

Fehlvorstellungen in der Kinematik vermeiden - durch Beginn mit der zweidimensionalen Bewegung

T. Wilhelm, D. Heuer

1. Einführung

Aus den Erfahrungen, die Schüler im Alltag machen, bilden sie Vorstellungen über physikalische Abläufe, die auch durch die Alltagssprache und den Konsum der Massenmedien beeinflusst werden. Da physikalische Vorgänge i. Allg. recht komplex sind, werden sie, damit sie eingeordnet und verstanden werden können, in ihrer Komplexität reduziert. Der Physiker tut dies z.B. mit Hilfe von Idealisierungen. Auch vielen Schülervorstellungen liegt ein Reduktionsprozeß zugrunde, vgl. [1, S.114].

Schließlich können sogar durch den Physikunterricht selbst Vorstellungen geweckt oder unterstützt werden, die den Aussagen der Physik zuwiderlaufen. Von den Schülern missverständene - d.h. auf dem Hintergrund ihrer Vorstellungen interpretierte -, an sich zutreffende Informationen des Lehrers führen bei den Schülern zu Vorstellungen, die der Lehrer nicht beabsichtigt hatte, vgl. [2, S. 285]. So sagt *Nachtigall*, dass durch den Unterricht aus den ursprünglichen Präkonzepten häufig Mißkonzepte entstehen, vgl. [3, S. 12]. Entsprechend legt *Hericks* [4, S. 124-137] dar, dass in diesen Fällen die Alltagstheorien nicht weiterentwickelt werden, sondern sogar ein Rückgang der Kompetenz unter die Ausgangsbasis eintritt

2. Der Begriff Geschwindigkeit

2.1. Alltagsgebrauch des Begriffs

Was schnell und langsam bedeutet ist schon elfjährigen Schülern intuitiv klar [5]. Im Alltag wird Geschwindigkeit aber auf eine positive skalare Größe (Betragsgröße) reduziert, die man mit Schnelligkeit oder Tempo bezeichnen könnte. Beim physikalischen Geschwindigkeitsbegriff handelt es sich dagegen um eine vektorielle Größe, wobei sich bei eindimensionalen Bewegungen der Richtungscharakter der Geschwindigkeit nur noch im Vorzeichen äußert. Es ist verständlich, dass manchen Schüler widerstrebt, bei einem Auto, das in negative Koordinatenrichtung fährt, zu sagen, es fahre mit -60 km/h. Schüler bezeichnen dies als Unsinn.

2.2. Schülervorstellungen zur Geschwindigkeit im Unterricht

Die Schüler meinen aus dem Alltagsgebrauch 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, vgl. [6, S. 254]. Sie aktualisieren diesen Sachverhalt nur, wenn sie gezielt danach gefragt werden, sonst wird ihnen das in der Regel nicht bewußt. So liegt für Schüler bei der gleichförmigen Kreisbewegung eine konstante Geschwindigkeit (statt konstante Schnelligkeit) und folglich keine Beschleunigung vor.

Daneben treten weitere Probleme mit der Richtung auf. *Wodzinski* weist darauf hin, dass im Gegensatz zur Physik im Alltagsverständnis zwei Körper dann die gleiche Richtung haben, wenn sie auf das gleiche Ziel zulaufen [7, S. 42]. Bei Kreisbewegungen liegt im Alltagsverständnis immer die gleiche Richtung vor, nämlich „immer im Kreis herum“, und Schüler zeichnen entsprechend überall den Richtungs Pfeil kreisförmig gebogen ein.

Desweiteren ist den Schülern die allgemeine Definition der Geschwindigkeit $v = \Delta x / \Delta t$ auch nach dem Unterricht häufig nicht bewußt und sie greifen auf die vereinfachte Darstellung $v = s / t$ aus dem Anfangsunterricht bzw. aus dem Mathematikunterricht zurück, obwohl diese nur für eindimensionale Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit ohne Anfangsgeschwindigkeit gilt. Diese Gleichung wird im Anfangsunterricht anscheinend so fest verankert, dass sie kaum zu relativieren ist, wozu auch die Formelgläubigkeit der Schüler beiträgt. Schüler meinen, bei den unterschiedlichsten Bewegungen die Momentangeschwindigkeit mit $v = s / t$ berechnen zu können. Eine Differenzierung zwischen den Punktgrößen Ort und Zeitpunkt und den Intervallgrößen Weg/Ortsdifferenz und Zeitdifferenz fehlt.

2.3. Vorschläge, um Fehlvorstellungen zu vermeiden

Bereits vor ca. 25 Jahren haben *Jung, Reul* und *Schwedes* [8] einen radikalen und konsequenten Vorschlag gemacht, Fehlvorstellungen zur Kinematik und Dynamik zu vermeiden und dieses Konzept auch mit Erfolg erprobt: Ihre Idee war, Bewegungsabläufe mit Schülern im Unterricht zu behandeln, bevor sie ohne Unterstützung der Schule versuchen, ihre eigenen Erfahrungen aus dem Alltag selbst zu deuten. Dazu konzipierten die Autoren einen qualitativen Kinematik-Dynamik-Unterricht mit einfachen Experimenten, den sie in den Klassenstufen 3 bis 6 erprobten. Im Zentrum stand die Aufgabe, qualitative Vorstellungen über den vektoriel- len Zusammenhang von Kraft \vec{F} und Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$ aufzubauen. Die besten Unterrichtserfolge zeigten sich in der Klassenstufe 4. Dieses Ergebnis ist einfach zu deuten. Wenn der Unterricht zu spät einsetzt, ist die Chance, rechtzeitig angemessene Vorstellungen aufzubauen, nicht mehr gegeben, da dann der Unterricht gegen die bereits eigenständig auf- gebauten Vorstellungen anarbeiten muss, ähnlich wie beim Unterricht in höheren Klassenstu- fen. Unseres Wissens gibt es aber zu dieser Unterrichtskonzeption keine Langzeituntersu- chungen, die Aussagen darüber machen, wie stabil die von den Schülern in diesem frühen Ki- nematik/Dynamik-Unterricht aufgebauten Vorstellungen über viele Jahre sind. Dies wäre aber wichtig, bevor man ins Auge fassen kann, Lehrpläne entsprechend zu ändern.

Um bei einem Unterricht zu Beginn der Sek. II den vektoriellen Charakter der Größe Ge- schwindigkeit von Anfang an deutlich zu machen, ist es sinnvoll, schon bei der Einführung der Geschwindigkeit von einer zweidimensionalen Bewegung auszugehen. Sowohl die Re- duktion auf eindimensionale Betrachtungen, als auch im herkömmlichen Unterricht noch die Reduktion des Vektorcharakters nur auf das Vorzeichen ist nicht zur Überwindung von Fehl- vorstellungen geeignet. Auch wenn es gelingt, das Vorzeichen als Richtungsangabe bei linea- ren Bewegungen zu vermitteln, bleibt es doch oft ein Zusatz zur eigentlichen Geschwindig- keit wie die Aussage „nach links“ bzw. „nach rechts“.

Zum Einstieg in zeidimensionale Bewegungen eignet sich die Betrachtung einer Fahrradfahrt. Läßt man einen Schüler mit einem Fahrrad im Gang des Schulgebäudes fahren und sendet die Impulse des Dynamos über ein recht langes Kabel oder eleganter per Funk an eine umgebaute PC-Maus (vgl. [9]), kann man am PC im Klassenzimmer den zurückgelegten Weg und die augenblickliche Schnelligkeit wie bei einem Tachometer darstellen - nur hier mit sehr viel besserer Auflösung. Dabei wird deutlich, dass diese Angaben trotzdem nicht reichen, um zu wissen, wo sich der Mitschüler gerade befindet. Die Schüler erkennen, dass eine Richtungsangabe bei der Bewegung bzw. eine Ortsangabe fehlt und schlagen z.B. GPS vor, d.h. man braucht ein Bezugssystem.

Genauer lassen sich Bewegungen dokumentieren und analysieren, die mit der PC-Maus auf dem Versuchstisch durchgeführt werden. Entsprechend der Bewegung der Maus erhält man auf dem Bildschirm eine Bahnkurve, die noch keine Informationen über die benötigte Zeit enthält. Um auch deutlich zu machen, wann die Maus wo war und somit einen Eindruck von der Schnelligkeit zu bekommen, können an die Bahnkurve z.B. alle 0,1 s eine Zeitmarke oder ein Ortsvektor \vec{x} vom Bezugspunkt zu der Zeitmarke (siehe Abb. 1) gezeichnet werden. Hier wird deutlich, dass „Ort“ einen Punkt im Bezugssystem meint, während „Weg“ für die Länge der Bahnkurve steht.

Die Änderung des Ortes in einem Zeitintervall Δt kann nun mit einem zusätzlichen Ortsänderungsvektor $\Delta\vec{x}$ deutlich gemacht werden, der die Bewegungsrichtung angibt (siehe Abb. 2). Da die Schüler mit der Vektoraddition bereits vertraut sind, erkennen sie

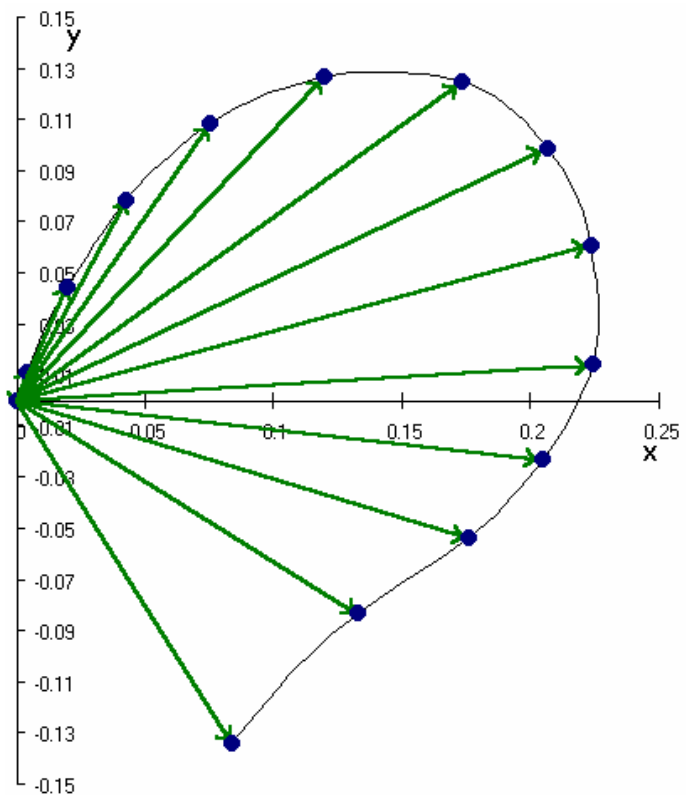


Abb. 1: Bahnkurve einer Computermaus mit Zeitmarken (alle $\Delta t = 0,15$ s) und Ortsvektoren

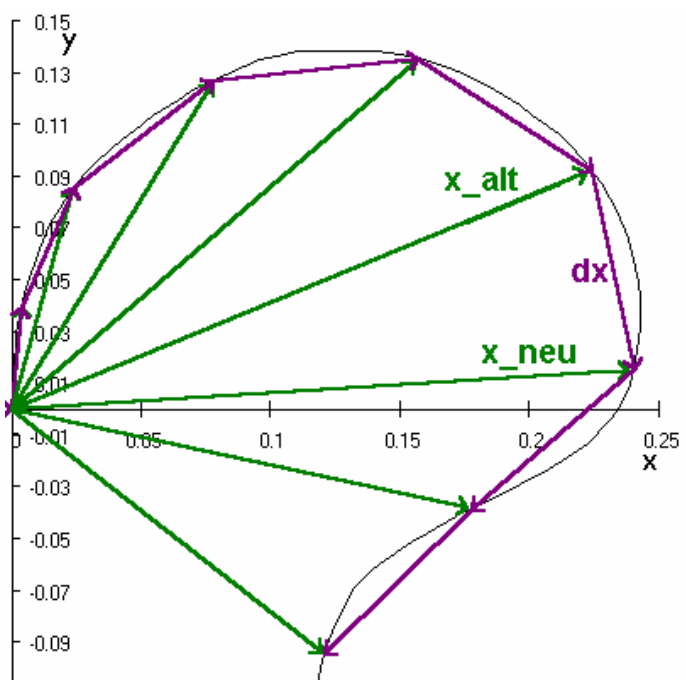


Abb. 2: Entstehung des Ortsänderungsvektors ($\Delta t = 0,25$ s)

auch, dass $\vec{x}_{alt} + \Delta\vec{x} = \vec{x}_{neu}$ oder $\Delta\vec{x} = \vec{x}_{neu} - \vec{x}_{alt}$ gilt. Die Länge dieses Vektors hängt aber nicht nur von der Schnelligkeit, sondern auch vom gewählten Zeitintervall Δt ab. Dividiert man den Ortsänderungsvektor durch das Zeitintervall, erhält man einen Vektor, dessen Länge die durchschnittliche Schnelligkeit in diesem Intervall und dessen Richtung die Bewegungsrichtung angibt. Das ist der Vektor der Durchschnittsgeschwindigkeit $\vec{v} = \Delta\vec{x} / \Delta t$. Einen Vektor für die Momentangeschwindigkeit erhält man näherungsweise für kleine Δt . Bei einer eindimensionalen Bewegung kann der Geschwindigkeitsvektor nur zwei Richtungen haben, da er nur in positive oder negative Richtung des Koordinatensystems zeigen kann. Dies kann nun mit einem Vorzeichen vor dem Zahlenwert deutlich gemacht werden.

Dem hier beschriebenen Vorgehen liegt folgende didaktische Überlegungen zugrunde: Zur Ermittlung der Geschwindigkeit wird eine anschauliche und leicht nachvollziehbare Konstruktion mit Pfeilen verwendet, die auch dynamisch von Computer dargestellt werden kann (vgl. [10]) und die Physik wird nicht durch Rechnungen überlagert oder gar verdeckt. Auch die Schüler selbst können zeichnerisch bei einer vorgegebenen Bahnkurve mit Zeitmarken Ortsänderungsvektoren bzw. Geschwindigkeitsvektoren zeichnerisch erstellen. Das hier noch als sehr leicht empfundene Vorgehen gewinnt erst an Bedeutung, wenn später bei der Erarbeitung des schwierigeren Beschleunigungsbegriffes ein Transfer durchgeführt wird und äquivalent aus den Geschwindigkeitsvektoren über den Geschwindigkeitsänderungsvektor der Beschleunigungsvektor entsteht.

2.4. Details zur experimentellen Realisierung

Zweidimensionale Bewegungen mit der Maus auf dem Versuchstisch sind mit der geeigneten Software, z.B. PAKMA 2000 unter Windows 95/98/ME, ohne jegliche Zusatzhardware und Experimentieranordnungen und ohne Umbau der Maus realisierbar, so dass damit auch Schülerversuche zur 2-dimensionalen Bewegungen in einem Computer-Pool durchgeführt werden können, vgl. [11]. Bei diesen Versuchen dient die Computermouse gleichzeitig zur Bedienung der Software und während des Programmablaufs als bewegtes Objekt mit Sensoreigenschaften zum Messen. Eine Einschränkung betrifft die "Fahrweise" mit der Maus. Damit die Zuordnung der Koordinaten zu den Sensorachsen der Maus erhalten bleibt, darf die Maus während der "Fahrt" nicht verdreht werden, da sonst die Richtungsinformation verfälscht wird und Fehlmessungen entstehen. Im PAKMA-Kernprogramm muss der Zeitschritt dt ein Vielfaches von 0.025 sein, da die Maus alle 25 ms Daten sendet. Schließlich muss die Längeneinheit richtig gewählt werden. Für eine serielle Standardmaus ist 20 bis 60 μm pro Impuls typisch. Der exakte Wert sollte bei jeder Maus durch Probieren ermittelt werden und gilt dann auch nur für diese Kombination von Maus und PC.

2.5. Unterrichtserfahrungen bei diesem Vorgehen

Durch das beschriebene Vorgehen war es den Schülern klar, dass Geschwindigkeit eine Richtung hat und dass diese bei eindimensionaler Bewegung durch ein Vorzeichen angegeben werden kann, obwohl es ihnen gefühlsmäßig weiterhin widerstrebt zu sagen, etwas bewege sich bezogen auf ein Koordinatensystem mit der Geschwindigkeit -10 m/s. Eine derartige

Aussage verlangt ja noch eine genaue Beschreibung des Umfeldes, nämlich die Festlegung/Kenntnis der Richtung der positiven Koordinatenachse. Deshalb benutzten die Schüler in Diskussionen lieber den Begriff der „Schnelligkeit“, der für sie anschaulicher ist als der äquivalente Begriff „Geschwindigkeitsbetrag“.

3. Der Begriff Beschleunigung

3.1. Alltagsgebrauch des Begriffs

Im Alltagsgebrauch meint "Beschleunigung" das "Schnellerwerden", also die Zunahme der Schnelligkeit, d.h. des Geschwindigkeitsbetrags. Anders als in der Physik versteht man darunter aber keinen Quotientenbegriff. Der Zeitraum, in dem das Schnellerwerden stattfindet, wird gelegentlich zusätzlich angegeben. *"Beschleunigung ist demnach keine auf den zeitlichen Verlauf des Vorgangs bezogene Größe, sondern eine Bilanzgröße, die aus dem Vergleich von Anfangs- und Endzustand ermittelt wird. Daher ist verständlich, daß mit einer großen Beschleunigung eher das Erreichen großer Endgeschwindigkeiten assoziiert wird als eine starke zeitliche Änderung, die auch bei kleinen Differenzen kleiner Absolutbeträge auftreten kann."* [6, S. 264]. Wegen diesem Differenzcharakter, den die Beschleunigung für die Schüler hat, kann sich die Beschleunigung für manche Schüler nur auf ein Zeitintervall beziehen und es ist für sie auch nicht möglich, einem Zeitpunkt eine Beschleunigung zuzuordnen, was insbesondere bei Umkehrpunkten (tiefster Punkt beim Trampolinspringen, höchster Punkt beim senkrechten Wurf) auftritt.

3.2. Schülervorstellungen zur Beschleunigung im Unterricht

Ein für die Newtonsche Mechanik zentraler Begriff ist der Begriff der Beschleunigung. Als zweite Ableitung des Ortes nach der Zeit - als Veränderung der Veränderung des Ortes mit der Zeit - ist die Beschleunigung jedoch der Erfahrung nicht so leicht zugänglich wie Ort oder Geschwindigkeit und ihre quantitative Erfassung ist sehr viel schwieriger.

So wird der Begriff Beschleunigung von den Schülern in seiner Komplexität oft reduziert. Am Drastischen 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 [12, S. 14]. Bei qualitativen Aufgaben zur Beschleunigung antworten Schüler dann so, als wäre nach der Geschwindigkeit gefragt worden, vgl. [13].

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 bezogen auf ein Zeitintervall $\Delta|\vec{v}|/\Delta t$). 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".

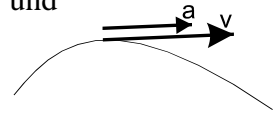
Wird nun allerdings Beschleunigung als eine skalare Größe betrachtet, die die Änderung des Geschwindigkeitsbetrages (pro Zeiteinheit) angibt und deren Vorzeichen die Zu- bzw. Abnahme des Geschwindigkeitsbetrages anzeigt, führt dies zunächst kaum zu Problemen, da sich ein Körper in der Schule meist in 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 eine radiale Beschleunigungsanteil ergibt [14, S. 349]. Die Kraft durch das Seil kompensiert eben nicht die radiale Komponente der Gewichtskraft, sondern ist (außer in den Umkehrpunkten) größer, sonst könnte sich der Pendelkörper nicht auf einer Kreisbahn bewegen.

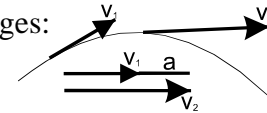
keine Beschleunigung ergibt und eine Zentripetalbeschleunigung nicht verstehbar ist. Entsprechend wird bei einer Kurvenfahrt mit veränderlicher Geschwindigkeit von den Schülern nur die tangentielle Komponente der Beschleunigung angegeben. Diese unangemessene Reduktion findet man sogar in Universitätslehrbüchern, in denen beim mathematischen Pendel die tangentielle Beschleunigung als die (gesamte) Beschleunigung dargestellt wird, ohne darauf zu verweisen, dass die Bewegung auf dem Kreisbogen eine radiale Beschleunigungsanteil ergibt [14, S. 349]. Die Kraft durch das Seil kompensiert eben nicht die radiale Komponente der Gewichtskraft, sondern ist (außer in den Umkehrpunkten) größer, sonst könnte sich der Pendelkörper nicht auf einer Kreisbahn bewegen.

Eine Richtungsumkehr tritt beim senkrechten Wurf mit einer Münze natürlicherweise auf, so dass bei einer entsprechenden Verständnisaufgabe 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. In der Aufgabenstellung wird aufwärts als die positive Richtung festgelegt und dann für die Aufwärtsbewegung, den höchsten Punkt und die Abwärtsbewegung nach dem Vorzeichen der

⊕ Kein prinzipieller Unterschied zwischen Beschleunigung und Geschwindigkeit $\vec{a} \sim \vec{v}$, nur verschiedene Formeln



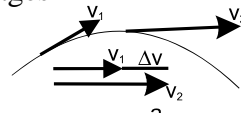
⊕ Beschleunigung ist Änderung des Geschwindigkeitsbetrages: $a = \Delta|\vec{v}|$ ist eine Zahl



(positive) Beschleunigung = schnellerwerden
negative Beschleunigung = langsamerwerden

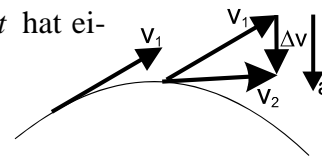
⊕ Beschleunigung ist Änderung des Geschwindigkeitsbetrages pro Zeit:

$$a = \Delta|\vec{v}| / \Delta t \text{ ist eine Zahl}$$



(positive) Beschleunigung = schnellerwerden
negative Beschleunigung = langsamerwerden

⊕ Beschleunigung ist eine vektorielle Größe: $\vec{a} = \Delta\vec{v} / \Delta t$ hat eine Richtung.



Überblick zu Schülervorstellungen zur Beschleunigung

Beschleunigung (A = negativ, B = Null, C = positiv) und zusätzlich nach der Richtung der Beschleunigung (\downarrow , 0, \uparrow) gefragt. In einer Untersuchung mit zehn Gymnasialklassen und 188 Schülern nach Abschluß der Kinematik und Dynamik [13, S. 283] gaben 41,0 % der Schüler eine der Geschwindigkeit entsprechenden Antwort (CBA). 36,2 % der Schüler antworteten entsprechend der Änderung des Geschwindigkeitsbetrages (ABC). 10,6 % lösten bis auf den Umkehrpunkt die Aufgabe richtig (ABA), während nur 6,9 % eine völlig richtige Antwort gaben (AAA). Die Frage nach der Richtung wurde von den Schülern, die der Geschwindigkeit entsprechend (CBA) antworteten, und denen, die richtig (AAA) oder fast-richtig (ABA) antworteten, meist passend zur Vorzeichenangabe gelöst ($\uparrow 0 \downarrow, \downarrow \downarrow \downarrow$ bzw. $\downarrow 0 \downarrow$). Dagegen wurden die Schüler, die entsprechend der Änderung des Geschwindigkeitsbetrages (ABC) antworteten, von dieser Fragestellung häufig verwirrt, änderten ihre Antwort mehrmals und blieben zum Großteil bei der Angabe der Geschwindigkeitsrichtung ($\uparrow 0 \downarrow$), so dass insgesamt 76,6 % der Schüler die Richtung der Geschwindigkeit statt die der Beschleunigung angaben. Etliche Schüler gaben explizit an, mit der Frage der Richtung Probleme zu haben, was wohl daran liegt, dass Beschleunigung für sie ein Zahlenwert ist.

3.3. Vorschläge, um Fehlvorstellungen zu vermeiden

Um unter anderem Schüler beim einführenden Unterricht über Kinematik/Dynamik nicht durch Begriffe und Vorstellungen aus der Statik zu belasten, hat *Wodzinski* [7] für die Sek. I einen Mechanikkurs mit Zugang über die Dynamik konzipiert und in kleinem Rahmen in einer Klasse erprobt. Ein wichtiges Ziel war, bei den Schülern qualitative Vorstellungen über den vektoriellen Zusammenhang von Kraft \vec{F} und Geschwindigkeitsänderung $\Delta\vec{v}$ aufzubauen. Dazu wurde einführend der senkrechte bzw. zeitliche Stoß auf eine rollende Kugel analysiert und über Plausibilitätsbetrachtungen die Newtonsche Bewegungsgleichung in der Form $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta\vec{v}$ erarbeitet. Dadurch konnte auf den sonst zentralen Beschleunigungsbegriff verzichtet und stattdessen mit der Geschwindigkeitsänderung gearbeitet werden, auf die die Schüler über den sich ändernden Geschwindigkeitspfeil, der längs der Bewegung für charakteristische Situationen per Hand mit eingezeichnet wurde, einen recht direkten Zugang hatten.

In einem Kinematikunterricht in der Sek. II will man aber sicher nicht auf die Behandlung des Beschleunigungsbegriffes verzichten. Schon bei der Einführung der Beschleunigung ist es hier wie bei der Geschwindigkeit sinnvoll, von einer allgemeinen zweidimensionalen Bewegung auszugehen, um den Vektorcharakter immer wieder überzeugend herausstellen zu können. Die eindimensionale beschleunigte Bewegung wird dann später als Spezialfall behandelt. Die Betrachtung läuft dabei analog zur Einführung des Geschwindigkeitsvektors: Die Änderung des Geschwindigkeitsvektors in einem Zeitintervall Δt wird nun mit einem zusätzlichen Geschwindigkeitsänderungsvektor $\Delta\vec{v}$ deutlich gemacht, der angibt, was an Geschwindigkeit „dazukam“ (siehe Abb. 3). Es gilt also $\vec{v}_{alt} + \Delta\vec{v} = \vec{v}_{neu}$ oder $\Delta\vec{v} = \vec{v}_{neu} - \vec{v}_{alt}$. Die Länge dieses Vektors hängt wieder vom gewählten Zeitintervall Δt ab. Dividiert man den Geschwindigkeitsänderungsvektor durch das Zeitintervall, erhält man einen Vektor, der unabhängig von Δt etwas über die Änderung des Geschwindigkeitsvektors aussagt. Das ist der Vektor der

Durchschnittsbeschleunigung

$\bar{a} = \Delta \vec{v} / \Delta t$. Einen Vektor für die Momentanbeschleunigung erhält man näherungsweise für kleine Δt .

Dieses Vorgehen, \bar{a} zu bestimmen, ist natürlich nichts weiter als die Umsetzung der Definition des Beschleunigungsvektors in Operations-/Konstruktionsschritte. Wie wichtig diese Fähigkeit für das Verständnis des Beschleunigungsbegriffes ist, haben *Labude*, *Reif* und *Quinn* [15, S. 82] gezeigt. Nachdem mit Studenten im Individualunterricht die zum Beschleunigungskonzept gehörigen Prozeduren erarbeitet wurden, konnten die Probanden Problemsituationen, wie sie sich z.B. aus Bewegungen in Abb. 6 ergeben, stringent lösen. Das Langzeitverhalten wurde dort aber leider nicht weiter untersucht. Entsprechende Konstruktionsprozeduren setzt *Reif* anhand von Zeichnungen auch in Lehrbüchern zur Mechanik [16, S. 31] ein [s. auch 17, S. 137].

Betrachtet man nun auf diese Weise eine eindimensionale Bewegung, stellt man fest, dass die Vektoren \vec{v} und \bar{a} genau dann die gleiche Richtung haben, wenn die Bewegung schneller wird, und entgegengesetzt gerichtet sind, wenn die Bewegung langsamer wird (s. Abb. 4). Ist ein Koordinatensystem gegeben, ergibt sich daraus, dass \vec{v} und \bar{a} genau dann das gleiche Vorzeichen haben, wenn die Bewegung schneller wird, und verschiedene Vorzeichen haben, wenn die Bewegung langsamer wird. Desweiteren stellt man fest, dass dann, wenn \vec{v} und \bar{a} immer senkrecht zueinander sind, die Bewegung auf einem Kreis mit konstantem Geschwindigkeitsbetrag/Schnelligkeit stattfindet.

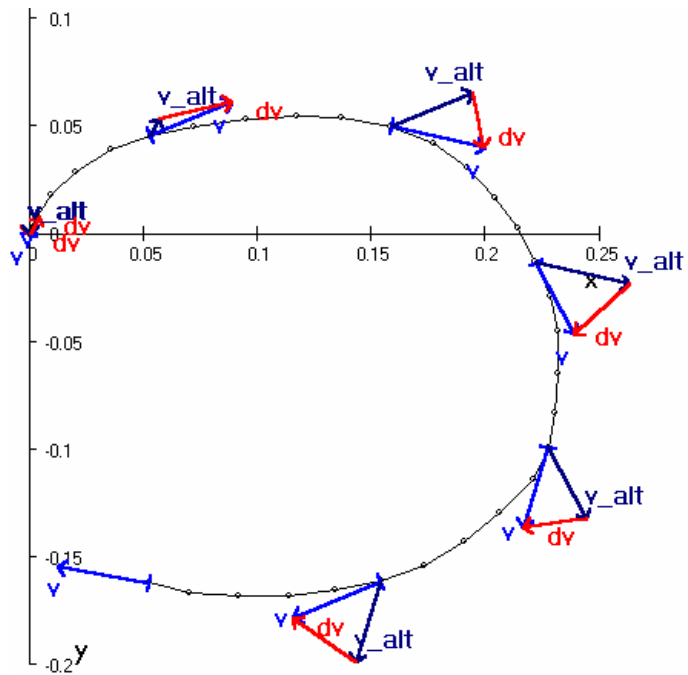
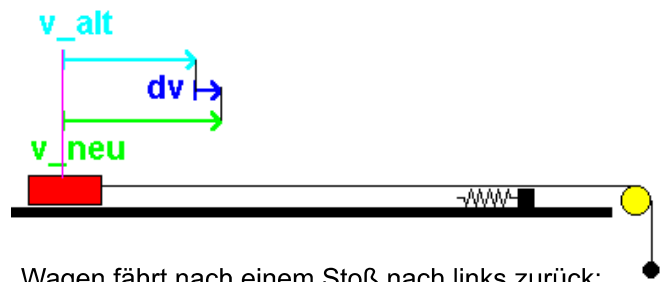


Abb. 3: Entstehung des Geschwindigkeitsänderungsvektors

Wagen wird nach rechts gezogen:



Wagen fährt nach einem Stoß nach links zurück:

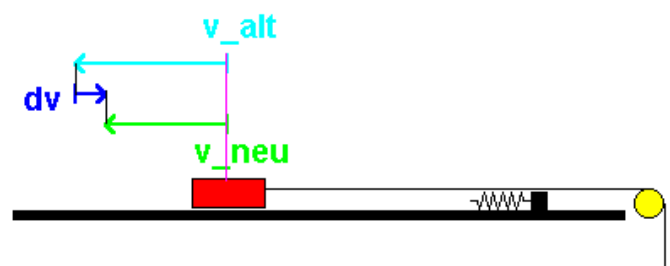


Abb. 4: Lage von \vec{v} und $d\vec{v} = \bar{a} \cdot dt$ zueinander beim Schneller- und Langsamerwerden

die Bewegung auf einem Kreis mit konstantem Geschwindigkeitsbetrag/Schnelligkeit stattfindet.

Fährt man nun mit der PC-Maus beliebig auf dem Versuchstisch umher, sieht man, dass \vec{v} und \vec{a} weder in gleiche oder in entgegengesetzte Richtung weisen noch senkrecht zueinander sind (Abb. 5). Jedoch kann man den Beschleunigungsvektor \vec{a} in einen senkrechten Anteil \vec{a}_n (Normalbeschleunigung) und einen tangentialen Anteil \vec{a}_t (Tangentialbeschleunigung) zerlegen und es ist den Schülern schnell klar, dass der senkrechte Anteil \vec{a}_n für die Richtungsänderung und somit die Kurvenfahrt verantwortlich ist, während der tangentialen Anteil \vec{a}_t die Änderung der Schnelligkeit bewirkt.

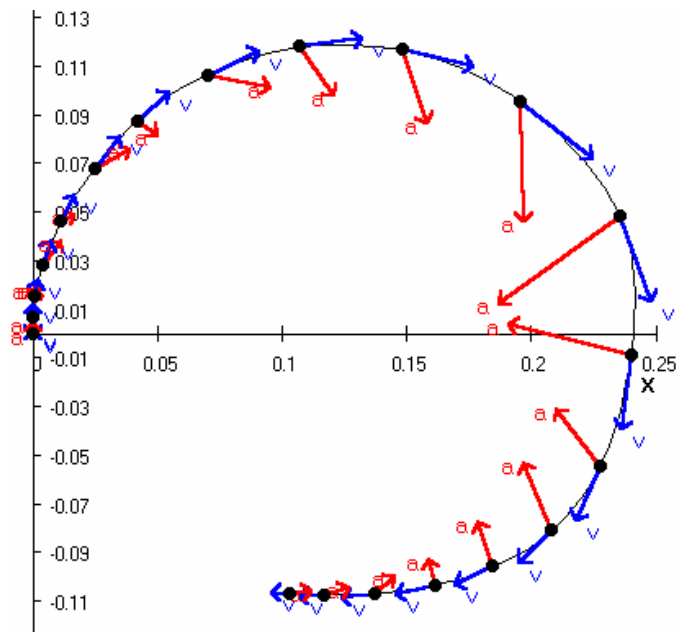


Abb. 5: Geschwindigkeit und Beschleunigung bei einer Bewegung, die erst schneller, dann langsamer wird

Das hier beschriebene Vorgehen zur Erarbeitung des Beschleunigungsbegriffes, das analog zur Erarbeitung des Geschwindigkeitsbegriffes läuft, ist auch eine anschauliche Konstruktion. Entscheidend dabei ist, dass ein Teilschritt der Konstruktion schon wichtige Informationen erhält: Der Geschwindigkeitsänderungsvektor $\Delta\vec{v}$ enthält schon die Richtung des Beschleunigungsvektors \vec{a} und die Längen sind bei festem Zeitintervall Δt proportional. Für konkrete Aufgaben bedeutet das, dass es bei der Ermittlung der Beschleunigungsrichtung genügt, sich zu überlegen, wie die Geschwindigkeitsänderung $\Delta\vec{v}$ aussieht.

In dem Unterrichtsgang wird also von Anfang an das Allgemeingültige in den Vordergrund gestellt und behandelt und erst später Spezialfälle betrachtet. Durch dieses Vorgehen werden die Definitionsgleichungen $\vec{v} = \Delta\vec{x} / \Delta t$ und $\vec{a} = \Delta\vec{v} / \Delta t$ betont, die bei herkömmlichem Vorgehen nur wenig Beachtung finden. Schon aus Zeitgründen wird dagegen das Rechnen mit den Bewegungsgleichungen, die nur für Spezialfälle gelten, nicht so stark betont.

Nicht erst seit der TIMS-Studie wird auf eine Überbetonung von Rechen- und Einsetzaufgaben - vor allem in der Mechanik und hier wiederum in der Kinematik - hingewiesen [18]. Die Vorstellung, dass es in Physik vor allem auf Formelkenntnis und Rechenfertigkeit ankommt, ist sehr verbreitet und beruht auf einer häufig anzutreffenden Schwerpunktsetzung im Unterricht [6, S. 199]. Einsetzaufgaben sind hier aber wenig hilfreich, da die Schüler nur ein Kalkül durchführen. Zwar können die Schüler durch Auswendiglernen der Formeln und durch Trainieren der Einsetzaufgaben mit Hilfe einer Gegeben-Gesucht-Strategie eine sichere Methode erlangen, um gute Noten zu erzielen, allerdings nur wenn diese Fähigkeiten unangemessen gewichtet werden. Die Physik wird damit aber nicht verstanden oder gar Vorstellungen verändert. Die Schüler lernen in einem solchen Physikunterricht letztlich nur, so zu reden, dass der Lehrer zufrieden ist, vgl. [19, S. 414]. Auch von Seiten der Universität wird kritisiert, dass

die Schüler zu sehr auf die speziellen Bewegungsgleichungen fixiert sind, die bei komplexeren Vorgängen aber nichts nützen.

Als Folge der TIMS-Studie wird wieder viel über eine neue Aufgabenkultur diskutiert. Dabei wird wieder betont, dass der Schwerpunkt im Physikunterricht auf dem qualitativen Verstehen liegen sollte und qualitative Aufgaben entscheidend für das Verständnis sind. Das hier vorgestellte Vorgehen ermöglicht diverse qualitative Aufgaben, die auf Kosten quantitativer Aufgaben durchgeführt werden. Eine qualitative Aufgabe zum Beschleunigungsbegriff ist z.B. in Abb. 6 zu sehen.

Da die Vorstellungen der Schüler den physikalischen Vorstellungen widersprechen, genügt es nicht, sich nur anzuhören, wie es die Physik sieht. Man muss sich intensiv damit auseinandersetzen und Erfahrungen damit sammeln. Deshalb sind hier Schülerübungen besonders hilfreich. Der hier beschriebene Unterrichtsgang ist zwar im normalen Klassenunterricht möglich. Noch effizienter ist es aber, wenn die Schüler im Computerraum selbst Experimente mit der Maus zur zweidimensionalen Bewegung durchführen, was leicht realisierbar ist [11].

3.4. Unterrichtserfahrungen

In vier Klassen, in denen die Kinematik und Dynamik in traditioneller Reihenfolge bereits behandelt wurde, hat *Reusch* das beschriebene Vorgehen bei der Behandlung der zweidimensionalen Bewegung genutzt [20, S. 184]. Dabei konnte er eine große Lernwirksamkeit feststellen.

Das hier beschriebene Unterrichtskonzept, bei dem der Kinematikunterricht mit der zweidimensionalen Bewegung begann, wurde im Schuljahr 2001/2002 vom Autor in einer Klasse getestet. Für die Einführung und Diskussion der Begriffe nach dem hier dargestellten Vorgehen sowie der Behandlung qualitativer Aufgaben wurde acht Unterrichtsstunden benötigt. Für die anschließende Herleitung der eindimensionalen Bewegungsgleichungen, den quantitativen Rechnen damit und einer Verkehrserziehung durch Behandlung von Bremswegen und Überholvorgängen wurden nochmals fünf Unterrichtsstunden beansprucht.

Obwohl die Konstruktion des Beschleunigungsvektors auf dem Papier kaum geübt wurde, konnten doch 70% der Schüler eine solche Konstruktion durchführen. Bei einer Aufgabe wie in Abb. 6 wurden die Beschleunigungsrichtung bei Kurvenfahrten mit konstanter Schnelligkeit von Dreiviertel der Schü-

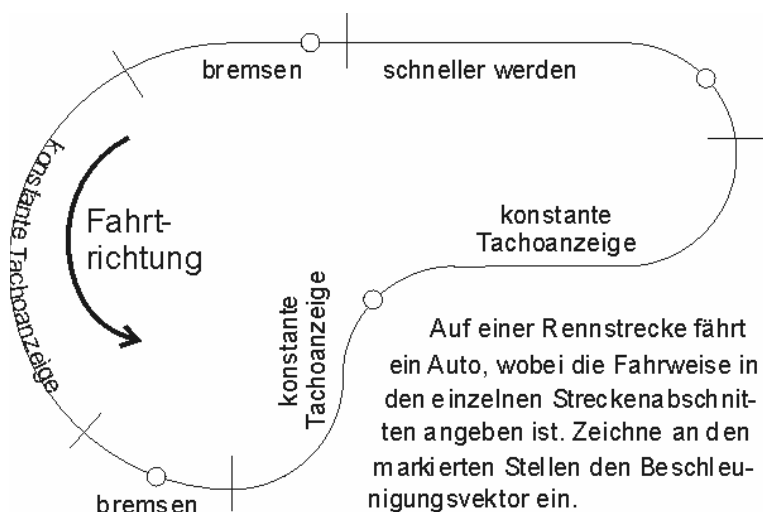


Abb. 6: Eine qualitative Aufgabe zum Beschleunigungsvektor

ler richtig angegeben (drei Monate später: von der Hälfte der Schüler). Bei der schwierigeren Situation des Bremsens oder Schnellerwerdens in der Kurve gaben noch 50-60% eine richtige Beschleunigungsrichtung an.

Bei der oben erwähnten Aufgabe zum senkrechten Wurf nach oben gab auch später im Schuljahr nur ein Schüler eine der Geschwindigkeit entsprechenden Antwort (CBA) und fast die Hälfte der Klasse eine richtige (AAA) oder fast-richtige Antwort (ABA). Bei der Frage nach der Richtung gab sogar die Hälfte eine richtige ($\downarrow\downarrow\downarrow$) und ein Viertel eine fast-richtige ($\downarrow 0 \downarrow$) Antwort, während nur ein Schüler eine der Geschwindigkeit entsprechende Antwort gab ($\uparrow 0 \downarrow$). So wurde also von drei Vierteln der Schüler dieser Klasse beim Auf- und Abbewegen die Richtung der Beschleunigung richtig angegeben, während es nach einem traditionellen Unterricht nur 24,0 % (8,5 % richtig, 15,5 % fast-richtig) sind, wie die oben erwähnte Untersuchung mit zehn Gymnasialklassen und 188 Schülern [13] ergab.

Beim quantitativen Rechnen verwendeten die Schüler dieser Klasse wie erhofft die Definitionsgleichungen statt die Bewegungsgleichung, wo es möglich war. Den Schülern, die die Software für zu Hause zur Verfügung gestellt bekamen, hat der Unterricht mit den vielen Experimenten, die sie auch selbst nachmachen konnten, nach ihren Aussagen gut gefallen (Die halbe Klasse entschied sich daraufhin für einen Physikleistungskurs).

Bemerkung:

Die verwendete Software mit den dazugehörigen einzelnen Mess- und Auswerteprogrammen befindet sich auf folgender CD-ROM:

D. Heuer et. al.: PAKMA 2000 zur Dorn•Bader Physik Sek. II, Bestandteil des Lösungsbandes Dorn•Bader Physik Sek. II (CD zum Schülerband Dorn•Bader Physik Sek. II), Schroedel-Verlag, Hannover, 2001, ISBN 3-507-10734-1

Weitere Informationen zu den CD-ROMs unter: <http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de>

Eine genaue Beschreibung des Unterrichts, eine Handreichung für Lehrer sowie vielfältige Materialien dazu können beim Autor unter wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de angefordert werden.

Literatur:

[1] *W. Jung:* Allgemeine Ergebnisse von Erhebungen über Schülervorstellungen zur Mechanik - In.: A. Scharmann, A. Hofstaetter, W. Kuhn (Hrsg.): Deutsche Physikalische Gesellschaft, Fachausschuss Didaktik der Physik, Vorträge der Frühjahrstagung 1980 Gießen, 1980, S. 110 - 115

- [2] *R. Duit*: Vorstellung und Physiklernen - Zu den Ursachen vieler Lernschwierigkeiten - In: Physik in der Schule 30, 1992, Nr. 9, S. 282 - 285
- [3] *D. Nachtigall*: Zum Verstehen von Physik im Unterricht - In: Physik in der Schule 30, 1992, Nr. 1, S. 10 - 13
- [4] *U. Hericks*: Über das Verstehen von Physik Physikalische Theoriebildung bei Schülern der Sekundarstufe II, Waxmann Verlag GmbH, Münster/New York, 1993
- [5] *C. v. Rhöneck*: Der Geschwindigkeitsbegriff von Fünftklässlern und didaktische Hilfen auf dem Weg zu $v=s/t$ - In: A. Scharmann, A. Hofstaetter, W. Kuhn (Hrsg.): Deutsche Physikalische Gesellschaft, Fachausschuss Didaktik der Physik, Vorträge der Frühjahrstagung 1983, Gießen, S. 232 - 237
- [6] *H. Schecker*: Das Schülervorverständnis zur Mechanik, Eine Untersuchung in der Sekundarstufe II unter Einbeziehung historischer und wissenschaftlicher Aspekte, Dissertation Universität Bremen, 1985
- [7] *R. Wodzinski*: Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht, Lit Verlag, Münster, 1996
- [8] *W. Jung, H. Reul, H. Schwedes*: Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3 – 6, Diesterweg, Frankfurt/Main, 1977
- [9] *D. Heuer, B. Voß, Th. Gessner*: Anfahren, Rollen und Bremsen eines Fahrrades – Experimente mit Datenerfassung über Handfunkgerät und Modellbildung – In: Praxis der Naturwissenschaften Physik 51, Heft 5, 2002
- [10] *T. Wilhelm, D. Heuer*: Dynamisch ikonische Darstellungen zur Überwindung von Fehlvorstellungen in der Dynamik – In diesem Heft
- [11] *W. Reusch, O. Gößwein, C. Kahmann, D. Heuer*: Computerunterstützte Schülerversuche zur Mechanik mit der Computermaus als Low-Cost-Bewegungssensor – In: Physik in der Schule 38, 2000, Nr. 4, S. 269 – 273
- [12] *R. W. Pohl*: Mechanik, Akustik und Wärmelehre, 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1944
- [13] *D. Heuer, T. Wilhelm*: Aristoteles siegt immer noch über Newton. Unzulängliches Dynamikverstehen in Klasse 11 - In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 50, 1997, Nr. 5, S. 280 – 285
- [14] *W. Reusch, D. Heuer*: Zweidimensionale Kinematik und Dynamik - ein Zugang mit rechnerunterstützten „Experimenten“, Beitrag im Tagungsband GDCP 1999 München, 2000, S. 349 – 351
- [15] *P. Labbude, F. Reif, L. Quinn*: Facilitation of scientific concept learning by interpretation procedures and diagnosis, International Journal of Science Education, Vol. 10, S. 81 - 98
- [16] *F. Reif*: Understanding Basic Mechanics – Text, Verlag John Wiley & Sons, USA, 1995
- [17] *F. Reif*: Acquiring an effective understanding of scientific concepts – In: L. H. T. West, A. L. Pines (Hrsg.): Cognitive structure and conceptual change, Academic Press, Orlando, 1985

- [18] *H. Dittmann, H. Näpfel, W. Schneider*: Die zerrechnete Physik - In: Kuhn, W. (Hrsg.): Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1988 Gießen (DPG, Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 389 - 394
- [19] *C. v. Aufschnaider, S. v. Aufschnaiter*: Eine neue Aufgabenkultur für den Physikunterricht, MNU 54, Heft 7, 2001, S. 409 – 416
- [20] *W. Reusch, D. Heuer*: Förderung des Physiklernens durch Visualisierung und Interaktivität im Bereich der 2-dimensionalen Kinematik/Dynamik, Beitrag im Tagungsband GDCP 1998 Essen, 1999, S. 182 – 184

Anschrift der Verfasser:

StR. Thomas Wilhelm, Prof. Dr. Dieter Heuer, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg