

Dynamik mit Hochgeschwindigkeitsvideos

Maximilian Michel, Thomas Wilhelm

1. Hochgeschwindigkeitskameras

Unter einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme versteht man Aufnahmegeschwindigkeiten von mehr als 30 Bildern pro Sekunde. Digitale Hochgeschwindigkeitskameras gibt es schon seit längerem und sie wurden vor allem im wissenschaftlichen Rahmen eingesetzt. Die „Pixelmanie“ und der High-Definition-Boom, die großen Fortschritte in der Entwicklung der Sensoren und vor allem die Verbesserung der CMOS-Sensoren haben letztendlich ermöglicht, dass kompakte Foto- und Videokameras „Slow-Motion“ und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zu einem bezahlbaren Preis machen können. Einige wenige Camcorder bieten so genannte „Slow-Motion“-Aufnahmen an, das heißt, ihre Bildrate wird von etwa 25 auf ca. 100 fps¹ erhöht. Dies ist aber in der Regel nur für eine sehr kurze Zeit möglich.

Casio hat 2008 mit der „Casio EX-F1“ eine völlig neue Art von Bridge-Kamera geschaffen. Sie schlägt nicht nur die Brücke zwischen kompakter Kamera und Spiegelreflexkamera, sondern auch die Brücke zwischen Fotoapparat und Videokamera sowie zwischen HD-Videokamera und Highspeed-Kamera. Durch den schnellen Prozessor und dem Einschränken der Bildauflösung kann sie mit fast unbegrenzter Aufnahmezeit 30 fps, 300 fps, 600 fps oder sogar 1200 fps aufnehmen. Das alles bei einem Preis von 799 €UVP. Der EX-F1 folgten weitere Modelle. Aktuell gibt es fünf weitere, verschiedene Kameratypen von Casio, die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit bis zu 1000 fps machen können [1]. Die günstigsten Modelle, z.B. die EX-FS10, werden neu für nur ca. 100 € im Internet gehandelt.

Die Kameras sind sehr vielseitig und können neben den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen auch normale Videos und Fotos aufnehmen. Damit sind solche Kameras prädestiniert für den Einsatz im zeitgemäßen Physikunterricht [2], für den z.B. der Lehrplan in Bayern u.a. auch die Videoanalyse empfiehlt. Der Preis der Kameras, die flexiblen Einsatzmöglichkeiten, die relativ einfache Bedienung, die umfangreiche Softwareausstattung und die kompakte Bauweise machen diese Kameras nicht nur für Schulen attraktiv. Beispielsweise sind für Verhaltensbiologen der „Pre-record“-Modus² und die kaum eingeschränkte Aufnahmezeit (beides auch für Hochgeschwindigkeitsvideos möglich) durchaus interessant. Beides wird bei „herkömmlichen“ Hochgeschwindigkeitskameras bisher nicht angeboten.

Die in den Kameras verwendeten CMOS-Sensoren haben gegenüber CCD-Sensoren den entscheidenden Vorteil, dass sie permanent ausgelesen werden können. Dabei wird nur die durch den Photoeffekt erzeugte Spannung jedes Pixels ausgelesen, abgebaut und interpretiert. In Folge höherer Bildfolgezahlen wird die Belichtungszeit des einzelnen Frames kürzer. Dies ist

¹ „fps“ ist die offizielle Abkürzung für „Frames pro Sekunde“, wobei ein Frame ein Einzelbild des Videos ist.

² Die (oft entscheidende) Sekunde vor dem eigentlichen Start der Aufnahme wird mit gespeichert.

bei schnellen Bewegungen von großem Vorteil, da man nicht so leicht eine Bewegungsschärfe im Bild erhält. Allerdings ist auch ein entsprechend stärkerer Lichteinfall nötig (siehe Abschnitt 7).

Um die Möglichkeiten der Kamera zu illustrieren, sei hier ein platzender, wassergefüllter Luftballon gezeigt, bei dem die höchste Framerate eingestellt werden muss, um ausreichend viele Bilder für die Auswertung zu erhalten. In Abb. 1 ist der Vorgang des Platzens auf 16 Bildern festgehalten. Die Framerate des Videos, aus dem die Bilder entnommen sind, beträgt 1200 fps (40-fache Zeitlupe). Die ersten 15 Bilder sind direkt aufeinander folgende Frames und decken einen Zeitraum von $1/80$ s ab. Zwischen dem 15. und dem letzten Bild sind 30 Frames, also $1/40$ s vergangen. Im ersten und zweiten Bild ist die Gummihaut noch vollständig, im dritten und vierten reißt sie gerade auf und ab dem fünften Bild ist nur noch links oben und unten ein klein wenig von der Gummihaut zu sehen, da sie zuerst vorne aufreißt und sich dann erst auf der Rückseite zusammenzieht. Man erkennt also im Zeitlupenvideo, dass sich die Gummihaut des Ballons schlagartig zusammenzieht und dabei einzelne Wassermoleküle herausgerissen werden. Die Grundform des Wasserballons bleibt aber aufgrund der Trägheit des Wassers erhalten.

Die Kamera kann auch eine Sekunde lang bis zu 60 Fotos bei voller Auflösung aufnehmen, die dann eine höhere Auflösung als das Video haben. Dies wurde bei den Fotos der Abb. 2 genutzt, bei der ein Wassertropfen auf eine ruhende Wasseroberfläche trifft.



Abb. 1: Zeitlicher Verlauf eines platzenden Luftballons aus einem Video (zwischen den einzelnen Bildern vergehen jeweils $1/1200$ s = 0,8 ms; nur zwischen vorletztem und letztem Bild liegen $1/40$ s = 25 ms vergangen).

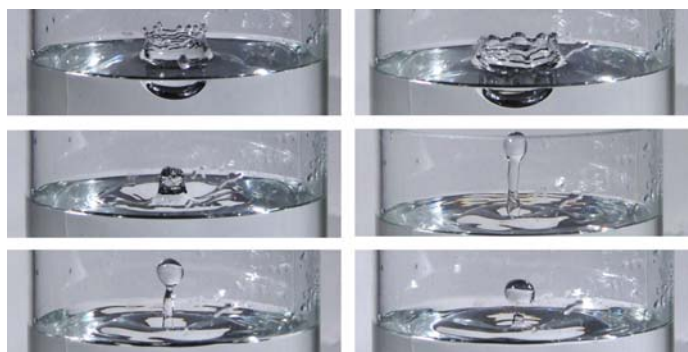


Abb. 2: Fotoserie: Ein Wassertropfen fällt in ein Wasserglas (Aufnahmegeschwindigkeit 60 fps, es wurden zwischen dem dritten und dem vierten Bild Bilder ausgelassen)

2. Videoanalyse von Hochgeschwindigkeitsvideos

Ein großer Vorteil der Videoanalyse ist, dass damit zweidimensionale Bewegungen erfasst werden können, was in modernen Unterrichtskonzepten zentral ist [3]. Dafür gibt es kaum

Messalternativen zur Videoanalyse [4]. Besonders günstig ist hier das Videoanalyseprogramm „measure dynamics“, da es die vektoriellen Größen Geschwindigkeit, Zusatzgeschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft oder Impuls als Pfeil ins Video einzeichnen kann [5] (verwendet wurde für diesen Beitrag Version 1.4 f build 377).

Ein weiterer Vorteil der Videoanalyse ist, dass die Experimente ungestört und unbeeinflusst ablaufen. Der Nachteil lag bisher darin, dass die Framerate („Abtastrate“) von Videoaufnahmen bei 25 bzw. 30 Bildern (Messwerten) pro Sekunde fest war und bei einigen Experimenten nicht ausreichte. Dies ist bei Bewegungen mit hohem Tempo oder kurzen großen Beschleunigungsbeträgen problematisch. An dieser Stelle setzt die Hochgeschwindigkeitskamera an, da sie dank der einstellbaren Bildrate eine höhere und - wenn auch eingeschränkt - einstellbare Abtastrate hat. Damit werden Experimente wie das Stoßvorgänge, Schwingungsanalysen, Loopingfahrten, schräge Würfe und fallende Gegenstände exakter auswertbar.

Damit der Computer die Videos abspielen kann, braucht er den verwendeten Codec, z.B. den „H.264“-Codec bei der EX-F1. Damit das Video auf *jedem* Computer (auch ohne diesen Codec) läuft, ist daher ein Recodieren der entstehenden mov-Videos mit einem älteren Codec sinnvoll. Bei den hier vorgestellten Videos wurde zum Ändern des Codecs, zum Schneiden und Bearbeiten das kostenlose Windows-kompatible Apple-Programm „MPEG-Streamclip“ verwendet und so eine avi-Datei mit einem weit verbreiteten Codec (Motion JPEG) erzeugt. Die EX-FS10 gibt dagegen avi-Videos bereits im Motion-jpg-Codec aus.

Die Casio EX-F1 nimmt die Videos mit 300, 600 bzw. 1200 fps auf, die Casio EX-FS10 mit 210 fps, 420 fps oder 1.000 fps. In jedem Fall werden sie allerdings so abgespeichert, dass sie beim Abspielen mit 30 Bildern pro Sekunde ablaufen. Dadurch entsteht der Zeitlupeneffekt, der den Prozess 10-, 20- oder sogar 40-fach bzw. 7-, 14- oder 33-fach langsamer anzeigt, als er in Wirklichkeit war. Das kann bei der quantitativen Videoanalyse ein Problem sein, bei der man den echten Wert der betrachteten physikalischen Größe wissen will, wenn das Videoanalyseprogramm die Framerate automatisch aus dem Video ausliest. Mit dem kostenlosen Programm AVIFrate kann man jedoch die Framerate sehr einfach auf den korrekten Wert ändern, ohne dass sich an der Codierung des Videos etwas ändert. Die Korrektur der Framerate ist nicht notwendig, wenn man nur die Richtung und die Veränderung einer physikalischen Größe betrachtet, nicht aber ihre genauen Werte.

3. Die Zusatzgeschwindigkeit bei zweidimensionalen Bewegungen

Bei den folgenden zwei Videos ist nur die Richtung der Geschwindigkeit und der Zusatzgeschwindigkeit von Interesse, nicht aber das Tempo. Damit man die wesentlichen Effekte wirklich beobachten kann, ist der Zeitlupeneffekt sogar von Vorteil, da die Bewegungen in Wirklichkeit zu schnell ablaufen.

3.1 Zusatzgeschwindigkeit beim Kugelstoß

Im ersten Video kommen zwei Kugeln von links mit ungefähr gleicher und konstanter Anfangsgeschwindigkeit angerollt, die mit \vec{v}_A bezeichnet wird und von “measure dynamics“ als dynamisch mitbewegter Pfeil ins Video an die Kugeln eingezeichnet wird [5]. Dann gibt es einen kurzen senkrechten Stoß auf eine Kugel und es ergibt

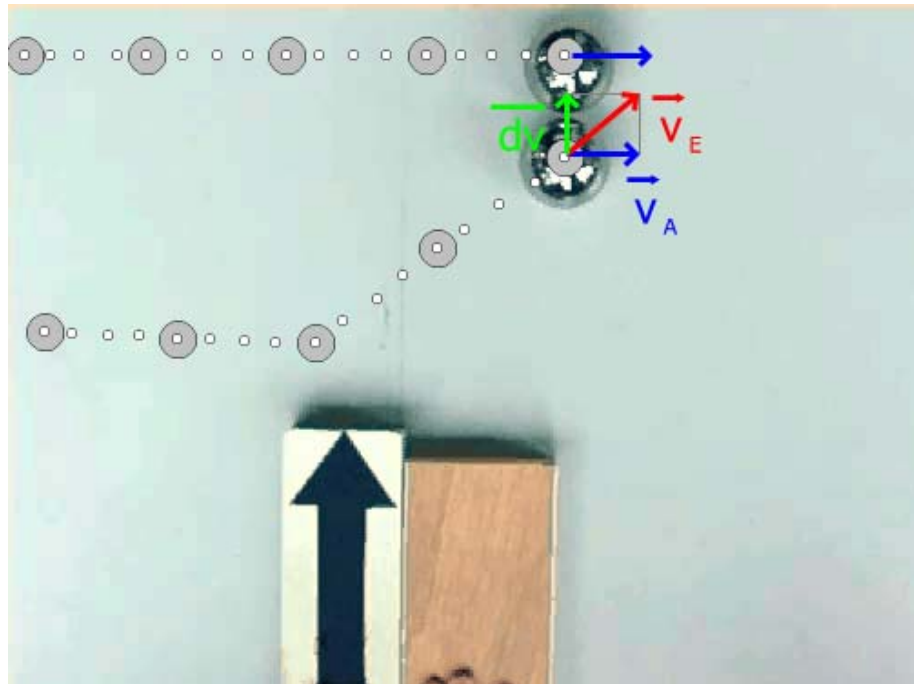


Abb. 3: Bild aus dem Video zum senkrechten Stoß (kleine Punkte alle 43 ms)

eine neue konstante Endgeschwindigkeit \vec{v}_E , die zusätzlich ins Video eingeblendet wird (siehe Abb. 3). Das Zustandekommen dieser Endgeschwindigkeit lässt sich wie folgt erklären: Die Anfangsgeschwindigkeit \vec{v}_A in x-Richtung bleibt bestehen und in Stoßrichtung, der y-Richtung, kommt eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ dazu. Die Endgeschwindigkeit \vec{v}_E ergibt sich durch Aneinanderhängen der Pfeile für die Anfangsgeschwindigkeit \vec{v}_A und die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$.

Um auch nach Ablauf des Videos den Bewegungsablauf noch sichtbar zu haben, werden die Schwerpunkte der Kugel in stets gleichen Zeitintervallen ins Video gestempelt. Damit die Darstellung wie in der Stoßsimulation aussieht, die in [3, Abb. 6b] vorgestellt wird, werden dazwischen noch kleinere Punkte gesetzt.

Alle diese Einblendungen kann man in “measure dynamics“ über die Funktion „Anzeige / Filter“ erstellen. Hiermit ist es nicht nur möglich, Symbole, Linien und Pfeile nach individuellen Wünschen nach beliebigen berechneten Größen in das aktuelle Videobild einzublenden, sondern man kann auch festlegen, ob und in welchem Abstand diese sichtbar bleiben sollen.

3.2 Zusatzgeschwindigkeit beim waagrechten Wurf

Beim Kugelstoß hatten wir nur eine kurze Einwirkung. Beim waagrechten Wurf dagegen haben wir eine längere, konstante Einwirkung, die ebenfalls senkrecht zur ursprünglichen Bewegungsrichtung ist. Auch hier kommt zur Anfangsgeschwindigkeit \vec{v}_A in x-Richtung eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ in Einwirkungs-

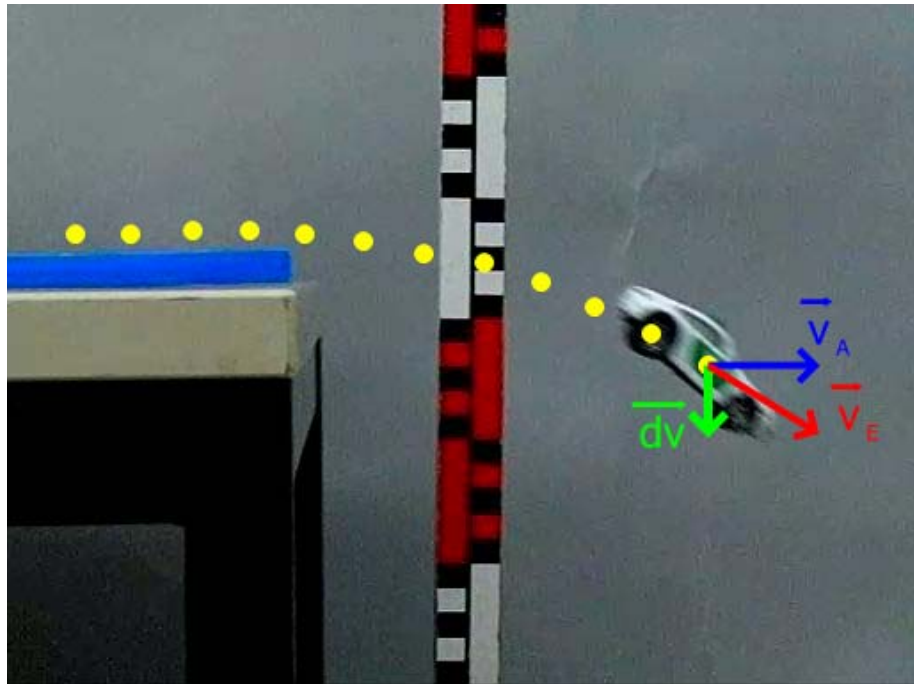


Abb. 4: Bild aus dem Video zum waagrechten Wurf (Ortsmarken alle 13 ms)

richtung, der y-Richtung, dazu (siehe Abb. 4). Die Endgeschwindigkeit \vec{v}_E ergibt sich wieder durch Aneinanderhängen der Pfeile für die Anfangsgeschwindigkeit \vec{v}_A und die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$. Der Unterschied ist hier nur, dass die Zusatzgeschwindigkeit während der gesamten Fallzeit zunimmt.

Dieses Video wurde mit 300 fps gefilmt (10-fache Zeitlupe) und es wird der Ort in jedem vierten Frame gestempelt (alle $4/300 \text{ s} = 13 \text{ ms}$). Damit die Bewegung schön langsam abläuft, sollte man in “measure dynamics“ nochmals das halbe Abspieltempo einstellen.

4. Kräfte bei Stößen auf der Luftkissenbahn

Die Videoanalyse hat das grundlegende Problem, dass die momentanen Beschleunigungen und damit die momentanen Kräfte sehr ungenau berechnet werden. In “measure dynamics“ gibt es daher zusätzlich zum üblichen Berechnungsmodus die Möglichkeit, dass zur Glättung über mehrere Frames gerechnet wird (siehe [6, Abb. 20] und Abschnitt 5.1). Wählt man zusätzlich bei der Analyse eine Schrittweite n , wird nur jedes n -te Bild analysiert und damit nochmals über ein größeres Intervall gemittelt. Bei manchen Vorgängen genügt es jedoch, die Geschwindigkeit \vec{v}_A vor einer Einwirkung und die Geschwindigkeit \vec{v}_E nach einer Einwirkung zu berechnen und mit der Masse m und der Einwirkzeit Δt die Durchschnittskraft während der Einwirkung gemäß $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta\vec{v}$ zu berechnen, wobei $\Delta\vec{v} = \vec{v}_E - \vec{v}_A$ ist.

In dem Mechanikkonzept, das in diesem Heft vorgestellt wird [3], spielen Stöße eine wichtige Rolle. Stöße sind in der allgemeinen Vorstellung ein sehr kurzer Vorgang, so dass man hier

für eine quantitative Behandlung sehr kurze Zeiten messen muss. Will man eine Videoanalyse machen, braucht man unbedingt Hochgeschwindigkeitsvideos des Stoßprozesses, mit denen man die Stoßzeiten aus dem Video bestimmen kann.

Im Folgenden werden Stöße zwischen zwei gleich schweren Luftkissengleitern auf der Luftkissenfahrbahn betrachtet, wobei an beiden Gleitern eine Feder befestigt ist. Ist die Feder sehr hart, dann ist die Kontaktzeit der beiden Luftkissenwagen extrem kurz. Statt die durchschnittliche Beschleunigung $\vec{a} = \Delta\vec{v} / \Delta t$ während des Stoßprozesses zu bestimmen und die durchschnittliche Kraft gemäß $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ zu berechnen, kann man auch auf die Beschleunigung verzichten und die durchschnittliche Kraft gemäß der Kraftstoßgleichung $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta\vec{v}$ bestimmen. Dazu genügt es Zeit und Ort jeden Wagens zu vier Zeitpunkten zu kennen: Am Anfang, zu Beginn des Stoßes, am Ende des Stoßes und am Ende des Videos.

Die Wagen haben in diesem Versuch beide eine Masse von $m_{\text{Wagen}} = 0,303 \text{ kg}$ und eine weiche Feder. Die Zeit wurde bei Frame 70 auf Null gesetzt. Der Stoßprozess für Wagen 1 beginnt im Beispielfideo bei Frame 220 und endet bei Frame 296, das Video bei frame 323 (siehe Tab. 1). Man kann nun mit den entsprechenden Zeiten und Orten die Anfangsgeschwindigkeit $v_A = 0,466 \text{ m/s}$ und die Endgeschwindigkeit $v_E = -0,012 \text{ m/s}$ berechnen. Somit erhielt der Wagen 1 die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta v = v_E - v_A = -0,478 \text{ m/s}$. Mit der Zeitdauer

$\Delta t = 76/300 \text{ s} = 0,253 \text{ s}$ und der Masse $m = 0,303 \text{ kg}$ ergibt sich aus $\vec{F} = m \cdot \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$ eine durch-

schnittliche Kraft von $F_{\text{auf Wagen 1}} \approx -0,564 \text{ N}$. Für den zweiten Wagen ergibt die gleiche Berechnung eine praktisch gleich große entgegengerichtete Kraft von $0,534 \text{ N}$.

Bildnr.	t / s	x ₁ / m	v ₁ / m/s	F _{1,mittel} / N	x ₂ / m	v ₂ / m/s	F _{2,mittel} / N
70	0,000	0,000	0,466	-0,564	0,420	0,013	0,534
220	0,500	0,233			0,426		
296	0,753	0,293	-0,012		0,486	0,465	
323	0,843	0,292			0,528		

Tab. 1: Stoß zweier Luftkissengleiter mit weichen Federn

Im zweiten Versuchsdurchgang bekamen beide Wägen statt den weichen Federn harte Federn ($m_{\text{Wagen}} = 0,299 \text{ kg}$). Nun ergibt sich ein wesentlich kleineres $\Delta t = 5/300 \text{ s} = 0,017 \text{ s}$ und deshalb eine wesentlich größere durchschnittliche Kraft von ca. 16 N . Dass das Anfangstempo und damit die Zusatzgeschwindigkeit ungefähr doppelt so groß war, trägt zwar auch zu einer größeren Kraft bei, ist aber von geringerer Bedeutung als die Stoßzeit.

Bildnr.	t / s	x ₁ / m	v ₁ / m/s	F _{1,mittel} / N	x ₂ / m	v ₂ / m/s	F _{2,mittel} / N
0	0,000	0,000	0,961	-16,30	0,201	-0,007	15,95
39	0,130	0,125			0,200		
44	0,147	0,132	0,064		0,211	0,871	
104	0,347	0,145			0,385		

Tab. 2: Stoß zweier Luftkissengleiter mit harten Federn

5. Die fallende Metallkugel

Eine fallende und evtl. wieder hochspringende Kugel ist ein klassisches Experiment, welches dazu dient, die Erdbeschleunigung oder die Energieerhaltung zu zeigen. Dieses Experiment mittels Videoanalyse auszuwerten, bereitete bisher große Schwierigkeiten, da bei 30 fps nur wenige Bilder vom Fallvorgang aufgenommen werden und insbesondere der Moment, in dem die Metallkugel die Unterlage berührt, in der Regel nicht im Video enthalten ist. Dadurch entstehen große Messfehler bei der Bestimmung der Beschleunigung. Typischerweise gibt es zwischen der Kugelposition in dem Frame vor dem Stoß und dem nach dem Stoß nur geringe Positionsänderungen, obwohl die Kugel einen großen Abstand zur Unterlage hat. Glaubt man den daraus resultierenden Messwerten, so wird die Kugel scheinbar in der Luft weit vor der Unterlage abgebremst und fliegt dann wieder nach oben.

Schon bei Hochgeschwindigkeitsvideos mit 300 fps sieht man deutlich, dass die Kugel die Unterlage, hier eine Glasplatte, berührt. In dem durchgeführten Experiment mit einer Fallhöhe von ca. 50 cm sind aber 300 fps schon zu viel, da der Ortsunterschied des Objektes zwischen

zwei Bildern zu gering ist. Es zeigte sich, dass es günstig ist, jedes dritte Bild analysieren zu lassen, was einer effektiven Framerate von 100 fps entspricht. In dem verwendeten Videoanalyseprogramm "measure dynamics" wählt man dazu nur die Einstellung „Schrittweite 3“ (siehe [7, S. 23]). Wählt man den Startpunkt der Analyse geschickt, ist der Frame, in dem die Kugel die Glasplatte zum ersten Mal berührt, in der Analyse enthalten, sodass hier realistische Werte gemessen und ausgegeben werden.

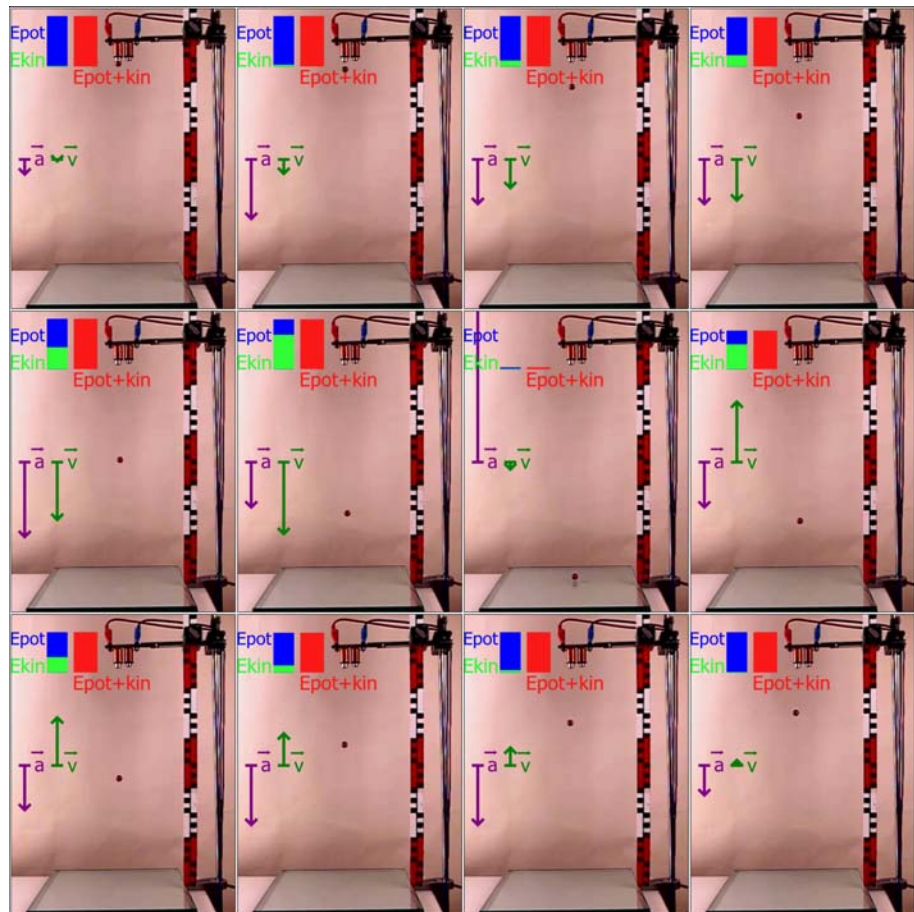


Abb. 5: Serienbild: Ausgabe jedes 15. Frames des Originalvideos mit Einblendung der Energien (links oben) und der wesentlichen kinetischen Größen (links mittig). Der Zeitabstand zwischen den Bildern ist $15/300 \text{ s} \approx 50 \text{ ms}$.

5.1 Die Fallbeschleunigung bei der Metallkugel

Das Serienbild in Abb. 5 zeigt eine Fallbewegung mit Stoß und anschließendem Aufsteigen. Das Bild besteht aus jedem fünfzehnten Frame des Originalvideos (300 fps). Die Geschwindigkeit und die Beschleunigung sind im Video ortsfest links mittig als Pfeile dargestellt [8, S. 3]. Statt der Beschleunigung (oder zusätzlich) könnte man auch einen Pfeil für die Kraft einzeichnen, die sich ja nur um einen konstanten Faktor unterscheidet.

Man sieht, dass das Tempo bis Bild sechs zunimmt, dann im Bild sieben, in dem die Kugel unten aufschlägt, Null ist und anschließend bei umgekehrter Bewegungsrichtung wieder abnimmt. Die Beschleunigungen sind annähernd, aber nicht ganz konstant. Gut erkennbar ist aber, dass im siebten Bild beim Stoß eine starke Beschleunigung nach oben auf die Kugel wirkt.

Diese Streuungen bei der während der Fallbewegung in Wirklichkeit konstanten Beschleunigung ist typisch für die Videoanalyse. Dass sie im Videoanalyseprogramm "measure dynamics" nicht so groß ist, hängt mit der glättenden Berechnung der Beschleunigung zusammen, die standardmäßig eingestellt ist, aber auch abgeschaltet werden kann. Für die Berechnung der Geschwindigkeit gehen dabei drei, bei der Berechnung der Beschleunigung fünf Ortspunkte ein (siehe [6, S. 24 und Abb. 20]) (ohne Glättung: zwei bzw. drei Ortspunkte). Der Vorteil bei dieser glättenden Methode ist, dass die Zuordnung der Geschwindigkeiten bzw. der Beschleunigungen zum richtigen Zeitpunkt bzw. Frame korrekt ist. Der Nachteil ist jedoch, dass ein bzw. zwei Messframes vor und nach dem jeweiligen Frame mit in die Wertebeziehung einfließen und damit Geschwindigkeit und Beschleunigung auch von der „Zukunft“ beeinflusst werden.

Um einen Wert für die Fallbeschleunigung zu erhalten, kann man eine Mittelwertbildung durchführen. Dazu berücksichtigt man, dass die Beschleunigungswerte um die Stoßvorgänge herum sowie die während des Stoßvorgangs selbst und die zu Beginn des Fallens der Kugel fehlerbehaftet sind und berechnet mit den restlichen Messwerten die mittlere Erdbeschleunigung mittels Tabellenkalkulation. Vor dem ersten Auftreffen auf die Glasplatte ergibt sich ein Mittelwert von $g = -9,89 \text{ m/s}^2$ (24 in die Berechnung eingehende Werte). Bestimmt man den Mittelwert aller (korrekt berechneten) Beschleunigungswerte zwischen allen Stößen, erhält man $g = -9,33 \text{ m/s}^2$ (Standardfehler $\pm 0,39 \text{ m/s}^2$, insgesamt 132 Einzelmesswerte). Die Genauigkeit der Messung mit der Videoanalysesoftware hat so mit der Hochgeschwindigkeitskamera zugenommen.

Eine einfachere Bestimmung der Fallbeschleunigung ist die Betrachtung der fast gesamten Fallzeit $\Delta t = t_E - t_A$ und der Geschwindigkeitsänderung $\Delta v = v_E - v_A$ in dieser Zeit [3, Abschnitt 2.2.8.1]. Je nachdem welches Intervall man wählt, bekommt man ein $g = \Delta v / \Delta t$ von 9,2 bis 10,7 m/s^2 , die aber im Mittel gut um den gewünschten Wert liegen.

Eine weitere Bereicherung stellt die realistischere Darstellung der Beschleunigung im Moment des Auftreffens dar (vgl. Abbildung 6). Bei 30 fps ist der Peak der Beschleunigung beim Aufschlag (bei $t = 0,333$ s) wesentlich flacher (etwa 70 m/s^2 statt 250 m/s^2) und deutlich breiter als bei 100 fps. Betrachtet man die Werte ohne die oben erwähnte Glättung, so werden die Unterschiede noch größer (140 m/s^2

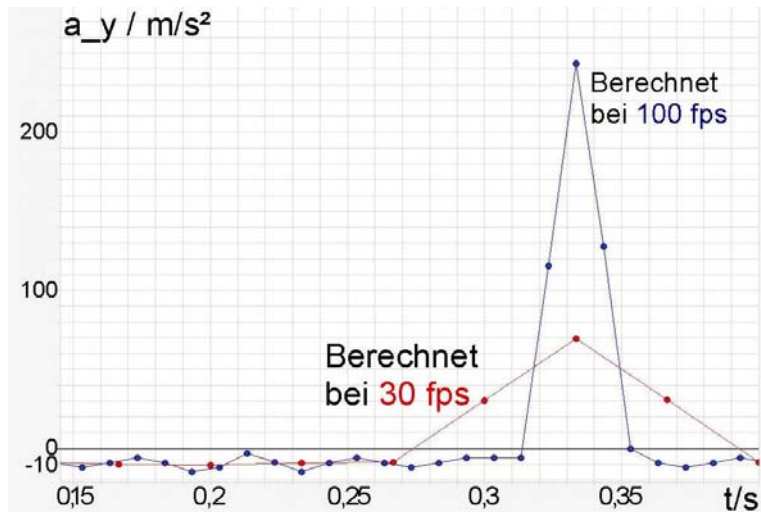


Abb. 6: Auftragung der Beschleunigung bei 100 fps und bei 30 fps gegen die Zeit.

bei 30 fps und 400 m/s^2 bei 100 fps), da weniger Frames in die Berechnung der Werte einfließen. Die Hochgeschwindigkeitsvideoanalyse kommt damit der Wirklichkeit näher. Tatsächlich ist der Moment des Auftreffens noch viel kürzer (nämlich kleiner als $1/300$ s) und damit die Beschleunigung in diesem Moment noch erheblich größer.

5.2 Die Metallkugel – energetisch betrachtet

Mit dem Experiment der fallenden Metallkugel kann man die umkehrbaren und nicht umkehrbaren Energieumwandlungen veranschaulichen. Vor dem ersten Stoß wird die potentielle Energie der Kugel (blau in Abb. 5) in kinetische Energie (grün in Abb. 5) umgewandelt, wobei die Summe beider Energien gleich bleibt (Abb. 5 und 7). Nach dem Stoßvorgang wird umgekehrt die kinetische Energie zurück in potentielle Energie umgewandelt.

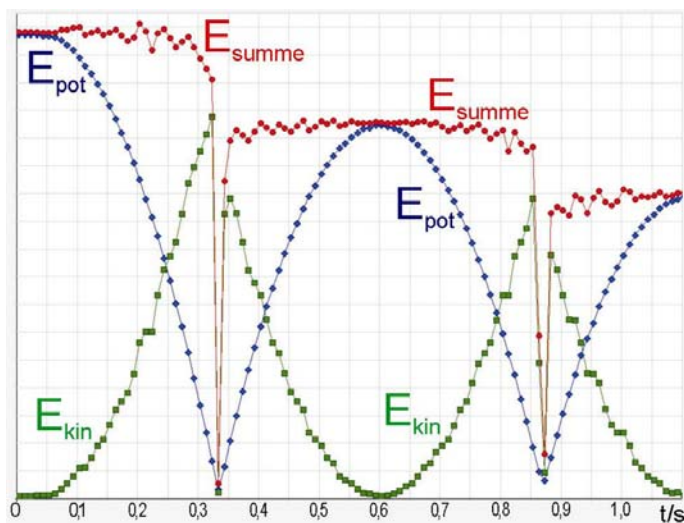


Abb. 7: Energiedarstellung der potentiellen und der kinetischen Energie sowie der Summe beider Energien

Beim Auftreffen auf die Glasplatte ist

die potentielle Energie vollständig in kinetische Energie umgewandelt, doch diese „verschwindet“ laut Berechnung scheinbar für den Moment des Auftreffens. Das ist auch sinnvoll, da die Metallkugel und das Glas beim Aufprall der Kugel wie eine extrem harte Feder wirken. Die kinetische Energie der Kugel wird in Spannenergie der Feder und wieder zurück in kinetische Energie der Kugel umgewandelt. Ein Teil der Energie des Systems wird in die Auflösung der Kristallstruktur des Glases irreversibel umgewandelt, was an den kleinen Sprungstellen im Glas erkennbar ist.

6. Der Looping mit der Darda-Bahn

Die Achterbahnen mit Looping sind auf Jahrmärkten eine Attraktion. Beim Einfahren in einen kreisförmigen Looping wirken schlagartig Zwangskräfte auf das Fahrzeug [9]. Selbst im günstigsten Fall ohne Reibung und bei minimaler potentieller Energie erfährt der Wagen (samt Insassen) am Übergang von der Geraden in die Kreisbahn eine Beschleunigung von $6g$ senkrecht zum Verlauf der Bahn, was für den Menschen lebensgefährlich ist. Daher werden die Loopings von Achterbahnen nicht mehr kreisförmig, sondern klothoidenförmig gebaut, was dazu führt, dass die radiale Zwangskraft durch die Bahn gemächlicher zunimmt. Da Klothoidenkurven im Schulunterricht schwer zu behandeln und noch schwerer im Experiment zu realisieren sind, bleibt man bei der Betrachtung des Kreisloopings wie es auch in Spielzeuggbahnen realisiert wird. Spielzeuge in den Physikunterricht mit einzubeziehen, fördert in der Regel das Interesse der Schülerinnen und Schüler an der Thematik.

Damit ein Fahrzeug ohne zusätzlichen Antrieb durch den Looping fahren kann, muss es im reibungsfreien Fall beim 2,5-fachen Radius starten. Aufgebaut wurde ein großer Darda-Looping ($2r = 0,51\text{m}$), an dem auf einer Seite eine lange Schiene an Stativen angebaut wurde. Da in diesem Experiment die Reibung des Fahrzeuges an den seitlichen Führungsschienen der Bahn und der Energieverlust durch das Durchbiegen der Schiene nicht mehr vernachlässigbar sind, muss von einer wesentlich größeren Höhe als dem 2,5-fachen Radius gestartet werden. Im konkreten Beispiel beträgt die Starthöhe $h = 1\text{ m}$. Das Experiment wird mit der Casio EX-FS10 bei 210 fps aufgenommen und jeder sechste Frame in die Analyse einbezogen.

Das Darda-Auto schafft den Looping aber auch, indem man das Auto „aufzieht“ und vor dem Looping eine gewisse ebene Strecke fahren lässt. Dieses zweite Video wurde mit 300 fps aufgenommen und jeder siebte Frame analysiert.

6.1 Der Looping – dynamisch betrachtet

Da hier eine zweidimensionale Bewegung vorliegt, werden die jeweiligen von der Videoanalysesoftware ermittelten und im Video dargestellten Geschwindigkeiten (gelbe Pfeile) und Beschleunigungen (grüne Pfeile) an den zugehörigen Ort „gestempelt“ [5]. Um ein Überschneiden der Vektorpfeile zu verhindern und damit die Übersichtlichkeit zu bewahren, wird nur jeder sechste Frame in die Analyse mit einbezogen und nur in jedem zwölften Frame die Pfeile eingezeichnet.

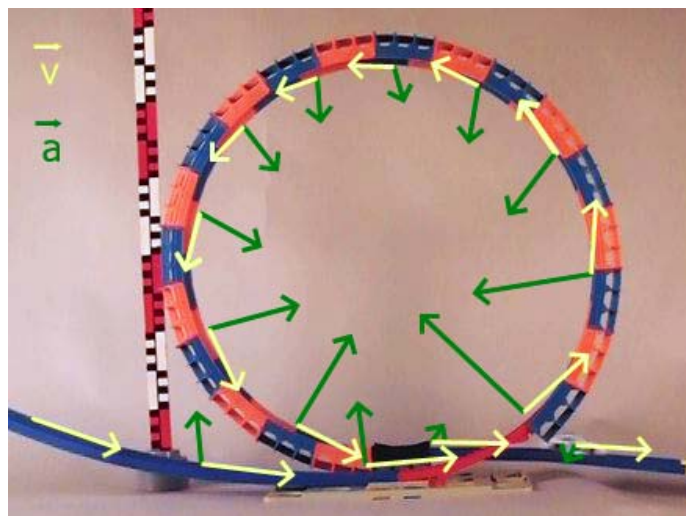


Abb. 8: Ein Auto durchrollt einen Looping (zeitlicher Abstand der Pfeile 57 ms)

In Abb. 8, in der ein Auto durch den Looping rollt, ist gut erkennbar, dass die Geschwindigkeit auch beim Durchfahren des Loopings tangential zur Bahn verläuft. Die Beschleunigung zeigt ins Innere des Kreises, denn im Looping wirkt auf das Auto eine radiale Zwangskraft in Richtung des Kreismittelpunktes durch die Fahrbahn. Zusätzlich wirkt die Gewichtskraft beim Hochfahren entgegen der Fahrtrichtung, so dass sich das Tempo des Wagens verringert, was an der Neigung des Beschleunigungsvektors erkennbar ist. Beim Herunterfahren wird das Auto wieder etwas schneller, was man an der Neigung des Beschleunigungsvektors *in* Fahrtrichtung erkennt. Im Scheitelpunkt ist die Beschleunigung aufgrund der Reibung *gegen* die Fahrtrichtung gerichtet.

In Abb. 9 ist gut erkennbar, dass die Geschwindigkeit beim Durchfahren des Loopings wieder tangential zur Bahn verläuft (eingezeichnet wurden die Pfeile jedes vierzehnten Frames bei 300 fps). Allerdings ist offensichtlich, dass noch eine andere Kraft im Spiel sein muss, da sich der Beschleunigungsvektor schon im oberen Bereich beim Scheitelpunkt des Loopings deutlich sichtbar *in* Fahrtrichtung neigt. Das Tempo des Wagens erhöht sich, noch bevor der Wagen den höchsten Punkt durchfahren hat. Das liegt an der noch nicht ganz entspannten Feder des Fahrzeugs, die hier noch immer eine Kraft in Fahrtrichtung bewirkt.

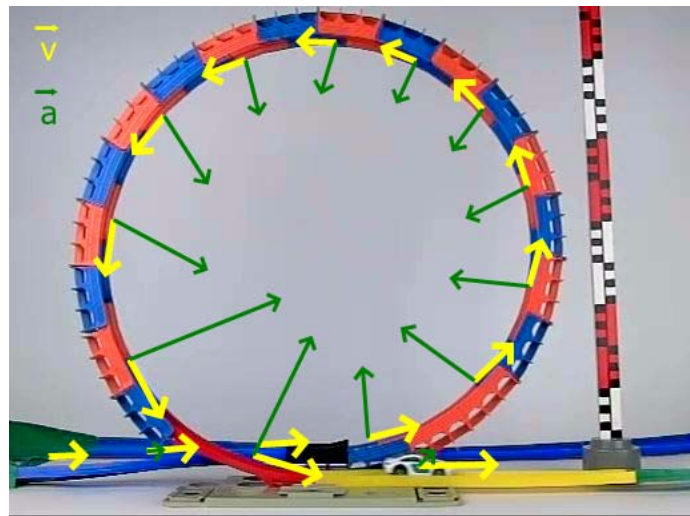


Abb. 9: Ein aufgezogenes Darda-Auto durchfährt den Looping (zeitlicher Abstand der Pfeile 47 ms)

6.2. Der Looping – energetisch betrachtet

Anfangs hat das nur rollende Fahrzeug kinetische Energie, die in potentielle umgewandelt wird und dann wieder zurück in kinetische. Die potentielle Energie nimmt bis zum Scheitel des Loopings zu und schließlich wieder ab. Die kinetische Energie ist bei der Einfahrt in den Looping am größten, nimmt dann bis etwa zum Scheitel des Loopings ab und danach wieder zu.

Betrachtet man zusätzlich die Summe beider Energien, fällt auf, dass diese gleichmäßig abnimmt (siehe Abb. 10), was an der Reibung im rollenden Auto liegt, das kei-

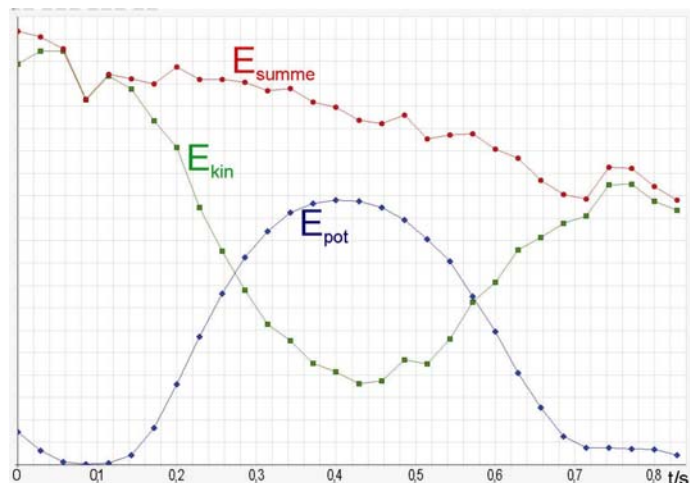


Abb. 10: Verlaufes der potentiellen Energie und kinetischen Energie sowie der Summe beider Energien beim Durchrollen eines Loopings mit Reibung

nen Antrieb hat. Durch die seitliche Führung des Wagens in der Bahn und die sichtbare Verformung der Bahn wird kinetische Energie in innere Energie umgewandelt.

Bei der zweiten Fahrt ist auffällig, dass die Summe beider Energien im Verlauf des Experimentes zunimmt (Abb. 10). Das liegt daran, dass die Spannenergie mit der Videoanalyse nicht erfasst wird bzw. erfasst werden kann. Beim Aufziehen der Feder des Motors wird Energie in das Spannen der Feder gesteckt. Entspannt sich die Feder, wandelt sie nach und nach ihre Spannenergie in kinetische Energie um.

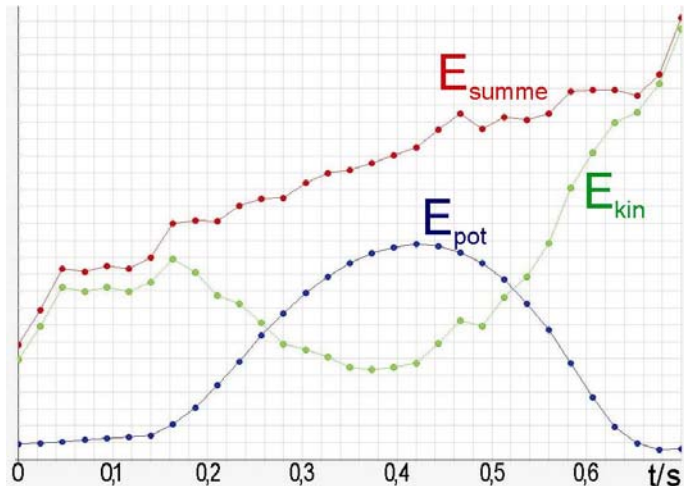


Abb. 11: Verlaufes der potentiellen Energie und kinetischen Energie sowie der Summe beider Energien beim Durchfahren eines Loopings mit Antrieb

7. Hinweise zur Beleuchtung

Aus der Fotografie ist bekannt: Bei kürzeren Verschlusszeiten oder kleineren Blenden wird mehr Licht für ein gut belichtetes Bild benötigt. Gleiches gilt auch bei Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Es steht eine maximale Belichtungszeit von $t = 1/\text{Framerate}$ zur Verfügung, daher muss das Licht gezielt und mit Bedacht eingesetzt werden.



Abb. 12: Beleuchtung eines Stoßversuches mit zwei selbstgebauten Scheinwerfern mit diffussem Licht

Dank der hohen Empfindlichkeit des Sensors und der ausreichend guten kamerainternen Nachbearbeitung des Videos reicht für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen inzwischen meist das natürliche Sonnenlicht aus. Nicht alle künstlichen Lichtquellen sind geeignet; so fallen bei Betrieb mit Wechselstrom sowohl LEDs als auch Leuchtstoffröhren weg, da diese „flackern“ und damit die automatische Videoanalyse erschwert oder gar unmöglich wird (eine manuelle Analyse ist aber möglich). Thermische Lichtquellen eignen sich am Besten, da diese (insbesondere bei hohen Stromstärken) extrem gleichmäßig und flackerfrei leuchten. Um die Analyse zu erleichtern, kann man außerdem weiches (diffuses) Licht einsetzen. Setzt man zwei Scheinwerfer mit diffussem Licht ein (vgl. Abb. 12), ist einerseits das Objekt gut ausgeleucht-

tet, andererseits wirft es keine störenden Schatten, da diese vom jeweils anderen Scheinwerfer überstrahlt werden. In manchen Fällen, wie beispielsweise bei dem Experiment mit dem Luftballon aus Abb. 1, ist ein einzelner gerichteter, seitlicher Lichteinfall mit nur einem Scheinwerfer gut geeignet [2]. Dann empfiehlt es sich auch, einen schwarzen Hintergrund zu wählen, damit die Tropfen deutlicher sichtbar werden.

Zur Beleuchtung muss es keine teure 5.000 W Studiobeleuchtung mit Softboxen sein. Bereits für ca. 60 € sind ähnliche Ergebnisse möglich. Es werden benötigt: zwei 500 W Bauscheinwerfer (am Besten mit Stativ) für je etwa 20 € aus dem Baumarkt, eine Diffusorfolie (ca. 70 x 70 cm²) aus dem Internet [10] für ebenfalls etwa 20 € (inkl. Porto) sowie etwas Stativmaterial aus der Physiksammlung. Für die Bauscheinwerfer reicht als Folie jeweils ein ca. 25 cm mal 25 cm großes Quadrat aus. Der Abstand zwischen Diffusorfolie und Bauscheinwerfer sollte wegen der Hitzeentwicklung ca. 15 - 20 cm betragen. In Abb. 13 ist ein solcher „umgebauter“ Bauscheinwerfer zu sehen. Abb. 12 zeigt den Einsatz von zwei Scheinwerfern in einem Stoßexperiment.



Abb. 13: Baustrahler mit vorgehängter Diffusorfolie

8. Fazit

Fast alle Jugendliche haben schon Erfahrungen mit Slow-Motion und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sammeln können. Sie werden sehr häufig in Kinofilmen, in der Werbung und in einigen (pseudo-) wissenschaftlichen Fernsehsendungen eingesetzt. Mit der Verwendung von Zeitlupenaufnahmen knüpft man an Alltagserfahrungen der Schülerinnen und Schüler an. Geschickt eingesetzt kann man mit Hochgeschwindigkeitsvideos die Schülerinnen und Schüler für ein Themengebiet motivieren oder es als Höhepunkt der Unterrichtseinheit aufnehmen und analysieren.

Bei schnell ablaufenden Vorgängen oder Vorgängen mit kurzen großen Beschleunigungen ist mit Hochgeschwindigkeitsvideos im Gegensatz zu normalen Videos eine quantitative Videoanalyse möglich, da wesentlich mehr Daten zu Verfügung stehen, wobei auf das Experiment selbst kein Einfluss durch Messapparaturen genommen wird. So können neue Vorgänge analysiert werden, bei denen die Videoanalyse bisher nur unzureichende Ergebnisse lieferte. Kann die Videoanalysesoftware Pfeile für physikalische Größen ins Video einzeichnen, sind auch qualitative Betrachtungen der Pfeile möglich und sinnvoll. Dies ermöglicht eine zweidimensionale Behandlung der Mechanik und die Betrachtung attraktiver schneller Bewegungen.

Anmerkung

Auf der Webseite der Zeitschrift können hier vorgestellte Videos mit den beschriebenen Einblendungen downgeloadet werden.

Literatur

- [1] <http://de.exilim.eu/de/exilimhighspeed/>
- [2] Michel, Maximilian (2010): Die Hochgeschwindigkeitskamera im Physikunterricht - Physik unter der (Zeit-) Lupe, Staatsexamensarbeit Universität Würzburg, <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Hochgeschwindigkeit.htm>
- [3] Waltner, C; Tobias, V.; Wiesner, H.; Hopf, M.; T. Wilhelm (2010): Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Dynamik in der Mittelstufe - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 59, Nr. 7
- [4] Wilhelm, Thomas (2006): Zweidimensionale Bewegungen - Vergleich von vier verschiedenen Möglichkeiten der Messwerterfassung und Evaluationsergebnisse eines Unterrichtseinsatzes – In: Nordmeier, V.; Oberländer, A. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Kassel 2006, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [5] Michel, Christine; Wilhelm, Thomas (2008): Lehrvideos mit dynamisch ikonischen Repräsentationen zu zweidimensionalen Bewegungen – In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin
- [6] Mück, Tobias; Wilhelm, Thomas (2009): Neue Möglichkeiten der Videoanalyse am Beispiel von Sportbewegungen – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58, Nr. 7, S. 19 v- 27
- [7] Wilhelm, Thomas; Ossau, Wolfgang (2009): Bierschaumzerfall – Modelle und Realität im Vergleich – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58, Nr. 8, S. 19-26
- [8] Benz, Michael; Wilhelm, Thomas (2008): measure Dynamics – Ein Quantensprung in der digitalen Videoanalyse – In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin
- [9] Müller, Rainer (2009): Klassische Mechanik: Vom Weitsprung zum Marsflug, de Gruyter, Berlin, 2009
- [10] www.fotobrenner.de

Anschrift der Verfasser:

Maximilian Michel, AR Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, maximilian.michel@physik.uni-wuerzburg.de, thomas.wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de, www.thomas-wilhelm.net