

Newton verliert noch immer gegenüber Aristoteles

Bericht über Testergebnisse und einen neuen Ansatz zur Vermittlung der Konzepte Trägheit und Gravitation

Hermann Haertel.

Gastwissenschaftler am: Institut für Theoretische Physik und Astrophysik
Universität Kiel

haertel@astrophysik.uni-kiel.de

Ko-Autoren:

Marian Kires, Zuzana Jeskova, Jan Degro
Universität P. J. Safarik, Kosice, Slowakei

Yuri B. Senichenkov

Polytechnische Universität, St. Petersburg, Russland

Jose-Miguel Zamarro

Universität Murcia, Spanien

Zusammenfassung

Schon Aristoteles verkündete: Jede Bewegung braucht einen Beweger, und dieses Konzept ist bei den meisten unserer Schüler tief verankert. Wie entsprechende Studien gezeigt haben, scheint es dem Physikunterricht in der Regel nicht zu gelingen, dieses Fehlkonzept aufzubrechen und die tiefere Bedeutung des 2. Newtonschen Prinzips ($F = m a$) zu vermitteln.

Um zu prüfen, ob dieses Problem nur ein nationales oder ein generelles ist, wurde in einem ersten Schritt ein gleichlautender Test in fünf verschiedenen europäischen Ländern mit 19 Klassen und insgesamt 360 Schülern durchgeführt. Die Ergebnisse sind gleichermaßen negativ und bestätigen, daß die meisten Schüler auch nach dem Unterricht weiterhin an der von Aristoteles verkündeten Idee festhalten.

In einem weiteren Test wurde gefragt: "Warum fallen alle Körper gleich schnell zu Boden" und somit gepüft, ob die Schüler zwischen träger und schwerer Masse unterscheiden können. Das Ergebnis ist gleichermaßen negativ. Die erfolgreiche Vermittlung dieser Konzepte scheint nur in Ausnahmefällen zu gelingen.

In einem zweiten Schritt wurden Lehr/Lernmaterialien entwickelt mit dem Ziel, durch spezielle mediale Unterstützung wie Simulationen und computergenerierte Animationen verbesserte Lernergebnisse zu erzielen. Die entscheidende Idee bei der Entwicklung von Simulationen besteht darin, zunächst eine zur Gravitation parallele Welt vorzustellen, in der die beschleunigende Kraft unabhängig von der Trägheit verändert werden kann. Dies gelingt, indem das Gravitationsfeld durch ein elektrisches Feld und die schwere Masse durch die elektrische Ladung ersetzt wird.

Mit diesen Materialien wurde in fünf europäischen Ländern unter kontrollierten Bedingungen in 9 Klassen mit insgesamt 103 Schülern eine Erprobung durchgeführt.

Die Ergebnisse als Differenz zwischen einem Vortest und einem verzögerten Nachtest sind positiv, und liefern Hinweise für weitere Verbesserungen.

Stichworte: Evaluation, Trägheit, Gravitation, Multi Media

I. Das Lehr/Lernproblem

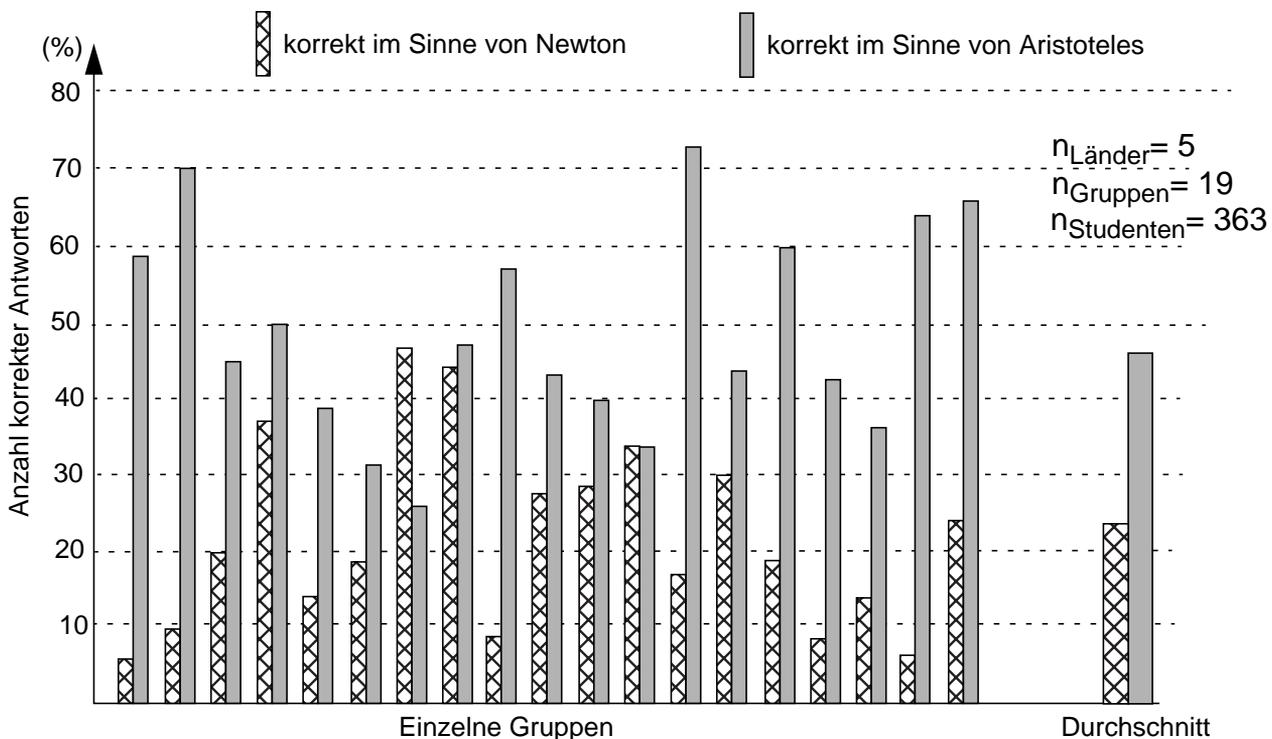
Verschiedene Studien haben gezeigt [1]-[5], daß die Mehrzahl der Schüler keine ausreichenden Kenntnisse hinsichtlich grundlegender Gesetze der Mechanik besitzen und dies gerade auch nach einem intensiven Mechanikkurs in der gymnasialen Oberstufe.

Hervorzuheben sind zwei Beispiele:

1. Für eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit gilt, daß die Summe aller angreifenden Kräfte gleich Null ist. Dagegen lehrt uns die Alltagserfahrung, daß zur Aufrechterhaltung einer Bewegung eine antreibende Kraft notwendig ist.

2. Alle Körper erfahren im freien Fall unabhängig von ihrer Masse die gleiche Beschleunigung. Der Alltag lehrt uns, daß leichte Körper wie Blätter oder Schneeflocken sehr langsam fallen und daß z. B. massige Bobfahrer gegenüber leichteren einen Vorteil haben.

Um zu überprüfen, ob die festgestellten Defizite von dem jeweiligen Schulsystem und der jeweiligen Lehrtradition abhängig sind, wurde in 5 verschiedenen europäischen Ländern ein entsprechender Test durchgeführt¹. Zum ersten Beispiel ergab sich das folgende Ergebnis:



In praktisch allen beteiligten Klassen (mit einer Ausnahme) überwiegt die aristotelische Sichtweise und im Durchschnitt gelingt es knapp 80% der Schüler auch nach einem Mechanikkurs nicht, die Newtonschen Prinzipien auf einfache Bewegungsvorgänge anzuwenden.

Die zweite Testfrage (Begründung für die Konstanz der Fallbeschleunigung) ergab ein gleichermaßen negatives Resultat. Von einigen wenigen Schülern abgesehen wurde diese Frage in den meisten Fällen entweder nicht beantwortet oder es fanden sich Antworten, die Zirkelschlüsse aufweisen oder Fehlvorstellungen hinsichtlich der Funktion des Vakuums oder der Reibung erkennen lassen.

1. Dieser Test wurde der Literatur entnommen [4].

Aus physikdidaktischer Sicht sind die hier festgestellten Lerndefizite höchst unbefriedigend, denn sie beziehen sich auf grundlegende Gesetze der Mechanik und diese wiederum gilt als Grundlage der klassischen Physik. In der hier vorgestellten Studie wird untersucht, in wie weit durch den Einsatz neuer Medien in diesen grundlegenden Lernbereichen verbesserte Lernergebnisse zu erreichen sind.

Materialentwicklung zum Thema: Konstante Geschwindigkeit und Kraft (träge Masse)

Im alltäglichen Leben bewegt man sich beständig im Raum oder bewegt Gegenstände hin und her. Übersieht man dabei die Reibungskraft, so bestätigt sich beständig die Vorstellung, daß zur Aufrechterhaltung einer Bewegung eine einwirkende Kraft notwendig ist. Um diese tief eingeprägte und sich stets erneut bestätigende Vorstellung zu problematisieren, müssen diese verschiedenen Bewegungsvorgänge des Alltags in den Unterricht mit einbezogen und uminterpretiert werden.

Um diese Forderung möglichst anschaulich und effizient im didaktischen Sinne erfüllen zu können, wurden computergenerierte Animationen entwickelt, in denen jeweils auf die gleiche Art Kraftpfeile in die unterschiedlichen Bewegungsabläufe eingeblendet werden und zum Ausdruck kommt, daß die Summe aller Kräfte gleich Null ist, sofern die Geschwindigkeit konstant bleibt. Die folgenden Beispiele zeigen die Schlußszene der ausgewählten bewegungsabläufe.



Fig. 1: Abb 1: a) Aufsteigende Blasen b) Fahrendes Auto c) Flugzeug

Zusätzlich wurden interaktive Simulationen entwickelt, die es erlauben, die Auswirkungen von zeitlich konstanten und zeitlich sich ändernden Kräften zu untersuchen.

Materialentwicklung zum Thema: Freier Fall (schwere Masse)

Bei der Behandlung des freien Falls kann die beschleunigende Kraft - bedingt durch die schwere Masse - nicht experimentell von der trägen Masse getrennt werden. Diese Trennung kann nur gedanklich vorgenommen werden und dies mag viele Schüler überfordern. In einer Simulationsumgebung ist eine solche Trennung jedoch ohne weiteres möglich, in dem z.B. ein Millikan-Versuch im schwerelose Zustand simuliert wird. Hier können die Ladung q und die träge Masse m der beschleunigten Teilchen unabhängig von einander variiert werden und die Schüler können experimentell entdecken, warum bei einem konstanten Verhältnis von q/m alle Teilchen gleichschnell beschleunigen. Im Vergleich mit der Simulation einer Fallbewegung in einem Gravitationsfeld wird dann demonstriert, warum sich bei einem konstanten Verhältnis von $m_{\text{träge}}/m_{\text{schwer}}$ immer

die gleiche Fallbeschleunigung einstellt.

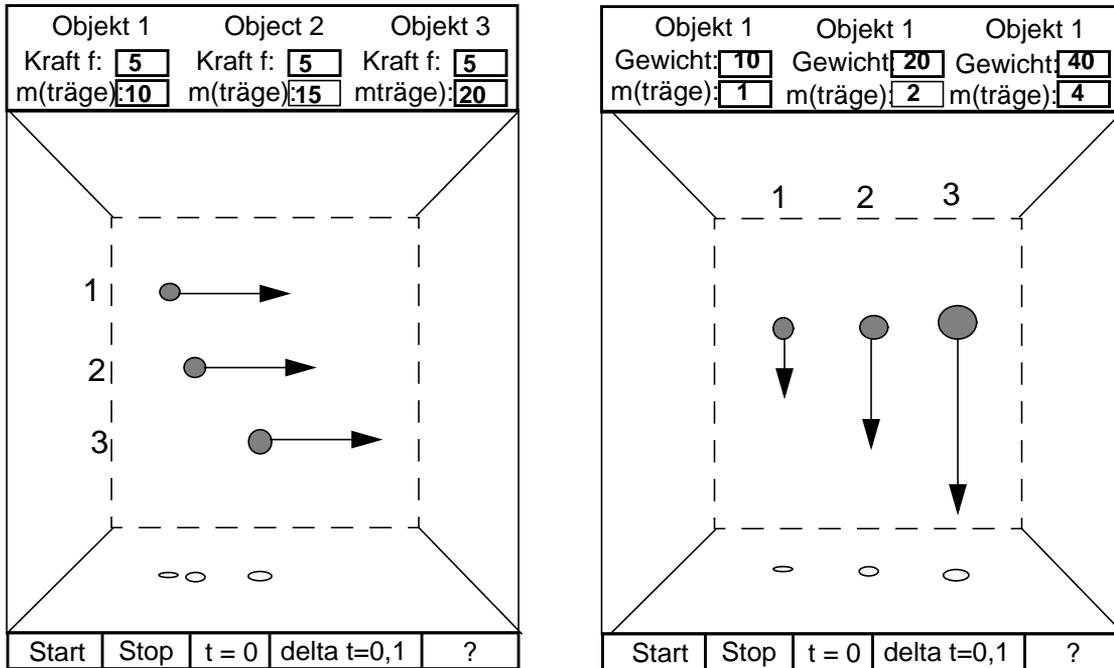


Fig. 2: a) Beschleunigung im horizontalen E-Feld. b) Beschleunigung im vertikalen g-Feld

Bei der Bewegung eines umlaufenden Satelliten kann dieser Ansatz erneut verwendet werden, in dem in Analogie zum Bohrschen Atommodell die schwere Masse durch die elektrische Ladung ersetzt und somit die für den Umlauf erforderliche Zentripetalkraft durch die Coulombsche Wechselwirkung hervorgerufen wird.

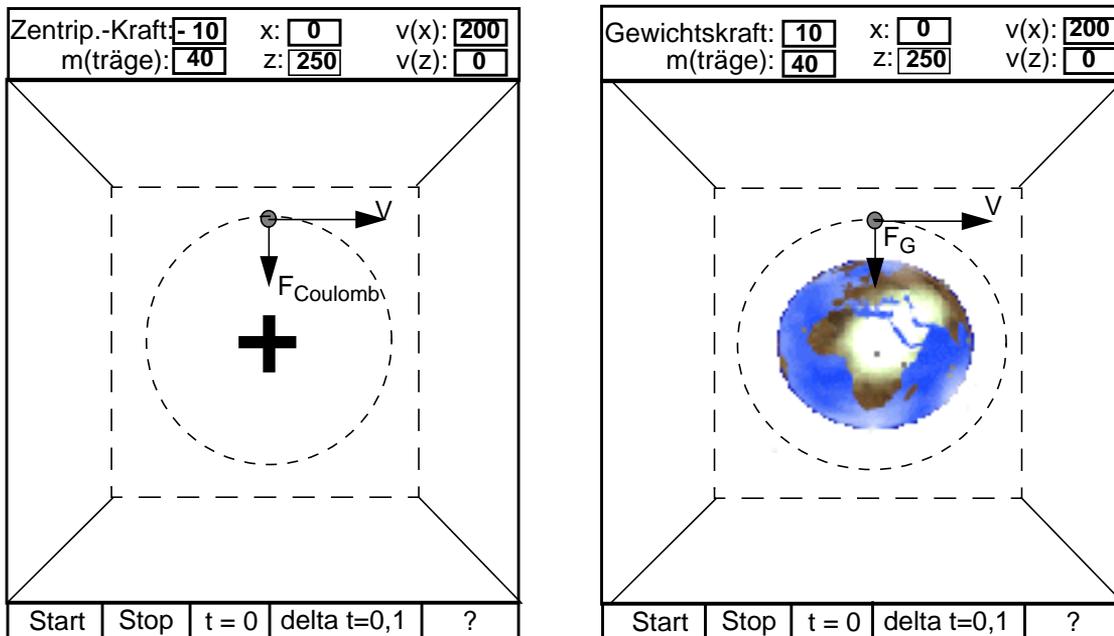


Fig. 3: Simulationen zur Umlaufbewegung eines geladenen Teilchens (links) und eines Satelliten (rechts)
 Auch in dieser Simulationsumgebung können die Schüler die angreifende Kraft F unabhängig

von der trägen Masse m variieren, die jeweiligen Auswirkungen studieren und schließlich herausfinden, warum bei einem konstanten Verhältnis von F/m die Umlaufbahn unverändert bleibt.

Diese Simulationen sowie die entwickelten Videosequenzen wurden in dazu passende Lernaufgaben integriert und mit zusätzlichen Lehrtexten zu einem geschlossenen Lernpaket zusammengefaßt. Dabei ist vorgesehen, daß diese Materialien von zwei bis drei Schüler gemeinsam und möglichst selbständig durchgearbeitet werden. Für die Lauffähigkeit der Simulationen in Form von Applets ist ein SUN-Java-aktivierter WEB-Browser erforderlich.

Erprobungs- und Testverfahren

Die Erprobung fand in den Städten Kiel, Kosice (Slowakei), Murcia (Spanien) und St. Petersburg (Russland) statt. Es wurden in jeder Stadt zwei bis drei Schulen entsprechend dem deutschen Gymnasium mit einem guten Ruf ausgewählt und entweder ganze Klassen oder freiwillig sich meldende Schüler in die Erprobung einbezogen. Alle Materialien wurden in die Landessprachen übersetzt und die Erprobung fand unter kontrollierten Bedingungen statt.

Der erste Teil eines zweiteiligen Vortest bezog sich auf die Frage nach dem Zusammenhang zwischen Bewegung und eventuell einwirkender Kraft. Dieser Teil entsprach dem in der Voruntersuchung eingesetzten Test. Da der betreffende Inhalt von allen Schülern in dem vorangegangenen Mechanikkurs durchgenommen worden war, entspricht dieser Testteil einem verzögerten Nachtest zum traditionellen Unterricht.

In einem zweiten Testteil wurde nach der beschleunigenden Wirkung von Kräften auf Körper mit unterschiedlicher Masse gefragt und insbesondere nach einer Begründung für die Massenunabhängigkeit der Fallbeschleunigung.

Um während der Lernphase von 2 x 90 min (für beide Unterrichtsteile) den Einfluß der Lehrerpersönlichkeit möglichst gering zu halten, wurden Interventionen auf die Beantwortung explizit gestellter Schülerfragen und auf Hilfen bei technischen Problemen beschränkt.

Eine zum Vortest parallel Testversion wurde den Schülern mindest zwei Wochen nach der Lernphase und ohne Ankündigung vorgelegt.

Ergebnisse der Erprobung

Insgesamt nahmen 103 Schüler aus 9 Gruppen an der Erprobung teil.

Der erste Teil des Test wurde wie in der Voruntersuchung sowohl hinsichtlich richtiger Antworten im Sinne einer newtonschen Perspektive ausgewertet, als auch im Hinblick auf Antworten, die im Sinne einer aristotelischen Perspektive einen Sinn ergeben.

Gemittelt über alle Items dieses Testteils ergaben sich für die einzelnen Gruppen die folgenden

Ergebnisse:

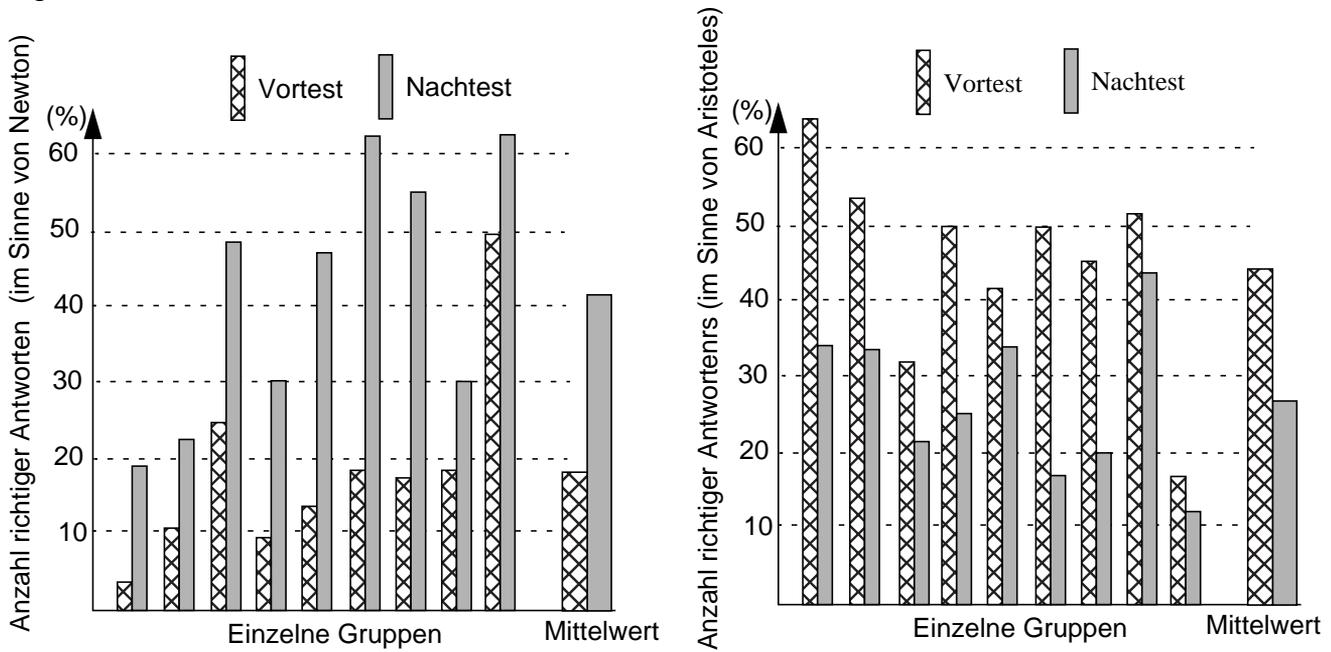


Fig. 4: Ergebnisse zum Zusammenhang von Bewegung und einwirkender Kraft
links: Korrekt im Sinne von Newton; rechts: korrekt im Sinne von Aristoteles

Die Ergebnisse zur Frage nach dem Zusammenhang zwischen einwirkender Kraft und träger Masse (2. Testteil) ergab die folgenden Mittelwerte für die einzelnen Gruppen

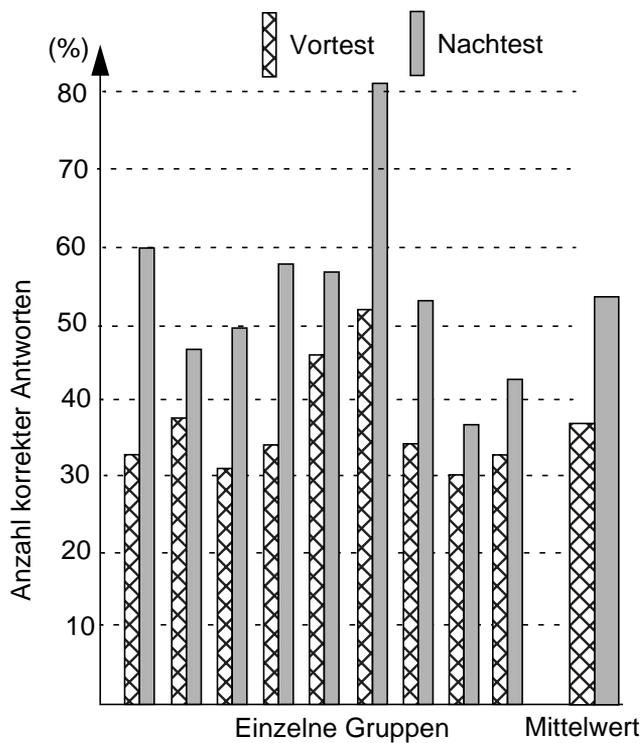


Fig. 5: Ergebnis zur Frage nach dem Zusammenhang zwischen Masse und beschleunigender Kraft

VII. DISKUSSION

Zum Teil 1- Zusammenhang zwischen Bewegung und Kraft

Im Vortest variiert die Anzahl korrekter Antworten (im Sinne von Newton) zwischen 3% und 50% für die verschiedenen Gruppen mit einem Durchschnitt von 18%.

Die Anzahl der Antworten, die im Sinne von Aristoteles (jede Bewegung braucht einen Beweger) einen Sinn ergeben, ist im Vortest in allen Gruppen höher (siehe Abb. 4 rechts). Sie variiert zwischen 17% and 63% für die verschiedenen Gruppen mit einem Durchschnitt von 45%.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß die Schüler aller Gruppen in der nahen Vergangenheit eine Mechanikkurs absolviert hatten, können zwei Schlußfolgerungen gezogen werden.

1. Die Wirksamkeit des traditionellen Unterrichts scheint in den verschiedenen Schulsystemen sehr unterschiedlich zu sein im Hinblick auf die Vermittlung eines gefestigten Verständnisses der Newtonschen Prinzipien.

2. Auch in der besten Gruppe erreicht nur jeder zweite Schüler bzw. jede zweite Schülerin ein stabiles Verständnis dieser Prinzipien, so das ein verzögerter Nachtest positiv ausfällt. Für die Mehrzahl der Schüler kann jedoch erneut festgehalten werden, daß sie unbeeinflusst von dem vorangegangenen Unterricht an ihren Alltagsvorstellungen festhalten und weiterhin davon überzeugt sind, daß 1. zur Aufrechterhaltung einer Bewegung mit konstanter Bewegung eine konstante Kraft einwirken muß und das 2. eine Bewegung mit sich ändernden Geschwindigkeit nur durch eine sich entsprechend ändernde Kraft bewirkt werden kann.

Der Nachtest wurde mindestens zwei Wochen nach der Lernphase durchgeführt und zwar wie schon erwähnt, ohne Ankündigung. Der Anstieg korrekter Antworten (im Sinne von Newton) variiert zwischen 11% und 45% für die verschiedenen Gruppen mit einem Durchschnitt von knapp 25%.

Die Anzahl der Antworten, die in der Aristotelischen Perspektive einen Sinn ergeben, ligt in allen Gruppen niedriger. Gemittelt über alle Gruppen ergab sich eine Abnahme von 18 % mit einer Variation zwischen 4% and 32%.

Die Zunahme physikalisch richtiger Antworten und die entsprechende Abnahme der vorherrschenden Fehlvorstellungen ist bei allen Gruppen festzustellen. Das Ausmaß dieser Veränderungen bleibt jedoch hinter unseren Erwartungen zurück. Die alltägliche und sich beständig erneuernde Erfahrung, daß eine konstante Kraft zur Aufrechterhaltung einer Bewegung notwendig ist, erweist sich als sehr resistent und als einflußreicher bei der Interpretation von Bewegungsvorgängen als das vermittelte physikalische Wissen. Ein großen Teil der Schüler kann offensichtlich den Wechsel von diesem tief verwurzelten Alltagswissen zu einer neuen physikalischen Sichtweise nicht in einem einzigen Lernschritt vollziehen.

Ein erster Hinweis für eine Verbesserung der Lernergebnisse ergab sich aus einer zusätzlichen Studie, an der allerdings nur zwei Klassen der untersuchten Population mit insgesamt 36 Schülern teilnahmen. Innerhalb von einer Unterrichtsstunde wurde der gleiche Inhalt wiederholt, indem alle Videos vorgespielt und alle wesentlichen Ergebnisse anhand der Simulationen vorgeführt wurden. In dem folgenden verzögerten und wiederum unangekündigten Nachtest zeigten sich deutlich verbesserte Ergebnisse, indem jetzt mehr als die Hälfte der Schüler korrekte Antworten abliefern.

Zum Teil 2 - Zusammenhang zwischen Masse und beschleunigender Kraft

Wie in Abbildung 5 dargestellt, ergab sich bei allen 9 Gruppen eine Zunahme der Anzahl korrekter Antworten, allerdings nur um knapp 20%, bei einer Variation zwischen 5% und 30 %.

Auch dieses Ergebnis fällt hinter unseren Erwartungen zurück, da während der Lernphase die Arbeitsatmosphäre und die Gespräche zwischen den Schülern als ausgesprochen produktiv erschienen. Offensichtlich stellt die Aufgabe, eine konzeptionelle Unterscheidung zwischen der Trägheit eines Körpers und seiner Schwere zu vollziehen, für viele Schüler eine Barriere da die sie zumindest in einem ersten Anlauf nicht überwinden können. Auch hier liegt die Forderung nahe, die Bewältigung dieser Lernaufgabe durch wiederholtes Üben zu unterstützen.

Bei der Betrachtung unserer Ergebnisse muß bedacht werden, daß sie im Vergleich zum traditionellen Unterricht unter erschwerten Bedingungen erzielt wurden. Es fand kein Unterricht durch einen Lehrer statt und für den verzögerten Nachtest konnten sich die Schüler nicht vorbereiten.

Es ist zu erwarten, daß unter der Anleitung eines professionellen Lehres und mit der üblichen Vorbereitungszeit für die Klausur deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden können.

Hinweise für die unterrichtliche Umsetzung

Die Materialien sind in Form einer Sequenz von Fragen strukturiert, auf die die Schüler mit Hilfe der Simulationen und den Hilfetexten Antworten finden sollen. Während in der Erprobung die Schüler diese Lösungen selbständig finden mußten, kann diese Diskussion und Erarbeitung von Lösungen mit der ganzen Klasse organisiert und vom Lehrer geleitet werden. Dann ist es auch möglich, auf neue Fragen einzugehen und besonders gute Lösungen hervorzuheben.

Die Lernphase während der Erprobung mußte auf zwei Doppelstunden beschränkt werden. Diese Zeitspanne stellt ein Minimum dar und sollte unter normalen Unterrichtsverhältnissen verlängert werden. Dies entspricht auch der Erkenntnis, daß das Lernen und vor allem das Umlernen als ein aktiver Prozess auf Seiten der Lernenden anzusehen ist [6][7], der Zeit und wiederholtes Üben erfordert. Zur Anregung für solche Wiederholungen sollten die entwickelten Videosequenzen hilfreich sein. Zusätzlich zu den drei schon vorgestellten und in der Erprobung eingesetzten Beispielen sind Videos zu den folgenden Vorgängen entwickelt worden:

- ein Schiff in einer Hafeneinfahrt
- ein Motorboot auf einem Fluß
- ein im Wind treibender Ballon
- ein am offenen Schirm hängender Fallschirmspringer

Diese Liste wird noch erweitert werden durch Beispiele, bei denen Gegenstände durch direkte Beteiligung von Menschen oder Tieren bewegt werden.

Werden diese Videos über einen längeren Zeitraum für kurze Wiederholungsübungen eingesetzt, und mit der sogenannten aristotelischen Vorstellung von Bewegung und Bewegter konfrontiert, so ist zu hoffen, daß es doch gelingt, bei der Mehrzahl der Schüler ein stabiles Umlernen und ein tieferes Verständnis der Newtonschen Prinzipien zu erreichen.

Das gleiche sollte auch für die Differenzierung von träger und schwerer Masse gelten. Auch hier sind sicherlich mehrere Wiederholungen erforderlich, bis den Schülern diese Unterscheidung gelingt und sie eine tiefere Begründung für die Konstanz der Fallbeschleunigung liefern können.

nen als nur den Satz: Im Vakuum spielt die Masse keine Rolle.

Literatur

- [1] G. Jung, H. Wiesner, Engelhard: Vorstellungen von Schülern über Begriffe der Newtonschen Mechanik. Didaktischer Dienst Franzbecker, Bad Salzdetfurth, 1981
- [2] B. White, (1983). Sources of difficulty in understanding Newtonian dynamics. *Cognitive Science*, 7(1), 41-65.
- [3] H. Schecker, Das Schülervorverständnis zur Mechanik. Dissertation, Bremen 1985
- [4] D. Heuer and T. Wilhelm (1997) Aristoteles siegt immer noch über Newton. *MNU* 50/5 S 280-285.
- [5] H. Härtel et al. (2001); Evaluation report.
http://www.astrophysik.uni-kiel.de/pershome/haertel/EVA_e
- [6] Vygotsky, L. S. *Thought and Language*. Cambridge, MA: The M.I.T. Press, 1985.
- [7] Piaget, J. *Die Äquilibration der kognitiven Strukturen*, Klett, Stuttgart. 1976