

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

Die Endversion des Zeitschriftenartikels findet man unter:

WILHELM, T.; GEßNER, T.; SULEDER, M.; HEUER, D.

***Sportaktivitäten vielseitig analysieren und modellieren - Video und Messdaten  
multimedial aufbereitet***

Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 52, Nr. 2, 2003, S. 23 - 30

# Sportaktivitäten vielseitig analysieren und modellieren – Video und Messdaten multimedial aufbereitet

T. Wilhelm, T. Geßner, M. Suleder, D. Heuer

## 1. Analyse von Sportbewegungen

Schon oft wurde vorgeschlagen, Vorgänge aus dem Sport im Physikunterricht zu behandeln, um die Lebenswelt der Schüler zu berücksichtigen und die Schüler durch die Verwendung solcher lebensnaher Beispiele zu motivieren (z.B. [1]). Da Sport mit Bewegungen, Kräften, Energieumwandlungen etc. zu tun hat, ist das eine sehr naheliegende Affinität zur Physik, wobei sich für den Physikunterricht hauptsächlich Phänomene aus dem Bereich der Mechanik anbieten. Physikalische Betrachtungen und Analysen können hier helfen, diese Abläufe zu verstehen und evtl. sogar zu optimieren.

Besonders häufig wurde z.B. vorgeschlagen, Wurfbewegungen im Sport im Physikunterricht zu behandeln (z.B. [2] bis [7]). Will man nicht nur bei einer theoretischen und rechnerischen Behandlung stehen bleiben, sondern reale Bewegungen betrachten, bietet sich heute für zwei-dimensionale Bewegungen wie Wurfbewegungen vorrangig die Videoanalyse an.

Die in Deutschland im Physikunterricht bisher benutzten Videoanalyseprogramme (siehe [5] bis [9]) haben allerdings mehrere Nachteile:

1. Die Auswertung der Videos geschieht nicht automatisch, sondern es muss aufwendig in jedem Bild die Position des Körpers per Hand angegeben werden (Ausnahme: [9]).
2. Die Ausgabe der Messwerte ist nur in Grafen möglich, während intuitiver verstehbare Darstellungsmöglichkeiten nicht nutzbar sind.
3. Der Vergleich von gemessenen Daten mit in einem Modell berechneten Daten ist nicht oder nur in Excel möglich.

Hier soll gezeigt werden, dass diese Schwierigkeiten überwunden werden können. Dazu sollen beispielhaft einige verschiedene Möglichkeiten gezeigt werden, wie man ein Video nutzen kann – Möglichkeiten, die über die klassische Videoanalyse hinausgehen. Schließlich wird dabei nur Software verwendet, die für die Schule erstellt wurde und im Gegensatz zu professioneller Software frei oder günstig zu bekommen ist.

## **2. Die Bewegung des Federballs**

Will man eine reale Wurfbewegung analysieren, so eignet sich die Bewegung eines Federballs besonders gut, denn hier wirkt neben einer verhältnismäßig kleinen Gewichtskraft noch eine relativ große Luftwiderstandskraft. Für das Verständnis der newtonschen Dynamik sind Versuchssituationen mit geschwindigkeitsabhängigen Reibungskräften sehr wichtig, da diese für die Fehlvorstellung verantwortlich sind, dass die Geschwindigkeit  $\vec{v}$  eines Körpers proportional zur wirkenden äußeren Kraft ist [10]. Da man die Bewegung des Federballs nicht direkt mit Sensoren erfassen kann, bietet sich der Umweg über die Aufnahme eines Videos an. Das Video muss anschließend digitalisiert werden, um es am Rechner auf verschiedene Weise nutzen zu können. Beim Federball gibt es folgende drei verschiedene Möglichkeiten:

1. Man kann das Video mit einem Videoanalyseprogramm analysieren und zusammen mit unterschiedlichen Darstellungen ablaufen lassen. Z.B. ist es sinnvoll, Geschwindigkeit oder Beschleunigung als Vektoren entsprechend den ermittelten Werten in das Video einzuzichnen.
2. Man kann auch ohne Videoanalyse ein Modell erstellen und dieses Modell mit dem Video vergleichen.
3. Schließlich ist auch beides gleichzeitig in einem Fenster vorstellbar. Diese drei Möglichkeiten sollen im Folgenden am Beispiel des Federballs dargestellt werden.

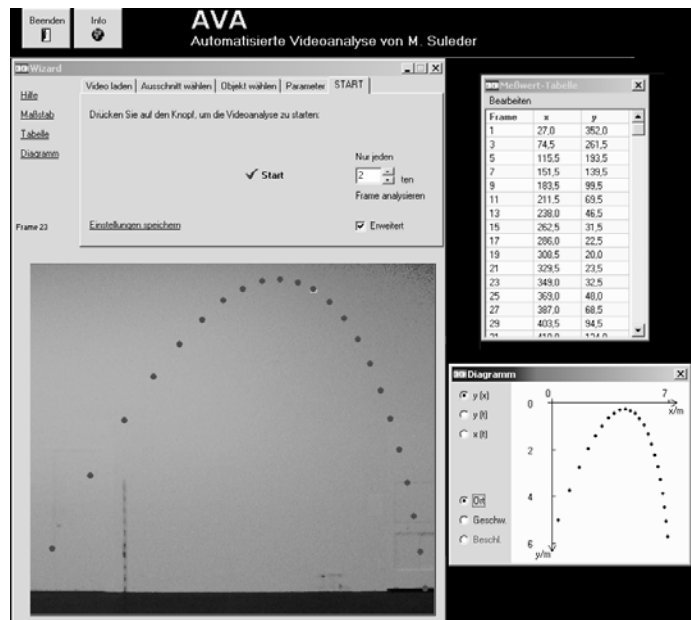
### **2.1 Automatische Videoanalyse und Darstellung mit dynamisch ikonischen Repräsentationen**

Um eine hohe Luftreibung zu haben, braucht man eine hohe Geschwindigkeit, so dass sich eine große Bahnkurve ergibt. Bei dem hierfür aufgenommenen Video wurde der Federball mit einem Geschwindigkeitsbetrag von fast 20 m/s unter einem Winkel von über  $60^\circ$  aufgeschlagen, so dass er 5,5 m hoch und 7,0 m weit flog. Schon mit bloßem Auge ist hierbei zu erkennen, dass sich die Bahnkurve deutlich von einer Parabel unterscheidet und der Federball schnell stark abgebremst wird. Dies kann man auch qualitativ vorführen. Bei solch hohen Anfangsgeschwindigkeiten ergeben sich also schon annähernd die Bahnkurven, die man im Mittelalter von Kanonenkugeln erwartete.

Wichtig für die spätere Analyse ist, dass ein Maßstab mit ins Bild gestellt wird und unabdingbar ist, dass die Videokamera auf einem stabilen Stativ steht. Um möglichst geringe perspektivische Verzerrungen zu haben, sollte man die Kamera in einer größeren Entfernung und wenn möglich in mittlerer Höhe der Bahnkurve positionieren, was hier in einem Hörsaal realisiert wurde. Eine Videokamera nimmt normalerweise in einer Sekunde nicht 25 ganze Frames auf, sondern jedes Bild wird in zwei Halbbilder aufgeteilt, die in Abständen von  $1/50$  s abwechselnd aufgenommen werden (Zeilensprungverfahren). Bei einer schnellen Bewegung wie beim Federball ergibt sich damit das Problem, dass sich das Objekt in diesen 0,02 s merklich weiterbewegt und somit bei den gerade Zeilen an einer anderen Stelle als bei den ungerade Zeilen ist (Kammefekt). Deshalb wurde der Progressiv Scan (auch Sportmodus genannt) gewählt, bei dem Vollbilder aufgenommen werden. Dafür sind aber leider von den 25 Frames

pro Sekunde immer zwei aufeinanderfolgende Frames identisch. Damit der Federball nicht unscharf wird, ist zusätzlich noch eine kurze Belichtungszeit zu wählen (hier: 1/300 s).

Das Softwareprogramm AVA [11] zur automatischen Videoanalyse verfolgt das bewegte Objekt nach einer einmaligen Markierung des Objektes, wobei es zu 100 Frames (= Bilder) nicht mehr als etwa 20 Sekunden braucht. Damit entfällt die Markierung des Objektes von Hand in jedem einzelnen Frame wie in herkömmlichen Videoanalyseprogrammen. Beim Videofilmen sollte der Hintergrund weitgehend unbewegt sein und ein hoher Helligkeits- und/oder Farbkontrast des Objekts gegenüber dem Hintergrund ist wünschenswert. Da der Federball im Vergleich zur ganzen Bahnkurve sehr klein ist, ist der Federball im Video nur noch 8 mal 8 Pixel groß, was die Untergrenze für eine automatische Analyse in AVA darstellt. Aufgrund des gewählten Progressiv Scans (Sportmodus) darf bei der Videoanalyse nur jeder zweite Frame für die Analyse benutzt werden. Nach erfolgter Analyse sind in ein Videobild Ortsmarkierung gestempelt und die Werte für Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung können in Tabellen oder Grafen ausgegeben werden. Durch Festlegung einer Strecke im Video und einer Einheit kann außerdem eine Maßeinheit definiert werden. Bei dem Federball wird an dem Analysebild mit gestempelten Orten bzw. am  $y(x)$ -Grafen schon deutlich, dass es sich nicht um eine Parabel handelt (s. Abb. 1); ein Ablauf des Videos mit den gestempelten Orten ist aber nicht möglich. Außerdem können die Messwerte in einer Textdatei (z.B. das Excel-übliche csv-Format) ausgegeben werden und somit in anderen Programmen wie Excel oder PAKMA wieder importiert werden.

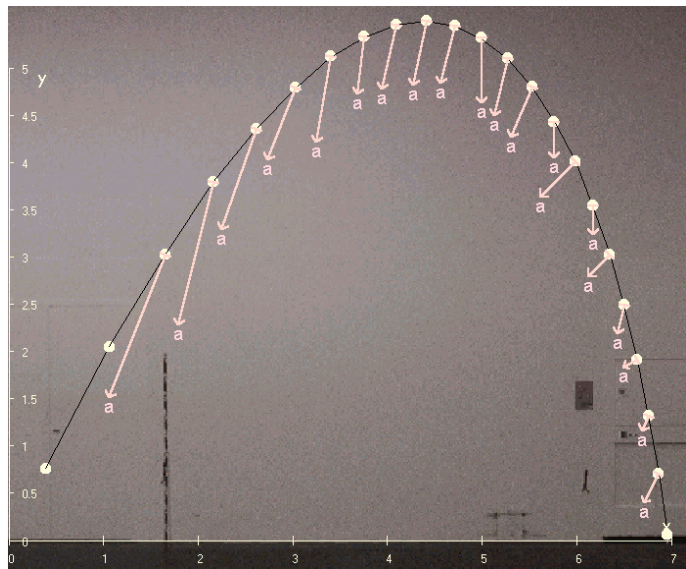


**Abb. 1: Analyse der Federballbewegung im Videoanalyseprogramm AVA**

In den meisten Videoanalyseprogrammen wird nach fertiger Analyse (sei sie per Hand oder automatisch durchgeführt) der fertige Graf eingeblendet. Hilfreicher für die Analyse und das Verständnis des Grafen wäre es, wenn gleichzeitig mit dem Ablauf des Videos ein Graf in Echtzeit schrittweise erzeugt wird (wie z.B. in dem Programm Coach 5). Dann ist es einfacher zu erkennen, welche Phase im Video welchem Grafenteilstück entspricht und somit ist die Kluft zwischen der konkreten visuellen Darstellung des Bewegungsablaufs und seiner abstrakten grafischen Darstellung für den Lernenden leichter zu überbrücken. Noch klarer können physikalische Sachverhalte werden, wenn man die Systemsoftware PAKMA 2002 (ab Version 5) einsetzt, um unterschiedliche Darstellungsmöglichkeiten zu nutzen, insbesondere dynamisch ikonische Repräsentationen, die sich entsprechend den physikalischen Größen verändern [12]. Dazu lässt man das Video in PAKMA ablaufen und importiert außerdem die

Messdaten (x- und y-Komponenten des Ortes zu entsprechenden Zeiten) aus der Textdatei, die von AVA erzeugt wurde. Geschwindigkeiten, Beschleunigung oder die Gesamtkraft können von PAKMA aus den Ortsdaten berechnet werden, wobei zu beachten ist, dass neue Daten alle  $2/25 \text{ s} = 0,08 \text{ s}$  ermittelt wurden. Im Hintergrund werden nacheinander die einzelnen Frames des Videos gezeigt und davor kann der Federball auf dem Video seine Bahnkurve, d.h. den x-y-Grafen, aufzeichnen und seinen Ort in festen Zeitabständen stempeln. Alle Grafen entstehen nun gleichzeitig mit dem Ablauf des Videos. Um Zusammenhänge noch deutlicher zu machen, kann man an den Federball des Videos einen Vektor für die Darstellung seiner augenblicklichen Geschwindigkeit oder für seine augenblickliche Beschleunigung anheften (s. Abb. 2), d.h. PAKMA zeichnet einen Vektor mit dem Anfangspunkt an den Ort, der aus der Videoanalyse ermittelt wurde.

Voraussetzung ist, dass der Graf richtig skaliert und an die richtige Stelle gesetzt wurde. Man könnte auch nur Teilaspekte wie z.B. die Geschwindigkeit in x-Richtung als Vektor betrachten und feststellen, dass diese abnimmt. Während Ort und Geschwindigkeit bei der Videoanalyse noch recht gut bestimmt werden, zeigen sich bei der Beschleunigung als zweite Ableitung des Ortes die Grenzen dieser Vorgehensweise und man sieht in Abbildung 2 insbesondere bei der Fallbewegung z.T. deutliche Streuungen.



**Abb. 2: Video des Federballschlags mit gestempelter Ortsmarke und gestempeltem Beschleunigungsvektor in PAKMA ( $v_0$  ca. 20 m/s)**

## 2.2 Vergleich von Modell und Video (ohne Videoanalyse)

Häufig möchte man im Unterricht aber nicht nur das Phänomen beschreiben und analysieren, sondern verstehen, wie es zu diesem Ablauf kam. Dazu ist eine Modellbildung sinnvoll. Auch ohne Videoanalyse kann man mit dem digitalen Video arbeiten, indem man versucht, die Bewegung so zu modellieren, dass sie mit dem Video übereinstimmt. D.h. man versucht das Modell bzw. die Startwerte so lange zu ändern, bis ein Objekt wie ein Kreis, der sich nach dem Modell bewegt, sich auf dem Bildschirm genauso bewegt wie der Federball des Videos. Messdaten aus dem Video sowie Grafen sind hierzu nicht notwendig. Das Video gibt hier den Bezug zur Realität und ist eine Motivation für das Erstellen und Verbessern des Modells. Damit der Federball noch groß genug zu sehen ist, eignen sich für diese Videoaufnahme der Federballbewegung eher kleinere Bahnkurven mit geringeren Anfangsgeschwindigkeiten. Hier wurde der Federball mit einem Geschwindigkeitsbetrag von ca. 7 m/s unter einem Winkel von ca.  $70^\circ$  aufgeschlagen, so dass er nicht ganz 2 m hoch und weit flog. Unbedingt sollte

auch wieder ein Maßstab mit ins Bild gestellt werden und eine kurze Belichtungszeit gewählt werden (hier: 1/1250 s)

Es ist sinnvoll, dass Modell nicht gleichungsorientiert etwa in Excel zu erstellen, sondern mit Hilfe eines grafischen Editors wie z.B. VisEdit [13] zu PAKMA, da hier qualitative Wirkungszusammenhänge deutlich werden [10]. Auch Schüler, die sich mit dem Lesen von Gleichungen schwer tun, sehen hier, welche Zusammenhänge angenommen werden (s. Abb. 3). Für jede Richtungskomponente gilt wie immer die Wirkungskette Kraft  $\rightarrow$  Beschleunigung  $\rightarrow$  Geschwindigkeit  $\rightarrow$  Ort. Der Betrag der gesamten Geschwindigkeit und der Winkel der Bewegungsrichtung werden aus den Geschwindigkeitskomponenten berechnet und werden für die Berechnung der Luftwiderstandskraft bzw. ihrer Komponenten benötigt. Fallbeschleunigung und Luftdichte sind bekannte bzw. nachschlagbare Konstanten und die Masse des Federballs ist messbar. Die exakte Querschnittsfläche ist wegen der Löchern im Federball nicht zu bestimmen, so dass man die Querschnittsfläche einschließlich Löcher nehmen wird. Die Koordinaten des Anfangsortes bzw. die Komponenten der Anfangsgeschwindigkeit sind aus dem Video abzuschätzen und gegebenenfalls nach einige Versuche zu korrigieren (oder aus einer Videoanalyse zu entnehmen). Beim  $c_w$ -Wert wird man sicher mit einem geschätzten Wert starten und diesen so lange korrigieren, dass Video und Modell bei einem hohen  $c_w$ -Wert von ca. 0,52 einigermaßen übereinstimmen. In Wirklichkeit ist die Fläche durch die Löcher des Federballs kleiner und der  $c_w$ -Wert höher. Man kann also nur das Produkt aus Querschnittsfläche und  $c_w$ -Wert sicher bestimmen.

Da man nun alle physikalisch relevanten Größen berechnet hat, kann man diese in PAKMA gleichzeitig mit dem Videoablauf anzeigen. Zusätzlich zu dem oben erwähnten Kreis, der sich dem Modell entsprechend bewegt, können an ihn dynamisch Pfeile gezeichnet werden, die Größe und Richtung der Gewichtskraft, der Luftreibungskraft und der Gesamtkraft bzw. der Beschleunigung visualisieren (siehe

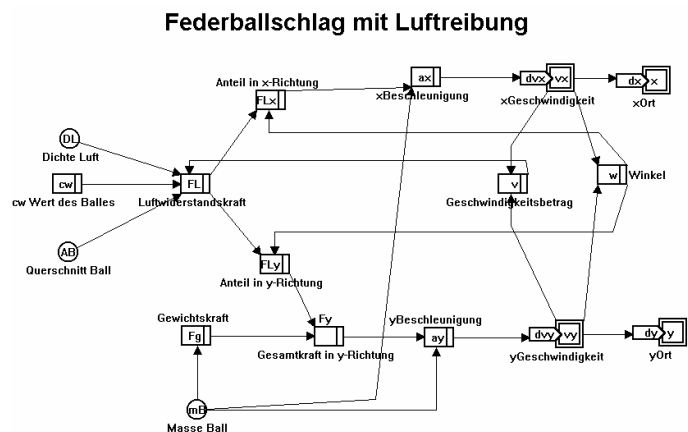


Abb. 3: Graphisches Wirkungsgefüge des Modells Federballbewegung mit Luftreibung in VisEdit

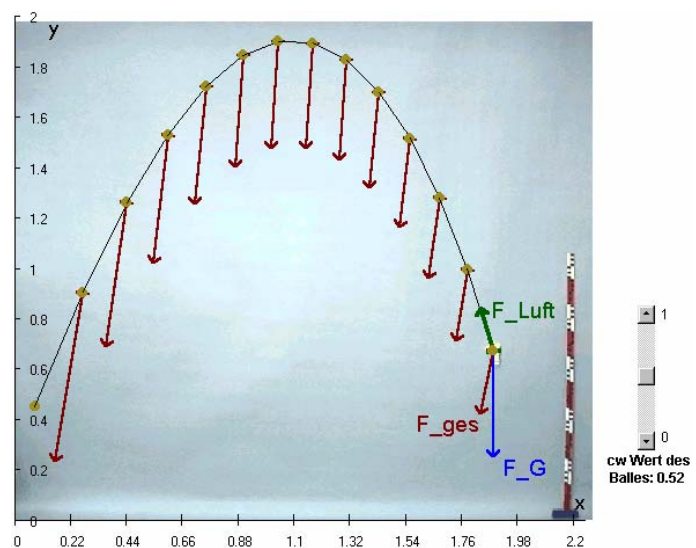


Abb. 4: Video mit Ablauf des Modells mit Pfeilen für die Kräfte und gestempelter Gesamtkraft  $F_{ges}$  ( $v_0$  ca. 7 m/s)

he Abb. 4). Man sieht hier, dass die Gesamtkraft stets schräg gerichtet ist. Das Anzeigen der Kräfte hilft, den Verlauf zu deuten.

Verhältnismäßig einfach kann man noch ein Modell für den Fall erstellen, dass bei gleichen Startwerten keine Luftreibung vorhanden ist (s. Abb. 5). Lässt man auch von dieser Bewegung noch die Ortskurve einzeichnen, wird erst deutlich, wie stark die beiden Ortskurven differieren (s. Abb. 6) und welcher hohen Einfluss die Luftreibung auch bei den noch kleinen Geschwindigkeiten schon hat.

Natürlich hätte man das Modell auch ohne Video erstellen können [13], aber erst ein Vergleich mit der Wirklichkeit macht es für den Schüler wirklich interessant. Dabei wird hier nicht ein Wert wie die gesamte Flugzeit (wie in [14]) verglichen, sondern ein permanenter Vergleich des Bewegungsablaufs ist möglich und zwar ohne Messdaten von dem Federball zu haben.

### 2.3 Vergleich von Modell und Videoanalyse

Wer sein Modell genauer überprüfen will, kann in PAKMA zusätzlich zur Darstellung des Ablaufs des in VisEdit erstellten Modells noch die Messdaten aus der Textdatei importieren, die das Videoanalyseprogramm AVA erstellt hat. In Abbildung 7 ist außer dem aus dem Modell berechneten Ortsgraf auch noch der aus der Videoanalyse ermittelte Ortsgraf eingezeichnet. Man sieht, dass diese nicht völlig übereinstimmen. Die Realität ist also noch komplexer als das ohnehin

### Federballschlag ohne Reibung

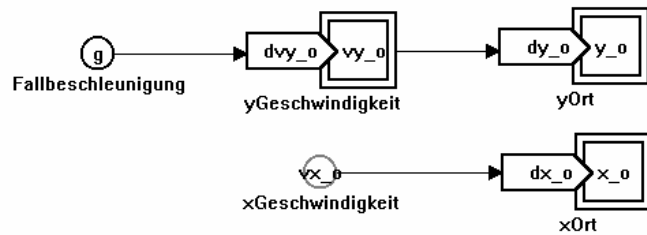


Abb. 5: Graphisches Wirkungsgefüge des Modells Federballbewegung ohne Luftreibung in VisEdit

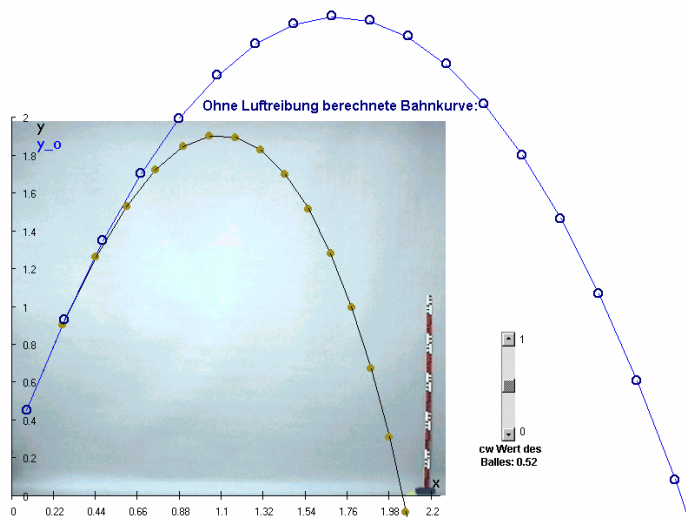


Abb. 6: Vergleich der modellierten Bahnkurven mit und ohne Luftreibung bei gleichen Startbedingungen

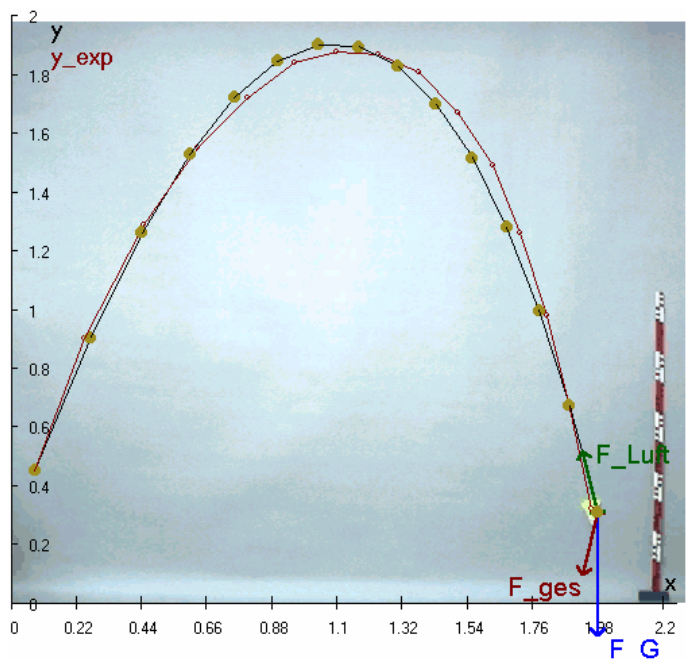


Abb. 7: Vergleich der Bahnkurve des Modells mit der Bahnkurve aus der Videoanalyse

schon anspruchsvolle Modell. Das Modell beachtet z.B. nicht, dass sich der Federball nicht immer so gedreht ist, dass er in Bewegungsrichtung weist. Dadurch variiert die Luftreibungskraft.

Nun könnte man auf die Idee kommen, statt der kleinen Bahnkurve mit geringerer Startgeschwindigkeit aus 2.2 die Bewegung mit großer Bahnkurve und größerer Startgeschwindigkeit aus 2.1 zu modellieren. Interessanterweise versagt hier das Modell. Eine genaue Analyse der Daten der Videoanalyse ergibt, dass selbst bei gleichem Geschwindigkeitsbetrag die Luftreibung bei der Fallbewegung kleiner ist als bei der Steigbewegung, wofür uns derzeit keine Erklärung vorliegt.

### **2.4 Ausblick**

Wenn man im Unterricht den Schwerpunkt auf die Modellbildung legen will, ist es eine Erleichterung, mit vorstrukturierten Situationen zu arbeiten. Dazu wird das jeweilige Video bereits digitalisiert (und evtl. analysiert) und in PAKMA eingebunden, ebenso werden Animationen Graphen und Vektoren als Darstellungsmöglichkeiten der physikalischen Größen vorgegeben. Im Unterricht ist dann mit den Schülern nur noch das Modell zu erstellen und anzupassen. Es ist geplant, solche Beispiele für Modellbildung, die auch Videos zur Prüfung von Modellen einsetzt, auf einer CD-ROM zu veröffentlichen.

## **3. Kräfte bei Kniebeuge und Sprüngen**

Im Physikunterricht werden bei der Behandlung der Newtonsche Mechanik zum einen quantitative Laborexperimente ohne engen Bezug zur Alltagswelt der Schüler eingesetzt (z.B. Luftkissenfahrbahn) und zum anderen bedient sich der Lehrer in qualitativen Freihandversuchen den Gegenständen der Alltagswelt. Mit einer Kraftmessplatte können nun aus dem Alltag vertikale Bewegungskomponenten gemessen und unmittelbar über  $F(t)$ -Graphen am Bildschirm analysiert werden und somit interessante und spannende Situationen untersucht werden, so dass sich den Schülern bei der Untersuchung von Bewegungen des Menschen ein alltägliches, aber keineswegs triviales Anwendungsgebiet der elementaren Dynamik eröffnet.

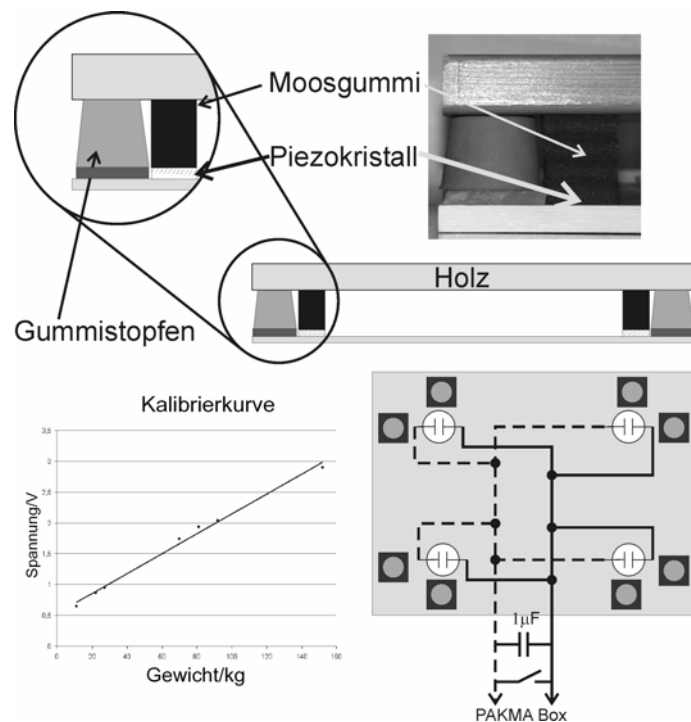
Im Physikunterricht werden häufig nur Spezialfälle behandelt. Auf einen Körper wirkt z.B. entweder von der Unterlage eine Kraft, die betragsgleich zur Gewichtskraft ist oder es wirkt auf ihn im freien fall nur die Gewichtskraft. Bei der Kraftmessplatte sind nicht nur die beiden Extrema, der ruhende Körper auf einer Unterlage bzw. der frei fallende Körper, messend zu erfassen, sondern auch der springende, hüpfende und sich verformende Körper. So können Lehrer und sogar die Schüler selbst zum „Versuchskaninchen“ werden.

Eine solche Kraftmessplatte, wie sie in Sportdiagnosezentren verwendet werden, ist jedoch mit ca. 8500 € [15] für Schulen unerschwinglich. Eine für schulische Ansprüche voll einsetzbare Kraftmessplatte wird neustens von einer Lehrmittelfirma für 199 \$ [16] angeboten oder

kann aufwendig und kostenintensiv (über 100 \$) gebastelt werden [17] oder lässt sich wie unten gezeigt sehr preisgünstig für einige Euro selbst herstellen.

### 3.1 Techn. Realisierung

Als Messsensor werden vier handelsübliche Piezoschallwandler (Preis ca. 10 ct/Stück bei Conrad Elektronik) verwendet, bei denen man aber testen sollte, ob sie bei gleicher Belastung gleiche Spannungen ausgeben. Die Piezokristalle haben eine Kapazität von ca. 30nF. Die Piezokristalle werden in richtiger Polung parallel mit einem zusätzlichen Folienkondensator von 1 $\mu$ F geschaltet und parallel dazu ein Schalter, um sie entladen zu können (s. Abb. 8). Damit wird mit dem sehr hochohmigen Messeingang der PAKMA-Box eine Zeitkonstante  $\tau \approx 200$  s erreicht, die sehr viel größer als die Messzeit ist. Da die Piezokristalle bei stärkerer Belastung recht hohe Spannungen liefern, was Probleme bei der hochohmigen Messwerterfassung gibt, und da man daher nur sehr schwierig Spannungsteiler oder ähnliches verwenden kann, wurde ein „mechanischer Nebenschluß“ verwendet. In Analogie zur Messbereichserweiterung in der Elektrizitätslehre wurden zu den Piezokristallen acht in der Chemie üblichen Gummistopfen (Höhe 35 mm, unterer Durchmesser 49 mm) „parallel geschaltet“, um einen großen Teil (99,6%) der Gesamtkraft aufzunehmen. Die Kraftübertragung auf die Piezokristalle erfolgt über Moosgummi, die über die Piezokristalle gelegt wurden. Da sowohl die Stauchung der Gummistopfen proportional zur wirkenden Kraft ist – sie beträgt bei 1600 N ca. 4 mm -, als auch für die insgesamt 40 mm dicke Moosgummischicht (4 Moosgummis à 10 mm) das hooksche Gesetz näherungsweise gilt, wirkt auch auf die Piezokristalle ein zur Belastung der Platte proportionaler Kraftanteil. Die aufgenommene Kalibrierkurve (s. Abb. 8) ergab, dass bei diesem Aufbau für die Spannung am Messeingang zwar kein direkt proportionaler, aber ein linearer Zusammenhang zur wirkenden Kraft im Bereich von 100 N bis 1600 N besteht (s. Abb. 8).



**Abb. 8: Aufbau der Kraftmessplatte**

Wird bei der Messwertaufnahme einer Bewegung mit einer Kraftmessplatte zusätzlich noch die Bewegung auf Video festgehalten, so ergibt sich eine bisher wenig genutzte multimediale Form der Kombination von Mess- und Videodaten (s. Abb. 9). In diesem Fall wird das Video nicht dazu genutzt Daten zu „produzieren“, sondern liefert einen Vergleichsrahmen für die gemessenen Daten. Die physikalisch interessanten Teile eines Bewegungsablaufs spielen sich

meistens in sehr kurzen Zeiträumen ab, so dass die gleichzeitige Betrachtung der Messdaten und der Bewegung der Person für Schüler nicht möglich ist. Die multimedial aufbereitete Ausgabe erlaubt, die Messdaten und das Video als Reproduktion in einem verlangsamteten Ablauf oder sogar als Einzelbilder dem Schüler zugänglich zu machen und die einzelnen Phasen der Bewegung genau zu betrachten. Die Möglichkeit, die

Messwerte mit dem Video in Verbindung zu bringen und damit dem Schüler die Zuordnung der gemessenen Kraft zur Bewegungssituation zu erlauben, leistet damit einen wichtigen Beitrag zum Verständnis eines Bewegungsablaufs aus physikalischer Sicht.

### 3.2 Die Kniebeuge

Wenn man ruhig auf der Kraftmessplatte steht, wirkt nur die Gewichtskraft  $F_G < 0$ , und nur diese wird registriert. Die Kraftmessplatte übt nach dem dritten newtonschen Gesetz eine zur Gewichtskraft gegengleiche Kraft ( $F_{\text{Boden}}$ ) auf die Person aus, wodurch die Summe der an der Person angreifenden Kräfte gleich null ist ( $F_G + F_{\text{Boden}} = F_G + (-F_G) = 0$ ) und die Person, die ruhig auf der Platte steht, auch in Ruhe bleibt (erstes newtonsches Gesetz) (s. Abb. 10).

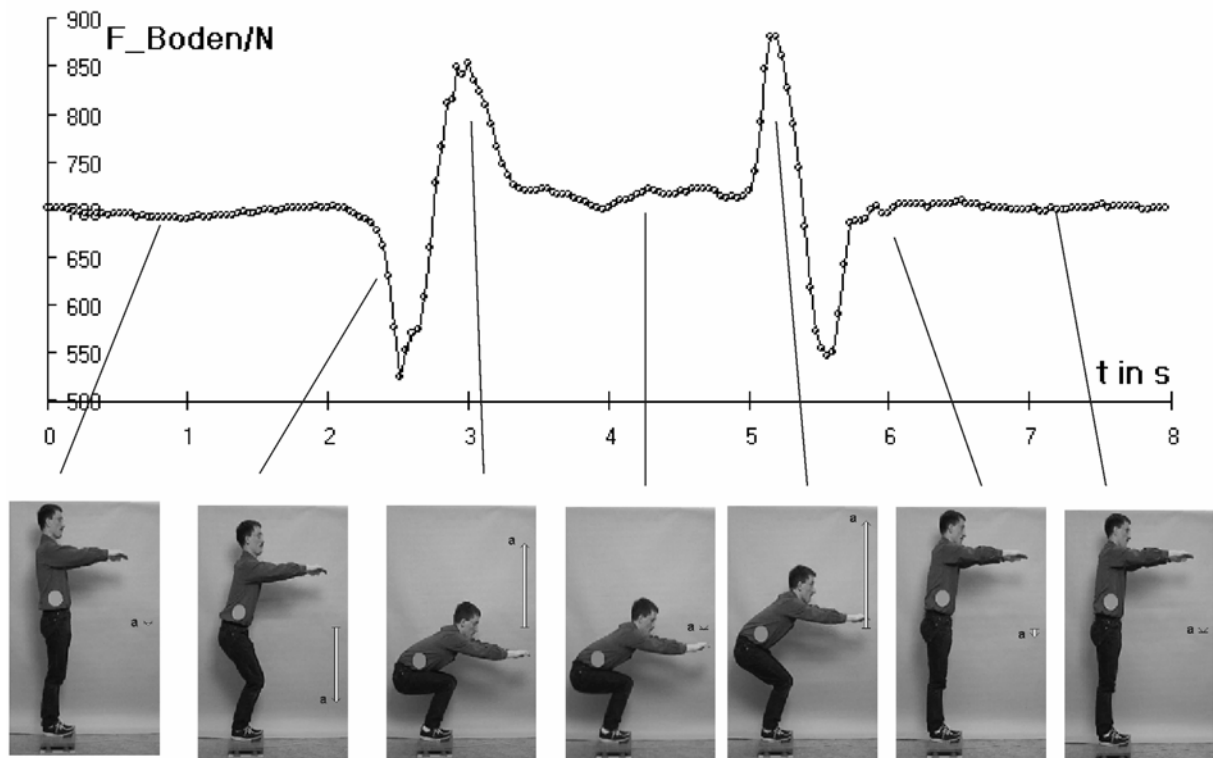


Abb. 10: Kraft-Zeit-Diagramm der Kniebeuge mit einzelne Frames des Videos, die den Bewegungsphasen zugeordnet sind

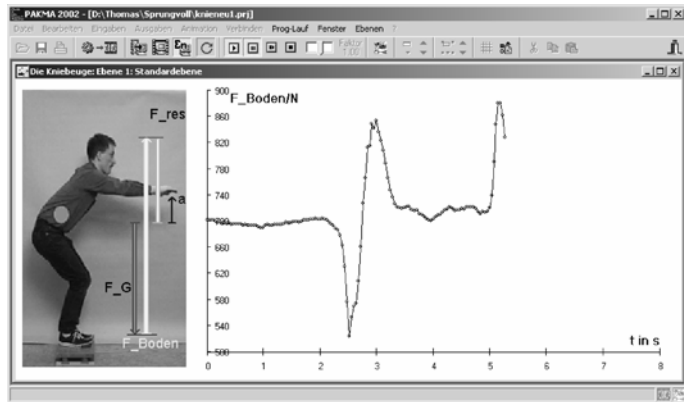


Abb. 9: Screenshot der Bildschirmausgabe in PAKMA mit Video, gemessenem  $F_{\text{Boden}}(t)$ -Graphen und daraus berechneten Vektoren

Geht man nun in die Knie, so bewegt sich der Körperschwerpunkt nach unten. Da dieser zu Beginn der Bewegung in Ruhe war, und sich jetzt nach unten bewegt, muss er auch nach unten beschleunigt werden. Folglich ist die Gesamtkraft auf die Person kleiner Null, also nach unten gerichtet (zweites newtonsches Gesetz). Da die Gewichtskraft  $F_G$  der Person sich nicht ändert, muss die Gegenkraft von der Platte auf die Person kleiner sein als in dem Moment, in dem sich der Körperschwerpunkt in Ruhe befindet.

Wenn man nun die Bewegung nach unten abfangen will, muss der Körperschwerpunkt nach oben, gegen die Bewegungsrichtung, beschleunigt werden. Somit ist die Gesamtkraft auf die Person wieder ungleich Null, diesmal aber größer Null und nach oben gerichtet. Man stößt sich vom Boden ab, wodurch die von der Kraftmessplatte gemessene Kraft, und damit auch die Kraft, die von der Platte auf die Person wirkt, größer als die Gewichtskraft der Person ist. Damit ist die gemessene Kraft solange größer als die Gewichtskraft bis der Körperschwerpunkt wieder in Ruhe ist.

Wenn man sich in der gehockten Position befindet, wirkt wieder nur die Gewichtskraft, und ihre gegengleiche Kraft, wodurch man in der gehockten Position bleibt.

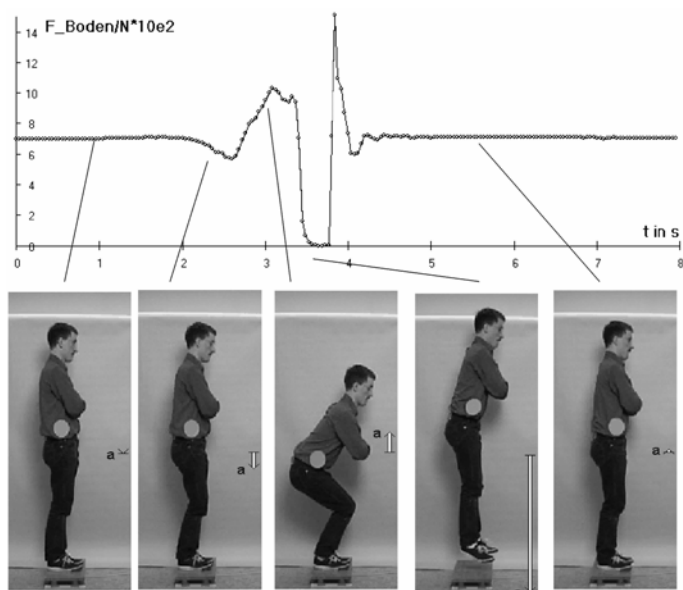
Will man nun wieder in die Ausgangsposition (aufrecht stehend) zurückkehren, so muss man den Bewegungsablauf genau umkehren. Zuerst muss der Körperschwerpunkt nach oben beschleunigt werden, wozu man sich abstößt, und die gemessene Kraft ist größer als die Gewichtskraft  $F > F_G$ .

Dann wird die Bewegung nach oben wieder abgebremst, weshalb die gemessene Kraft kleiner als die Gewichtskraft ist. Danach steht man wieder ruhig auf der Platte und nur noch die Gewichtskraft wird registriert.

### 3.3 Der Sprung aus dem Stand

Die Anfangsphase eines Sprunges aus dem Stand, bei dem man zum Schwungholen in die Knie geht, ist mit der Anfangsphase der Kniebeuge fast identisch. Wieder bewegt sich der Körperschwerpunkt zu Beginn des Sprunges nach unten. Wieder muss der Körperschwerpunkt nach unten beschleunigt werden. Folglich ist die Gesamtkraft auf die Person kleiner Null, also nach unten gerichtet (zweites newtonsches Gesetz) (s. Abb. 11).

Jetzt aber verändert sich der Bewegungsablauf im Vergleich zur Kniebeuge. Die Bewegung nach unten



**Abb. 11: Kraft-Zeit-Diagramm des Sprunges aus dem Stand mit einzelne Frames des Videos, die den Bewegungsphasen zugeordnet sind**

wird wieder abgefangen, der Körperschwerpunkt nach oben gegen die Bewegungsrichtung beschleunigt. Aber diese Beschleunigung endet nicht, wenn der Körperschwerpunkt in Ruhe ist, sondern wird aufrechterhalten, um dem Körper eine Bewegung nach oben zu ermöglichen.

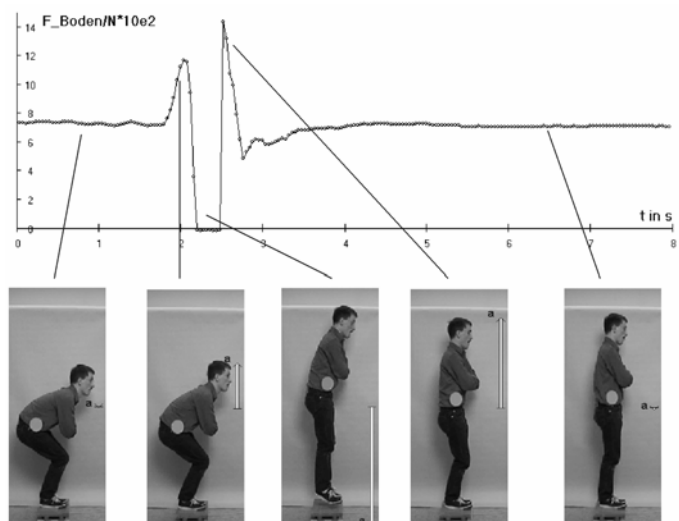
Die Beschleunigung ist deutlich größer als die, welche benötigt wird, die Bewegung nach unten zu stoppen und man sieht, dass der Körperschwerpunkt bald eine Geschwindigkeit hat, die der Gewichtskraft von der Richtung her entgegengesetzt ist.

Jetzt hebt man ab, wodurch man die Verbindung zur Kraftmessplatte aufhebt. Diese übt dann keine Kraft mehr auf die Person aus und es wird während der Flugphase keine Kraft mehr registriert.

Die Landephase auf der Messplatte kann man sich wie eine Kniebeuge mit Anfangsgeschwindigkeit nach unten vorstellen. Man muss den Körperschwerpunkt, der sich nach unten bewegt, abfangen. Dazu wird dieser nach oben gegen die Bewegungsrichtung beschleunigt. Somit ist die Gesamtkraft auf die Person wieder größer Null und damit nach oben gerichtet. Man drückt sich stark vom Boden ab, wodurch die von der Kraftmessplatte gemessene Kraft, und damit auch die Kraft, die von der Platte auf die Person wirkt, sehr viel größer als die Gewichtskraft der Person ist. Ist der Körperschwerpunkt abgefangen, so ist man wieder in der aufrecht stehenden Ausgangsposition.

### **3.4 Der Sprung aus der Hocke**

Die Landephase eines Sprunges aus dem Stand unterscheidet sich nicht von der Landephase eines Sprunges aus einer gehockten Position. Jedoch ist der Absprung deutlich unterschiedlich. Nachdem man sich zu Beginn der Bewegung schon in der gehockten Position ist, kann man die Kniebeuge zum Schwungholen nur noch erahnen, oder diese fällt völlig weg. Der Körperschwerpunkt wird nur nach oben beschleunigt, so lange bis man abhebt (s. Abb. 12).



**Abb. 12: Kraft-Zeit-Diagramm des Sprungs aus der Hocke mit einzelne Frames des Videos, die den Bewegungsphasen zugeordnet sind.**

### **3.5 Weitere vergleichende Analyse der Sprünge**

Die Analyse der beiden vorgestellten Absprungvarianten wurde bereits früher in einem Lehrbuch [18] offensichtlich unter Einsatz einer Spezialkraftmessplatte beschrieben. Hier ergibt sich nicht nur eine Low-Cost-Lösung für diesen Versuch, sondern zusätzlich können auch die Geschwindigkeit über Integration der Beschleunigungskurve ermittelt werden. Dazu können die Werte der Sensormessung in die Beschleunigungswerte umgerechnet und numerisch aufaddiert werden. Würde man bei den Bewegungen in Abb. 11 und 12 mit maximal mögli-

cher Kraft springen, ergäbe sich bei dem Sprung aus dem Stand eine höhere Absprunggeschwindigkeit als beim Sprung aus der Hocke, man kann also so höher springen.

### **3.6 Ausblick**

Mit dieser Messanordnung können noch weitere interessante physikalische Aspekte näher zu untersucht werden. So können verschiedene Arten des Absprungs, aber auch der Landung detailliert betrachtet werden. Man kann „steif wie ein Brett“ landen oder den Schwung weich in den Knien und Füßen abfangen. Genauso können aber auch die Abrollverhalten der Füße verschiedener Personen beim Laufen verglichen werden.

## **4. Zusammenfassung**

Die Beispiele zeigen, dass es sehr interessant sein kann, Bewegungen aus dem Sport unter physikalischen Gesichtspunkten zu betrachten. Bei der Beschreibung bzw. Analyse der Bewegung mit dem Rechner sind Videos für das Verständnis hilfreich. Für eine Vorhersage bzw. Berechnung der Bewegung und damit ein tieferes Durchdenken und Strukturieren der Abläufe ist eine Modellbildung sinnvoll, bei der Videos den wünschenswerten Realitätsbezug herstellen und auch zu quantitativen Vergleichsaussagen herausfordern.

Welches Vorgehen man im Einzelnen wählt, hängt von der Zielsetzung ab. Will man ein Grundphänomen zeigen und Gesetzmäßigkeiten erarbeiten, eignet sich eine Sensormessung in Kombination mit einem Video (siehe 3.). Dabei wird es sich häufig anbieten, den Ort des gefilmten und sich eindimensional bewegenden Körpers über einen Sensor zu messen, woraus Geschwindigkeit und Beschleunigung berechnet werden. Vor allem bei zweidimensionalen Bewegungen kann die Messung mit Hilfe eines Sensors durch eine Videoanalyse ersetzt werden (siehe 2.1). Will man erkannte Zusammenhänge anwenden und üben, ist die Erstellung von Modellen sehr zu empfehlen [10]. In dem Spezialfall, dass das Modell genauer geprüft werden soll, ist ein Vergleich der Daten der Videoanalyse bzw. der Daten der Sensormessung und der Daten des Modells angezeigt (siehe 2.3). Einfach und elegant ist es heute dagegen, die Modellbildung direkt mit einem Video zu vergleichen, das im Hintergrund abläuft (siehe 2.2).

### **Bemerkung:**

Es ist geplant, eine CD-ROM zur Modellbildung im Schroedel-Verlag zu veröffentlichen. Sie soll die erwähnte Software enthalten sowie Beispiele für Modellbildung, bei denen Videos, Vektoren und weiteren Darstellungsformen der physikalischen Größen eingesetzt werden.

### **Anschrift der Verfasser:**

StR Thomas Wilhelm, Thomas Gessner, Dipl.-Phys. Michael Suleder, Prof. Dr. Dieter Heuer, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg

**Literatur:**

- [1] *H. J. Schlichting*: Die physikalische Dimension des Sports – In: *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik 3*, Nr. 12, 1992, S. 4 - 6
- [2] *H. J. Schlichting*: Einfache Themen zur Physik des Sports – In: *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik 3*, Nr. 12, 1992, S. 7 - 17
- [3] *C. Pagel*: Was hat Kugelstoßen mit Physik zu tun? Versuch einer fächerübergreifenden Betrachtung – In: *Praxis der Naturwissenschaften-Physik 45*, Nr. 4, 1996, S. 26 – 30
- [4] *P. Labudde*: Ein gelungener Wurf: Zur Physik des Skispringens – In: *Praxis der Naturwissenschaften-Physik 35*, Nr. 5, 1986, S. 25 – 29
- [5] *P. Kraemer, R. Winter, H. Mikelskis*: Der Computer – ein multimediales Werkzeug zum Lernen von Physik. Das Projekt „Galileo“ – Videoanalyse von Bewegungsvorgängen (2) – In: *Physik in der Schule 35*, Nr. 7/8, 1997, S. 274 – 277
- [6] *S. Seifert, H. Mikelskis, R. Winter*: Der Computer – ein multimediales Werkzeug zum Lernen von Physik. Videoanalyse von Wurf- und Kreisbewegungen im Alltag mit CUPLE, VIDEOPOINT und EXCEL (3) – In: *Physik in der Schule 35*, Nr. 9, 1997, S. 306 - 311
- [7] *S. Seifert, H. Mikelskis, R. Winter*: Der Computer – ein multimediales Werkzeug zum Lernen von Physik. Videoanalyse von Schlag- und Stoßvorgängen im Sport mit VIDEOPOINT und DAVID (4) – In: *Physik in der Schule 35*, Nr. 10, 1997, S. 352 - 356
- [8] *C. Dzierstek, H. Hilscher*: Physik im Alltag: Bewegungsabläufe auf Video festgehalten und per Computer analysiert. Videoanalyse-Programm DIVA und 61 ausgewertete Videoclips für den Kinematik-Unterricht auf CD-ROM – In: *Physik in der Schule 36*, Nr. 1, 1998, S. 25 - 30
- [9] *V. Nordmeier*: Videoanalyse von Bewegungen mit dem Computer – In: *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik 13*, Nr. 69, 2002, S. 27 - 30
- [10] *T. Wilhelm, D. Heuer*: 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
- [11] *M. Suleder, D. Heuer*: Automatische Videoanalyse – In: Nordmeier, V. (Red.): CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 2002, ISBN 3-936427-11-9
- [12] *D. Heuer*: Dynamische Physik-Repräsentationen – Verständnishilfe für Physikalische Experimente - In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik 45*, 1996, Nr. 4, S. 12 - 18
- [13] *W. Reusch, O. Gößwein, D. Heuer*: Graphisch unterstütztes Modellieren und Messen – VisEdit und PAK-MA - In: *Praxis der Naturwissenschaften Physik 49*, 2000, Nr. 6, S. 32 – 36
- [14] *T. Wilhelm.*: Der alte Fallkegel - modern behandelt - In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik 49*, 2000, Nr. 7, S. 28 – 31
- [15][http://www.kistler.com/web/kistler\\_portal.nsf/urnames/pdf\\_loader\\_en?OpenDocument&PDF=article.nsf/KIWEBArticlesByNumber/000-160/\\$File/DB06.9290d-12.99.pdf](http://www.kistler.com/web/kistler_portal.nsf/urnames/pdf_loader_en?OpenDocument&PDF=article.nsf/KIWEBArticlesByNumber/000-160/$File/DB06.9290d-12.99.pdf)
- [16] <http://www.vernier.com/probes/fp.html>
- [17] *R. Cross*: Standing, walking, running, and jumping on a force plate, *American Journal of Physics*, April 1999, Volume 67, Issue 4, S. 304-309
- [18] *F. Bader, F. Dorn (Hrsg.)*: *Dorn•Bader Physik 11 Ausgabe A Gymnasium Sek. II*, Schroedel Verlag, Hannover, 1998, S. 87