

Die folgenden Original-Seiten der Zeitschrift „Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht“ wurden mit Genehmigung des Verlages Klaus Seeberger auf die Webseite www.thomas-wilhelm.net gestellt.

Vielen Dank für die Erlaubnis.

Die exakte Quellenangabe des Artikels ist:

HEUER, D.; WILHELM, T.

Aristoteles siegt immer noch über Newton - Unzulängliches Dynamikverstehen in Klasse 11

Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 50, Nr. 5, 1997, S. 280 - 285

Aristoteles siegt immer noch über Newton

Unzulängliches Dynamikverstehen in Klasse 11

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

Ein zentrales Thema der klassischen Physik sind die Newtonschen Axiome. Es wird eine empirische Untersuchung darüber vorgestellt, wieweit Schüler nach dem Dynamikunterricht der elften Klasse Vorstellungen erworben haben, die dem ersten und zweiten Newtonschen Gesetz entsprechen. Dabei wurde auch festgestellt, welche Art der Aufgabenstellung und welche Form der Antwortdarstellung eher welche Vorstellung aktiviert.

1 Intention der durchgeführten Untersuchung

Man weiß heute aus einer Reihe von Untersuchungen vieles darüber, wie Schüler den Zusammenhang zwischen Kraft und Bewegung sehen. (Eine Übersicht über die Untersuchungen, die bis 1985 gemacht wurden, findet sich in [1]. Eine knappe Auflistung typischer Schülervorstellungen findet sich in [2].) Obwohl solche Schülervorstellungen immer individuelle Vorstellungen sind, lassen sich doch viele Gemeinsamkeiten und typische Merkmale feststellen. So ist es sicher nicht zufällig, daß diese Schülervorstellungen in einigen Punkten historischen Theorien ähneln, so der Aristotelischen Bewegungslehre oder den mittelalterlichen Impetustheorien. Allerdings sind sich Lehrer häufig nicht im klaren darüber, in welchem Umfang ihre Schüler auch nach dem von ihnen erteilten Physikunterricht noch solche nicht-physikalischen Vorstellungen haben.

In der hier dargestellten Untersuchung zu diesem Thema ging es nicht darum, weitere Details zu individuellen Schülervorstellungen aufzuzeigen. Es sollte vielmehr festgestellt werden, wieweit Schüler einige Monate nach dem Dynamikunterricht in der elften Klasse des Gymnasiums und der Fachoberschule eher Vorstellungen haben, die man als newtonsch bezeichnen kann, oder eher solche, die als aristotelisch einzuordnen sind. Mit anderen Worten ging es darum zu sehen, in welchem Ausmaß es den Schülern in dem lehrplanmäßigen Physikunterricht gelingt, ihre Alltagsvorstellungen zur Dynamik hin zu angemessenen physikalischen Vorstellungen dauerhaft zu verändern.

2 Die Form der durchgeführten Untersuchung

Zu diesem Zweck wurden den Schülern etwa 3–6 Monate nach dem Unterricht über die Newtonschen Gesetze aus physikalischer Sicht recht einfache Fragen zu alltagsrelevanten Situationen gestellt. Da aber – je nachdem in welchem Kontext die Fragestellung eingebettet ist – unterschiedliche Vorstellungen aktiviert werden und Schüler auch zwischen verschiedenen Vorstellungen hin- und herspringen können, wurde eine größere Zahl physikalisch ähnlicher Fragen eingesetzt.

Ein solcher Satz von Aufgaben in Multiple Choice-Form wurde von RONALD THORNTON an der Tufts University in Boston, Massachusetts (USA) erarbeitet [3]. Diese wurden im Rahmen einer Zulassungsarbeit [4] ins Deutsche übersetzt, mehrfach sprachlich überarbeitet und auch inhaltlich etwas abgeändert. Besonderer Wert wurde auf eine übersichtliche und ansprechende Gestaltung gelegt. Außerdem wurden die Aufgaben mit einzelnen Schülern durchgesprochen, deren Reaktionen und Verständnisschwierigkeiten zu weiteren Verbesserungen führten.

Im Schuljahr 1994/95 beantworteten – neben Schülern aus der Fachoberschule – 188 Schüler aus zehn Klassen der elften Jahrgangsstufe des Gymnasiums (im wesentlichen aus Unterfranken) die ausgearbeiteten Aufgaben. (Diese sind bei den Autoren erhältlich.) Im folgenden werden kurz die Aufgaben und typische Antwortverhalten der Schüler vorgestellt. Global kann man sagen, daß auch nach dem Physikunterricht von einem erstaunlich großen Teil der Schüler ganz selbstverständlich eine Kraft in Bewegungsrichtung proportional zur gewünschten Geschwindigkeit angenommen wird – je nach Aufgabenstellung sind es ca. 30 bis 75%. In jeder Klasse hatten die Schüler außerdem zu zwei Aufgaben je eine schriftliche Begründung der Antwort zu geben. So liegen nun zu fast jeder Aufgabe auch schriftliche Begründungen vor. Hieraus ist zu sehen, daß die Schüler die Aufgabenstellung verstanden haben und welche Vorstellungen sie zu ihren Antworten geführt haben.



3 Antwortverhalten bei Fragestellungen zu Kräften an einem idealen Schlitten

Im ersten Aufgabenblock ist ein Schlitten dargestellt (siehe Abb. 1). Im Text wird beschrieben, daß er sich auf einer Eisfläche so bewegt, daß Reibung und Luftwiderstand vernachlässigbar sind. Über einen ferngesteuerten Propeller können auf den Schlitten unterschiedliche Kräfte ausgeübt werden. In den einzelnen Aufgaben 1–7 bewegt sich der Schlitten nun nach rechts oder links und zwar schneller oder langsamer werdend oder mit konstanter Geschwindigkeit.

Fragen zu Kraft und Bewegung

Anleitung zu allen Aufgaben: Beantworte alle Fragen 1-35 nur in den Lücken auf dem gesonderten Antwortblatt.

Situation: Ein Schlitten bewegt sich auf einer Eisfläche. Die Reibung und der Luftwiderstand sind bei dieser Bewegung so klein, daß sie vernachlässigt werden können. Auf dem Schlitten befindet sich ein ferngesteuerter Propeller, mit dem (ferngesteuert) auf den Schlitten unterschiedliche Kräfte ausgeübt werden können.
 Aufgabe: Wähle die eine Kraft (A bis G), die den Schlitten so bewegt, wie es in jeder der Fragen 1-7 unten beschrieben ist. Die einzelnen Fragen sind dabei unabhängig voneinander.
 Hinweis: Du kannst jede der Kräfte A bis G mehrmals für die Fragen 1-7 auswählen oder auch gar nicht, aber wähle nur eine Antwort pro Frage. Wenn Du meinst, daß keine Antwort richtig ist, antworte mit J.

	<p>Die Kraft ist nach rechts gerichtet und</p> <p>A. ihre Stärke (Größe) nimmt zu. B. hat konstante Stärke. C. nimmt an Stärke ab. D. Es wird keine Kraft benötigt</p>
	<p>Die Kraft ist nach links gerichtet und</p> <p>E. nimmt an Stärke ab. F. hat konstante Stärke. G. nimmt an Stärke zu.</p>

- ☛ 1. Der Schlitten bewegt sich nach rechts. Bei welcher Kraft bewegt er sich weiterhin nach rechts und wird gleichmäßig immer schneller (konstante Beschleunigung)?
- ☛ 2. Der Schlitten bewegt sich nach links. Bei welcher Kraft bewegt er sich weiterhin nach links mit einer konstanten Geschwindigkeit?
- ☛ 3. Der Schlitten bewegt sich nach rechts. Bei welcher Kraft wird er gleichmäßig immer langsamer (konstante Beschleunigung)?
- ☛ 4. Der Schlitten bewegt sich nach links. Bei welcher Kraft bewegt er sich weiterhin nach links und wird gleichmäßig immer schneller (konstante Beschleunigung)?
- ☛ 5. Der Schlitten wurde aus der Ruhe gestartet und geschoben, bis er eine feste (konstante) Geschwindigkeit nach rechts erreichte. Bei welcher Kraft bewegt sich der Schlitten mit dieser Geschwindigkeit weiter?
- ☛ 6. Der Schlitten brems gleichmäßig ab und hat eine konstante Beschleunigung nach rechts. Welche Kraft ist für diese Bewegung verantwortlich?
- ☛ 7. Der Schlitten bewegt sich nach links. Bei welcher Kraft bewegt er sich weiterhin nach links und wird gleichmäßig immer langsamer (konstante Beschleunigung)?

Abb. 1. Die Aufgaben zu Kräften, die einen Schlitten bewegen

Dazu ist jeweils eine Kraft aus den Antworten A-G auszuwählen, die den Schlitten entsprechend weiterfahren läßt.

Diese einfachen Aufgaben wurden je nach Aufgabe nur von 17 bis 50% der Schüler richtig im Sinne der newtonschen Sichtweise beantwortet (siehe Abb. 2). 41 bis 58% der Schüler (je nach Aufgabe) gaben Kräfte an, die in Bewegungsrichtung wiesen und sich mit der Geschwindigkeit veränderten. Kaum ein Schüler hält dabei eine Sichtweise bei allen Fragen bei, doch korreliert die Beantwortung jeder Frage sehr hoch mit den entsprechenden Beantwortungen der anderen Fragen. Viele Lehrer, die die Aufgaben eingesetzt hatten, hatten sehr viel bessere Ergebnisse erwartet und waren hier sehr verwundert und regelrecht frustriert über die Ergebnisse ihrer Schüler.

Auffällig ist, daß – wie zu erwarten – Aufgaben mit Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit am häufigsten und solche mit langsamer werdenden Bewegun-

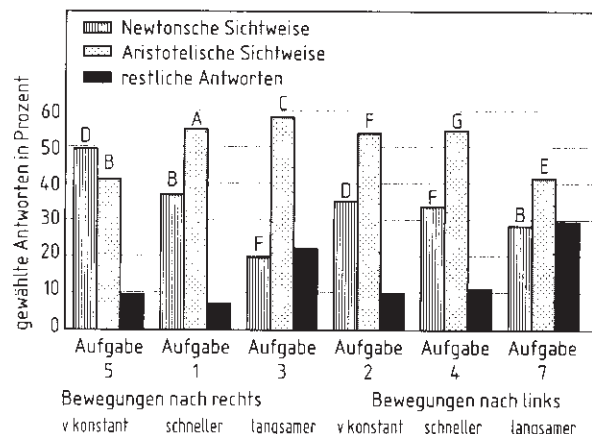


Abb. 2. Beantwortung der Schlittenaufgaben (zehn Klassen Gymnasium mit 188 Schülern); die Buchstaben A, B, C... bezeichnen die entsprechende Antwort in Abbildung 1

Situation: Die Fragen 14-21 beziehen sich auf ein Spielzeugauto, das sich nach rechts oder links entlang einer horizontalen Linie (der x-Achse eines Koordinatensystems) bewegen kann. Nimm an, daß die Reibung und der Luftwiderstand so klein sind, daß sie vernachlässigt werden können.



Aufgabe: Eine Kraft wirkt auf das Auto. Wähle für jede der unten gemachten Aussagen einen Kraftgraphen aus den Graphen A bis H aus, der es ermöglicht, daß die beschriebene Bewegung des Autos besteht.

Hinweis: Du darfst jede Möglichkeit (A bis H) mehrfach wählen oder überhaupt nicht. Wenn du denkst, daß keine korrekt ist, wähle J.

- 14. Das Auto bewegt sich nach rechts (in positive Richtung) mit einer festen (konstanten) Geschwindigkeit.
- 15. Das Auto ist in Ruhe.
- 16. Das Auto bewegt sich nach rechts und wird gleichmäßig immer schneller (konstante Beschleunigung).
- 17. Das Auto bewegt sich nach links (in negative Richtung) mit einer festen (konstanten) Geschwindigkeit.
- 18. Das Auto bewegt sich nach rechts und wird gleichmäßig immer langsamer (konstante Beschleunigung).
- 19. Das Auto bewegt sich nach links und wird gleichmäßig immer schneller (konstante Beschleunigung).
- 20. Das Auto bewegt sich nach rechts, wird schneller und dann langsamer.
- 21. Das Auto wurde nach rechts gestoßen und dann losgelassen. Welcher Graph beschreibt die Kraft, nachdem das Auto losgelassen wurde?

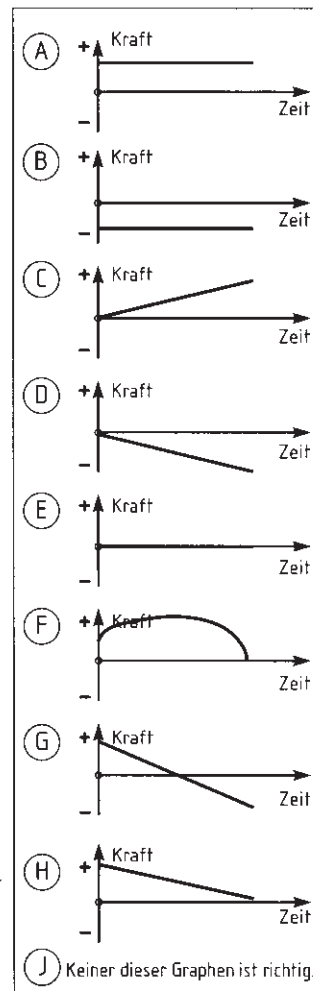


Abb. 3. Die Aufgaben, in denen Kraft-Zeit-Graphen einer Bewegung zuzuordnen sind

gen am seltensten richtig beantwortet wurden. Überraschend ist, daß bei physikalisch äquivalenten Aufgaben unterschiedlicher Bewegungsrichtung meistens die Aufgaben mit Bewegung nach rechts häufiger richtig beantwortet wurden als die mit einer Bewegung nach links.

4 Antwortverhalten bei Fragestellungen zu Kräften in Verbindung mit Graphen

In einem weiteren Aufgabenkomplex wurden nochmals zu einer ähnlichen Aufgabenstellung ähnliche Fragen gestellt (siehe Abb. 3). Hier war allerdings ein Koordinatensystem vorgegeben, und die möglichen Antworten für die gesuchte Kraft wurden als Graphen dargestellt.

Hier antworteten sogar nur 15 bis 27% im newtonschen Sinne - also nur gut halb so viele wie bei dem ersten Aufgabenblock -, 67 bis 76% der Schüler im aristotelischen Sinne (siehe Abb. 4). Bei der Darstellung der möglichen Antworten in Graphen geben also noch mehr Schüler eine Kraft proportional zur Geschwindigkeit an. Man könnte annehmen, daß die

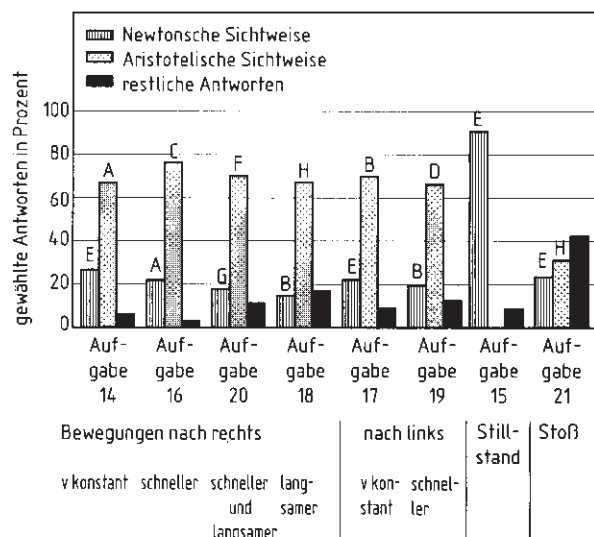


Abb. 4. Beantwortung der Kraftgraphenaufgaben (zehn Klassen mit 188 Schülern); die Buchstaben A, B, C... bezeichnen die entsprechende Antwort in Abbildung 3

Schüler Schwierigkeiten haben, Graphen zu interpretieren. Dies ist aber keineswegs der Fall. Denn wenn die Schüler zu einer beschriebenen Bewegung den passenden Geschwindigkeitsgraph angeben sollten, hatten sie zur Verblüffung der Lehrer und trotz anderer Ergebnisse in anderen Tests (siehe z. B. [5], [6]) überhaupt keine Probleme. 91 bis 98 % der Schüler beantworteten die Aufgaben hier richtig. Eine Vermutung ist deshalb, daß es für die Schüler schwerer ist, wenn sie zusätzlich zur Überlegung, welche Kraft wirkt, gleichzeitig noch Graphen zu interpretieren haben.

In einer Klasse war der Unterschied in der Beantwortung zwischen den Kraftaufgaben zum idealen Schlitten und den Kraftgraphenaufgaben nicht so groß wie in anderen Klassen. Möglicherweise bestanden in dieser Klasse weniger Probleme mit Grapheninterpretation als in anderen Klassen, da der Lehrer nach seinen Aussagen im Unterricht intensiv mit »PAKMA für den Commodore C 64« Grapheninterpretation zu Bewegungsabläufen geübt hatte.

5 Antwortverhalten bei Fragestellungen zu Kräften beim Wurf nach oben

Besonders auffallend sind die Ergebnisse bei den folgenden Aufgaben. Ein Spielzeugauto bekommt einen Stoß eine schiefe Ebene hinauf. Gefragt ist nun die Kraft, die auf das Auto wirkt, wenn es a) nach dem Stoß die Rampe hochrollt, b) an seinem höchsten Punkt ist oder c) sich wieder abwärts bewegt. Nur 9 % gaben an, daß die Kraft auf das Auto stets abwärts gerichtet ist. 80 % dagegen gaben an, daß beim Hochrollen die Kraft nach oben gerichtet und im Umkehrpunkt null ist.

Den schriftlichen Begründungen zufolge nehmen die meisten Schüler an, daß während der ganzen Bewegung außer der Hangabtriebskraft eine Kraft nach oben wirkt, die sie Schubkraft, Anstoßkraft oder Antriebskraft nannten. Für die Bewegungsrichtung ist nach Schülermeinung entscheidend, welche der beiden Kräfte gerade größer ist. Man sieht hier fast durchgehend rein statische Begründungen. In der physikalisch äquivalenten Aufgabe, in der eine Münze nach oben geworfen wird, antworten zwar ca. 20 % Schüler anders, als sie in der Spielzeugautoaufgabe geantwortet haben; aber insgesamt ergibt sich doch bei beiden Aufgaben ein fast gleiches Gesamtergebnis (10 % newtonsche, 73 % aristotelische Antworten). Im einzelnen entsprechen die Ergebnisse hier den Ergebnissen anderer Untersuchungen (z. B. von SCHECKER [1, S. 107, 113, 300], CLEMENT [1, S. 357] oder NACHTIGALL [7]).

6 Antwortverhalten bei Fragestellungen zur Beschleunigung

Schwierig wird es auch für die Schüler, wenn sie den passenden Beschleunigungsgraph zu einer beschrie-

benen Bewegung angeben sollen. Dazu sind unterschiedliche $a(t)$ -Graphen zur Auswahl vorgegeben, z. B. waagrechte, ansteigende oder abfallende Geraden. 25 bis 51 % der Schüler – je nach Aufgabe – wählen nicht den Graphen, der die Beschleunigung, sondern den, der die Geschwindigkeit anzeigt (siehe Abb. 5). Auch aus den schriftlichen Begründungen geht hervor, daß viele Schüler den Beschleunigungsbegriff nicht verstanden haben, sondern Beschleunigung für sie so etwas wie Geschwindigkeit ist. Es ist offensichtlich nicht so – wie man vielleicht meinen könnte –, daß die Schüler bei der Beantwortung die beiden Begriffe Beschleunigung und Geschwindigkeit einfach verwechselten; für diese Schüler besteht in ihrer Vorstellung kein wesentlicher Unterschied zwischen diesen Größen. Für andere – das wurde besonders in persönlichen Gesprächen deutlich – bedeutet Schnellerwerden stets positive Beschleunigung und Langsamerwerden stets negative Beschleunigung unabhängig von der augenblicklichen Bewegungsrichtung und dem festgelegten Koordinatensystem. Beschleunigung ist hier also nur eine Betragsgröße, keine vektorielle Größe. Das führt bei Bewegungen in positive Richtung zu richtigen und bei Bewegungen in negative Richtung zu falschen Antworten.

Besonders gut ist das an der Aufgabe zu sehen, bei der eine Münze hochgeworfen wird und wieder herunterfällt: 7 % geben die richtige Lösung an, 36 % geben eine Antwort entsprechend dem Schneller-/Langsamerwerden und 41 % geben nur die Geschwindigkeit an. Ein Teil argumentiert also in der Form »Aufwärtsbewegung \Rightarrow Langsamerwerden \Rightarrow negative Beschleunigung« und »Abwärtsbewegung \Rightarrow Schnellerwerden \Rightarrow positive Beschleunigung«, obwohl die Beschleunigung ja stets nach unten in die negative Richtung weist! Ein anderer Teil argumentiert dagegen: »Aufwärtsbewegung \Rightarrow Bewegung in positive Richtung \Rightarrow positive Beschleunigung« und »Abwärts-

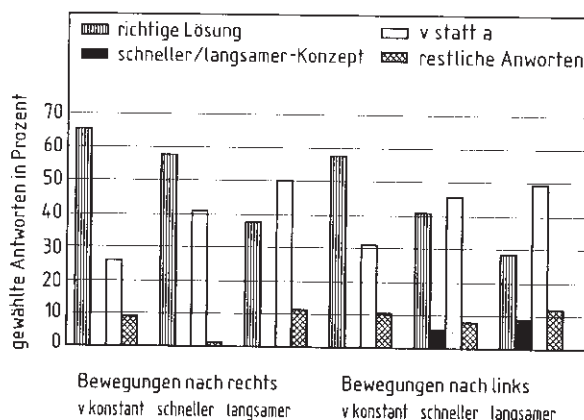


Abb. 5. Beantwortung der Aufgaben zur Beschleunigung (zehn Klassen mit 188 Schülern)

bewegung \Rightarrow Bewegung in negative Richtung \Rightarrow negative Beschleunigung«.

Von den Schülern, die die Beschleunigungsaufgaben richtig lösten (circa 50%), könnte man nun erwarten, daß sie bei den Aufgaben mit Kraftgraphen gemäß $F = m \cdot a$ auch die newtonsche Antwort gaben. Allerdings haben nur ein Drittel der Schüler, die ein Beschleunigungsitem richtig lösten, beim entsprechenden Kraftitem newtonsch geantwortet. Dagegen haben aber Dreiviertel der Schüler, die ein Kraftitem newtonsch beantworteten, das entsprechende Beschleunigungsitem richtig gelöst. Dies läßt sich dahingehend interpretieren, daß das Verständnis des Beschleunigungsbegriffes eine Voraussetzung für das Verständnis des Kraftbegriffes ist.

7. Vergleich mit Erhebungen von R. Thornton in den USA

Die hier eingesetzten Aufgaben ließ R. THORNTON in ähnlicher Weise von Studenten der Universität von Oregon bearbeiten. Die Studenten wurden einmal vor dem entsprechenden Universitätsunterricht, also nach länger zurückliegendem, herkömmlichen Schulunterricht und nochmals nach dem herkömmlichen Universitätsunterricht befragt. Der Anteil der korrekten Antworten ist sowohl bei den »Kraft«-Aufgaben als auch bei den »Beschleunigungs«-Aufgaben nach dem Schulunterricht nur knapp halb so groß wie bei unserer Erhebung an deutschen Schulen (ebenfalls nach herkömmlichen Unterricht). Durch den Unterricht im Einführungskurs an der Universität verbesserten sich die USA-Studenten nicht entscheidend [3], [5]. Die Ergebnisse zeigen dann prinzipiell ähnliche Tendenzen wie die an den untersuchten deutschen Gymnasialklassen, sie liegen aber etwas niedriger.

THORNTON schließt aus diesen und anderen Erhebungen auf eine hierarchische Beziehung beim Lernen der Begriffe Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft, d. h. das Verständnis des Geschwindigkeitsbegriffes ist Voraussetzung für das Verständnis des Beschleunigungsbegriffes und dies wiederum für das Verständnis des newtonschen Kraftbegriffes – ein Sachverhalt, den unsere Untersuchung ebenfalls zeigt.

8 Nebeneinander von korrekten und inkorrekten Konzepten

Die Untersuchung zeigt, daß bei herkömmlichem Physikunterricht in der Klasse 11 die Grundkonzeptionen der Newtonschen Sichtweise nicht in breiter Front aufgenommen werden. Das scheint sich auch im Laufe des weiteren Unterrichts nicht entscheidend zu ändern. So stellte K. BLASCHKE [9] in einer ergänzenden Erhebung mit entsprechenden Fragen in drei 12. Klassen und einer 13. Klasse ein ganz entsprechendes Antwortverhalten fest.

Man kann einwenden, daß der ausschließliche Einsatz von Multiple-Choice-Fragen kein sicheres methodisches Instrumentarium ist, das Ausmaß der newtonschen Vorstellungen der Schüler zu erfassen. So haben insbesondere C. A. BERG und P. SMITH [8] kürzlich nach Beendigung der hier beschriebenen Untersuchung im Bereich der Kinematik deutliche Unterschiede im Antwortverhalten zwischen freien Antwortformen und Multiple Choice Antworten belegt, wobei die offenen Antworten bis zu 19%-Punkte besser ausfielen.

Ein vergleichbarer Effekt wurde auch in der vorliegenden Untersuchung bei einer Teilpopulation festgestellt. Wie oben erwähnt, mußten die Schüler ihre Antworten zu einzelnen Fragen zusätzlich begründen. In zwei Klassen eines Lehrers war ein überraschendes Verhalten festzustellen. In diesen Klassen sollten zwei Antworten zu solchen Fragen begründet werden, in denen anhand von Kraft-Zeit-Graphen die Kräfte auszuwählen waren, die eine bestimmte Bewegung bewirken. Eine Anzahl von Schülern strich ihr erstes Ergebnis im aristotelischen Sinne durch, kreuzte dann die newtonschen Antworten an und begründete diese angemessen. Bei den qualitativen Fragestellungen werden offensichtlich zuerst lebensweltliche Vorstellungen aktualisiert und erst bei genauerem Nachdenken über Argumentationen wird von einem Teil der Schüler die andere Wissensrepräsentation aufgerufen, die im Physikunterricht vermittelt wurde und in der die Sachverhalte in Newtonscher Sicht strukturiert sind. Voraussetzung dazu ist allerdings, daß die Schüler diese Repräsentation angemessen aufgebaut haben, was offenbar nur für einen kleineren Teil der Schüler zutrifft. Das beobachtete Antwortverhalten ist wohl ein Beispiel für ein Nebeneinander von inkorrekten und korrekten Konzepten, eine Kompartimentalisierung, wie sie MANDL, GRUBER und RENKL beschreiben [10].

Diese Tatsache wurde auch in einem persönlichen Interview mit einigen Schülern festgestellt. Die Schüler hatten die Aufgaben zwar richtig verstanden, antworteten und argumentierten aber voller Überzeugung im aristotelischen Sinne. Als ihnen dann das newtonsche Konzept in Erinnerung gerufen wurde, konnten sie Aufgaben plötzlich richtig lösen und wunderten sich über ihre ersten Antworten.

9 Handlungsbedarf

Obwohl bei freien Antwortformen ein etwas besseres Ergebnis zu erwarten ist als bei den Auswahl-Antwort-Fragen, bleiben die Lernerfolge bei herkömmlichem Dynamikunterricht recht unbefriedigend. Das fordert natürlich sofort zu der Frage heraus, ob und wie heute ein Unterricht zur Dynamik so gestaltet werden kann, daß bessere Lernerfolge erreichbar werden. In einer neu zu konzipierenden Lernsequenz kommt es

darauf an, die Ursachen für die bekannten gravierenden Lernschwierigkeiten geeignet zu berücksichtigen, d. h. sie z. T. zu thematisieren bzw. ihnen durch veränderte methodische Vorgaben und den Einsatz von geeigneten Medien zu begegnen.

Literatur

- [1] H. SCHECKER: Das Schülervorverständnis zur Mechanik. Eine Untersuchung in der Sekundarstufe II unter Einbeziehung historischer und wissenschaftlicher Aspekte. - Dissertation Universität Bremen 1985.
- [2] H. WIESNER: Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Mechanik - Schülervorstellungen, Lernschwierigkeiten und fachdidaktische Folgerungen. - In: Physik in der Schule 32 (1994) Nr. 4, S. 122-126.
- [3] R. THORNTON: Using Large-Scale Classroom Research to Study Student Conceptual Learning in Mechanics and to Develop New Approaches to Learning (Typoskript, private Mitteilung).
- [4] T. WILHELM: Lernen der Dynamik geradliniger Bewegungen - Empirische Erhebungen und Vorschlag für ein neues Unterrichtskonzept. - Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg 1994.
- [5] R. THORNTON - D. SOKOLOFF: Learning motion concepts using real-time microcomputer-based laboratory tools. - In: American Journal of Physics 58 (1990) 858-867.
- [6] R. TREFFER: Schülerexperimente zur Kinematik mit dem Computer, Bericht über erste Testergebnisse und Art des Unterrichts. - In: W. KUHN (Hg.): Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1989 Bonn. - Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik 1989, S. 229-235.
- [7] D. NACHTIGALL: Skizzen zur Physikdidaktik. - Frankfurt am Main, Bern, New York, Paris: Verlag Peter Lang 1987, S. 148 ff.
- [8] C. A. BERG - P. SMITH: Assessing Students' Abilities to Construct and Interpret Line Graphs: Disparities between Multiple-Choice and Free-Response Instruments. - In: Science Education 78 (1994) 527-554.
- [9] K. BLASCHKE: (Bad Kissingen) private Mitteilung.
- [10] H. MANDL - H. GRUBER - A. RENKL: Lernen im Physikunterricht - Brückenschlag zwischen wissenschaftlicher Theorie und menschlichen Erfahrungen. - In: W. KUHN (Hrsg.): Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1993 Esslingen. - Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik, S. 21-36. □