

Die folgende Original-Seite der Zeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule“ wurden mit expliziter Genehmigung des Aulis-Verlages (Dr. Brigitte Abel) und des Friedrich-Verlages (Hubertus Rollfing) auf die Webseite www.thomas-wilhelm.net gestellt.
Vielen Dank für die Erlaubnis.

Die exakte Quellenangabe des Artikels ist:

WILHELM, T.; HEUER, D.; PHAN-GIA, A.-V.

Kinematik- und Dynamiklernen am Fahrrad

Praxis der Naturwissenschaften - Physik 46, Nr. 4, 1997, S. 2 - 8

Kinematik- und Dynamiklernen am Fahrrad

Th. Wilhelm, D. Heuer, A. Phan-Gia

1 Begründung, reale Alltagssituationen im Physikunterricht zu behandeln

Häufig sind Schüler der Ansicht, physikalische Erkenntnisse aus dem Unterricht beziehen sich primär auf ideale Gedanken- und Laborwelten, mit denen man im Alltag wenig anfangen kann. Für Alltagssituationen werden dann andere Gesetze angenommen, siehe *H. Schecker* [1] und *H. Mandl, H. Gruber, A. Renkl* [2]. Unabhängig davon, daß ein Teil der Schüler die im Unterricht erarbeiteten physikalischen Begriffe und Gesetze nur unzureichend erfassen, s. *D. Heuer Th. Wilhelm* [3], stellen viele Schüler überhaupt keinen Zusammenhang mehr zwischen diesen erarbeiteten Begriffen und Gesetzen einerseits und den realen Dingen ihrer Erlebniswelt andererseits her. Im Physikunterricht werden also andere Vorstellungen eingesetzt als zur Klärung von Alltagssituationen.

Daher ist es unbedingt wichtig, daß im Physikunterricht auch reale Situationen aus dem Alltag thematisiert werden, um die ihnen zugrunde liegenden physikalischen Strukturen zu erkennen bzw. wiederzuerkennen, anstatt nur idealisierte Versuchssituationen theoretisch zu betrachten. Typische Anwendungsaufgaben allein reichen aber dazu nicht, besonders wenn sie von den Schülern als Einsetzungsaufgaben schematisch gelöst werden. Sehr viel produktiver ist hier die Analyse von physikalischen Abläufen aus dem Alltag, wenn sie auch experimentell vorgenommen wird. Denn dann sind ihre Ergebnisse auch für den Schüler nachprüfbar und brauchen nicht im Hypothetischen stecken zu bleiben. So wird immer wieder eine Ausrichtung des Physikunterrichts auf die tägliche Erfahrungswelt gefordert, damit der Schüler direkt erfährt, daß die von ihm im Unterricht gebildeten Vorstellungen helfen, die uns umgebende Welt angemessen zu deuten, das physikalische Wissen für die reale Welt relevant und in ihr anwendbar ist und sie dabei auch lernen, es sachgerecht anzuwenden.

Alltägliche Situationen können die Schüler außerdem mehr motivieren. So fordern die Schüler selbst, daß sich der Physikunterricht stärker den Alltagsphänomenen zuwendet, für die sie sich interessieren. Andererseits wehren sie sich gegen abstrakt-spekulative Betrachtungsweisen. So stimmten nach *H. Schecker* [4] in einer Befragung von Schülern der Sekundarstufe II 91 % der Aussage zu, daß Physik die Aufgabe habe, die Phänomene systematisch zu untersuchen, denen wir im Alltag begegnen.

2 Das Fahrrad als geeignetes Versuchsobjekt

Eine solche reale Alltagssituation, die man gut im Physikunterricht anhand von Experimenten analysieren kann, ist

das Fahrradfahren, besonders das Anfahren und Bremsen. Mit einem Fahrrad ist sicher jeder Schüler gut vertraut und Fahrradfahren ist heute eine sehr beliebte Freizeitbeschäftigung. So können vorhandene Erfahrungen aktiviert, neue Erfahrungen gezielt gemacht und beides dann mit den physikalischen Konzepten in Zusammenhang gebracht werden. Außerdem sind Fahrräder nicht nur für Demonstrationsversuche im Physikunterricht leicht verfügbar, sondern Schüler können damit selbst einfache Versuche zur Kinematik durchführen. Die Bewegung eines Fahrrades ist nämlich relativ gut erfaßbar. Zum einen kann man ganz traditionell mit Stoppuhr und Maßband Fahrzeiten und Wege und daraus z. B. mittlere Geschwindigkeiten erfassen. Praktischer und eleganter ist dies vielfach mit den heute sehr weit verbreiteten, kleinen, digitalen Fahrradcomputern machbar. So gibt es Fahrradcomputer für nur 25 DM, die Geschwindigkeit, Tageskilometer und Gesamtkilometer angeben können. Für etwas mehr Geld sind weitere Funktionen, wie Stoppuhr, Durchschnittsgeschwindigkeit und maximale Tagesgeschwindigkeit enthalten. Dieser kleine Computer zählt dabei einfach nur die Umdrehungen des Vorderrades und mißt die Zeit, die während einer Umdrehung vergeht. Es ist dazu nur nötig, die Radgröße beim erstmaligen Gebrauch einzugeben. Allerdings hat man bei kleinen Geschwindigkeiten mit Ungenauigkeiten zu rechnen, da nun die Zeiten für eine Umdrehung länger sind und keine quasi kontinuierliche Messung vorliegt.

3 Erfassung der Fahrradbewegung mit einem Meßwerterfassungssystem

Der Fahrradcomputer hat allerdings auch entscheidende Nachteile: Er ist sehr klein, ist während des Fahrradfahrens nur vom Fahrer abzulesen und die Meßdaten werden nicht dokumentiert. Erfast man die eindimensionale Bewegung des Fahrrades während des Fahrens hingegen kontinuierlich mit einem Personal-Computer, kann man die interessierenden physikalischen Größen parallel zum Experiment auf einem Monitor oder mit einem Display über einen Overhead-Projektor für viele Schüler sichtbar machen. So läßt sich nicht nur ein kleiner Fahrradcomputer als Großgerät emulieren, sondern die erfaßten Meßdaten lassen sich je nach eingesetzter Software vielseitig aufbereiten und die erhaltenen Ergebnisse auch in andere Darstellungsformen wie Graphen umsetzen.

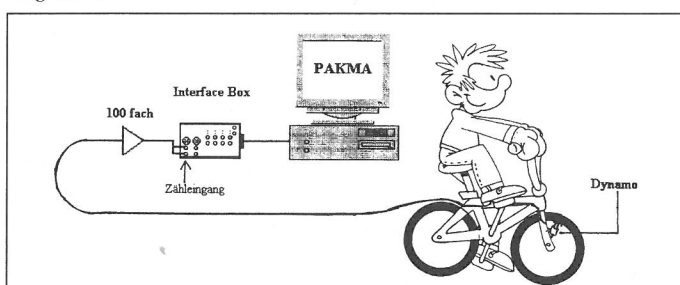
Ein geeigneter Sensor ist bereits an fast jedem Fahrrad vorhanden: Ein Fahrraddynamo, der eine Wechselspannung erzeugt. Über die erzeugten Impulse wird der vom Fahrrad zurückgelegte Weg erfaßt, z. B. 1 Impuls pro 1,6 cm. Die Impulse kann man durch ein langes 2adriges Kabel (z. B. 30 m) zum Interface des Rechners leiten, s. Abb. 1

und D. Heuer [5]. Damit auch sehr langsame Bewegungen registriert werden, wird hier ein beschalteter Operationsverstärker zwischengeschaltet. Wenn man auf das Kabel verzichten möchte, können die Impulse auch über leicht modifizierte Handfunksprechgeräte an den Rechner übertragen werden, s. D. Heuer, B. Voß [6]. Als Sensor kann man auch ein Laufrad zur Registrierung von Bewegungen einsetzen, wenn man es so abändert, daß es auf dem Vorderreifen des Fahrrades aufliegt. In diesem Laufrad befindet sich eine Lichtschranke und ein mitlaufendes Strichgitter. In beiden Fällen, sowohl beim Dynamo als auch beim Laufrad, kann über die Ortsänderung die Geschwindigkeit und über deren Änderung die Beschleunigung berechnet werden. Die Messung mit dem Dynamo ist zwar sehr einfach, die mit dem Laufrad kann aber genauer sein, je nach verwendetem Strichgitter, s. St. Müller [13]. Für die weiteren Messungen wird hier nur der Dynamo benutzt. Gerade bei komplexen Experimenten ist unbedingt eine quasi kontinuierliche Messung und Meßwertaufzeichnung mit Hilfe eines Computereinsatzes notwendig. Nur so ist gewährleistet, daß die aufzuzeigenden Phänomene auch in den grafischen Repräsentationen dokumentiert werden und daraus das Wesentliche erkennbar wird; einzelne Meßwerte können einem komplexen Vorgang nicht gerecht werden. Ideal ist dabei eine grafische Darstellung in Echtzeit. Denn nur dann können die relevanten physikalischen Größen und ihre funktionalen Zusammenhänge parallel zum Versuchsablauf verfolgt werden, so daß dann auch direkt zu sehen ist, wie sich Eingriffe des Experimentierenden auf den Versuchsablauf auswirken (siehe D. Heuer [7]). Eine solche Aufgabe kann z. B. von der Systemsoftware PAKMA [8] realisiert werden. Mit einem derartigen Programm können mehrere Meßvorgänge erfaßt und gleichzeitig in unterschiedlichen Repräsentationen dargestellt werden. „Der Experimentierende wird von den Routinearbeiten des Messens, Auswertens, Zeichnens entlastet, damit er sich der eigentlichen Aufgabe widmen kann: Argumentation zu prüfen, zu werten und dabei eigene Konzepte in Frage zu stellen und diese auch zu ändern, s. D. Heuer [9]). Ferner kann die gewonnene Zeit auch für weitere Experimente z. B. mit veränderten Parametern genutzt werden.

4 Bewegungsbeschreibung durch Momentangeschwindigkeit und Durchschnittsgeschwindigkeit

Mit der beschriebenen Versuchsanordnung können Anfahren und Bremsen eines Fahrrades registriert und be-

Abb. 1: Versuchsanordnung, um die Fahrradbewegung mit dem Rechner aufzunehmen. Der Dynamo wird als Sensor benutzt. Als Verstärker wird eine ca. 20fach verstärkende invertierende Operationsverstärkerschaltung eingesetzt.



schrieben werden, die z. B. im Gang des Schulhauses neben dem Physikraum durchgeführt werden können. Dabei kann von der digitalen Weg- bzw. Geschwindigkeits-Großanzeige zu einem Zeit-Ort-Diagramm bzw. Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm übergegangen werden und solche Diagramme können qualitativ diskutiert werden. In diesem Rahmen kann auch der Geschwindigkeitsbegriff behandelt werden.

4.1 „Konflikt“-Experiment: Vor- und Zurückfahren mit dem Fahrrad

Für einige Schüler ist der Geschwindigkeitsbegriff nur ein Schnelligkeitsbegriff, also eine Betragsgröße ohne Richtung. Für Schüler, die mit einem solchen Konzept in den Unterricht kommen, ist es wahrscheinlich wenig hilfreich, nur auf den Vektorcharakter der Geschwindigkeit – eventuell auch anhand von Geschwindigkeitsvektoren – hinzuweisen. Aufschlußreicher ist ein „Konflikt“-Experiment, dessen Ergebnis dem erwarteten Ablauf gegenübergestellt werden kann. Mit dem Fahrrad fährt man auf dem Flur eine Strecke, hält an und fährt zurück. Die eine Hälfte der Klasse beobachtet auf dem Flur nur die Bewegung und soll die zugehörigen Graphen $s(t)$ und $v(t)$ erstellen. Die andere Hälfte sieht im Physikraum nur die Graphen auf dem Bildschirm und soll daraus die Bewegung rekonstruieren und beschreiben. Im vom Rechner aufgenommenen Diagramm kommt das Fahrrad nicht an den Startpunkt zurück und es wird nur das Tempo statt der Geschwindigkeit angezeigt. Das liegt daran, daß die Fahrtrichtung des Fahrrades umgedreht wird. Aber auch beim Zurückschieben ohne Umdrehen ergibt sich mit dem Dynamo als Sensor das Gleiche. Ergänzend kann man das Hin- und Hergehen eines Fußgängers vor einem Sonarmeter zeigen, wobei die Bewegung vorzeichenrichtig erfaßt und die Geschwindigkeit richtig dargestellt wird. Entsprechende Versuche werden zusammen mit Unterrichtserfahrungen in einem von R. Jäger [10] beschriebenen Dynamik-Unterricht genauer dargestellt.

4.2 Ein etwas anderer Geschwindigkeitsmesser – eine Durchschnittsgeschwindigkeits-Anzeige

Hier bietet es sich auch an, in Situationen aus dem Alltag den Unterschied zwischen mittlerer Geschwindigkeit und augenblicklicher Geschwindigkeit experimentell aufzuzeigen. So kann man leicht Bewegungen zeigen, bei denen der Fahrradfahrer zwischendurch eine Pause einlegt, oder bei denen er erst verspätet nach dem Start des Meßsystems losfährt. Stehen nur kurze Strecken zur Verfügung, kann das Fahrrad auch geschoben werden. Dabei wird ohne weiteren Kommentar eine „Geschwindigkeits“-Anzeige auf dem Bildschirm gezeigt. Diese gibt aber stets die Durchschnittsgeschwindigkeit vom Start bis zum jeweiligen Augenblick an und nicht die Momentangeschwindigkeit. Die Auswirkungen der Pausen bzw. Verzögerungen auf die mittlere Geschwindigkeit lassen sich dann leicht beobachten. Diese erscheinen den Schülern anfänglich z. T. so wenig sinnvoll, daß sie an einen defekten Geschwindigkeitsmesser denken. Erst durch gezielt geplante Versuchsvarianten, die die Schüler zur Klärung vorschlagen, – z. B. erst gleichförmige Bewegung, dann unterschiedlich langes Anhalten, dann wieder wie vorher Weiterfahren – kann die Funktionalität erschlossen werden. Um den Unterschied

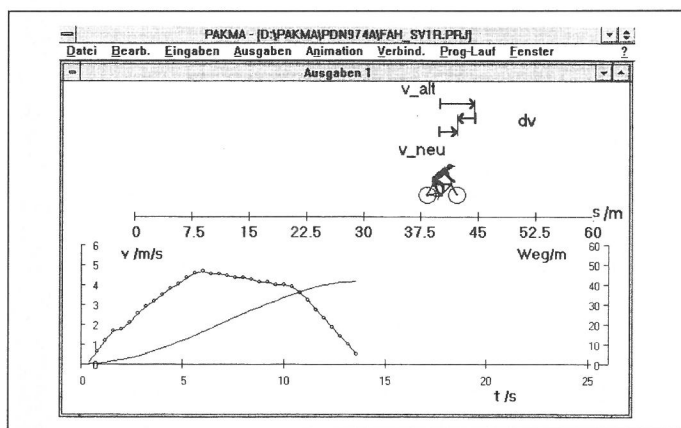
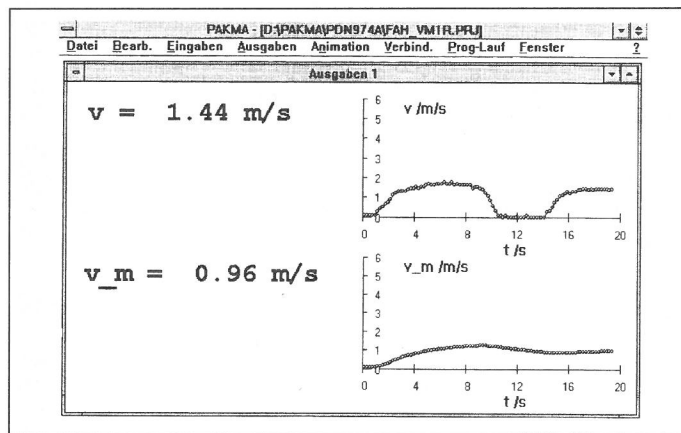


Abb. 2 (oben): Der Bewegung eines Fahrrades wird gleichzeitig dargestellt durch Anzeige der Momentangeschwindigkeit $v = \Delta s / \Delta t$ und der Durchschnittsgeschwindigkeit $v_m = s/t$, links die Momentanwerte durch Großanzeige, rechts durch Graphen als Funktion der Zeit.

Abb. 3 (unten): Ein Fahrrad fährt an, rollt eine kurze Zeit und wird dann gebremst. Im oberen Teil wird der Vorgang durch dynamische ikonische Repräsentationen dargestellt. Auf der Ortsachse bewegt sich das Fahrrad-Ikon. Entsprechend mitbewegt werden die durch Vektoren angezeigte alte Geschwindigkeit v_{alt} , die neue Geschwindigkeit v_{neu} und die Geschwindigkeitsdifferenz Δv . Im unteren Teil sind $s(t)$ und $v(t)$ als Graphen eingezeichnet.

zwischen Momentangeschwindigkeit $v = \Delta s / \Delta t$ und Durchschnittsgeschwindigkeit $v_m = s/t$ eindringlich deutlich zu machen, sollte nach der Klärung parallel zu einem Versuchsvorgang sowohl v wie v_m in Großanzeige und in entsprechenden Diagrammen $v(t)$ und $v_m(t)$ gleichzeitig dargestellt werden und anschließend in der Reproduktion des Ablaufs auf dem Bildschirm im Detail erörtert werden, warum $v_m(t)$ in der beobachteten Weise verläuft, s. Abb. 2. In diesem Zusammenhang kann auch darauf eingegangen werden, daß das Meßsystem eigentlich auch nur Durchschnittsgeschwindigkeiten in einem Zeitintervall zwischen zwei internen Zählerablesungen berechnet, wobei allerdings die jeweiligen Zeitintervalle und damit auch die Wegabschnitte recht klein gewählt werden können. Mit dieser Diskussion wird dann schon der Grenzwertbegriff vorbereitet.

5 Beschleunigungen beim Fahrradfahren

Als erster Schritt zur Erarbeitung des Beschleunigungsbegriffs bietet es sich an, die Änderung Δv der Geschwin-

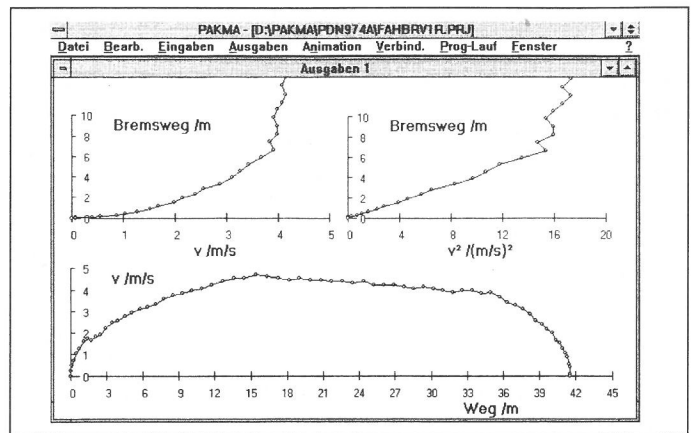


Abb. 4: Der gleiche Vorgang wie in Abb. 3. Hier dargestellt: Unten $v(s)$ und oben der Bremsweg $s_B = s_0 - s$ als Funktion von v und von v^2

digkeit in einem festen Zeitintervall zu betrachten und dies am Beispiel des Anfahrens und Bremsens eines Fahrrades zu untersuchen.

5.1 Geschwindigkeitsänderung Δv als Maß für schnelles bzw. langsames Anfahren und Bremsen

Als Maß zur Beschreibung von schnellem bzw. langsamem Anfahren und Bremsen bietet sich die Größe Δv an, bezogen auf den Zeitschritt Δt , mit dem die Bewegung erfaßt wird. Zur Veranschaulichung der Richtung von Δv sollte in einer ikonischen Repräsentation des Versuchsablaufs über dem Fahrrad-Ikon zusätzlich zum momentanen Geschwindigkeitsvektor v der alte Geschwindigkeitsvektor v_{alt} und Δv angezeigt werden, s. Abb. 3. Während sich beim Anfahren die Geschwindigkeit recht ungleichmäßig ändert – der physikalische Grund ist das nicht konstante Drehmoment, das über die Pedale übertragen wird – erhält man beim Bremsen ein erstaunlich konstantes, jetzt aber negatives Δv .

Da die Meßwerte im Computer gespeichert sind, hat man die Möglichkeit, im Nachhinein die Bewegung weiter zu analysieren und auch auf andere Arten darzustellen, was sich besonders beim Bremsvorgang anbietet.

5.2 Bremsweg als Funktion der Geschwindigkeit

Beim Bremsen ist die Wegstrecke wichtig, die bei der augenblicklichen Geschwindigkeit v noch gebraucht wird, um zum Stillstand zu kommen, also der Bremsweg. In einer Reproduktion kann der Computer diese leicht aus den aufgenommenen Meßwerten für alle Zeitpunkte berechnen und den Bremsweg s_B in Abhängigkeit von v darstellen. Man sieht nun, bei welcher Geschwindigkeit noch welcher Bremsweg nötig war. Man erhält dabei eine Parabel, s. Abb. 4. Ob es eine quadratische Abhängigkeit $s_B \sim v^2$ ist, läßt sich schnell überprüfen, indem man s_B über v^2 auftragen läßt. Es ergibt sich ungefähr eine Gerade, s. Abb. 4. Diese Erkenntnis sollte nun Ausgangspunkt einer Diskussion über verantwortliches Verhalten im Straßenverkehr sein, z. B. welcher Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer bei welcher Geschwindigkeit nötig ist. Erfahrungsgemäß ist es für die Schüler nicht nur überraschend, wie groß der Bremsweg bis zum absoluten Stillstand ist, sondern besonders, daß zur doppelten Geschwindigkeit ein vierfacher Bremsweg gehört usw., was aus den Graphen gut abzulesen ist.

5.3 Flächeninhalt unter dem $v(t)$ -Graph entspricht dem Weg

Wie kann man die überraschende quadratische Abhängigkeit des Bremswegs von der Geschwindigkeit verstehen? Wenn bereits die Fläche unter dem $v(t)$ -Graph als Weg interpretiert worden ist, ist der Sachverhalt nicht nur direkt durch Flächenberechnung zu belegen. Auch die Vervierfachungen von s_B bei Verdoppelung von v kann durch Aufteilung in kongruente Dreiecksfläche verdeutlicht werden. Wie anschaulich zu begründen ist, warum die Fläche unter $v(t)$ selbst ein Maß für den zurückgelegten Weg ist, wurde am Beispiel „Schieben eines Fahrrades“ in *D. Heuer* [11] aufgezeigt. Dazu werden im gleichen Diagramm unter den Graphen $s(t)$ und $ds(t)$ die Wege s_{alt} , s und $ds = s - s_{alt}$ als Stäbe eingezeichnet und verglichen.

Man sieht also, daß sich das Fahrradfahren sehr gut eignet, um durch die Analyse von Bewegungen, die damit ausgeführt werden, die Kinematik linearer Bewegungen in der 11. Jahrgangsstufe zu erarbeiten. Dabei sollte aber nicht vergessen werden, daß sowohl aus physikalischer Sicht wie auch aus Schülersicht die Frage viel interessanter und wichtiger ist, warum sich das Fahrrad eigentlich so bewegt, wie es sich bewegt. Die kausale Erklärung der Bewegung, des Anfahrens und Bremsens, führt zu den Newtonschen Gesetzen.

6 Teilaussagen zum zweiten Newtonschen Gesetz

Sicher wird jeder Schüler sagen, daß das Anfahrverhalten eines Fahrrades u. a. von der Kraft abhängt, die der Fahrradfahrer ausübt. So liegt es nahe, eine solche Abhängigkeit zu untersuchen. Dennoch sind Fahrradversuche nicht ohne weiteres geeignet, um mit ihnen das erste und zweite Newtonsche Gesetz aufzufinden. Denn unsere Alltagserfahrung zeigt, daß beim Fahren mit dem Fahrrad oder mit Motorfahrzeugen sich zu einer bestimmten antreibenden Kraft eine bestimmte konstante Geschwindigkeit v_e einstellt – ebene Strecke und Windstille vorausgesetzt –, also die erreichte Geschwindigkeit eine Funktion der Kraft ist. Der Grund dafür ist natürlich die Luftreibung, die aber von den meisten Schülern gar nicht als Kraft gesehen und erkannt wird. Diese bewirkt übrigens, daß statt dem aus der Alltagserfahrung vermuteten Gesetz $v_e \sim F_{Antrieb}$ in Wirklichkeit $v \sim \sqrt{F_{Antrieb}}$ gilt.

In dieser Situation bieten sich drei Wege an:

1. Um die ersten beiden Newtonschen Gesetze aufzuzeigen, kann man ohne an bisherige Vorstellungen der Schüler anzuknüpfen, eine ideale Versuchsbedingung ohne Reibung wählen, wie sie auf einer Luftkissenbahn näherungsweise gegeben ist. Dann läßt man in bekannter Weise unterschiedliche, genau meßbare Kräfte wirken. Der Endpunkt einer solchen Lernsequenz ist die Anwendung auf Beschleunigungsvorgänge auch beim Fahrradfahren.
2. Man arbeitet mit dem Fahrrad mit Beschleunigungsvorgängen, bei denen die Luftreibung noch zu vernachlässigen ist. Für $v < \text{ca. } 2\text{--}3 \text{ m/s}$ ist dies bei Beschleunigung $a > 0,3 \text{ m/s}^2$ noch eine akzeptable Näherung. Daran zeigt man $F = m \cdot a$ auf.
3. Man nimmt das Anfahrverhalten eines Fahrrades auf. Wegen der sich ergebenden Komplexität von $v(t)$ versucht

man, eine vergleichbare Situation – Anfahren unter der Wirkung einer konstanten Kraft – in Laborversuchen zu klären und versucht dann mit den gewonnenen Kenntnissen, die Ausgangssituation wieder zu analysieren.

6.1 Von der Idealisierung der Luftkissenbahn zur Anwendung beim Bremsen und Anfahren

In fast allen Dynamiklehrgängen für die Kl. 11 werden praktisch reibungsfreie Bewegungen auf der Luftkissenbahn analysiert. Dabei wird jeweils für eine vorgegebene konstante Kraft F und eine Masse m die auftretende Beschleunigung a entweder aus Einzelmessungen mit Lichtschranken berechnet oder es wird die gesamte Bewegung quasi kontinuierlich mit Sensoren (Laufrädern oder Sonarometern) erfaßt und daraus a ermittelt.

Will man möglichst nachhaltig die Proportionalität von F und a ganz unabhängig von v ins Bewußtsein der Schüler bringen, kann man während eines Versuchs F und damit auch a nicht nur kontinuierlich verändern, sondern in einem computerunterstütztem Experiment auch F und a messen und anzeigen. Wird die Kraft F als Hangabtriebskraft durch leichtes Neigen der Fahrbahn realisiert, läßt sich F direkt aus der Neigung bestimmen. Dann ändert sich a entsprechend mit F , und in einer Vektordarstellung wird sofort deutlich, a ist proportional zu F unabhängig von der Größe und Richtung von v . In einer ikonischen Repräsentation, in der Fahrbahn und Gleiter dynamisch dargestellt werden, läßt sich gleichzeitig der Zusammenhang von v , Δv und a zeigen, s. *Th. Wilhelm* [14]. Diese Versuchsmöglichkeiten sind auch in [11] ausführlich dargestellt, ebenso solche zu $F_{ges} = m \cdot a$.

Diese idealisierte Situation auf der Luftkissenbahn dient der Theoriebildung. Dabei darf der Physikunterricht aber nicht stehenbleiben. Wie in der Physik und der Technik muß es auch im Physikunterricht um die Anwendung der Theorien an realen Einzelfällen gehen. Hier ist die Aufgabe, die reinen Phänomene und Begriffe in die komplexen Vorgänge hineinzuprojizieren und damit komplexe Aufgaben in kleinere, bekannte Aufgaben zu strukturieren. So erkennen die Schüler die Tragfähigkeit der physikalischen Konzepte und können Alltagserfahrungen physikalisch interpretieren. Für die Dynamik bedeutet das aber die Einbeziehung von Reibung. Denn bei fast allen Bewegungen in Natur und Technik spielen Reibungsvorgänge eine entscheidende Rolle.

In einem ersten Schritt kann man nochmals auf den Bremsvorgang eingehen, den die Schüler jetzt aus ihren bisher entwickelten Vorstellungen deuten können sollten. Mit der Felgenbremse kann man eine konstante, reproduzierbare Gleitreibungskraft erzeugen. Durch einen am Lenker mit Draht befestigten kleinen Holzkeil läßt sich nämlich leicht erreichen, daß der Bremshebel nur ein festgelegtes Stück angezogen werden kann. So kann man einstellbare, konstante Gleitreibungskräfte und entsprechende Bremsbeschleunigungen realisieren. Die Größe der gesamten Bremskraft F_B einschließlich anderer auftretender Reibungskräfte läßt sich dadurch messen, daß man in einem Vorversuch das Fahrrad einschließlich Fahrer bei angezogener Bremse langsam mit konstanter Geschwindigkeit über eine Schnur mit angeknötetem Kraftmesser zieht. Eine interessante Variante ergibt sich, wenn man das Fahrrad eine längere Rampe hinunterrollen lassen kann. Hier

sind jetzt v und a gleichgerichtet. Da hier wie bei allen bisher beschriebenen Versuchen wegen der kurzen Fahrstrecken nur geringe Geschwindigkeiten (bis ca. 5 m/s) auftreten, spielt die Luftreibung nur eine geringe Rolle und man erhält eine ungefähr konstante Beschleunigung. In Abb. 6 ist ein Versuchsergebnis wiedergegeben, wobei die Graphen mit den durchgezogenen Linien der normalen Fahrt mit normalem Luftwiderstand entsprechen. Weiterführende Versuche, die die Luftreibung explizit berücksichtigen und diesen Vorgang auch modellieren, sind im folgenden Beitrag ausgeführt, s. D. Heuer, Phan Gia Anh Vu [12].

6.2 Direktes Erschließen von $F_{\text{ges}} = m \cdot a$ aus Bremsen und Anfahren mit dem Fahrrad

Die in Abschnitt 6.1 beschriebenen Bremsversuche kann man aber nicht nur als Bestätigungs- und Anwendungsversuche einsetzen, die aufzeigen, daß die Aussagen der typischen Laborversuche auf der Luftkissenfahrbahn auch die Abläufe bestimmen, die wir täglich im Alltag sehen. Diese Versuche eignen sich auch für eine systematische Erarbeitung von $F = m \cdot a$. Soll aber wie hier ein Gesetz neu erschlossen werden, sollte es aus einer größeren Zahl von Versuchsabläufen generalisiert werden, die auch möglichst unterschiedliche Versuchsvarianten berücksichtigen. Für das Aufzeigen des Gesetzes $F = m \cdot a$ lassen sich mit dem Fahrrad als zu beschleunigendes Versuchsobjekt aber nur ein Teil der wünschenswerten Versuchskonstellationen verwirklichen. Am leichtesten sind die Bremsversuche auszuführen, also Versuche mit v_0 positiv und a negativ (s. 6.1). Abb. 5 a zeigt nach Anfahren und Rollen für drei unterschiedliche F_B die Bremsvorgänge im $v(t)$ Diagramm. Aus diesen Versuchen ergibt sich, wie die Abb. 5 b zeigt, die Proportionalität von a und F . Die beschleunigte Masse m läßt sich bei diesen Versuchen – jetzt mit konstanter Kraft – nur recht eingeschränkt variieren, am einfachsten dadurch, daß eine zweite Person auf dem Gepäckträger mitfährt.

Versuche mit positiver Beschleunigung, also v und a positiv, – sonst die Standardversuche zu $F = m \cdot a$ – können nur eingeschränkt durchgeführt werden. Denn eine konstante Antriebskraft unterschiedlicher Größe läßt sich durch Ziehen über einen herkömmlichen Kraftmesser (0–100 N) nur sehr grob realisieren, da man bei dem erforderlichen schnelleren Laufen nicht gleichmäßig genug

ziehen kann. Auch das Herabfahren auf einer Rampe ist keine zureichende Lösung, da das Verhältnis F/m und damit auch die Beschleunigung durch die Neigung festgelegt ist. Eine brauchbare Lösung wird im folgenden Beitrag aufgezeigt, s. D. Heuer, Phan Gia Anh Vu [12].

6.3 Der sich schließende Kreis: Von der Alltagssituation über die Idealisierung zurück zur Alltagssituation

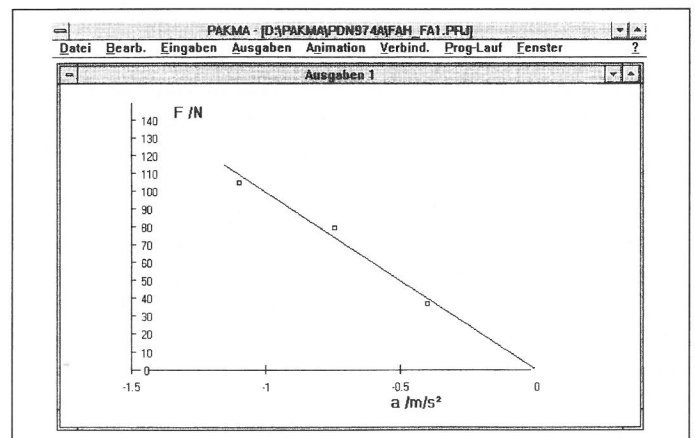
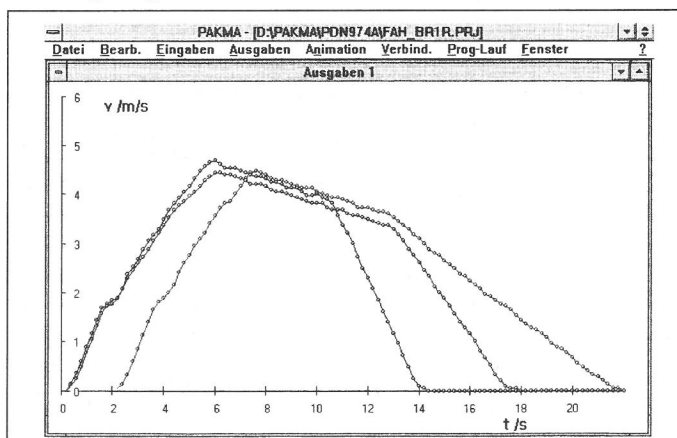
Dieses Vorgehen geht von dem Anfahr- und Bremsvorgang beim Fahrrad aus und versucht Einflüsse zu klären, die die Bewegung mitbestimmen – von der ungleichmäßig wirkenden Kraft beim Anfahren bis zur Kraft, die beim schnellen Fahren zu spüren ist, wenn z. B. lose Kleidung nach hinten weht. Der Schritt zur Idealisierung, die Analyse der Bewegung auf der Luftkissenbahn, ist hier von vornherein nur als Zwischenschritt geplant, damit dann die Ausgangsfragestellung um so effizienter angegangen werden kann. Die Erarbeitung der Newtonschen Gesetze an den Laborexperimenten kann dann ähnlich erfolgen wie in 6.1 beschrieben. Dabei sollten aber Zwischenergebnisse schon immer im Hinblick darauf gesehen und gewertet werden, was sie zur Klärung der Ausgangsfrage beitragen. Dies ist sicher ein Ansatz, dem Entstehen völlig getrennter physikalischer Vorstellungen über Laborsituationen und Alltagssituationen entgegenzuwirken.

In der abschließenden dritten Phase kann am Anfang die Analyse eines Bremsversuches stehen, entsprechend Abschnitt 6.1 oder 6.2. Als Schwerpunkt bietet sich an, den Einfluß der Luftreibung zu klären. Bemerkungen dazu finden sich ebenfalls bereits in 6.1. Insgesamt entspricht die Strukturierung dieser Lernsequenz einem Spannungsbogen. Ausgehend von Schülerinteressen und -vorstellungen können anhand von Laborexperimenten Theorieelemente erarbeitet werden, die dann zu neuen Kenntnissen und Vorstellungen über Alltagsvorgänge führen können.

7 Bewegung mit geschwindigkeitsabhängiger Reibung

Nachdem das 2. Newtonsche Gesetz erarbeitet worden ist – ob auf dem in Abschnitt 6.2 angedeuteten Wege oder in konventioneller Weise – und nachdem Anwendungen wie

Abb. 5: links: Die $v(t)$ -Graphen für drei Vorgänge mit Beschleunigen, Rollenlassen und Bremsen mit drei unterschiedlichen Bremskräften F_B (105 N, 80 N, 37 N). rechts: F_B als Funktion von $\Delta v/\Delta t$, entnommen aus den obigen drei Graphen. Für die Steigung ergibt sich $m = 100 \text{ N/m/s}^2$ (Die Masse Fahrrad + Fahrer betrug 95 kg).



z. B. die des abbremssenden Fahrrades behandelt worden sind, sollte ausführlich die Frage erörtert werden:

Wie ist die Alltagserfahrung: „Ein Fahrzeug wird unter der Wirkung einer konstanten Antriebskraft F_A nur anfänglich beschleunigt und nimmt dann eine konstante Geschwindigkeit an“ mit dem 2. Newtonschen Gesetz vereinbar?

Die Annahme einer konstanten Reibungskraft F_R kann das Problem nicht lösen, da dann die resultierende Gesamtkraft $F_{\text{ges}} = F_A - F_R$ immerzu weiter beschleunigen würde.

7.1 Konsequenzen unterschiedlicher Paradigmen

Wenn im bisherigen Unterricht die Wirkung von Reibungskräften auf die Bewegung nicht erörtert wurde, gibt es auf die obige Frage zwei mögliche Erklärungen.

1. Das Gesetz $F = m \cdot a$ gilt nur für „kleine“ Geschwindigkeiten am Anfang der Bewegung. Später stellt sich eine Endgeschwindigkeit v_e ein, die von der „Antriebskraft“ abhängt.

Bis auf den Beginn der Bewegung ist dies ein *vornewton*-sches Konzept. Da v_e u. a. von der Form des Körpers abhängt (Stromlinien-Form, -verkleidung) scheint es schwer zu sein, einen geeigneten Formelansatz für $v_e = f(F, \text{Form}, \text{Größe} \dots)$ zu finden. Auch wenn das Problem geklärt wäre, weiß man noch nicht, wie dann $v(t)$ vor dem Erreichen von v_e aussieht.

Nahegelegt durch den Sachverhalt, daß in $F = m \cdot a$ für F stets die Summe der äußeren Kraft einzusetzen ist, ist auch eine andere Erklärung denkbar.

2. $F = m \cdot a$ gilt auch für größere Geschwindigkeiten. Man hat nur eine zusätzliche Kraft F_{Zusatz} nicht berücksichtigt, die erst bei größeren Geschwindigkeiten wirksam wird. Ein Indiz dafür ist z. B. die Kraft, die die Luft auf die Hand ausübt, wenn man diese aus dem Autofenster hält. Diese Kraft nimmt stark zu, wenn das Auto schneller fährt.

An diesen beiden Lösungsansätzen kann der Physikunterricht dem Schüler exemplarisch aufzeigen, welche unterschiedlichen Konzepte in der Physik zur Beschreibung und Deutung gewählt werden können. Da von vielen Schülern physikalische Gesetze als etwas Absolutes, Eindeutiges angesehen werden, ist es wichtig herauszustellen, wie die sich ergebenden Gesetze von den zugrunde gelegten Vorstellungen und Begriffen abhängen, hier insbesondere von der Frage: Was sind Kräfte?

7.2 Analyse durch Experimente

Um den Einfluß der Luftreibung quantitativ zeigen zu können, ohne recht „hohe“ Geschwindigkeiten zu benötigen, wurde am Fahrrad mit Holzstangen und Plastikfolie ein „Segel“ befestigt, das ca. 2 m breit und 1,4 m hoch war. Auf einer ca. 30 m langen und ca. $6^\circ = 10,5\%$ geneigten Rampe konnten die typischen Auswirkungen gezeigt werden: Nun ist die Beschleunigung nicht mehr wie bisher konstant, sondern sie ist anfangs bei geringer Geschwindigkeit groß und fällt zunehmend ab, St. Müller [13] (s. Abb. 6). Leider ist das Segel nicht groß genug, daß es bei der Länge der Rampe bereits zu einem Kräftegleichgewicht zwischen Hangabtriebskraft und Luftwiderstandskraft kommt.

Um das Kräftegleichgewicht erreichen zu können, kann zu einem analogen Versuch gewechselt werden. Auf eine geeignete Luftkissenbahn setzt man einen Gleiter mit vier

flachen, zylinderförmige Pinwandmagneten. So erhält man eine starke, geschwindigkeitsabhängige Wirbelstrombremskraft, siehe Th. Wilhelm [14]. Es gilt also nun $\vec{F}_{\text{Wirbel}} = -k \cdot \vec{v}$ anstatt $\vec{F}_{\text{Luftreib}} = -\frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho_L \cdot A \cdot |\vec{v}| \cdot \vec{v}$. Hier er-

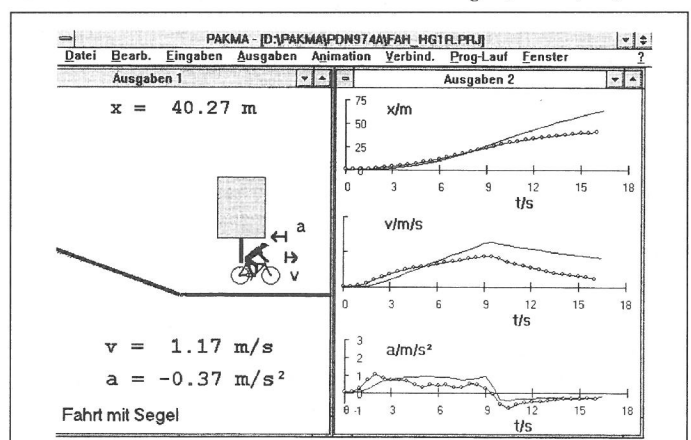
reicht nun der Gleiter nach einer Anfahrphase bei gleichbleibender Hangabtriebskraft relativ schnell seine Endgeschwindigkeit, s. auch D. Heuer [11]. Vergrößert man die „Antriebs“-Kraft nach der Anfahrphase, so wird die Endgeschwindigkeit weiter vergrößert. Dies entspricht einem *vornewton*-schen Konzept für die Beschreibung von Bewegungen, wobei die Anfahrphase als komplex und nicht typisch außer Betracht bleibt und die Reibungskraft nicht gesehen wird. Solche Vorstellungen lassen sich bei den meisten Schülern auch nach dem Physikunterricht nachweisen, siehe D. Heuer, Th. Wilhelm [3]. Nach diesem unterrichtlichen Vorgehen kann diese Bewegung aber auch vom *newton*-schen Standpunkt aus verstanden werden und gezeigt werden, daß das *newton*-sche Konzept tragfähiger ist.

8 Gestaltung eines Kinematik-Dynamik-Lehrgangs

In diesem Beitrag wurden Möglichkeiten vorgestellt, wichtige Teilthemen zu einem Kinematik-Dynamik-Lehrgang an der Bewegung eines Fahrrads experimentell zu erarbeiten. Gründe dafür, ein solches technisches Gerät aus dem Alltag zentral in den Mittelpunkt des Unterrichts zu stellen, wurden in Abschnitt 1 ausgeführt. Insbesondere sollen Schüler sehen, daß physikalische Konzepte auch aus der Analyse von Vorgängen aus dem Alltag aufzubauen sind und diese Konzepte die Vorgänge häufig angemessener beschreiben als unreflektierte Alltagsvorstellungen. Sucht man nach Möglichkeiten, solche Konzepte aus Alltagssituationen zu entwickeln, so ist es häufig erstaunlich, welche Alternativen sich zu Laborexperimenten anbieten. Trotzdem wird man nicht meinen, daß in jedem Fall Experimente, die aus dem Aufbereiten von Alltagssituationen entstehen, den Vorrang vor Laborexperimenten haben müssen. Beide Typen von Experimenten haben ihr eigenes didaktisches Potential.

Versuche, die Alltagssituationen experimentell analysieren, können Schüler direkter ansprechen, ihnen in Bezug

Abb. 6: Ein Fahrrad fährt ein ca 6° steile Rampe hinab und dann horizontal weiter. Vergleich der $x(t)$, $v(t)$ und $a(t)$ Graphen für ein normales Fahrrad und ein Fahrrad mit zusätzlichem Luftsegel (2 m · 1,4 m).



auf die Anwendung des Gelernten einen direkten Kompetenzgewinn versprechen und auch vermitteln; sie können evtl. auch betroffen machen, wenn sich Diskrepanzen bei ihren Erklärungsversuchen zeigen. Laborversuche hingegen erscheinen anwendungsferner, können aber häufig in der Variation der Parameter und allgemeiner Versuchsbedingungen vielfältiger sein. Ein typisches Beispiel dafür sind die Versuche zu $F_{\text{ges}} = m \cdot a$ wie sie in Abschnitt 6.1 kurz vorgestellt sind. Hier haben solche Laborversuche, die F während eines Experiments kontinuierlich ändern können, z. B. durch die Änderung der Fahrbahneigung, s. [11], einen großen Vorteil. Nicht nur die Proportionalität von F und a wird in jedem Moment der Bewegung aufgezeigt, sondern auch alle für die Bewegung typischen Bewegungsabläufe, die sich durch verschiedene Richtungen von v und a ergeben, können während der Hin- und Herbewegung beobachtet und analysiert werden. Daher erscheint die in Abschnitt 6.1 skizzierte Variante hier günstiger als die von 6.2. Denn mit dem Fahrrad können dort die unterschiedlichen Versuchskonstellationen nur eingeschränkt realisiert werden.

Der wesentliche Nachteil des Vorgehens von 6.1 liegt darin, gleich recht unvermittelt mit den Laborexperimenten zu beginnen, ohne zu versuchen, die Fragestellung – Wirkung einer konstanten Kraft auf die Bewegung – an einer für die Schüler konkreten Fragestellung aus ihrem Alltag zu analysieren. Umgekehrt liegt die didaktischen Vorteile des in 6.3 skizzierten Vorgehens darin, diesen Ausgangspunkt zu wählen, damit die Problemsituation aus der Schülersicht anzugehen, die Notwendigkeit für Idealisierungen erfahrbar zu machen und dann mit den neuen Kenntnissen die Ausgangsfrage neu angehen und durch Einbeziehen der Luftreibung vertieft behandeln zu können.

Diese Vertiefung kann sogar noch weitergeführt werden: Statt einer nur qualitativen Erklärung zur Luftreibung kann auch bereits in Klasse 11 ein quantitativer Ansatz in Form eines Modells aufgestellt werden. Damit kann vom Rechner der Bewegungsablauf ermittelt werden. Der Vergleich Experiment-Modell zeigt eine überraschend gute Übereinstimmung. Diese abschließende Ergänzung wird im folgenden Beitrag dargestellt, s. D. Heuer, A. Phan-Gia [12].

9 Projektthema: Anfahren und Bremsen mit dem Fahrrad

Die dargestellten und angedeuteten Fragestellungen sollten sich auch gut für ein Projekt-Thema eignen. Es gibt zahlreiche Teilaspekte, denen in einzelnen Gruppen nachgegangen werden kann. Fahrräder sind überall verfügbar. Auch mit Stoppuhr und Bandmaß kann gearbeitet werden. Wenn man einen Rechner einsetzen will, reicht von der Schnelligkeit jeder '386. Auch ohne Interface-Einsatz bieten sich mit dem Rechner Modellierungen von Anfahr-, Roll- und Bremsvorgängen mit Systemsoftware an, die auch für Schüler frei verfügbar ist. Interessant ist der Vergleich Experiment-Modell. Eine weitere Teilfragestellungen sind energetische Betrachtungen, s. [12]. So ergibt sich sofort die Möglichkeit, daß Schüler aus einer zentralen Thematik eine größere Zahl von sich ergänzenden Fra-

gestellungen entwickeln, die dann in entsprechenden Gruppen bearbeitet werden können. Diese recht starke Konzentration aller Einzelprojekte auf die Physik ist aus Sicht der Physik ein recht positiver Aspekt, zumal es bei diesen Einzelprojekten um praktisches Tun und Anwenden geht, das gerade von den Schülern gewünscht wird, s. Blaschke [15].

Anmerkung:

Das gesamte PAKMA-Software-System mit dem die Projekte dieses Beitrags erstellt wurden, können Sie kostenlos über <http://www.didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/pakma> abrufen.

Dort finden Sie auch alle Projekte dieses Beitrags mit den zugehörigen Meßdaten, so daß damit die Abläufe ohne zusätzliche Hardware in Reproduktion angeschaut und auch neu analysiert werden können. Die Projektnamen sind dabei aus den Pfadangaben in den Kopfzeilen der zugehörigen Abbildungen zu entnehmen. PAKMA darf auch an die Schüler zur eigenen Arbeit zuhause weitergegeben werden, wobei die enthaltenen PASCAL-Dateien nur zusammen mit PAKMA benutzt werden dürfen.

Dank:

Die PAKMA-Entwicklung wurde dankenswerterweise durch eine finanzielle Unterstützung der Firma IBM DEUTSCHLAND gefördert. Die Grundkonzeption realisierte Herr St. Hild, ein Teil der Meßroutinen Th. Hahn, die Animationsmöglichkeiten Herr M. Schmidt. Weitere Ausgestaltungen und Verbesserungen nahmen Herr M. Prautzsch, Herr P. Klein und insb. Herr Chr. Kahmann vor. Allen sei auch an dieser Stelle für ihre engagierte Arbeit herzlich gedankt.

Literatur

- [1] Schecker, H.: Das Schülervorverständnis zur Mechanik. Eine Untersuchung in der Sekundarstufe II unter Einbeziehung historischer und wissenschaftlicher Aspekte, Dissertation Universität Bremen, 1985, S. 166
- [2] Mandel, H.; Gruber, H.; Renkel, A.: Lernen im Physikunterricht – Brückenschlag zwischen wissenschaftlicher Theorie und menschlichen Erfahrungen – In: Kuhn, W. (Hrsg.): Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1993 Esslingen (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 28
- [3] Heuer, D. Wilhelm, Th.: Aristoteles siegt über Newton. Unzulängliches Dynamikverstehen in Klasse 11, erscheint in MNU 1997, Heft ...
- [4] Schecker, H.: Das Schülervorverständnis ..., S. 160
- [5] Heuer, D.: Effizientes Experimentieren und Analysieren durch universelle Programmierungsumgebung PAKMA
Teil 1: Einführung in die Programmierungsumgebung; Fahrradbewegung analysieren, PdN-Ph 38, Heft 7, S. 37–43, 1989
- [6] Heuer, D.; Voß, B.: Mobile Datenerfassung einer Fahrradbewegung (in Vorbereitung)
- [7] Heuer, D.: Offene Programmierungsumgebung zum Messen, Analysieren und Modellieren. Ph. i. d. S. 30, Heft 10, S. 352–357, 1992.
- [8] PAKMA für Windows wird unter der Projektleitung des Lehrstuhls für Didaktik der Physik, Uni Würzburg konzipiert, erstellt und erprobt. Zur Bezugsmöglichkeit der Software, s. Anmerkung am Schluß dieses Beitrages. Die Hardware ist über die Firma Microsystems, Dr. H. Parsche, Neufahrer Str. 21, 85748 Garching, zu beziehen.
- [9] Heuer, D.: Konzepte für Systemsoftware. PdN-Phy 45, Heft 4, S. 2–11, 1996.
- [10] Jäger, R.: Konzept eines rechnerunterstützten Dynamikunterrichts zur Bildung adäquater mentaler Modelle. Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg 1996
- [11] Heuer, D.: Dynamische Physik-Repräsentationen – Verständnishilfe für Physikalische Experimente. PdN-Ph 45, Heft 4/1996, S. 12–18.
- [12] Heuer, D.; Phan Gia Anh Vu: Anfahren mit dem Fahrrad – Vergleich Experiment-Modell unter Berücksichtigung der Luftreibung, PdN-Phy 46, Heft 4/1997
- [13] Müller, St.: Versuche zu einem alternativen Rechnerunterstützten Dynamikkurs. Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg, 1996
- [14] Wilhelm, Th.: Lernen der Dynamik geradliniger Bewegungen – Empirische Erhebungen und Vorschlag für ein neues Unterrichtskonzept, Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg, 1994, S. 148 + 179–188
- [15] Blaschke, K.: Unterrichtserfahrungen mit einer Lernsequenz Anfahren und Bremsen mit dem Fahrrad, PdN-Ph 46, Heft 4/1997.

Anschrift der Verfasser:

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