % *
Vorzeichen fast-richtig	3 %	10 %	10 %
+ =schneller - =langsamer	34 %	36 %	14 % *
Vorzeichen wie \bar{v}	55 %	41 %	25 % *
restliche Vorzeichen	5 %	6 %	12 %
Pfeile rich- tig ↓↓↓	-	9 %	42 % *
Pfeile fast- richtig ↓0↓	-	19 %	18 %
Pfeile wie +/- ↓0↑	-	4 %	7 %
Pfeile wie \bar{v} ↑0↓	-	62 %	27 % *
restliche Pfeile	-	6 %	6 %

Tab. 3: Auswahlhäufigkeiten bei der Aufgabe „Beschleunigung beim Münzwurf“ abhängig vom Unterricht, Quelle: Eigene Erhebung und Aufzeichnung Treffer. Ein Stern bedeutet einen signifikanten Unterschied zur Kontrollgruppe 1 (χ^2 -Test, 0,01-Niveau).

Außerdem sollten die Schüler wieder die Richtung der Beschleunigung mit einem Pfeil angeben. Während in herkömmlich unterrichteten Klassen die Hälfte der Schüler, die beim Vorzeichen entsprechend der Änderung des Geschwindigkeitsbetrages (schneller/ langsamer) antworteten, Pfeile entsprechend der Geschwindigkeit einzeichnet, tritt dies

hier kaum auf (nur 2 Schüler). Dagegen gibt hier fast die Hälfte dieser Schüler eine fast-richtige Pfeillösung an und die andere Hälfte zeichnet die Pfeile entsprechen dem gewählten Vorzeichen ($\downarrow 0 \uparrow$ entsprechend $-0+$) und damit besser als nur entsprechend der Geschwindigkeit. Während somit in herkömmlich unterrichteten Klassen 62 % als Richtung der Beschleunigung einfach die Richtung der Geschwindigkeit angeben, sind das hier nur 27 %.

3.4 Testaufgaben zur eindimensionalen Bewegung mit Grapheninterpretation

Eine 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 Unterrichtskonzept kürzer vor als es in konventionellen Klassen der Fall ist. Oder andere Frage: Hilft ihnen ihr größeres Verständnis sogar zu besseren Ergebnissen? Dazu wurde ein Test des Amerikaners Ronald Thornton [32-35] übersetzt, neu formatiert und ergänzt [1]. In den Aufgaben waren eindimensionalen Bewegungen beschrieben und es sollte jeweils der dazu passende Zeit-Graph ausgewählt werden.

Bei Aufgaben, in denen jeweils der passende Zeit-Geschwindigkeits-Graph gewählt werden soll (4 Items), lösten schon zu Beginn der elften Jahrgangsstufe die Schüler ($N = 373$) diese Aufgaben zu 89 % richtig. Da hier keine großen Veränderungen mehr möglich sind, eignet sich dieser Test auch nicht zum Vergleich der Treatmentgruppe mit einer Kontrollgruppe. Folglich ist auch kein signifikanter Unterschied nach dem Unterricht nachweisbar. Aber nach diesen Ergebnissen ist der Sinn einer intensiven Grapheninterpretation von Geschwindigkeitsgraphen bei eindimensionalen Bewegungen in Frage zu stellen.

Deutlich anders ist die Situation, wenn zu beschriebenen eindimensionalen Bewegungen jeweils der passende Zeit-Beschleunigungs-Graph gewählt werden soll. Die betrachteten sechs Items haben erfreulicherweise eine hohe Reliabilität (Cronbachs Alpha $\alpha = 0,84$). Zu Beginn der elften Jahrgangsstufe werden diese nur von durchschnittlich 9 % der Schüler richtig gelöst ($N = 373$), 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 ($N = 188$). Bei Bewegungen nach links antworten durchschnittlich 7 % so, als wäre die Beschleunigung die Änderung des Geschwindigkeitsbetrages, also „+“ = schneller und „-“ = langsamer. Bei der Treatmentgruppe ist kein signifikanter Unterschied nachweisbar.

Dass in diesem Konzept eindimensionale Bewegungen und Grapheninterpretation weniger als im herkömmlichen Unterricht behandelt wurden und statt-

dessen das Verständnis für die Größen an zweidimensionalen Bewegungen geschult wurde, wirkt sich also nicht auf das Lösen dieser Aufgaben zu Grapheninterpretation bei eindimensionalen Bewegungen aus. Man kann dies als Erfolg deuten, dass die Schüler der Treatmentgruppe nicht schlechter sind, oder als Misserfolg, dass sie nicht besser sind.

3.5 Zusammenfassung der Testergebnisse

Insgesamt kann man sagen, dass ein Großteil der konventionell unterrichteten Schüler eine vereinfachte Vorstellung des Beschleunigungsbegriffes im Sinne der Angabe „schneller/langsamer“ bis zum Ende der elften Klasse entwickelt hat, auch wenn nicht alle dieser Schüler dies bei schwierigen Items (mit Graphen oder Münzwurf) umsetzen können. Dagegen haben nur wenige herkömmlich unterrichtete Schüler eine vektorielle Vorstellung, die bei zweidimensionalen Bewegungen die richtige qualitative Lösung ermöglicht.

In der Treatmentgruppe können die Schüler dagegen häufiger zwischen Geschwindigkeit und Beschleunigung unterscheiden. Die Schüler wissen außerdem, dass Beschleunigung eine Richtung hat und viele geben auch die richtige an. Physikalische Aussagen mit Hilfe von Pfeilen darzustellen, ist ihnen ebenso vertraut. Nur die Darstellung durch Zeitgraphen ist anscheinend nicht so gefestigt, so dass die Schüler da auf das Niveau herkömmlich unterrichteter Klassen zurückfallen.

Abschließend ist das Fazit zu ziehen, dass es bezüglich dem Richtungsverständnis der Größe Beschleunigung nicht so effektiv ist, die Größe erst eindimensional einzuführen und den Begriff später auf zweidimensionale Bewegungen zu verallgemeinern. Mehr Verständnis ist zu erreichen, wenn von Anfang an die kinematischen Größen als gerichtete Größen eingeführt werden.

4. Literatur

- [1] Wilhelm, T. (2005): Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung, Dissertation, Logos-Verlag
- [2] Schecker, H. (1985): Das Schülervorverständnis zur Mechanik, Eine Untersuchung in der Sekundarstufe II unter Einbeziehung historischer und wissenschaftlicher Aspekte, Dissertation, Universität Bremen
- [3] Pohl, R. W. (1944): Mechanik, Akustik und Wärmelehre, 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- [4] 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

- [5] Dykstra, D. (1991): Studying Conceptual Change: Constructing New Understandings - In: Duit, R.; Goldberg, F.; Niedderer, H. (Hrsg.): Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies. Proceedings of an International Workshop held at the University of Bremen. March 4-8, 1991, Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel, Kiel, S. 40 - 58
- [6] Reusch, W.; Heuer, D. (2000): Zweidimensionale Kinematik und Dynamik - ein Zugang mit rechnerunterstützten „Experimenten“ - In: Brechel, R. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in München, September 1999, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 349 - 351
- [7] Reusch, W.; Gößwein, 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
- [8] 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, S. 17 - 22
- [9] 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
- [10] Heuer, D. (2003): Physikunterricht, gestaltet mit Multimedia-Elementen - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 52, Nr. 3, S. 2 - 15
- [11] Mikelskis-Seifert, S.; Thiele, M.; Wünscher, T. (2005): Modellieren - Schlüsselfertigkeit für physikalische Forschungs- und Lernprozesse - In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule 1/4, S. 30 - 46
- [12] Reusch, W.; Gößwein, 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
- [13] Wilhelm, T.; Geßner, 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
- [14] 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, 2005, S. 41 - 47
- [15] Backhaus, U. (2005): Alltagsmechanik mit GPS - In: Nordmeier, V.; Oberländer, A. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2005, Lehmanns Media - LOB.de, Berlin
- [16] Bergmann, L. (1952): Der Nachweis elektrischer Wechsellspannung mittels Staubfiguren - In: Praxis der Physik / Chemie und Photographie im Unterricht der Schulen 1, Aulis Verlag Frankenberg/Eder, S. 6 - 9
- [17] Treitz, N. (2003): Brücke zur Physik, Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, Frankfurt am Main
- [18] Geipel, R.; Reusch, W. (2005): Physik 8 I, C.C.Buchners Verlag, Bamberg
- [19] Kircher, E.; Girwidz, R.; Häußler, P. (2000): Physikdidaktik. Eine Einführung in Theorie und Praxis, Braunschweig/Wiesbaden, Vieweg
- [20] Flores, S.; Kanim, S.; Kautz, C. (2004): Student use of vectors in introductory mechanics - In: American Journal of Physics 72, Nr. 4, S. 460 - 468
- [21] Hestenes, D.; Wells, M. (1992): A Mechanics Baseline Test - In: The physics teacher 30, S. 159 - 166
- [22] Labudde, P.; Reif, F.; Quinn, L. (1988): Facilitation of scientific concept learning by interpretation procedures and diagnosis - In: International Journal of Science Education, Vol. 10, S. 81 - 98
- [23] Warren, J. (1979): Understanding Force, Murray, London
- [24] 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
- [25] Jung, W.; Wiesner, H. (1981): Verständnisschwierigkeiten beim physikalischen Kraftbegriff Eine Untersuchung zum Kraftbegriff bei Physikstudenten - In: Physik und Didaktik 9, Nr. 2, S. 111 - 122
- [26] Nachtigall, D. (1987): Skizzen zur Physikdidaktik, Verlag Peter Lang GmbH, Frankfurt am Main, Bern, New York, Paris
- [27] Clement, J. (1982): Student's preconceptions in introductory mechanics - In: American Journal of Physics 50, Nr. 1, S. 66 - 71
- [28] Thijs, G. (1992): Evaluation of an Introductory Course on "Force" Considering Students' Preconceptions - In: Wollmann, W. T. (Abschnitt-Hrsg.): Science Education 76, Nr. 2, S. 155 - 174
- [29] Wilhelm, T. (1994): Lernen der Dynamik geradliniger Bewegungen - Empirische Erhebungen und Vorschlag für ein neues Unterrichtskonzept, Schriftliche Hausarbeit für die erste Staatsprü-

fung für das Lehramt am Gymnasium, Universität Würzburg, unveröffentlicht

- [30] Demidow, I.; Lichtfeld, M.; Ussowa, A. (1997): Präkonzepte von russischen Schülern und Studenten in der Mechanik – andere als in Deutschland - In: Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachverband Didaktik der Physik (Hrsg.): Didaktik der Physik: Vorträge - Physikertagung 1997 - Berlin, S. 194 - 199
- [31] TIMSS III-Testaufgabe G15, http://www.mpib-berlin.mpg.de/TIMSSIII-Germany/Die_Testaufgaben/Die_Testaufgaben.htm
- [32] 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
- [33] 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
- [34] 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
- [35] Thornton, R.; Sokoloff, D. (1990): Learning motion concepts using real-time microcomputer-based laboratory tools - In: American Journal of Physics 58, Nr. 9, S. 858 – 867

5. Adresse

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