

Die folgenden Seiten enthalten das Manuskript, das bei der Zeitschrift eingereicht wurde.

Die Endversion des Zeitschriftenartikels findet man unter:

WILHELM, T.; HEUER, D.

***Experimente zum dritten Newtonschen Gesetz zur Veränderung von
Schülervorstellungen***

Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 53, Nr. 3, 2004, S. 17 - 22

Experimente zum dritten newtonschen Gesetz

zur Veränderung von Schülervorstellungen

T. Wilhelm, D. Heuer

1. Relevante Schülervorstellungen:

Schüler bringen in den Physikunterricht schon vielfältige und relativ gefestigte Vorstellungen vom Begriff „Kraft“ mit, die zu großen Teilen den physikalischen Aussagen widersprechen. Häufig gelingt es deshalb nicht, dass Schüler zusätzlich zur Alltagsvorstellung ein angemessenes physikalisches Kraft-Konzept aufbauen. Dies gilt insbesondere auch für das dritte newtonsche Gesetz.

Allgemein zeigen Schülern die Tendenz, Körper, die bei einem Vorgang beteiligt sind, in aktive und passive Körper einzuteilen [1, S. 310]. Nur den aktiven Körpern sprechen sie die Fähigkeit zu, eine Kraft auszuüben, während ein passiver Körper keine Kraft ausüben kann, sondern lediglich aktive Kräfte oder Bewegungen hemmen kann. In einer eingeschränkteren Vorstellung rechnen sie nur belebte Körper zu den aktiven, in einer weiteren Vorstellung auch solche, die sich in Bewegung oder sich wie eine Feder in einem Spannungszustand befinden. Schließlich gehören auch magnetische Körper oder eventuell bei Fallvorgängen schwere Körper durch ihre Gewichtseigenschaft dazu. Passive Körper sind dagegen solche, die sich nicht bewegen und sich in entspannten, stabilen Lagen befinden.

Bao et. al. untersuchten bei Problemlöseaufgaben zum dritten newtonschen Gesetz, von welchen Merkmalen die Antworten von Studenten nach entsprechendem Unterricht abhängen [2]: Zu einem großen Teil werden falsche Antworten gegeben gemäß den stabilen Vorstellungen „Der schwere Körper übt eine größere Kraft aus.“ und „Der schnellere Körper übt eine größere Kraft aus.“ Ebenfalls noch häufig, aber abhängig vom erhaltenen Unterricht zeigt sich die Vorstellung „Der Aktive übt die größere Kraft aus.“, wobei hier aber auch die Erfahrung eine Rolle spielen kann, dass der Stoßende ebenso gestoßen wird.

Die im Unterricht häufig gewählten Formulierungen "actio gleich reactio" bzw. "Kraft gleich Gegenkraft" verstärken allerdings auch die beschriebene falsche Einteilung in eine aktive Ursache und in eine passive Wirkung. In der newtonschen Sichtweise sind jedoch beides völlig gleichberechtigte Kräfte. Deshalb ist es auch sinnvoller, wenn in Schulbüchern die Überschrift nicht „actio und reactio“ [3] oder "Kraft und Gegenkraft" [4] heißt, sondern „Wechselwirkungssatz“ oder „Kraft als Zwillingsspaar“ [5].

Eng mit dieser Einteilung verbunden sind Vorstellungen von Absichten und Zielen. Aktive Kräfte dienen in Schülervorstellungen einem bestimmten Ziel, d.h. sie können mit einem bestimmten Ziel auf sich oder auf andere Körper einwirken. Passive Widerstände sind ohne Absicht lediglich Hemmnisse. Demnach sind Reibungskräfte immer nur Widerstände gegen Bewegungen, aber keine wirklichen Kräfte.

Beispielsweise wurden Schüler mit der Aussage konfrontiert, dass es beim Anfahren eines Autos die Straße ist, die die beschleunigende Kraft ausübt, was von den Schülern entschieden als völlig absurd abgelehnt wurde. Die Straße, die einfach nur so daliege (passiv, absichtslos), könne doch keine Kraft ausüben und kein Auto beschleunigen (aktiv, zielgerichtet) [6, S. 117]. Ebenso gilt für die Schüler, dass ein Sprinter sich selbst durch seine eigene Kraft vom Startblock abstoßen kann, während der Startblock keine Kraft ausübt, sondern als Widerstand ein Wegrutschen des Fußes verhindert [1, S. 310].“

Das 3. Axiom wird von den Schülern häufig so verstanden, dass beide Kräfte am gleichen Körper angreifen. „Die 'Gegenkraft' wird von einem Körper als passiver Widerstand gegen eine von außen einwirkende Kraft mobilisiert [1, S. 311].“ Wirkt also auf einen ruhenden Körper eine äußere Kraft ein, bewirkt seine Gegenkraft, dass er sich nicht oder nur allmählich in Bewegung setzen lässt.

Schüler zeigen sehr häufig auch „Überwindungs“-Vorstellungen: Damit ein Körper beschleunigt wird, muss für manche Schüler die von außen wirkende Kraft größer sein als die Gegenkraft bzw. größer als die Trägheit des Körpers, die als Gegenkraft bezeichnet wird. Aber „*der ganze Vorgang wird nicht unter dem Aspekt von Größen auf einer einheitlichen Dimension gesehen*“ [7, S. 112-113], denn die Trägheit bzw. die Gegenkraft sind in der Schülervorstellung keine Kräfte. Ist die äußere Kraft nicht groß genug, bewegt sich nach dieser Vorstellung der Körper nicht; das bedeutet, dass hier eine Schwellenvorstellung vorliegt.

2. Unzureichende Experimente in Schulbüchern

Die Ursache mancher dieser Schülervorstellungen ist sicher auch darin zu finden, dass wir im Alltag bei einer Wechselwirkung mit einem anderen Körper immer nur *einen* Druck bzw. *einen* Zug spüren. Als außenstehender Beobachter kann man nur die beiden Bewegungen beobachten, aber nicht die beiden Kräfte. Ein idealer Demonstrationsversuch müsste jedoch die beiden Kräfte messen. Ein Überblick über verschiedene Schulbücher zeigt nun, dass es in diesen zum dritten Newtonschen Gesetz nur wenig unterschiedliche Experimente gibt.

Ein häufig dargestellter Versuch ist der Versuch, der auf Newton selbst zurückgeht, bei dem ein Magnet und ein Eisenstück auf Korkstücken (oder Styropor) liegen, die wiederum auf Wasser schwimmen [8, 9, 10]. Dieser Versuch ist durch die kleine Anziehungskraft nicht überzeugend realisierbar, da die Korkstücke schwanken und sie durch die Oberflächenspannung nicht nur gegenseitig, sondern auch vom Gefäßrand angezogen werden. Selbst bei einem guten Aufbau ist aufgrund der geringen Reichweite des Magnetfeldes aber eine Beobachtung nur über eine kurze Strecke (ca. 10 cm) bzw. kurze Zeit (ca. 5 s) möglich. Mehr, als dass sich beide irgendwie aufeinander zu bewegen, kann man hier kaum aussagen.

Geeigneter scheint deshalb der Versuch mit zwei gleich schweren Schülern auf zwei Skateboards [3, 9, 10]. Ein Schüler bekommt den Auftrag, den anderen aktiv zu sich heranzuziehen, während dieser den Auftrag bekommt, nur passiv das Seil festzuhalten – ohne den anderen heranzuziehen. Man findet sicher auch zwei annähernd gleich schwere Schüler, die etwas Erfah-

rung mit Skateboards haben. Das Problem ist, das man in der Regel keine zwei Skateboards mit gleicher Reibung zur Verfügung hat, so dass sich keine gleichen Geschwindigkeiten einstellen und die Schüler sich nicht in der Mitte treffen. Noch schlechter funktioniert es mit Bürostühlen oder Versuchstischen [8].

Neben diesen Einstiegsversuchen findet man unter den Übungsaufgaben Versuche, die für Schüler in der Erklärung recht anspruchsvoll sind. In einem Versuch hängt ein Gewichtsstück an einer Feder über einem Becher Wasser, der auf einer Waage steht. Die Frage ist, was an der Waage und was an der Feder zu beobachten ist, wenn das Gewichtsstück in das Wasser gehängt wird [9, 11]. In einem anderen Versuch befinden sich zwei Magnete mit gleicher Orientierung in einem passenden Glasgefäß auf einer Waage (die nicht auf magnetische Kräfte reagiert) [10]. Wenn man den oberen Magneten umdreht, schwebt er und die Frage ist, was dann die Waage anzeigt.

Es ist fraglich, wie weit man mit diesen wenigen Versuchen, eine Veränderung in den Vorstellungen der Schüler bewirken kann. Ein guter Versuch, der mehr herausfordert und Schülervorstellungen bewusst angeht, ist der Versuch mit der batteriebetriebenen Spielzeugeisenbahn [12, 3, 10]: Ein Schienenstück ist auf Walzen gelagert. Fährt die Eisenbahn an, bewegt sich nicht nur die Eisenbahn nach vorne, sondern auch die Schiene nach hinten.

In all den aufgeführten Versuchen werden stets nur die Geschwindigkeiten verglichen, die zwei Körper nach einer Beschleunigungsphase haben. Will man wirklich die Gleichheit beider Kräfte zeigen, muss man aber zwei Beschleunigungen messen. Dies ist mit einer kontinuierlichen Messung mit einem Messwerterfassungssystem möglich, was nur von wenigen Lehrbüchern [8] eingesetzt wird – allerdings auch nur zur Geschwindigkeitsmessung.

3. Experimente mit einem Messwerterfassungssystem

Für eine genaue kontinuierliche Messung wurde der obige Standardversuch mit den zwei Skateboardfahren auf der Luftkissenfahrbahn nachgebaut, so dass nach einer qualitativen Durchführung des Skateboardversuchs damit eine quantitative Behandlung zur Erarbeitung des dritten newtonschen Gesetzes möglich ist [13]. Auf der horizontalen Luftkissenfahrbahn stehen zwei Luftkissengleiter. Auf einem wird eine kleine Holzplatte befestigt, auf der ein Kleinmotor ($F \approx 0,02 \text{ N}$), zwei (schon etwas schwache) 1,5 V-Batterien zur Stromversorgung und ein Schalter zum Einschalten befestigt ist (Abb. 1). An dem Kleinmotor befindet sich ein Wickelrad, auf das der Faden

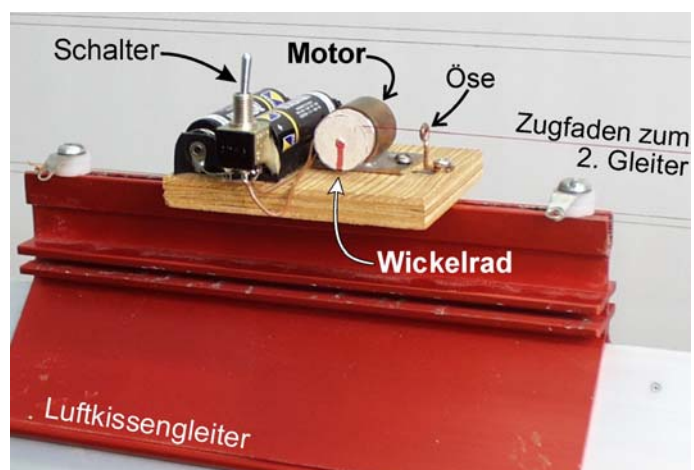


Abb. 1: Foto des Kleinmotors auf dem Luftkissengleiter (einschließlich Batterien, Schalter und Öse)

aufgewickelt werden kann, der beide Gleiter verbindet. Vor dem Wickelrad wird noch eine kleine Führungsöse befestigt, damit der Faden beim Aufprall auf den zweiten Gleiter nicht vom Wickelrad herunterrutscht. Will man zwei gleich schwere Gleiter, muss auf den anderen ein entsprechendes Zusatzgewicht setzen. Am Graphen (Abb. 2 a) sieht man, dass beide Gleiter mit entgegengesetzten, aber betragsmäßig gleichen Beschleunigungen $|\vec{a}| \approx 0,05 \text{ m/s}^2$ bewegen, bis sie zusammenstoßen

($t = 3,8 \text{ s}$). Dabei bewegen sich die Gleiter ($m = 420 \text{ g}$) über jeweils eine Strecke von $\Delta x = 0,4 \text{ m}$. Wenn man will, kann man auch betrachten, wie sich die beiden Gleiter nach dem Stoß ($3,8 - 4,6 \text{ s}$) mit betragsgleichen Beschleunigungen langsamer werdend voneinander wegbewegen ($4,6 - 6,0 \text{ s}$) und dann wieder mit gegengleichen Beschleunigungen aufeinander zufahren ($6,0 - 7,4 \text{ s}$) (Abb. 2 b). Die Beschleunigung ist beim auseinander fahren etwas größer, da die Reibung nun auch in die Richtung der Zugkraft wirkt und der Motor eine größere Kraft ausübt.

Interessant sind natürlich auch die Phasen, in denen die Gleiter zusammenstoßen (in Abb. 2b bei $3,8 - 4,6 \text{ s}$ und $7,4 - 8,2 \text{ s}$, $9,4 - 10,0 \text{ s}$), so dass es sich lohnt, diese Stöße allein ohne Motor zu betrachten. Damit die Beschleunigungen nicht zu kurz und stark sind, wurden an die Gleiter weiche Stoßfedern¹ befestigt. Nachdem nun ein Gleiter angestoßen wurde (in Abb. 3 bei $t = 1,0 \text{ s}$), stoßen die Gleiter während einer Messzeit von 15 s dreimal miteinander (in Abb. 3 bei $2,4 \text{ s}$, $4,1 \text{ s}$ und $11,2 \text{ s}$) und mehrmals mit der Begrenzung der Luftkissenfahrbahn (in Abb. 3 bei $3,5 \text{ s}$, $5,4 \text{ s}$, $9,5 \text{ s}$ und $14,8 \text{ s}$). Um in einer anschließenden Diskussion immer wie-

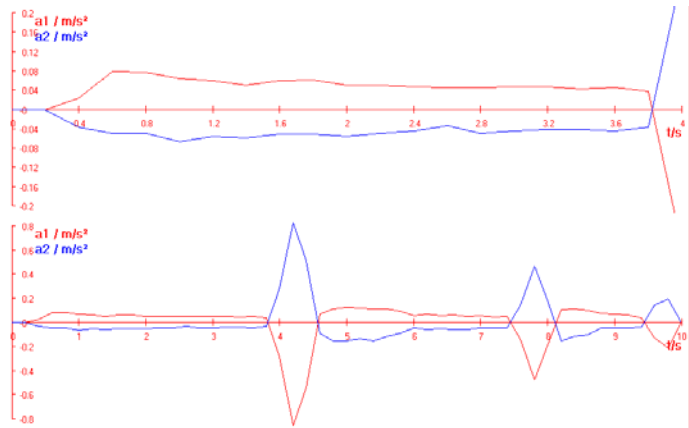


Abb. 2a: Beschleunigung der beiden Gleiter während des gegenseitigen Anziehens

Abb. 2b: Beschleunigung der beiden Gleiter einschließlich zweier Stöße (gemessen mit PC-Mäusen)

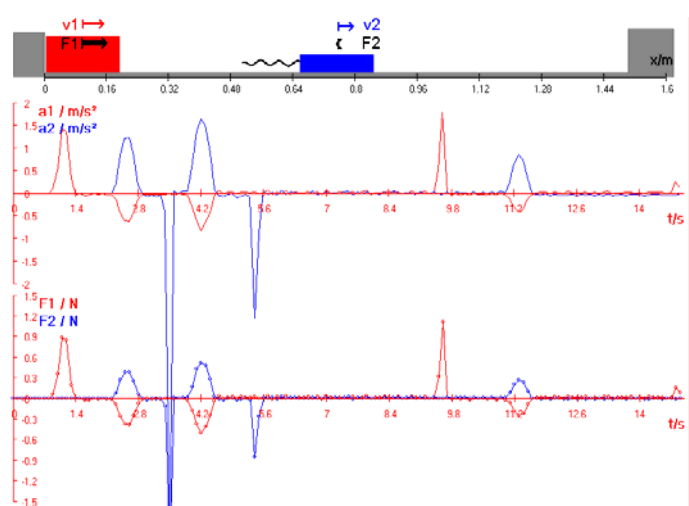


Abb. 3: Stoß unterschiedlich schwerer Gleiter, Ortsanimation mit Pfeilen für v und F , t-a-Graphen und t-F-Graphen (gemessen mit PC-Mäusen)

¹ Als Stoßfeder wurde ein $0,1 \text{ mm}$ dünner Federstahl $0,8 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ zu einem großen Kreisring ($\varnothing = 9 \text{ cm}$) verbunden. Bei Leybold gibt es unter der Nr. 337 112 auch eine (leider härtere) Stoßfeder.

der nachschauen zu können, welcher Peak in welcher Situation entstand, ist eine Animation hilfreich, die sich entsprechend den Messwerten bewegt und die jederzeit mit einem Ablauf des Graphen reproduziert werden kann. Als Vektoren können hier weitere interessierende Größen wie die Geschwindigkeit oder die Kräfte eingezeichnet werden (Abb. 3 oben) [14], ohne dass man viele unübersichtliche Graphen erhält. Der Versuch kann leicht mit gleich schweren und unterschiedlich ungleich schweren Gleitern wiederholt werden, wobei insbesondere ungleich schwere Gleiter interessant sind (Abb. 3). Hier stellt man fest, dass zwar die Beschleunigungen während des Stoßes, also während der Wechselwirkung, unterschiedlich sind, aber die entsprechend den Massen gewichteten Beschleunigungen $m \cdot a$ betragsgleich sind (Abb. 3).

Dabei sollte man deutlich machen, dass beim Stoß unterschiedlich schwerer Körper die Wirkungen auf die beiden Körper tatsächlich entsprechend der Schülervorstellung unterschiedlich sind. Diese "Wirkungen" sind die Beschleunigungen, sie entstehen aber durch gleich große Kräfte. Damit wird den Schülern zugestanden, dass ihre Erfahrung richtig ist; es findet allerdings eine Art Umdeuten statt. Ein Beispiel, das Schülern sehr gefallen hat, ist das Folgende: Wenn ein Hase von einem Auto erfasst wird, wirken auf beide gegengleiche Kräfte, was aufgrund der unterschiedlichen Massen zu recht unterschiedlichen Wirkungen führt.

Eine weitere Variante auf der Luftkissenfahrbahn ist, die zwei unterschiedlich schweren Gleiter mit einer weichen Standard-Schraubenfeder ($D = 3 \text{ N/m}$, $l = 0,15 \text{ m}$, $\varnothing = 0,03 \text{ m}$) zu verbinden. Zusätzlich wird an einen Gleiter eine der oben erwähnten kreisringförmigen Stoßfedern befestigt. Nun hat man einen ständigen Wechsel zwischen Anziehen durch die Schraubenfeder und ein Abstoßen durch die Stoßfeder, wobei wieder in jedem Moment die Beschleunigungen unterschiedlich und die Kräfte gleich groß sind (Abb. 4).

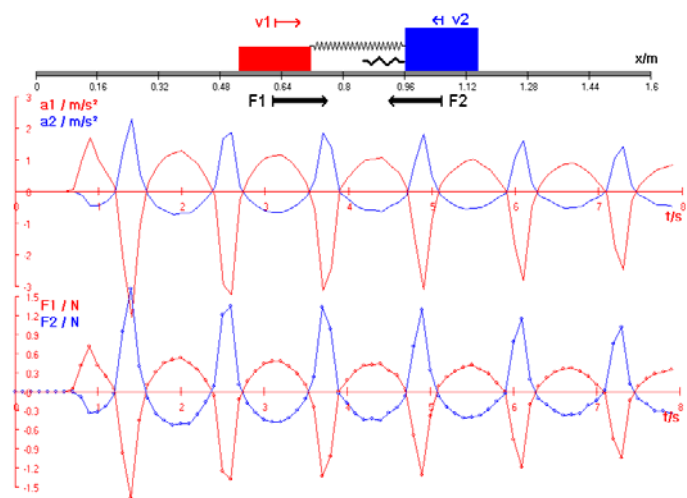


Abb. 4: Beschleunigungen und Kräfte beim Wechsel zwischen Anziehen und Abstoßen bei zwei unterschiedlich schweren Gleitern (gemessen mit PC-Mäusen)

4. Technische Realisierungsmöglichkeiten

Alle Versuche im Abschnitt 3 wurden mit einem Laptop mit Windows XP und PAKMA 2002+ und zwei Mäusen als seriell Messgerät aufgenommen (siehe unten). Man kann die Versuche zwar auch mit der PAKMA-Hardware und mit dem PAKMA-Präzisionslaufrad (Gitterabstand $80,4 \mu\text{m}$) messen, doch dies ist nicht mehr käuflich erhältlich. Ab der Version PAKMA 2004 ist es zwar auch möglich, in PAKMA mit dem Sensor-Cassey von Leybold

Didactic zu messen. Während aber die Messung von Spannungen (und Strömen) einfach geht, muss man beim Messen mit Zählrädern mehr beachten (Kleine Umbauarbeit und pro Laufrad zwei Kanäle, d.h. ein Sensor-Cassey nötig). Außerdem gibt es von Leybold keine Laufräder mit so hoher Ortsauflösung.

Hier wurde eine Low-Cost-Lösung eingesetzt, bei der zwei identische PC-Mäuse zum Messen verwendet wurden. Im Gegensatz zur Messung einer einzigen eindimensionalen Bewegung [15] sind hier mehr Umbauarbeiten nötig. Wie bei der Messung einer Bewegung wird die Maus geöffnet, die Kugel herausgenommen und eine passende Kabeldurchführungsstülpe aus Weich-PVC und/oder ein Gummischlauch auf die Achse geschoben². Außerdem muss der störende Einfluss von Umgebungslicht auf die Lichtschranke durch eine Abdeckung verhindert werden. So werden zwei Mäuse umgebaut, wobei einmal die Achse mit Rasterscheibe für die x-Richtung und einmal für die y-Richtung genutzt wird. Es sollten aber nicht beide Mäuse gleichzeitig am Computer angeschlossen werden, da dann die Messgenauigkeit nachlässt. Stattdessen sollte man z.B. der Maus, bei der die y-Richtung genutzt wird, das Signal des Fototransistors entnehmen und es der anderen Maus (x-Maus), deren y-Fototransistor man abgeklemmt hat, einspeisen. So kann diese x-Maus beide Signale umsetzen und als Datenpaket an den Computer senden; es müssen aber weiterhin beide Mäuse mit Spannung versorgt werden, wozu die Schaltung aus Abb. 5 geeignet ist. Alternativ und einfacher kann man auch nur die x-Maus (durch normalen Anschluss an den PC) mit Spannung versorgen, deren y-Fotodiode und y-Fototransistor abklemmen und die Anschlüsse mit der y-Fotodiode und dem y-Fototransistor der y-Maus verbinden.

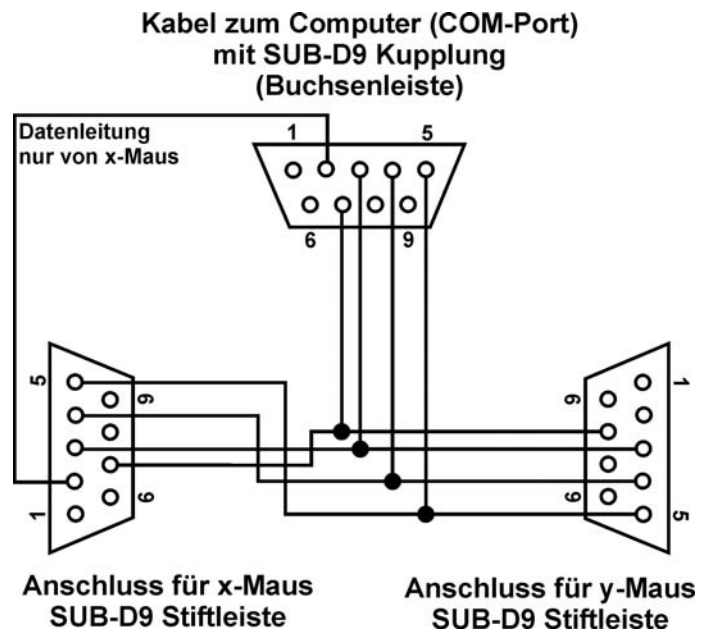


Abb. 5: Schaltung zur Spannungsversorgung zweier Mäuse, wobei nur die x-Maus Daten an den PC sendet

Unter Windows 95/98/ME genügt es bei jeder PAKMA-Version, wenn die Maus von Windows erkannt wird. Damit die Mausdaten vom Maustreiber proportional übertragen und nicht von Windows dynamisch in Abhängigkeit der "Fahrweise" behandelt werden, muss in der Systemsteuerung bei der Einstellung der Maus die Option "Mausbeschleunigung" auf "Aus" gestellt werden [15]. Um den Programmablaufs nicht mit der Tastatur steuern zu müssen,

² Eine bebilderte Umbauanleitung findet man unter <http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/software/mausumbau/index.html>. Die Kabeldurchführungsstülpe bekommt man bei Conrad-Elektronik, Best.-Nr. 52 69 08 - 33, Hauptkatalog, 2004, S. 1132, 0,09 €

verwendet man einen Computer mit einer Maus zum Bedienen und einem zusätzlichen Port zum Messen, wobei die Bedienmaus während der Messung nicht benutzt werden darf.

Unter Windows NT/2000/XP werden aber die Datenpakete, die die Maus sendet, noch zusätzlich intern bearbeitet, so dass für die Beschleunigung keine angemessene Messgenauigkeit erreichbar ist. Daher muss man in PAKMA 2002+ neben einer PS/2- oder USB-Maus zur Bedienung noch eine serielle Maus anzuschließen und sie als serielles Messgerät auslesen³. Entweder schließt man sie erst nach dem Systemstart an, damit sie nicht als Bedien-Maus erkannt wird, oder man meldet sie in der Systemsteuerung ab. Damit ist auch eine echte Entkopplung von Messen und Bedienen gegeben.

Der Zeitschritt Δt muss bei jeder Mausmessung unbedingt ein Vielfaches von 0,025 sein (empfohlen 0,1 s), da die Maus die Daten von jeweils 25 ms als ein Paket sendet. Schließlich muss die Längeneinheit empirisch ermittelt werden (Größenordnung: $l_{\text{ein}} = 0.0001$ m/Impuls). Die maximal detektierbare Geschwindigkeit liegt bei der Standardmaus mit oben genannter Kabeltülle typischerweise bei 0,55 m/s. Wenn die Bewegung möglichst reibungsfrei sein soll, dann darf die Mausachse nicht als Umlenkrolle verwendet werden, sondern es muss ein zusätzliches Laufrad als Umlenkrolle verwendet werden, so dass an der Maus der Faden nur um ca. 30° umgelenkt wird. Vor allem aber dürfen die beiden umlaufenden Fäden nicht gespannt sein (sondern sie müssen geringfügig durchhängen). Dann wurde eine Reibung von nur in der Größenordnung 0,01 N gemessen. Diese Reibung in der Maus⁴ spielt keine große Rolle, da große Massen bewegt werden. Mit der Maus als seriellem Messgerät sind die Ergebnisse dann faszinierenderweise fast genauso gut wie mit einem hochauflösenden Präzisionslaufrad.

Eine sehr schöne, wenn auch nicht billige Lösung zur Aufnahme der Versuche von 3 erhält man mit VideoCom von Leybold Didactic⁵. Mit dieser CCD-Kamera ist eine hochauflösende berührungsfreie Bewegungsaufnahme möglich (Auflösung: max. 80 Bilder/Sekunde, 0,25 mm bei 1 m registrierbare Weglänge). In der Software „VideoCom Bewegungen“ können die Messwerte in Graphen und Tabellen auch mit Marken auf einer Skala dargestellt werden, nicht aber als Pfeile. Allerdings ist es nicht möglich, gleichzeitig nur den $F(t)$ -Graphen und eine Zeigerdarstellung für den Ort anzuzeigen. Außerdem kann man keine Reproduktion der Messung (in Echtzeit oder verlangsamt) zeigen. Im Gegensatz zu anderen Messwerterfassungssystemen können aber auch mehr als zwei Objekte verfolgt werden. Insgesamt gesehen bietet die Maus als serielles Messgerät also das beste Preis-Leistungs-Verhältnis.

³ Dank gilt Herrn S. Bärhausen, der diese innovative Lösung programmiert hat.

⁴ Weitere Informationen unter <http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/software/maussensor/index.html>

⁵ Bestell-Nummer 337 47 bei www.leybold-didactic.de. Siehe auch <http://www.leybold-didactic.com/software/vc-exp-d.pdf>

5. Freihandversuche

Wie die in Abschnitt 1 dargestellten Schülervorstellungen zeigen, ist es gerade beim dritten newtonschen Gesetz wichtig, dass die vorhandenen Vorstellungen angesprochen und mit der physikalischen Sichtweise verglichen werden. Dazu eignen sich als Einstieg in das Gespräch einfache qualitative Freihandversuche. Damit können auch weitere Kontexte auf das erarbeitete Gesetz projiziert werden, nach Gemeinsamem darin gesucht werden und die Struktur wieder erkannt werden.

Zum Beginn eignet sich z.B. der bereits erwähnte Versuch mit der Eisenbahn, deren Schiene auf Rollen liegt [12, 3, 10]. Für eine weitere Analyse des Anfahrvorgangs nimmt man ein Spielzeugfahrzeug, das von einem verdrillten Gummiring angetrieben wird. Spannt man den Gummiring extrem stark und setzt das Fahrzeug dann auf eine glatte, mit Wasser benetzte Fläche, fährt es trotzdem nicht an, sondern bleibt überraschenderweise an seinem Platz stehen, während das Wasser durch die sehr schnell drehenden Räder nach hinten weggespritzt wird. Das Fahrzeug konnte „sich“ also nicht „selbst“ beschleunigen. Durch die fehlende Reibung konnte die Unterlage keine Kraft auf das Fahrzeug ausüben.

Die Idee, dass sich ein Auto selbst beschleunigt, entspricht physikalisch der Geschichte des Barons Münchhausen, der sich selbst aus dem Sumpf zieht. Deshalb ist es sinnvoll, diese Geschichte zu diskutieren [10, 16]. Zum Vergleich eignet sich folgender Freihandversuch: Auf einem Wagen wird mit Pappe ein größeres Segel befestigt. Liegt ein kleiner Fön auf dem Wagen und bläst in das Segel, bewegt sich der Wagen nicht (woran auch seine Reibung mitwirkt) (siehe Abb. 6). Hält

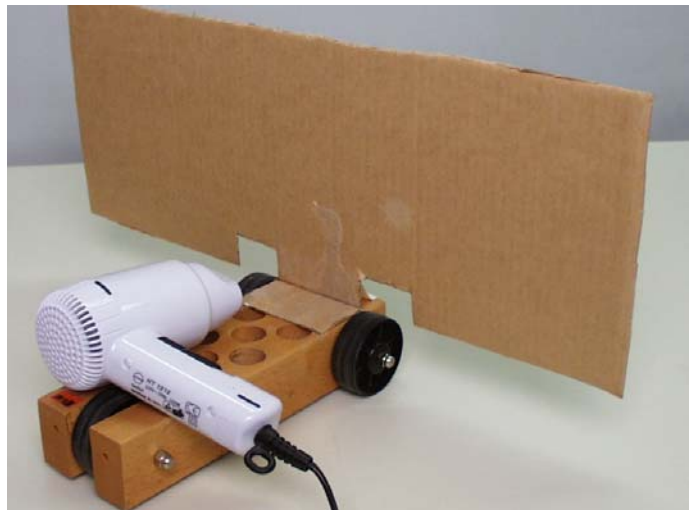


Abb. 6: Versuch zur Münchhausen-Geschichte: Fön und Segel auf gleichem Wagen montiert

man dagegen den Fön mit der Hand vor das Segel, bewegt sich der Wagen. Äquivalent, aber nicht so eindrücklich, ist ein Nachbau des Magnetantriebs aus den Geschichten Michael Endes über Jim Knopf und Lukas dem Lokomotivführer, bei dem die Lokomotive Emma durch einen an ihr befestigten Magneten gezogen wird [16].

Man sollte also unbedingt diskutieren, wie die Bewegungen im Alltag zustande kommen und wer auf wen eine Kraft ausübt. So wie der startende Sprinter den Startblock nach hinten drückt und von Startblock nach vorne gedrückt wird, wird im Paddel- oder Motorboot das Wasser nach hinten gedrückt. Beim Propellerflugzeug, beim Propellerfahrzeug (im Spielwarenhandel) oder beim Düsenflugzeug wird die Luft nach hinten beschleunigt und damit von der Luft das Flugzeug nach vorne. Das dritte newtonsche Gesetz ist auch eine Erklärung für

das Fliegen der Flugzeuge [17]: Die Tragflächen lenken die Luft nach unten (Kraft von Tragflächen auf Luft), entsprechend gibt es eine Kraft von der Luft auf die Tragflächen nach oben.

Als Versuche eignen sich auch einige Versuche, die normalerweise für das Thema Rakete aufgehoben werden. Das „Rückstoßprinzip“ ist ja nur ein Spezialfall für das „dritte newtonsche Gesetz“. Ein schöner einfacher Freihandversuch ist das Luftballonauto, bei dem ein aufgeblasener Luftballon auf dem Auto befestigt wird und die Luft nach hinten und das Auto nach vorne beschleunigt werden⁶. Steht dieses Spielzeug nicht zur Verfügung, kann man natürlich auch einen aufgeblasenen, nicht verschlossenen Luftballon frei davonfliegen lassen. Schließlich kann man obigen Fön auch so auf den Wagen legen, dass er Luft nach hinten bläst.

Fasziniert sind die Schüler stets von der Überlegung, dass bei einer Ohrfeige jeweils die gleiche Kraft auf die Backe und die Hand wirkt, obwohl beim Schmerzempfinden und den juristischen Folgen ein Unterschied besteht.

Wichtig ist auch etwas gegen die folgende Verwechslungsgefahr zu tun: Zwei gegengleiche Kräfte greifen als Wechselwirkungskräfte an zwei beteiligten Körpern an (3. Newtonsches Gesetz) oder zwei gegengleiche Kräfte erzeugen an einem Körper ein Kräftegleichgewicht. Bei einem Kräftegleichgewicht darf man deshalb auch nicht von einer „Gegenkraft“ sprechen, sondern nur von einer „Gleichgewichtskraft“ oder noch besser von einer „Kompensationskraft“.

6. Untersuchungsergebnisse

Aufbauend auf verschiedenen Vorarbeiten wurde von *Wilhelm* ein neues Unterrichtskonzept für den Kinematik- und Dynamikunterricht entwickelt [18, 19]. Von verschiedenen Lehrern, denen das Konzept in einem Begleitseminar vorgestellt wurde, wurde in etlichen Klassen entsprechend unterrichtet. In diesem Konzept wurden für die Behandlung des dritten Newtonschen Gesetzes die hier vorgestellten Versuche vorgeschlagen. Da nicht alle Lehrer über geeignete Hardware verfügten und die Versuche mit einem Messwerterfassungssystem aufwändig sind, bestand die Möglichkeit, digitale Videos der Versuche zu zeigen und die Messung in PAKMA als Reproduktion in Echtzeit ablaufen zu lassen, was von den Lehrern auch gerne so genutzt wurde und wobei gute Erfahrungen gemacht wurden. Der Vorteil der Zeitersparnis (in der Vorbereitung und im Unterricht selbst) wird sehr groß eingeschätzt, während der Nachteil, keine Originalmessungen zu haben, als gering eingeschätzt wird. Die im Unterricht gewonnene Unterrichtszeit kann zum Gespräch mit den Schülern genutzt werden. Dass Reproduktionen statt Originalmessungen gemacht wurden, wurde von den Schülern stets akzeptiert, was Lehrer z.T. verwunderte. Es setzte sich die Erkenntnis durch, dass es für Schüler keinen Unterschied macht, ob sie eine Originalmessung sehen oder ein Video mit Reproduktion. In beiden Fällen sind sie selbst unbeteiligte Zuschauer. Anscheinend hat kein Schüler daran gezei-

⁶ Ein Bausatz ist bei www.Opitec.de unter Nr. 101.026 bestellbar.

felt, dass die Reproduktion wirklich der Realmessung entspricht. Das Video hilft jedenfalls, deutlich zu machen, dass nun eine Reproduktion eines Realversuches folgt. Die Videos dienen der Anschauung und verdeutlichen Versuchsaufbau und Versuchablauf. Ein Vorteil gegenüber dem Realversuch ist, dass sie wiederholt und angehalten werden können. In PAKMA 2004 können solche Videos auch zusammen mit Graphen und Vektoren für die Größen ablaufen [14, S. 7+9].

Ein international bekannter Test zum Kraftverständnis ist der "Force Concept Inventory", kurz FCI-Test [20]. Bei aller Kritik an dem Test bzw. seiner Einteilung in Aufgabengruppen sind zumindest die vier Aufgaben zum dritten Newtonschen Axiom gut nutzbar, da sie eine hohe Reliabilität erreichen [21, S. 82]. Demnach ist diese Aufgabengruppe ein konsistenter Indikator für ein Konstrukt „Verständnis des 3. Newtonschen Gesetzes“. In den acht bayerischen Klassen der Jahrgangsstufe 11 (162 Schüler), deren Lehrer an dem Seminar teilnahmen und den FCI durchführten, erreichten die Schüler 50 % richtige Antworten (Standardabweichung 30%); in einer Klasse wurden sogar 71 % (Standardabweichung 27%) erreicht. Vor dem Dynamik-Unterricht wurden aufgrund des Wissens aus der Mittelstufe nur 17 % richtig gelöst. Die drei bayerischen Vergleichsklassen, die bisher vorliegen, erreichen dagegen auch nach dem Dynamik-Unterricht nur 33 %, so dass durch den hier dargestellten Unterricht ein Effekt nachweisbar ist. Um eine größere Vergleichsbasis zu haben, sind weitere Tests in mehr Vergleichsklassen in Arbeit. Der Test wurde jeweils mehrere Monate nach dem Unterricht durchgeführt, um langfristige Effekte zu sehen. Das Problem in Bayern ist, dass das Kurssystem erst in der zwölften Klasse beginnt und viele Elftklässler schon wissen, dass sie Physik ablegen; außerdem stehen für viele Unterrichtsinhalte nur zwei oder drei Wochenstunden zu Verfügung. Die Art, wie das dritte Newtonsche Gesetz unterrichtet und welche Experimente gezeigt werden, hat jedoch einen Einfluss auf das Verständnis und auf längerfristige Behaltenseffekte.

Bemerkung:

Die Software PAKMA 2002 zum Messen mit PC-Maus unter Windows 95/98/ME befindet sich auf der CD-ROM „PAKMA 2002“ im Schroedel-Verlag, ISBN: 3-507-10729-5. Ein Update auf PAKMA 2002+ zum Messen mit der Maus als seriellem Messgerät ist unter www.pakma.de downloadbar. Die Version PAKMA 2004 zum Messen mit dem Sensor-Cassey wird demnächst veröffentlicht werden. Weitere Informationen unter: <http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de>.

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

Literatur:

- [1] Schecker, H.: Das Schülervorverständnis zur Mechanik, Eine Untersuchung in der Sekundarstufe II unter Einbeziehung historischer und wissenschaftlicher Aspekte, Dissertation Universität Bremen, 1985
- [2] Bao, L.; Hogg, K.; Zollmann, D.: Model analysis of fine structures of student models: An example with Newton's third law _ In: American Journal of Physics 70, 2002, Nr. 7, S. 766-778
- [3] Bader, F.; Dorn, F. (Hrsg.): Dorn · Bader, Physik 11 Ausgabe A Gymnasium Sek II, Schroedel Verlag, Hannover, 1998
- [4] Bayer, R. et. al.: ImpulsePhysik 2, Bundesausgabe (11. Schuljahr oder Gesamtband), Ernst Klett Verlag, Stuttgart, 1997
- [5] Maennel, R.: Die Formulierung des 3. Newtonschen Grundgesetzes – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik, 1976, Nr. 1, S. 17-19

- [6] Jung, W.; Wiesner, H. (1980): Lernschwierigkeiten in der Mechanik bei Schülern der NGO -In: Scharmann, A.; Hofstaetter, A.; Kuhn, W. (Hrsg.): Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik, Vorträge der Frühjahrstagung 1980, Gießen
- [7] Jung, W. (1980): Allgemeine Ergebnisse von Erhebungen über Schülervorstellungen zur Mechanik - In: Scharmann, A.; Hofstaetter, A.; Kuhn, W. (Hrsg.): Deutsche Physikalische Gesellschaft, Fachausschuß Didaktik der Physik, Vorträge der Frühjahrstagung 1980 Gießen, S. 110 – 115
- [8] Grehn, J.; Krause, J. (Hrsg.): Metzler Physik, Schroedel Verlag, Hannover, 1998
- [9] Gaitzsch, R. et. al.: Hammer · Knauth · Kühnel, Physik Jahrgangsstufe 11 Mechanik Fundamentum, Oldenbourg-Verlag, 1996
- [10] Feuerlein, R.; Näpfel, H.; Schedl, E.: Physik mechanik, Bayerischer Schulbuch-Verlag, München, 1993
- [11] Figuring Physics. Submerged Teabag – In: The Physics Teacher, Vol. 41, 2003, S. 384
- [12] Braunschmidt, H.: Versuche zum 3. Newtonschen Gesetz – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik 1972, Nr. 2, S. 53
- [13] Albert, U.: Das 3. Newtonsche Gesetz – ein experimentell orientiertes Unterrichtskonzept, Schriftliche Hausarbeit für die erste Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium, Universität Würzburg, unveröffentlicht, 1997
- [14] Heuer, D.: Physikunterricht, gestaltet mit Multimedia-Elementen - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 52, 2003, Nr. 3, S. 2 - 15
- [15] Schmidt, M.; Wilhelm, T.; Heuer, D.: Die Maus als Bewegungssensor. Kinematik und Dynamik in der Sekundarstufe I mithilfe des Computers - In: Naturwissenschaften im Unterricht – Physik 13, 2002, Nr. 69, S. 31 – 33
- [16] Backhaus, U.: Die Kraft ist ein Zwillingsspaar. Beispiele zur Einführung des Wechselwirkungsprinzips in der Schule – In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik 12, 2001, Nr. 65, S. 12 (186) – 14 (188)
- [17] Weltner, K.: Flugphysik – um das Fliegen zu verstehen – In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 55, 2002, Nr. 7, S. 388 – 396
- [18] Wilhelm, T.; Heuer, D.: Fehlvorstellungen in der Kinematik vermeiden - durch Beginn mit der zweidimensionalen Bewegung - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 51, 2002, Nr. 7, S. 29 - 34
- [19] Wilhelm, T.; Heuer, D.: Interesse fördern, Fehlvorstellungen abbauen - dynamisch ikonische Repräsentationen in der Dynamik - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 51, 2002, Nr. 8, S. 2 - 11
- [20] Hestenes, D.; Wells, M.; Swackhamer, G.: Force concept inventory – In. The Physics Teacher, 30, 1992, 141-158
- [21] Schecker, H.; Gerdes, J.: Messung der Konzeptualisierungsfähigkeit in der Mechanik – Zur Aussagekraft des Force Concept Inventory, Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 5, 1999, Nr. 1, S. 75 – 89

Anschrift der Verfasser:

StR *Thomas Wilhelm*, Prof. Dr. *Dieter Heuer*, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de