

# Videoanalyse realer Bewegungen auf dem PC

André Beinert, Tomas Hahn  
Georg Kosian, Alfred Pflug  
Lehrstuhl für Didaktik der Physik  
Universität Dortmund

## 1) Prinzipielle Charakterisierung des Vorhabens

Die moderne Technik der digitalen Videoaufzeichnung in Verbindung mit der nachträglichen Bearbeitung auf dem PC erlaubt eine quantitative Analyse von Bewegungsabläufen, welche ansonst kaum zugängliche kinematische und dynamische Strukturen, die der Bewegung zugrunde liegen, graphisch darstellen und numerisch verdeutlichen kann. Im besonderen soll in der ersten Entwicklungsstufe des Projektes die komplexe Bahnkurve eines rotierenden starren Körpers, der im (homogenen) Erdschwerefeld frei fällt, aufgezeichnet und anschließend quantitativ analysiert werden.

Um die gesamte Komplexität dieser Bewegung registrieren zu können, müssen zwei Punkte auf dem starren Körper (etwa mit Hilfe weißer Klebepunkte) markiert werden. Günstigerweise wählt man dazu den Massenmittelpunkt (Schwerpunkt) sowie einen weiteren körperfesten Punkt, der möglichst weit von diesem Massenmittelpunkt entfernt ist. Damit diese beiden markierten weißen Punkte auf der Videoaufnahme auch klar und deutlich zu erkennen sind, muß die Albedo des Körpers möglichst gering sein. Wir haben das durch Umwickeln mit einem mattschwarzen Klebeband in zufriedenstellender Weise erreicht.

Außerdem muß die gesamte Bewegung des Körpers innerhalb einer festen Ebene senkrecht zur optischen Achse der Aufnahme erfolgen, weil nur in diesem Fall die dreidimensionale, räumliche Position des Körpers unmittelbar aus den zweidimensionalen Bildschirmkoordinaten rekonstruiert werden kann.

Leider sind nun bei der freien Rotation eines starren Körpers nicht alle Drehachsen stabil oder quasistabil, das heißt bleiben während der gesamten Bewegung in einer festen Orientierung oder zeigen nur eine „geringfügige“ Präzession. Die Drehachse muß dazu in der „Nähe“ einer Hauptträgheitsachse mit maximalen oder minimalen Massenträgheitsmoment liegen.

Um diese ausgezeichneten Achsen eines starren Körpers leichter finden zu können, haben wir nur Objekte mit bestimmten Symmetrien ausgewählt: einen Schraubenschlüssel und einen Hammer. In beiden Fällen ist es relativ leicht, beim Wurf eine Rotation um eine Achse zu erzielen, welche in der unmittelbaren Nähe der Achse des maximalen Trägheitsmomentes liegt.

Registriert man nun in jedem Einzelbild die Lage der beiden markierten Punkte auf dem starren Körper, so läßt sich sowohl die detaillierte Energiebilanz der Bewegung (Wechselspiel von kinetischer und potenzieller Energie des Körperschwerpunkts) als auch die zeitliche Invarianz der Rotationsenergie um diesen Körperschwerpunkt (oder

äquivalent die Unveränderlichkeit der entsprechenden Winkelgeschwindigkeit der Rotation) quantitativ mit ausreichender numerischer Präzision ermitteln.

Dazu müssen natürlich Eichungen der drei physikalischen Grundgrößen Länge, Zeit und Masse vorgenommen werden. Die Längeneichung erfolgt durch Anklicken der beiden Endpunkte des Bildes eines mitaufgenommenen Maßstabes, dessen wahre Länge in das Auswerteprogramm eingegeben werden muß. Der Zeittakt ist durch den fixen Zeitabstand der Registrierung aufeinanderfolgender Videoeinzelbilder festgelegt.

Leider ist dieser Zeitabstand nicht für alle Videosysteme gleich: beim amerikanischen System NTSC beträgt er  $1/30$  Sekunde, beim deutschen PAL-System  $1/25$  Sekunde, während er im Falle der Webcam nicht einmal zeitlich konstant ist, sondern unregelmäßigen Schwankungen unterliegt. Noch dazu ist er von der Ausleuchtung abhängig.

Bei unserer Aufnahme mit den Webcam der Firma Philips konnten wir einen mittleren zeitlichen Abstand der Einzelbilder von  $1/10$  Sekunde feststellen. Da eine quantitative Auswertung der Bewegungsdaten nur möglich ist, wenn dieser Abstand strikt zeitlich konstant ist, mußten wir zur Sicherstellung dieses Umstandes eine große, freilaufende Stoppuhr (Auflösung  $1/100$  Sekunde) mit auf jedes Bild bringen. Die Erfahrung zeigte daß bei einer Gesamtdauer der Videoaufnahme von rund fünf Sekunden im Mittel jede dritte Aufnahme einen strikt konstanten Zeittakt von  $1/10$  Sekunde besaß.

Eine weitere Schwierigkeit bei der quantitativen Auswertung der registrierten Bewegung liegt in der Tatsache, dass das PAL-System in jeder Sekunde nicht 25 Vollbilder, sondern 50 Halbbilder (gerade beziehungsweise ungerade Zeilennummern) liefert. Bei der in unserem Falle auftretenden „schnellen“ Bewegung sind aufeinanderfolgende Halbbilder nicht mehr deckungsgleich.

Die direkte digitale Registrierung mit Hilfe der Firewirekarte zeigt daher auch auf jedem Einzelbild zwei unterschiedliche Positionen des bewegten Objekts (Hammer). Bei der Auswertung muß man daher stets die erste oder stets die zweite Position verwenden, die beiden Positionen des Objektes auf jedem Einzelbild also in eine zeitliche Ordnung bringen, was im allgemeinen zweifelsfrei möglich ist.

Die charakteristische Struktur der Dynamik eines starren Körper, der um die Achse seines maximalen Trägheitsmoments rotiert, kann ohne das Hilfsmittel der quantitativen Videoanalyse kaum experimentell überprüft werden, obwohl ihre theoretische Begründung zum Standardrepertoire der analytischen Mechanik zählt. Die Möglichkeiten der vergleichsweise relativ einfachen experimentellen Bestätigung theoretischer Konzepte der Physik können also durch den Einsatz der beschriebenen multimedialen Lehr- und Lernsysteme in fachdidaktisch relevanter Weise entscheidend erweitert werden.

Fernziel des Projektes ist natürlich die Entwicklung zuverlässiger Methoden für die Videoaufzeichnung und die nachträgliche quantitative Analyse von Bewegungen, die sich entweder

i) im Klassenraum realisieren und aufzeichnen sowie innerhalb einer einzigen Unterrichtsstunde in den wesentlichen Aspekten quantitativ analysieren lassen,

oder

ii) der Erlebniswelt der Jugendlichen (Straßenverkehr, Rummelplatz, Sport usw.) entstammen und eine für diese Altersstufe interessante Problemstellung beinhalten.

Das Projekt befaßt sich in der Hauptasche mit drei bestimmten Aspekten des Problemkreises der Videoanalyse realer Bewegungen auf dem PC, nämlich

i) vergleichende praktische Erprobung der Aufnahmemöglichkeiten sowohl mit einer semiprofessionellen Digitalkamera (Sony Digital Handycam DCR-VX1000E, 3 CCD's, Preis ca. 3000 Euro) als auch mit einer einfachen Webcam (Philips PCVC 680K, Preis ca. 80 Euro)

ii) vergleichende praktische Erprobung einer schnellen Datenübertragung zwischen Videokamera und Festplatte des Computers (Digitalisierungskarte Miro DC 30, Firewire-Schnittstelle IEEE 1394, USB-Schnittstelle)

iii) Analyse und Evaluation der möglichen fachdidaktischen Strategien im Zusammenhang mit der Videoanalyse realer Bewegungen auf dem PC; Entwicklung von konkreten Einsatzvorschlägen für die Schule.

Dabei sollen bei der Bearbeitung des Projektes keine neuen Videoanalyse-Programme entwickelt werden, da davon bereits genügend viele existieren. In der Anfangsphase der Projektbearbeitung haben wir mit relativ gutem Erfolg das Programm DIVA (DIGITALE VideoAnalyse) der Universität Augsburg/Lehrstuhl für Didaktik der Physik/Prof. Helmut Hilscher eingesetzt.

Leider läßt dieses Programm in der uns anfangs vorliegenden Version nur die Markierung eines einzigen Punkts auf jedem Einzelbild zu; für die Analyse der Rotation müssen aber mindestens zwei Punkte des entsprechenden Körpers (durch Anklicken mit der Maus) markiert werden.

Außerdem war eingesetzte Version von DIVA an eine bestimmte Version des Programmes EXCEL, welches zur numerischen Glättung der erhaltenen Messkurven eingesetzt werden konnte und in unserem Fall auch mußte, gebunden.

Nach einem mehrmonatigen erfolgreichen Einsatz war aber das von engagierten Amateuren verfaßte Programm DIVA (vermutlich auf Grund einer nachträglich installierter Software) plötzlich nicht mehr lauffähig, sodaß der Umstieg auf ein anderes System der computergestützten Videoanalyse erforderlich war.

Unsere Wahl fiel auf „World in Motion“ (The Project Group Inc., 1700 Rhode Island Ave. No., Golden Valley, MN 55427-4067 USA, Tel.: (612) 544-2356, Fax.: (612) 544-3533, email: pagex014@maroon.tc.umn.edu). Trotz der wenig komfortablen Eingabe mit physikalisch und mathematisch unsinnigen Default-Einstellungen lief das Programm sehr stabil und brachte die besten numerischen Ergebnisse.

Während bei der Arbeit mit DIVA auf eine nachträgliche numerische Glättung der gewonnenen Meßkurven nicht verzichtet werden konnte, wenn man zur Berechnung der auftretenden Beschleunigungen und Kräfte die zweite Ableitung der Funktionen bilden wollte, so konnte diese Prozedur bei der Arbeit mit „World in Motion“ trotz der dort verwendeten einfachen Algorithmen zur Berechnung des Differenzialquotienten zum Glück wegfallen. Dieser Umstand hat neben einer sehr wesentlichen Vereinfachung in der Bedienung auch das Vermeiden numerischer Artefakte zur Folge. Approximiert man nämlich eine punktweise gemessene Funktion durch ein Polynom zweiter Ordnung, etwa mittels der Methode der minimalen Summe aller Fehlerquadrate, so ist die zweite Ableitung der auf diese Weise „geglätteten“ Funktion notwendigerweise konstant.

Dieser Umstand täuscht die exakte zeitliche Konstanz der zweiten Ableitungsfunktion, im konkreten Falle der Beschleunigung, vor, ist aber nur ein numerisches Artefakt: approximiert man die gemessene Funktion mittels eines Polynoms dritter oder höherer Ordnung, so geht diese zeitliche Konstanz der Beschleunigung im allgemeinen sofort verloren. Aus diesem Grund ist der Verzicht auf jegliche Art der numerischen Approximation für die Beurteilung der auftretenden Meßfehler von zentraler Bedeutung.

## 2) **Fachliche und fachdidaktische Zielsetzungen des Projektes**

Da Fernziel des Projektes ist die Entwicklung und praktische Erprobung eines Video-Aufnahmeverfahrens, welches nur preisgünstige Hardwarekomponenten erfordert und im Verlaufe einer einzigen schulischen Physikstunde zusammen mit der anschließenden quantitativen Auswertung durchgeführt werden kann. Zur Erreichung dieses Ziels wurden bisher die folgenden Zwischenschritte realisiert:

i) Innenaufnahmen unter Studiobedingungen (blauer Vorhang als homogener Hintergrund, gleichmäßige Ausleuchtung mit Hilfe von Studioluchten, Vermeidung von Reflexen am schräg geworfenen Schraubenschlüssel usw.) mit einer halbprofessionellen (digitalen) Videokamera (Sony Digital Handycam DCR-VX1000E, 3 CCD's, Preis ca. 3500 Euro), nachträgliche bildweise Digitalisierung des über den analogen Ausgang der Videokamera übertragenen Videofilms mit Hilfe der Digitalisierungskarte Miro DC 30 (Preis etwa 800 Euro).

ii) Real-Time-Speicherung des digitalen Ausgangssignals der halbprofessionellen Videokamera (Sony Digital Handycam DCR-VX1000E, 3 CCD's, Preis ca. 3500 Euro) mit Hilfe einer Hochleistungs-Schnittstellenkarte (IEEE 1394 = Firewire = iLink, Preis etwa 600 Euro) direkt auf die Festplatte eines PC. Vereinfachte Aufnahmebedingungen (kein spezieller Hintergrund, Ausleuchtung mit einem einzigen Scheinwerfer, Inkaufnahme von Reflexen usw.), die sich auch in einem Klassenzimmer realisieren lassen.

iii) Real-Time-Speicherung des digitalen Ausgangssignals einer preisgünstigen Webcam (Preis < 150 DM) direkt auf die Festplatte. Aufnahmebedingungen wie unter ii)

Auswertung mit Hilfe kommerzieller Videoanalyseprogramme, die allerdings die Registrierung von (mindestens) zwei Punkten pro Einzelbild ermöglichen müssen, um die komplexe Bewegung eines starren Körpers analysieren zu können. Bisher verwendete Software: „World in Motion“ (Fa. Project Group, USA, Preis etwa 300 DM).

### 3) **Stellung und Einsatz des Projektes in der Lehre der Universität Dortmund**

Das Multimediaprojekt „Videoanalyse realer Bewegungen auf dem PC“ soll zunächst im Rahmen der Ausbildung von Physiklehrerinnen und –lehrern der Sekundarstufe I und II eingesetzt werden. Im Rahmen der stufenübergreifenden Lehrveranstaltung „Planung, Durchführung und Analyse von Physikunterricht III“ soll das theoretische Konzept sowie der praktische Gebrauch eines Videoanalyseprogrammes grundsätzlich diskutiert und anschließend seine konkreten Einsatzmöglichkeiten in der Schule bezüglich ihres didaktischen Potentials (Chancen und Hindernisse) im Detail analysiert werden.

Zuletzt wird an Hand eines einzelnen Softwareproduktes, nämlich des aus den USA stammenden Programmes „World in Motion“ (The Project Group Inc., 1700 Rhode Island Ave. No., Golden Valley, MN 55427-4067 USA, Tel.: (612) 544-2356, Fax.: (612) 544-3533, email: pagex014@maroon.tc.umn.edu) die praktische Handhabung eines Videoanalyseprogrammes exemplarisch vorgestellt.

### 4) **Angestrebte Kooperationen innerhalb und außerhalb der Universität**

- Universität Dortmund:
- Institut für Schulentwicklungsforschung: Frau Prof. Dr. Renate Schulz-Zander
- Medienzentrum: Herr Josef Hüvelmeyer

- Universität Potsdam (Softwareprodukt Galileo):  
Herr Prof. Dr. Helmut Mikelskis, Herr Dr. Rolf Winter

- Universität München (Softwareprodukt DAVID):  
Herr Prof. Dr. Hartmut Wiesner

- Universität Augsburg (Softwareprodukt DIVA):  
Herr Prof. Dr. Helmut Hilscher

### 5) **technische Rahmen- und Randbedingungen**

Die Verwendung der Firewireschnittstelle für die digitale Videoaufzeichnung liefert einzelne Videobilder, bei welchem ein schnell bewegtes Objekt zweimal in etwas unterschiedlichen Positionen auf dem Schirm erscheint. Dieser etwas unerfreuliche Umstand rührt offensichtlich von der Tatsache her, dass zwei zeitlich

aufeinanderfolgende Halbbilder zu einem Vollbild überlagert werden. Für die Auswertung ist es in diesem Falle unumgänglich notwendig, die zeitliche Reihenfolge der Halbbilder zu kennen und jeweils durchgehend das erste oder das zweite auszuwerten.

Leider konnte bisher bei der Verwendung der Webcam (Philips) nicht verlässlich garantiert werden, daß die bei der Aufnahme tatsächlich auftretende Zeitdifferenz zwischen zwei Bildern über die ganze Aufnahme hinweg konstant bleibt. Manchmal fallen in zufälligen zeitlichen Abständen einzelne Bilder aus, was für den Einsatz als Webcam unerheblich ist, die quantitative Analyse der Dynamik aber praktisch unmöglich macht.

Um diese Fehlerquelle auszuschalten, ließen wir zur Kontrolle bei jeder Aufnahme eine große Stoppuhr mitlaufen, deren Zeitanzeige (mit einer Auflösung von 0,01 Sekunden) auf jedem Einzelbild deutlich zu erkennen war. Der typische (vermutlich ausleuchtungsabhängige) zeitliche Abstand zwischen zwei Bildern der Webcam betrug (entgegen den Herstellerangaben, wo eine kürzere Zeitdauer versprochen wurde) 0.1 Sekunden, im Mittel war er bei jeder dritten Aufnahme auch über die gesamte Aufnahmezeit hinweg konstant.

Ob diese Schwankung bei anderen Webcamfabrikaten in gleicher oder ähnlicher Weise auftritt, muß näher untersucht werden, damit konkrete Vorschläge für einen Unterrichtseinsatz in der Schule erstellt werden können. Die Studierenden sollen unter allen Umständen mit dem vollen Spektrum der auftretenden Probleme vertraut gemacht werden, um sie auf möglichst viele konkrete Unterrichtssituationen vorzubereiten.