

# Pfeile am Computer

Thomas Wilhelm

## 1. Pfeile als dynamisch ikonische Repräsentationen

Für Schüler ist es nicht leicht, aus vorgestellten Daten Zusammenhänge zu erschließen. Daher ist es wichtig, die Daten so aufzubereiten, dass im Kurzzeitgedächtnis genügend Ressourcen zum Verarbeiten zur Verfügung stehen. Häufig werden die Abhängigkeiten physikalischer Größen durch Graphen wiedergegeben. Dies ist aber nur ein effizientes Vorgehen für diejenigen, die bereits über angemessene physikalische Konzepte verfügen und außerdem Erfahrungen haben, mit Graphen umzugehen, Graphen also sicher lesen können. Die Aussagen des oder sogar der Graphen müssen erfasst und zueinander in Beziehung gesetzt werden [1]. So haben Schüler Schwierigkeiten, Liniengraphen zu verstehen und mit ihnen zu arbeiten [2+3].

Eine leichter zu erfassende, weniger abstrakte Darstellung der relevanten Größen ist deshalb wünschenswert. Die Codierung von Aussagen in Pfeilen ist anschaulicher [1]. Sie finden sich in vielen Schulbüchern. Ihr häufiges Vorkommen zeigt offensichtlich, dass sich Aussagen mit ihnen gut verdeutlichen lassen. Sie haben aber einen prinzipiellen Nachteil: Es handelt sich stets um statische Einzelbilder, die nur eine Momentansituation aufzeigen und nicht einen Ablauf. Mit einem Computer und geeigneter Software ist es jedoch möglich, mit Pfeilen physikalische Größen dynamisch zu veranschaulichen. Pfeile zeigen die Richtung einer Größe und die Länge (oder Dicke) des Pfeils gibt den Betrag der Größe an. Dies ist insbesondere bei gerichteten Größen interessant, die man sonst nicht direkt sehen oder wahrnehmen kann, wie z.B. Stromstärken, Spannungen, Impulse, Beschleunigungen oder Kräfte. Damit sind sie eine Hilfe zum Aufbau von qualitativen Vorstellungen. Eine Hilfe für Erklärungen kann es sein, wenn mehrere Größen (wie Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kräfte) gleichzeitig darstellbar sind und in Beziehung zueinander gebracht werden.

Viele Simulationsprogramme bzw. Simulationsbaukästen nutzen die dynamische Darstellung von Pfeilen für physikalische Größen. Als Beispiele seien hier genannt: Interactive Physics, Yenka, Algodoo, Cinderella 2, Modellus 4, VPython oder die Software des Projektes „Mechanik und Verkehr“ [4]. Häufig werden sie vor allem in Java-Applets genutzt.

Bei Messwerterfassungssystemen werden Pfeile seltener verwendet. Ausnahmen sind das mittlerweile veraltete Windows-Programm PAKMA sowie das aktuelle Videoanalyseprogramm *measure dynamics* [5].

*Heuer* [6] nannte solche bildhaften Darstellungen physikalischer Größen, die sich entsprechend der Größe dynamisch verändern, dynamisch ikonische Repräsentationen. Dazu gehören neben den Pfeilen auch Säulen und Flächen, deren Flächeninhalt den Betrag einer physikalischen Größe repräsentiert, oder Balken und Linien. Animationen sind ebenso bildhafte Reprä-

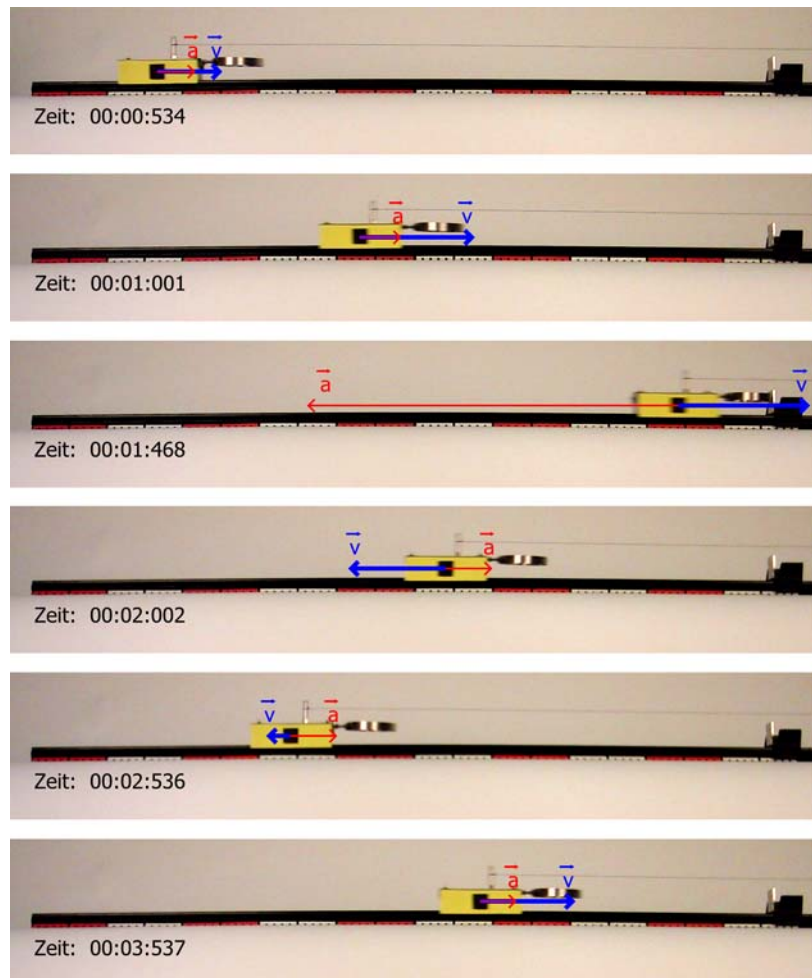
sentationen, die sich dynamisch ändern. Aber sie müssen nicht unbedingt etwas über physikalische Größen aussagen. Wenn sie sich jedoch physikalischen Größen entsprechend bewegen, kann man sie auch zu den dynamisch ikonischen Repräsentationen rechnen.

Diese externen ikonischen Darstellungen können helfen, sich selbst innere Bilder der Vorgänge zu machen. Ihr Potenzial liegt damit im Zusammenwirken externer Repräsentationen mit den internen Repräsentationen. Gerade wenn Lernende mit geringem Vorwissen nicht in der Lage sind, einen Ablauf mental zu simulieren, können die externe Repräsentation durch Animationen und Pfeile helfen, eine Vorstellung aufzubauen, was als Supplantation interner Operationen im externen Medium bezeichnet wird [7].

## 2. Der Verlauf einer gerichteten Größe

Wer eine Simulation auswählen oder erstellen will, muss sich darüber Gedanken machen, wie die Pfeile angeordnet werden sollen. Hier gibt es viele Möglichkeiten, von denen einige an einem Beispiel aufgezeigt werden sollen. Als Vorgang wird dazu ein Wagen auf einer Fahrbahn mit geringer Reibung betrachtet. Auf den Wagen wirkt stets über einen Faden eine konstante Kraft und beim Stoß am Fahrbahnde eine weitere Kraft durch eine Blattfeder. Verwendet wird hier eine Realmessung mit dem Videoanalyseprogramm „measure dynamics“, wobei ein Video mit 30 Frames per Second verwendet wurde. Fokussiert wird hier aber nicht auf eine spezielle Software, sondern auf prinzipielle Darstellungsmöglichkeiten. Dabei macht es einen Unterschied, ob es darum geht, den zeitlichen Verlauf einer Größe zu erkennen, oder darum, mehrere Größen zu vergleichen, um Strukturaussagen zu finden.

Die intuitivste Darstellung ist, einen einzigen Pfeil für die zu betrachtende Größe

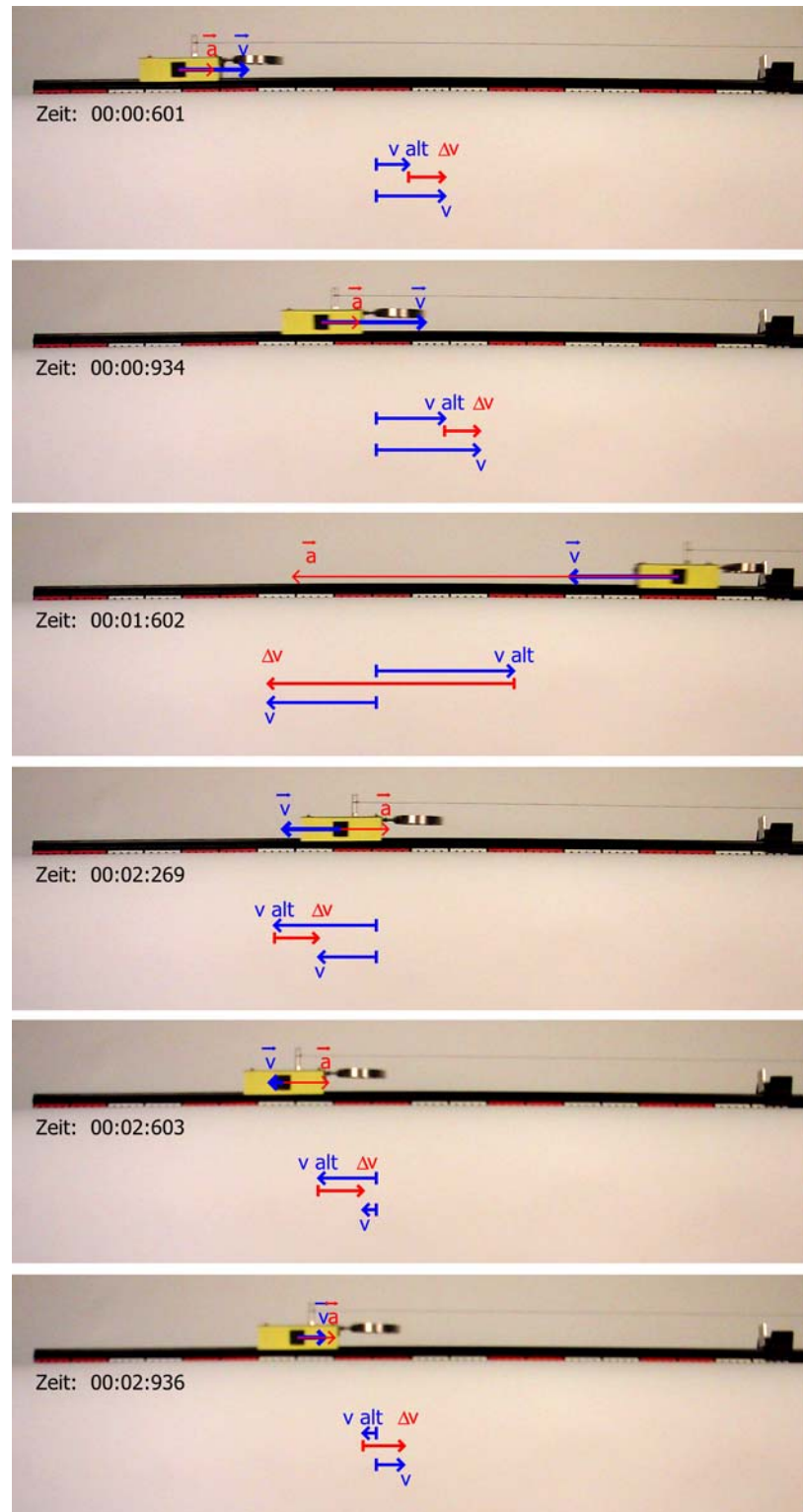


**Abb. 1:** An ein bewegtes Objekt angehängte Pfeile (hier blau Geschwindigkeit und rot Beschleunigung)

direkt an das bewegte Objekt anzuhängen (siehe Abb. 1), z.B. für die Geschwindigkeit, die Geschwindigkeitsänderung, die Beschleunigung, den Impuls oder die Kraft. Beim Ablauf des Videos oder der Animation kann man so die Größe verfolgen [8], wobei sich die Länge dieses Pfeils nach den ermittelten Werten richtet. Entgegen den hier verwendeten Abbildungen sollte zuerst nur eine Größe als Pfeil sichtbar sein und weitere erst später dazugeschaltet werden.

Beim Ablauf fällt es vor allem auf, wenn dieser Pfeil die Richtung ändert. Dagegen kann man die Veränderung der Länge mit der Zeit nur schlecht beobachten. In einem weiteren Schritt kann man den Pfeil nochmals so einzeichnen, dass der Anfangspunkt (Fußpunkte) des Pfeils fest ist (ortsfester Vektor) und sich Richtung und Länge entsprechend der dazugehörigen Größe ändern (siehe Abb. 2). Da sich der Pfeil nicht mehr mit dem Objekt bewegt, kann man die Veränderung der Länge besser sehen.

Man kann eine Animation oder ein Video auch so erstellen, dass beim Ablauf ein Stroboskopbild entsteht, in das auch die jeweiligen Pfeile eingezeichnet sind, so dass man in einem Bild die zeitliche Veränderung der Größe sehen kann (siehe Abb. 3). Dies wurde auch schon als „Stempeln“ des Pfeils bezeichnet. In measure dynamics wird es als „Spur“ bezeichnet.



**Abb. 2:** Ortsfeste Pfeile (hier blau alte und aktuelle Geschwindigkeit und rot die Geschwindigkeitsänderung in diesem Zeitintervall)

Bewegt sich der Pfeil nicht mit dem Objekt, sondern wandert nur mit der Zeit nach unten und erzeugt dabei eine „Spur“, erhält man die Darstellung von Abbildung 4. Betrachtet man nur die Spitzen der Pfeile, erhält man eine Vorstufe eines Graphen, bei dem nach unten die Zeit und nach rechts die Geschwindigkeit aufgetragen ist (Stempeldiagramm).

In einem nächsten Schritt kann man die Darstellung um  $90^\circ$  drehen, um so näher an einen üblichen Zeit-Graphen zu kommen (siehe Abb. 5). Dazu werden bei den Pfeilen die x- und y-Komponenten vertauscht und auf eine zeitlich Ver-

schiebung nach rechts geachtet. So läuft der Pfeil (Anfangspunkte auf der x-Achse) mit der Zeit nach rechts entlang der Zeitachse, weist nach oben oder unten und erzeugt ein Stempeldiagramm.

Wenn nun ein Pfeil, während er mit der Zeit nach rechts läuft, mit seiner Spitze eine Linie zeichnet und nicht mehr gestempelt wird, erhält man einen Zeit-Graphen mit einem mitlaufenden Pfeil (siehe Abb. 6). Hiermit soll der Schwierigkeit der Schüler entgegengewirkt werden, die x-Achse als Zeitachse zu erkennen, denn im Versuch entspricht die Horizontale meist dem Ort und bei der zweidimensionalen Kinematik betrachtet man zuerst x-y-Diagramme. Der entscheidende Vorteil dieser Darstellung ist, dass man die relevanten Größen nicht nur zu

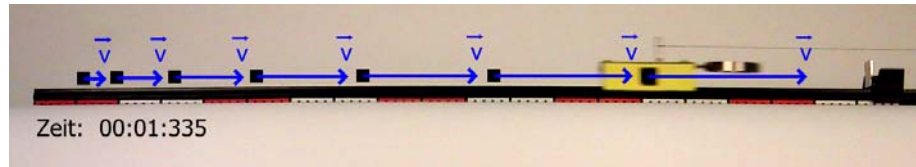


Abb. 3: Stroboskopbild des Geschwindigkeitspfeils (bzw. „gestempelter“ Pfeil bzw. „Spur“ des Pfeils)

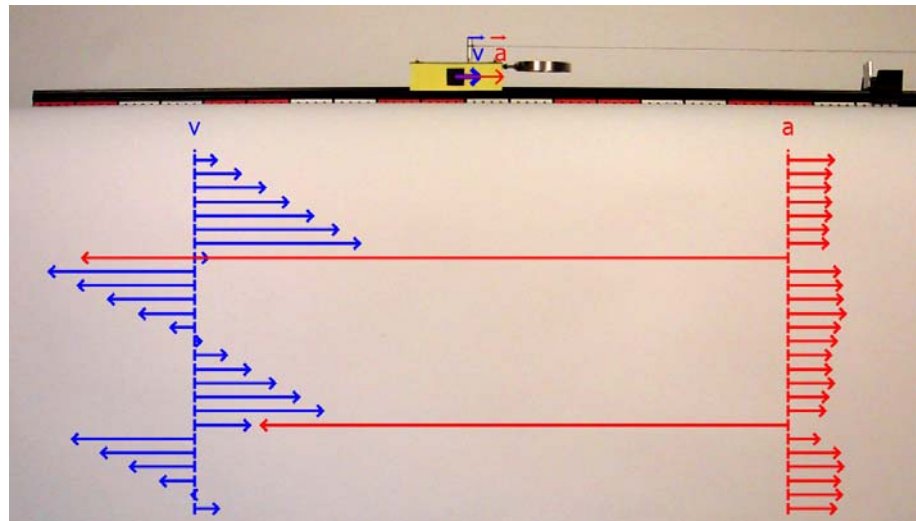


Abb. 4: „Stempeldiagramme“: Spuren von zeitlich nach unten verschobenen Pfeilen

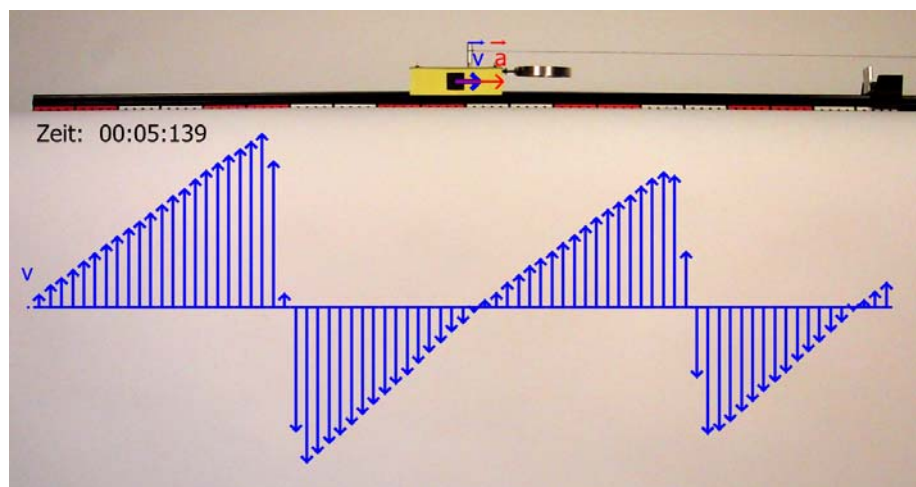
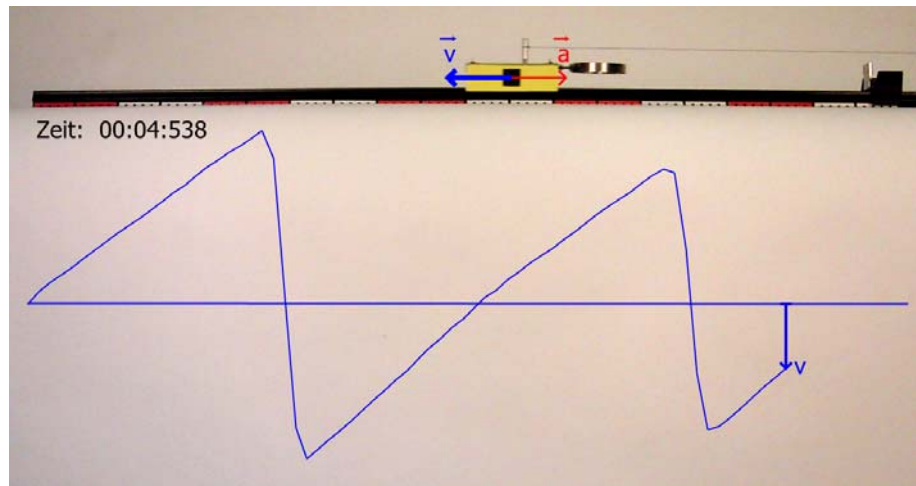


Abb. 5: Pfeile erzeugen eine Vorstufe eines Zeit-Graphen

jeweils einem Zeitpunkt sieht, sondern mit dem ganzen, bis dahin abgelaufenen Versuch vergleichen kann, also hier die zeitliche Entwicklung dokumentiert wird (Längsschnitt).



**Abb. 6: Ein Geschwindigkeitspfeil zeichnet einen Zeit-Graphen**

Häufig werden fertige Zeitgraphen gezeigt, ohne dass sie

langsam durch Pfeile erstellt werden. Aber „erst nachdem der Lernende [...] Konzepte aufgebaut und qualitative Zusammenhänge erkannt hat, sollten Graphen [...] zur Präzisierung physikalischer Abhängigkeiten herangezogen werden, deren Interpretation dann zusätzliche Verarbeitungsprozesse erfordert“ [9].

Mit den vorgestellten Zwischenschritten kommt man von einer anschaulichen Darstellung zum Zeitgraphen. Je nachdem wie neu oder vertraut den Lernenden Liniengraphen sind, müssen mehr oder weniger Zwischenstufen gewählt werden. Möglich ist auch, dass man neben der gerade zu betrachtenden Darstellung eine ältere anschaulichere Darstellungen weiterhin zum Vergleich und zur Erinnerung sichtbar lässt, damit die Lernenden leichter bestimmte Phasen des Graphen bestimmten Phasen des Ablaufs zuordnen können. Während allerdings die Darstellungen der Abbildungen 1 bis 3 in „measure dynamics“ einfach mit wenigen Klicks zu erstellen sind, machen die Darstellungen der Abbildungen 4 bis 6 etwas Mühe.

### 3. Der Vergleich verschiedener gerichteter Größen

Häufig interessiert im Physikunterricht nicht nur der zeitliche Verlauf einer Größe, sondern ihr Zusammenhang mit anderen Größen. Werden Pfeile in ein Video (siehe Abb. 1) oder in eine Animation hineingezeichnet, ist ein Vergleich verschiedener Größen manchmal schwer möglich, wenn sich die Pfeile mit dem Objekt mitbewegen. Dennoch kann in Abbildung 1 erkannt werden, dass die Bewegung schneller wird, wenn Geschwindigkeit und Beschleunigung in die gleiche Richtung weisen, und langsamer, wenn sie in entgegengesetzte Richtungen weisen. Und es fällt auf, dass während dem Stoß mit der rechten Wand eine sehr große Beschleunigung entsteht, während sie sonst als gleich klein erscheint.

Eine geeignete Darstellung ist auch hier, die verschiedenen Pfeile (evtl. zusätzlich) ortsfest zu zeigen (siehe Abb. 2). In dieser Darstellung hat man einen übersichtlichen Querschnitt durch die dargestellten Größen zu jeweils einem Zeitpunkt, so dass man diese gut vergleichen kann. In Abbildung 2 wurde die aktuelle Geschwindigkeit, eine frühere Geschwindigkeit und die

Geschwindigkeitsänderung in diesem Zeitintervall eingezeichnet. Nun ist gut zu erkennen, dass die Geschwindigkeitsänderung bis auf die Stöße ungefähr konstant ist. Im Stempeldiagramm der Abbildung 4 ist allerdings zu sehen, dass bei der Bewegung nach links die Beschleunigung etwas größer ist, als bei der Bewegung nach rechts, was daran liegt, dass die Reibungskraft ihre Richtung ändert und einmal gegen und einmal mit der Zugkraft auf den Wagen wirkt.

Der nächste Abstraktionsschritt wäre, alle relevanten Größen in einen Zeitgraphen einzuzichnen. Auch hier können die verschiedenfarbigen Pfeile wieder eingezeichnet werden, so dass die Anfangspunkte dabei der Zeitachse entlang laufen und die Pfeile nach oben oder unten weisen, wobei an der Spitze der Pfeile farblich entsprechende Linien entstehen (Abb. 7).

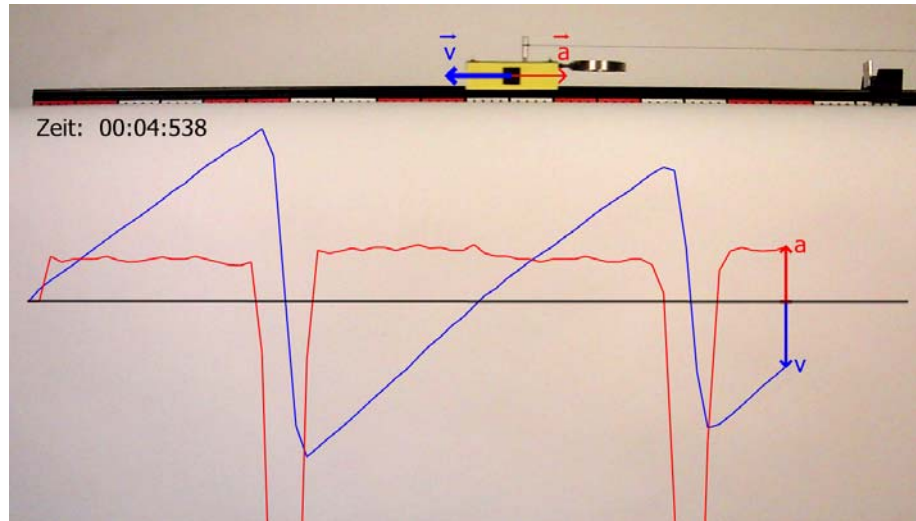


Abb. 7: Zwei Zeit-Graphen in einem Diagramm

#### 4. Vorteile dynamischer Pfeile

Ein Vorteil der Pfeile ist, dass die dargestellten vektoriellen Größen, die in der Physik häufig vorkommen, auch sofort als gerichtete Größen erkennbar sind. Damit sollen die Schüler von Anfang an mit dem vektoriellen Charakter der betrachteten Größen vertraut gemacht werden. Denn häufig werden vektorielle Größen von den Schülern auf ihre Beträge reduziert (z.B. Geschwindigkeit, Beschleunigung, Reibungskraft). Wird diese „Pfeildarstellung“ konsequent eingesetzt, tritt ein Übungs- und Gewöhnungseffekt auf und der Richtungscharakter wird von den Schülern verinnerlicht.

Dynamisch dargestellte Pfeile können genutzt werden, um durch ihre Anordnung nicht nur die Größe jeder einzelnen Größe darzustellen, sondern auch Zusammenhänge zwischen den Größen darzustellen und Gründe für deren Verhalten deutlich zu machen. So wird z.B. in Abbildung 2 deutlich, dass  $v_{alt}$  und  $\Delta v$  zusammen das aktuelle  $v$  ergeben. Während dem Ablauf wird  $v$  kontinuierlich größer, während  $\Delta v$  in etwa konstant bleibt. Durch die Art der Anordnung der Pfeile werden also physikalische Strukturen mit sichtbar.

Günstig ist es, wenn Pfeile für die relevanten physikalischen Größen so dargestellt werden, dass sie dynamisch mit einer Animation oder mit einem Video mitlaufen, um stets den Kontext mit zu sehen. Dies unterstützt das episodische Gedächtnis und erleichtert damit das Erinnern und eine Interpretation eines Versuchsablaufs. Insbesondere ist eine zeitliche Zuordnung der dargestellten Größen zu einzelnen Phasen des Ablaufes möglich.

In einer erweiterten Darstellung sollten zusätzlich zu diesen ikonischen Bildelementen Graphen angezeigt werden. Denn ihnen sind wichtige Aussagen über das gesamte Verhalten des Ablaufs zu entnehmen. Die Fähigkeit, Graphen zu interpretieren, ist ein relevantes Lernziel des Physikunterrichts. Während mit ikonischen Bildelementen wie Pfeilen ein momentaner Querschnitt über alle relevanten physikalischen Größen gegeben wird, stellt ein Graph einen Längsschnitt einer Größe über den ganzen Versuchsablauf dar [10]. Der synchrone Einsatz mehrerer verschiedener Kodierungssysteme, wie z.B. Pfeile und Graphen, bietet nun dem Lernenden die Möglichkeit, kurzzeitig von einer noch ungewohnten, logisch abstrakten Kodierung auf eine gewohntere bildlichere zu wechseln, um so mit den gewonnenen zusätzlichen Informationen Verständnisschwierigkeiten abzubauen.

## **5. Probleme dynamischer Pfeile**

Natürlich stellen dynamische Pfeile auch neue Anforderungen an die Lernenden, da spezielle Kodierungen verwendet werden. Die Darstellungen müssen ebenso gelesen und verstanden werden. Dabei muss die Aufmerksamkeit teilweise auf verschiedene Stellen gleichzeitig gerichtet werden. Schließlich müssen aufeinander folgende Einzelbilder verarbeitet bzw. zueinander in Beziehung gesetzt werden.

Deshalb muss in die Bedeutung von und der Umgang mit Vektorpfeilen sorgfältig eingeführt werden und eine Vertrautheit damit geschaffen werden. Außerdem sollten nicht zu viele verschiedene Repräsentationen gleichzeitig dargestellt werden. Die Lehrkraft sollte die Aufmerksamkeit auf ganz bestimmte Dinge lenken. Des Weiteren ist es hilfreich, wenn man die Darstellung langsamer, also in Zeitlupe ablaufen lassen kann, wobei die Reproduktionsgeschwindigkeit gewählt werden kann. Damit ist es möglich, auch bei in Realität schnell ablaufenden Vorgängen in aller Ruhe die Pfeile für die relevanten Größen zu beobachten. Sinnvoll für den Unterrichtseinsatz ist ferner, wenn zu beliebigen Zeitpunkten, z.B. bei entscheidenden Phasen, der Ablauf angehalten und diskutiert werden kann, um ihn anschließend ganz oder stückweise weiter laufen zu lassen.

Wichtig ist, dass die Farben der Pfeile innerhalb eines Schuljahres konsequent verwendet werden, also eine physikalische Größe immer die gleiche Farbe hat. Das Gleiche gilt für die Pfeilform, d.h. der Form des Pfeilfußes und der Form der Pfeilspitze sowie evtl. der Pfeilbreite (z.B. Doppelpfeil). Außerdem sollten die Pfeile immer beschriftet werden. Am Besten, es steht nicht in einer Legende am Rande, welche Farbe für welche Größe steht, sondern direkt an der Pfeilspitze steht immer der Buchstabe, der für die entsprechende Größe steht.

**Hinweis:**

Alle Abbildungen können auch als Video betrachtet werden. Sie befinden sich bei den Online-Ergänzungen der Zeitschrift und unter [www.thomas-wilhelm.net/Pfeile](http://www.thomas-wilhelm.net/Pfeile)

**Literatur**

- [1] D. Heuer: Dynamische Physik-Repräsentationen als Brückenschlag zwischen realen Experimenten und inneren Bildern - In: Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik (Hrsg.): Didaktik der Physik: Vorträge - Physikertagung 1993 - Esslingen (1993), S. 367 - 370
- [2] C. Berg & P. Smith: Assessing students' abilities to construct and interpret line graphs: Disparities between multiple-choice and free-response instruments, *Science Education* 78 (1994), S. 527 - 554
- [3] D. Heuer & T. Wilhelm: Aristoteles siegt immer noch über Newton. Unzulängliches Dynamikverstehen in Klasse 11 - In: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 50, Nr. 5 (1997), S. 280 – 285
- [4] A. Bresges & A. Busse: Multimedia im Physikunterricht soll den Verkehrstod junger Autofahrer verhindern helfen – In: V. Nordmeier & A. Oberländer (Hrsg.): *Didaktik der Physik. Beiträge der Frühjahrstagung – Düsseldorf 2004* (2004), Berlin
- [5] [www.thomas-wilhelm.net/mD.htm](http://www.thomas-wilhelm.net/mD.htm)
- [6] D. Heuer: Konzepte für Systemsoftware zum Physikverstehen - In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik* 45, Nr. 4 (1996), S. 2 – 11
- [7] G. Salomon: *Interaction of Media, Cognition and Learning*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ (1994)
- [8] D. Heuer: Physikunterricht, gestaltet mit Multimedia-Elementen - In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 52, Nr. 3 (2003), S. 2 – 15
- [9] D. Heuer: Dynamische Physik-Repräsentationen in Realexperimenten Beispiele - In: Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik (Hrsg.): *Didaktik der Physik: Vorträge - Physikertagung 1993 - Esslingen* (1993), S. 371 - 378
- [10] D. Heuer & T. Wilhelm: Physikalische Abläufe verständlich machen durch Visualisierung von Strukturaussagen mit Hilfe des Computers – In: F. C. Sauter, W. Schneider & G. Büttner, G. (Hrsg.): *Schulwirklichkeit und Wissenschaft – Ausgewählte Kongressbeiträge von Didaktikern, Pädagogen, Psychologen*, Verlag Dr. Kovač, Hamburg (2003), S. 101 – 121

**Anschrift des Verfassers:**

Prof. Dr. habil. *Thomas Wilhelm*, Didaktik der Physik, Universität Augsburg, Universitätsstraße 1, 86135 Augsburg, [info@thomas-wilhelm.net](mailto:info@thomas-wilhelm.net), [www.thomas-wilhelm.net](http://www.thomas-wilhelm.net)