

## Neue Möglichkeiten durch Kombination von Videoanalyse und Modellbildung

Michael Suleder, Thomas Wilhelm, Dieter Heuer  
Lehrstuhl für Didaktik der Physik,  
Physikalisches Institut der Universität Würzburg

### Kurzfassung

Bei der Videoanalyse am PC, die ein elegantes Verfahren zur Messwertaufnahme von Bewegungsvorgängen ist, werden die Daten bisher nur als Graphen ausgegeben. So wird allerdings die Chance nicht genutzt, physikalische Aussagen dadurch leichter erschließbar zu machen, dass dynamisch ikonische Repräsentationen wie Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsvektoren entsprechend den ermittelten Werten bei der Wiedergabe des Videos miteingeblendet werden.

Außerdem kann durch den Vergleich der Daten der Messung mittels Videoanalyse und einer Modellbildung eine Verbindung zwischen realem Vorgang und der zugrunde liegenden physikalischen Struktur hergestellt werden. Eine einfache, neue Möglichkeit ist, ein vom Modell gesteuertes Animationsobjekt gleichzeitig über dem ablaufenden Video einzublenden, wodurch die Übereinstimmung leicht zu überprüfen ist. Eine zusätzliche Möglichkeit ist, dynamisch ikonische Repräsentationen mit den Daten sowohl aus der Videoanalyse als auch aus der Modellbildung gleichzeitig mit in das Video einzublenden oder im gleichen Fenster die zugehörigen Graphen direkt zu vergleichen.

### 1. Neue Möglichkeiten des Videoeinsatzes

Bisher wurde die Videoanalyse genutzt, um aus einem Video Messwerte zu einem realen Ablauf in Form von Graphen zu erhalten. Bei der Modellbildung wurde dagegen bisher kaum ein Vergleich mit Realversuchen durchgeführt. Neue didaktische Möglichkeiten ergeben sich durch Kombination verschiedener bekannter Einsatzmöglichkeiten des Computers. Der hier dargestellte Einsatz von Videos bezieht sich naturgemäß aber nur auf sichtbare Vorgänge aus der klassischen Mechanik.

Im Einzelnen wollen wir folgende drei Möglichkeiten vorstellen:

1. Video mit dynamisch ikonischen Repräsentationen relevanter physikalischer Größen: Bei der Videoanalyse am PC werden die Daten bisher nur als Graphen ausgegeben. So wird allerdings die Chance nicht genutzt, physikalische Aussagen dadurch unmittelbarer erschließbar zu machen, dass dynamisch ikonische Repräsentationen wie Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsvektoren entsprechend den ermittelten Werten bei der Wiedergabe des Videos miteingeblendet werden.
2. Vergleich Video – Modell: Hat man einen physikalischen Vorgang modelliert, so stellt sich häufig die Frage, inwieweit das Modell der Wirklichkeit entspricht. Für den Vergleich kann das Modell mit einem Video verglichen - auch ohne Videoanalyse Dazu wird ein vom Modell

gesteuertes Animationsobjekt über dem ablaufenden Video eingeblendet, wodurch die Ort-Zeit-Übereinstimmung leicht zu überprüfen ist.

3. Vergleich der Daten aus Videoanalyse und Modellbildung: Für einen detaillierten Vergleich ist schließlich auch beides, Videoanalyse und Modellbildung, gleichzeitig in einem Fenster möglich. Dazu kann man dynamisch ikonische Repräsentationen mit den Daten sowohl aus der Videoanalyse als auch aus der Modellbildung gleichzeitig mit in das Video einblenden oder im gleichen Fenster die zugehörigen Graphen direkt vergleichen.

Eine Modellbildung und der Vergleich mit den Daten der Videoanalyse sind im Windows-Programm PAKMA/VisEdit, im JAVA-Programm JPAKMA und im Windows-Programm Coach 5 möglich. Während in Coach 5 auch die Videoanalyse selbst möglich ist, so dass die Daten nicht importiert werden müssen, ist in PAKMA und JPAKMA der Einsatz dynamisch ikonischer Repräsentationen wie Vektorpfeile möglich.

Welches der drei Vorgehensweisen man im Einzelnen wählt, hängt von der Zielsetzung ab. Will man ein Grundphänomen zeigen und Gesetzmäßigkeiten erarbeiten, eignet sich eine Messung mit Hilfe der Videoanalyse (vor allem bei zweidimensionalen Bewegungen). Will man erkannte Zusammenhänge anwenden und Strukturen verdeutlichen, ist die Erstellung von Modellen sehr verständnisfördernd [1,

S. 3+4]. Einfach und elegant ist es, die Modellbildung direkt mit einem Video zu vergleichen, das im Hintergrund abläuft. In dem Spezialfall, dass das Modell genauer geprüft werden soll, ist ein Vergleich der Daten der Videoanalyse und der Daten des Modells angezeigt.

## 2. Die Bewegung des Federballs als Beispiel

Als erstes Beispiel dient die Bewegung eines Federballs, bei dem die drei verschiedenen Möglichkeiten, ein Video zu nutzen, mit dem Windows-Programm PAKMA dargestellt werden.

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

Für das Video des Federballfluges wurde ein Federball schnell mit fast 20 m/s mit einem Winkel von über  $60^\circ$  aufgeschlagen, so dass er hoch und weit flog. Mit dem Softwareprogramm AVA [2] zur automatischen Videoanalyse wurde die Bewegung automatisch analysiert [3], wobei der sehr kleine Federball mit 8 mal 8 Pixel in etwa die Grenze darstellt, bei der die automatische Analyse noch möglich ist.

Um unterschiedliche Darstellungsmöglichkeiten zu nutzen, insbesondere dynamisch ikonische Repräsentationen, die sich entsprechend den physikalischen Größen verändern [4], wurde dann die Software PAKMA 2002 eingesetzt. In PAKMA lässt man das Video ablaufen und importiert außerdem die Messdaten (x- und y-Komponenten des Ortes zu entsprechenden Zeiten) aus der Textdatei, die vom Videoanalyseprogramm erzeugt wurde. Die Vektoren für Geschwindigkeiten, Beschleunigung oder die Gesamtkraft können dann von PAKMA aus den Ortsdaten berechnet werden.

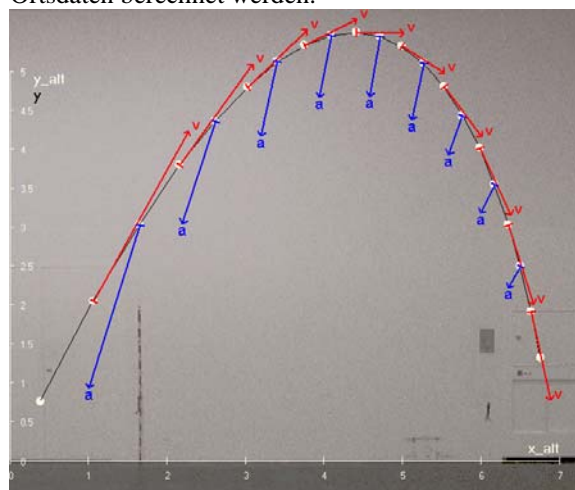


Abb. 1: Video der Federballbewegung in PAKMA mit gestempelten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren

Beim Ablauf des Projektes werden im Hintergrund 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. An

den Federball des Videos kann man einen Vektor für die Darstellung seiner augenblicklichen Geschwindigkeit und/oder für seine augenblickliche Beschleunigung anheften (s. Abb. 1). Evtl. gewünschte Grafen entstehen außerdem gleichzeitig mit dem Ablauf des Videos. Der didaktische Vorteil des Vorgehens besteht darin, dass vektorielle Größen im Video deutlich werden.

Mit Hilfe der Videoanalyse und der Darstellung mit Vektorpfeilen ist es nun sogar ein anderer Einstieg in die Kinematik möglich. Man kann die kinematischen Begriffe anhand einer allgemeinen zweidimensionalen Bewegung einführen und erst danach auf eindimensionale Bewegungen spezialisieren [5]. Fehlvorstellungen zu den kinematischen Begriffen werden nämlich dadurch, dass im herkömmlichen Unterricht vor allem eindimensionale Bewegungen betrachtet werden, nicht aufgearbeitet bzw. sogar erst erzeugt. Bei den kinematischen Begriffen Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung handelt es sich nämlich um vektorielle Größen, deren Vektorcharakter bei der Reduktion auf ein Vorzeichen nicht deutlich wird. Mit diesem veränderten Vorgehen rückt ein qualitatives Verständnis in den Vordergrund.

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

Will man nicht nur das Phänomen beschreiben und analysieren, sondern verstehen, wie es zu diesem Ablauf kam, ist eine Modellbildung sinnvoll, da auf diese Weise qualitative Zusammenhänge bewusster werden. Auch ohne Videoanalyse kann man mit dem digitalen Video arbeiten, indem man versucht, die Bewegung so zu modellieren, dass sie mit dem Video übereinstimmt. Dazu hilft ein animiertes Objekt wie ein Kreis, der sich nach dem Modell bewegt. Man versucht nun, das Modell bzw. die Startwerte so lange zu ändern, bis sich dieses Objekt auf dem Bildschirm genauso bewegt wie der Federball des Videos. Damit der Federball noch genügend groß zu sehen ist, eignen sich für diese Videoaufnahme der Federballbewegung eher kleinere Bahnkurven mit geringeren Anfangsgeschwindigkeiten (hier ca. 7 m/s) [3].

Beim Erstellen mit Hilfe eines grafischen Editors wie z.B. VisEdit [6] zu PAKMA werden qualitative Wirkungszusammenhänge deutlich [7] (s. Abb. 2). 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. Beim cw-Wert wird man sicher mit einem geschätzten Wert starten und diesen so lange korrigieren, dass Video und Modell bei einem hohen cw-Wert von ca. 0,52 einigermaßen übereinstimmen. In Wirklichkeit ist die Fläche durch die Löcher des Feder-

balls kleiner und der cw-Wert höher. Man kann also nur das Produkt aus Querschnittsfläche und cw-Wert sicher bestimmen.

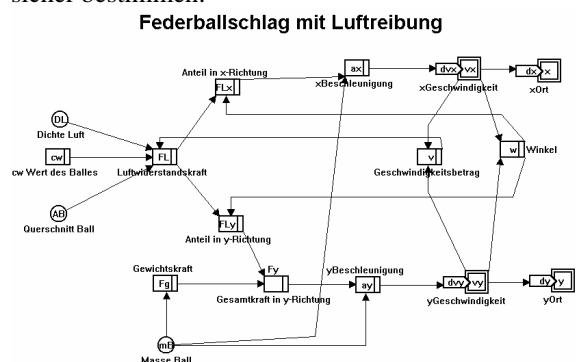


Abb. 2: Graphisches Wirkungsgefüge des Modells Federballbewegung in VisEdit

Da man nun alle physikalisch relevanten Größen (im Gegensatz zu Abb. 1) aus dem Modell berechnet hat, kann man in PAKMA diese auch gleichzeitig mit dem Videoablauf anzeigen. Zusätzlich zu dem oben erwähnten Kreis, der die Modellrechnung repräsentiert, können an ihn dynamisch Pfeile gezeichnet werden, die die Größe und Richtung der Gewichtskraft, der Luftreibungskraft und der Gesamtkraft bzw. der Beschleunigung visualisieren (s. Abb. 3). Man sieht hier, dass die Gesamtkraft stets schräg gerichtet ist. Das Mitdarstellen der Kräfte hilft, den Verlauf qualitativ zu deuten.

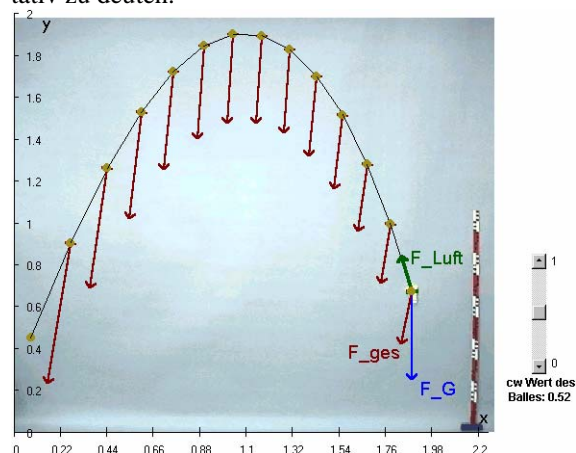


Abb. 3: Video mit Ablauf des Modells mit Vektorpfeilen für die Kräfte

Verhältnismäßig einfach kann man noch ein Modell für den Fall erstellen, dass bei gleichen Startwerten keine Luftreibung vorhanden ist (s. Abb. 4). Natürlich hätte man das Modell auch ohne Video erstellen können, 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 [8]) verglichen, sondern ein permanenter Vergleich des Bewegungsablaufs ist möglich und zwar ohne Messdaten von dem Federball zu haben, allein durch die Nutzung des Videos.

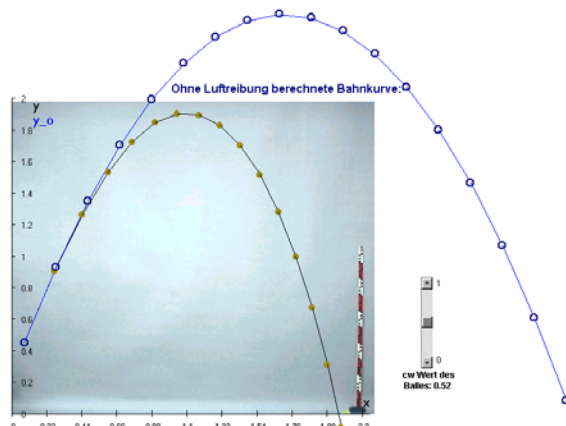


Abb. 4: Vergleich der modellierten Bahnkurven mit und ohne Luftreibung

### 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 ein Videoanalyseprogramm erstellt hat. In Abbildung 5 ist außer dem aus dem Modell berechneten Ortsgraphen auch noch der aus der Videoanalyse ermittelte Ortsgraph eingezeichnet. Während beim Ablauf nach 2.2 (s. Abb. 3) nur zu jeweils einem Zeitpunkt ein grober Vergleich möglich ist, kann nun ein genauer Vergleich des ganzen Ablaufs diskutiert werden. Man sieht, dass Modell und Realität nicht völlig übereinstimmen. Die Realität ist also noch komplexer als das ohnehin schon anspruchsvolle Modell. Möglicherweise wird die Größe der Luftreibungskraft im Modell noch nicht angemessen berücksichtigt. Das könnte vielleicht daran liegen, dass das Modell z.B. nicht beachtet, dass sich der Federball bei hohen Geschwindigkeiten zusammenpresst, wodurch die Luftreibungskraft variiert.

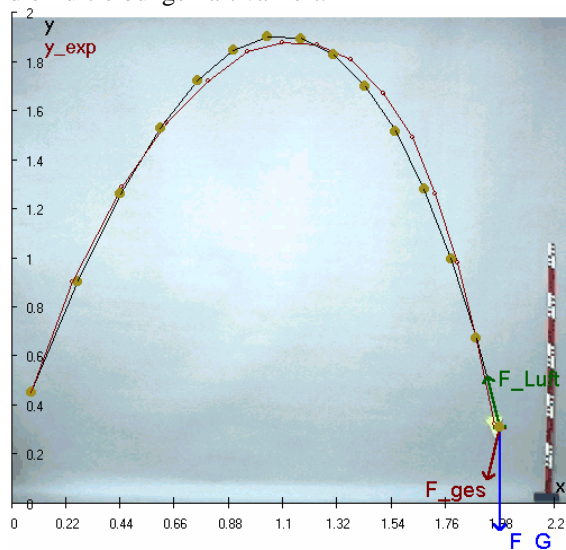


Abb. 5: Vergleich der Bahnkurve des Modells mit der Bahnkurve aus der Videoanalyse

### 3. Das zweidimensionale Federpendel mit JPAKMA

#### 3.1 Rahmenbedingungen

Das hier beschriebene Projekt wurde mit Diplomphysikstudenten im ersten Semester behandelt. Der sogenannte „Zusatzkurs“ diente dazu, für die Studenten mit Studienbeginn im Sommersemester fehlende Kenntnisse aus der Mechanikvorlesung des Wintersemesters aufzuarbeiten. Nach einer Einführung in die Modellbildung mit JPAKMA [9] anhand verschiedener eindimensionaler Bewegungen, insbesondere auch der Federschwingung, sollte nun eine komplexere, zweidimensionale Bewegung analysiert werden. Die Bewegungsdifferentialgleichung sollte diskutiert und der Vorteil des numerischen Lösungsverfahrens mittels Modellbildung gegenüber dem sehr viel aufwändigeren bzw. für Erstsemesterstudenten nicht lösaren analytischen Weg aufgezeigt werden.

#### 3.2 Versuchsaufbau

Ein gewöhnliches Federpendel wird nicht senkrecht, sondern schräg ausgelenkt und losgelassen, so dass es eine Bewegung in zwei Dimensionen vollführt. Die Bahnkurve des Pendelkörpers ähnelt dann einer Lissajouskurve.

#### 3.3 Vorgehensweise

##### Experiment:

Den Studenten wurde der recht einfach zu handhabende Versuchsaufbau im Seminarraum vorgeführt. Anhand des Realexperiments wurde um eine Beschreibung der Bahnkurve gebeten. Keiner der Studenten konnte eine differenziertere Analyse geben, als dass es sich um eine „recht komplizierte“ Bahnkurve handle.

##### Videoanalyse:

Im nächsten Schritt wurde der Bewegungsvorgang mittels einer Videoaufnahme und eines Videoanalyseprogramms stroboskopartig aufgezeichnet und in Graphen qualitativ analysiert. Nun fiel bei den Studenten auch der Begriff der Lissajousfigur (Abb. 6). Die Videoanalyse ist ein probates Mittel zur berührungslosen Erfassung der Pendelbewegung. Die Messwertaufnahme in zwei Dimensionen mit mechanischen Sensoren (z.B. Laufräder) wäre dagegen mit erheblichem Aufwand verbunden. Darüber hinaus bietet eine automatische Videoanalyse hier den Vorteil einer gleichbleibenden Genauigkeit und einer schnelleren Verfügbarkeit der Messwerte als beim Anklicken jedes einzelnen Bildes von Hand (manuelle Analyse) [2]. Das verwendete Video besteht aus ca. 600 Einzelbildern.

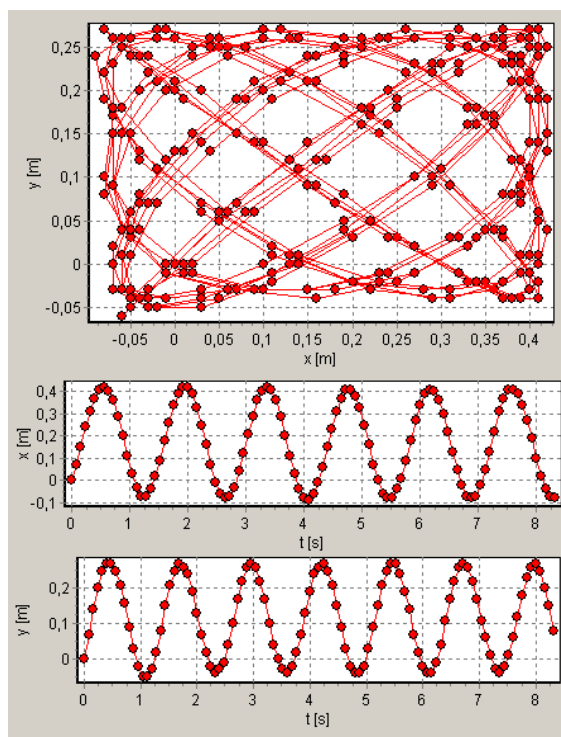


Abb. 6:  $y(x)$ -,  $x(t)$ - und  $y(t)$ -Diagramm der Messung mit dem Videoanalyseprogramm AVA.

##### Modellbildung:

Der Vorgang wurde mit der Modellbildungs- und Animationssoftware JPAKMA modelliert und dargestellt [9]. Die Masse des Pendelkörpers, die Federhärte, die Ruhelänge der unbelasteten Feder sowie die Startkoordinaten wurden gemessen und in das Modell übernommen. Es wurden die Gewichtskraft und die Federkraft berücksichtigt, nicht jedoch Luftreibungskräfte, die den Umfang der Bewegungsbahn allmählich reduzieren.

Eine weitere Variante der Methode „Vergleich der Daten aus Videoanalyse und Modellbildung“ basiert auf der Möglichkeit des Videoanalyseprogramms AVA, die Bewegung des Objekts in einem Bild durch kleine Kreise zu stempeln. Das so gewonnene Bild kann als Hintergrundbild in die Animations-ebene von JPAKMA eingebunden werden und daraufhin die reale Bewegungsbahn nachmodelliert werden. Je nach Lernsituation kann die Aufgabe für die Studenten also lauten, ein Modell zu erstellen, das die reale Bewegungsbahn reproduziert oder an einer bereits erstellten Modellbildungssimulation (Modell mit Animation) bestimmte Parameter entsprechend anzupassen. Das Ergebnis für das zweidimensionale Federpendel zeigt Abbildung 7.

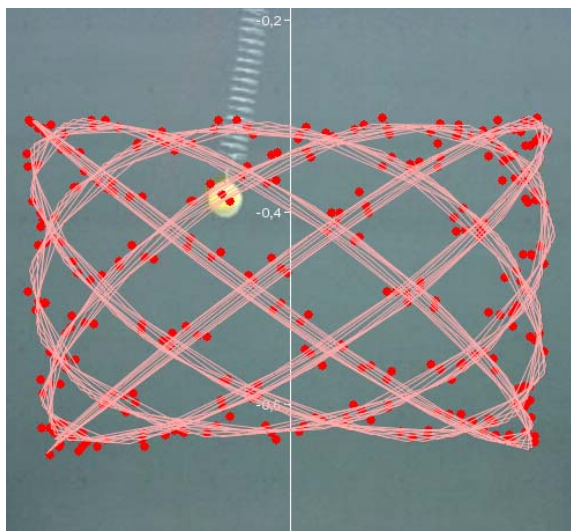


Abb. 7: Vergleich von Videoanalysedaten (Punkte) und Modellbildung (Linie).

#### Detailbetrachtungen und Folgerungen:

Im vorliegenden Versuch wurde eine relativ weiche Feder mit kurzer Ruhelänge (im unbelasteten Zustand) verwendet. Die Bewegungsbahn des Pendelkörpers ist dann in erster Näherung eine Lissajouskurve. Es gilt jedoch zu bedenken, dass bei diesem Schwingungsvorgang die „Ruhelage“, bei der die Federkraft null ist, nicht ortsfest ist, sondern ebenfalls schwingt. Es handelt sich daher nicht um eine Lissajous-, sondern nur um eine lissajousähnliche Figur. Deutlich wird dies, wenn man Ruhelänge und Härte der Feder entsprechend verändert. Bei immer härter werdender Feder und endlicher Ruhelänge nähert sich die Kurve der eines mathematischen Pendels an (Abb. 8). Solche Grenzbetrachtungen sind mit der Modellbildung problemlos möglich, und geben den Lernenden Gelegenheit für eigene Überlegungen und ein tieferes Verständnis.

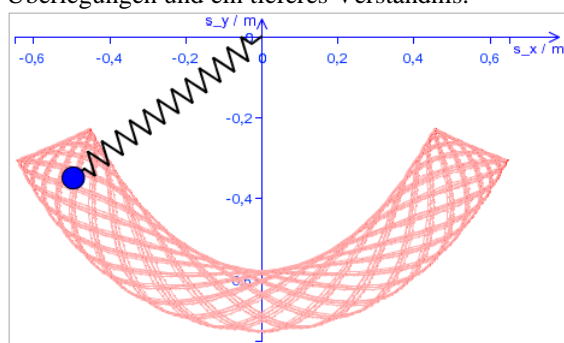


Abb. 8: Dasselbe Modell wie in Abb. 7 mit größerer Federhärte.

Es soll allerdings nicht unerwähnt bleiben, dass die vorgestellte Übungsstunde nicht den gewünschten Erfolg bei den Studenten erzielte. Der Grund hierfür lag in einer starken Fixierung auf das „Rechnen“, d.h. auf dem Wunsch, analytische Lösungswege anzuwenden. Das Ziel des Kurses – das Verständnis von strukturellen Zusammenhängen – war den Studenten dagegen nur schwer nahe zu bringen. Dass

im Alltag des Physikers eine Handvoll Differentialgleichungen existiert, deren Lösung bekannt ist, denen eine Vielzahl von (oft analytisch überhaupt nicht lösbaren) Gleichungen gegenübersteht, die numerisch gelöst werden, stieß weitgehend auf Unverständnis. Die Werkzeugfunktion von numerischen Lösungsverfahren, wie z.B. des Modellbildungsprogramms, war den meisten unbekannt (vgl. auch [10]).

#### 4. Weitere Beispiele mit dem Windows-PAKMA

Von Gigliola wurde mit Schülern das Trampolinspringen mit einer Kombination von Videoanalyse (AVA) und Modellbildung behandelt [11] (s. Abb. 9). Theismann lies ihre Schüler u.a. die Schwingung einer Wassersäule im U-Rohr mit Videoanalyse (Galileo) und Modellbildung untersuchen [12] (s. Abb. 10). Bei diesen Beispielen handelt es sich im Gegensatz zu obigen Beispielen um eindimensionale Bewegungen.

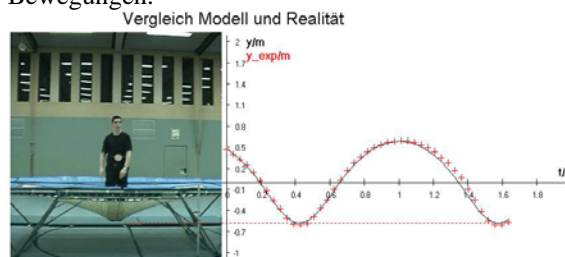


Abb. 9: Vergleich des Modells mit der Videoanalyse beim Trampolinsprung

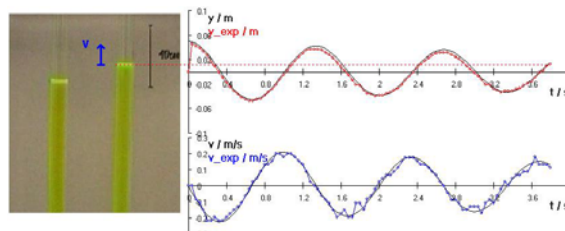


Abb. 10: Schwingung einer Wassersäule im U-Rohr: Vergleich des Modells mit der Videoanalyse

#### 5. Literatur

- [1] WILHELM, T.; HEUER, D.: *Förderung von Verständnis in der Mechanik durch den Einsatz neuer Darstellungen physikalischen Wissens am Computer* – In: NORDMEIER, V. (Red.): CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 2002
- [2] SULEDER, M.; HEUER, D. (2002): *Automatische Videoanalyse*– In: NORDMEIER, V. (Red.): Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG Leipzig 2002, Münster
- [3] WILHELM, T.; GEßNER, T.; SULEDER, M.; HEUER, D.: *Sportaktivitäten vielseitig analysieren und modellieren – Video und Messdaten multimedial aufbereitet* - In: Praxis der Natur-

- wissenschaften – Physik in der Schule 52, 2003, Nr. 2, S. 23 – 30
- [4] HEUER, D.: *Dynamische Physik-Repräsentationen – Verständnishilfe für Physikalische Experimente* - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik 45, 1996, Nr. 4, S. 12 - 18
- [5] 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
- [6] REUSCH, W.; GÖßWEIN, O.; HEUER, D.: *Graphisch unterstütztes Modellieren und Messen – VisEdit und PAKMA* - In: Praxis der Naturwissenschaften Physik 49, 2000, Nr. 6, S. 32 – 36
- [7] 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
- [8] WILHELM, T.: *Der alte Fallkegel - modern behandelt* - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 49, 2000, Nr. 7, S. 28 – 31
- [9] GÖßWEIN, O.; HEUER, D.; SULEDER, M.: *Modellbildung und Präsentation mit JPAKMA*– In: NORDMEIER, V. (Red.): Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG Leipzig, 2002, Münster
- [10] SULEDER, M.; HEUER, D. (2004): *Neue Medien als Werkzeug*, auf dieser Tagungs-CD.
- [11] GIGLIOLA, S.: *Modellbildung im Physikunterricht der 11. Jahrgangsstufe - Erarbeitung und Erprobung einer Unterrichtseinheit zum Thema „Trampolinsprung“*, Schriftliche Hausarbeit für die Zweite Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium, unveröffentlicht, 2003
- [12] THEISMANN, S.: *Rechnergestützte Modellbildung und Messwerterfassung im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe am Beispiel von mechanischen Schwingung*, Hausarbeit im Rahmen der Zweiten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien, Studienseminar für das Lehramt für die Sekundarstufe II Rheine, unveröffentlicht, 2003

## 6. Adresse

Dipl.-Phys. Michael Suleder, StR Thomas Wilhelm,  
 Prof. Dr. Dieter Heuer, Lehrstuhl für Didaktik der  
 Physik, Physikalisches Institut der Universität  
 Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, Tel.  
 0931/888-5786

[suleder@physik.uni-wuerzburg.de](mailto:suleder@physik.uni-wuerzburg.de),  
[wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de](mailto:wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de),  
[heuer@physik.uni-wuerzburg.de](mailto:heuer@physik.uni-wuerzburg.de)