

Einsatzmöglichkeiten von Hochgeschwindigkeitskameras im Physikunterricht

Maximilian Michel, Thomas Wilhelm

Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Am Hubland, 97074 Würzburg

Maximilian.Michel@physik.uni-wuerzburg.de, Thomas.Wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de

Kurzfassung

Anfang 2008 wurde von Casio mit der EX F1 die erste auch für Schulen bezahlbare Hochgeschwindigkeitskamera vorgestellt. Weitere Modelle folgten kurz darauf, sodass inzwischen digitale Kameras mit Hochgeschwindigkeitsfunktion bereits ab etwa 150 € UVP erhältlich sind. Der Beitrag geht der Frage nach, welche neuen Möglichkeiten sich daraus für den Physikunterricht an der Schule ergeben.

Die durchgeführten und gefilmten Versuche schließen bei den Grenzen herkömmlicher Videokameras an und loten die Grenzen der neuen Möglichkeiten dieser kompakten Hochgeschwindigkeits-Technologie aus. Die Ergebnisse sind eine Mischung aus erstaunlichen Effekten und logischen, wenn auch unerwarteten Phänomenen. Die Hochgeschwindigkeitsvideos eignen sich in unterschiedlicher Weise als motivierender Einstieg, für qualitative Betrachtung von Phänomenen oder für eine quantitative Videoanalyse.

1. Die Hochgeschwindigkeitskamera in der Schule

Digitale Hochgeschwindigkeitskameras gibt es schon seit längerem und sie wurden vor allem im wissenschaftlichen Rahmen eingesetzt. Die „Pixelmanie“ und der High-Definition-Wahn der Kunden, 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. Unter einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme versteht man Aufnahmege-
schwindigkeiten von mehr als 30 Bildern pro Sekunde. 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 des Aufnahmebereiches kann sie fast ohne eine Einschränkung der Aufnahmezeit² 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. Aktuell³ gibt es vier weitere, verschiedene Kameratypen von Casio, die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit bis zu 1000 fps machen können. Die günstigsten Modelle werden für ca. 150 € neu 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, 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“-Modus⁴ und die kaum eingeschränkte Aufnahmezeit (beides auch für Hochgeschwindigkeitsvideos möglich) durchaus interessant. Beides wird bei „herkömmlichen“ Hochgeschwindigkeitskameras bisher nicht angeboten.

In einer Staatsexamensarbeit „Die Hochgeschwindigkeitskamera im Physikunterricht - Physik unter der (Zeit-) Lupe“ [1] wird untersucht, welche Möglichkeiten diese Kameras bieten und in welchen Bereichen sie den Physikunterricht unterstützen. Nicht zuletzt geht es auch darum, welche neuen Bereiche der Physik mit dieser Kamertechnologie nun im Physikunterricht behandelt werden könnten.

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

² Eingeschränkt wird die Aufnahmezeit lediglich durch die Akkulaufzeit bzw. der Kapazität der Speicherkarte.

³ Aktuell: Mai 2010

⁴ Die (oft entscheidende) Sekunde vor dem eigentlichen Start der Aufnahme wird mit gespeichert.

2. Das Licht und der Sensor -- wichtige Komponenten dieser Technologie

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. Damit die Spannungen der Pixel immer wieder hoch genug sind, ist ein entsprechend stärkerer Lichteinfall nötig. Das Ändern der Lichtempfindlichkeit des Sensors (ISO-Werte) hilft dagegen nur bedingt.

Dank der hohen Empfindlichkeit des Sensors und der ausreichend guten kamerainternen Nachbearbeitung des Videos reicht für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen inzwischen meist das natürliche Sonnenlicht aus. Es ist auch möglich, Experimente mit künstlichem Licht auszuleuchten. Bereits für unter Hundert Euro kann man ähnliche Lichtsituationen erzeugen, wie in den im Folgenden besprochenen Experimenten. Allgemein empfiehlt es sich, thermische Lichtquellen zu verwenden, da sich bei diesen die Wechselspannung nicht durch Flackern bemerkbar macht. Durch geschicktes Positionieren der Lichtquellen können die wichtigen Details einer Aufnahme gut herausgearbeitet werden (siehe [1, Kapitel „Licht ins Dunkle bringen ...“]).

CMOS-Sensoren können ohne mechanischen Verschluss betrieben werden, wodurch sie weniger verschleißanfällig werden. Es ergibt sich durch diese Auslesemethode aber eine neue Fehlerquelle, der sogenannte „Rolling-Shutter-Effekt“. Der dadurch entstehende Fehler ist allerdings in der Regel vernachlässigbar klein [1].

3. Quantitative Versuche mit der Hochgeschwindigkeitskamera

Bei vielen Experimenten in der Dynamik wird ein großer Aufwand betrieben, um Messwerte zu erhalten. Oftmals beeinflussen die Messwerterfassungssysteme dabei mehr oder weniger stark die Ergebnisse. Die Videoanalyse hat hier den entscheidenden Vorteil, 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. Bei anderen computergestützten Messwerterfassungssystemen kann die Abtastrate dagegen sehr hoch eingestellt werden.

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 Maxwell-Rad, Schwingungsanalysen, Loopingfahrten, schräge Würfe und Metallkugeln auf Glasplatten exakter und realistischer auswertbar. Die Vorteile von Hochgeschwindigkeitskameras werden an zwei

quantitativen Beispielen zur Videoanalyse besprochen. Insbesondere für die Messwerterfassung zweidimensionaler Bewegungen gibt es kaum Messalternativen zur Videoanalyse.

Nicht jeder Computer kann jedoch den „H264“-Codec dieser Kamera verarbeiten. Damit das Video auf jedem Computer (auch ohne diesen Codec) läuft, ist daher ein Recodieren mit einem älteren Codec notwendig. Bei den hier vorgestellten Videos wurde dazu das kostenlose Windows-kompatible Apple-Programm MPEG-Streamclip verwendet und so eine avi-Datei mit einem älteren Codec erzeugt.

Die Casio EX F1 nimmt die Videos mit 300, 600 bzw. 1200 fps auf, speichert sie allerdings so ab, dass sie mit 30 Bildern pro Sekunde ablaufen. Dadurch entsteht der Zeitlupeneffekt, der den Prozess 10-, 20- oder sogar 40-fach langsamer anzeigt, als er in Wirklichkeit war, was jedoch für eine quantitative Videoanalyse ein Problem ist. Mit dem kostenlosen Programm AVIFrate kann man jedoch die Framerate sehr einfach ändern, ohne dass sich an der Codierung des Videos etwas ändert.

3.1. Die Metallkugel auf der Glasplatte

Eine fallende und wieder hochspringende Kugel ist ein klassisches Experiment, welches dazu dient, die Erdbeschleunigung oder die Energieerhaltung zu zeigen. Typischerweise baut man Lichtschranken auf und richtet sie exakt aus. Aus der Strecke zwischen den beiden Lichtschranken und der dafür benötigten Zeit kann man dann mittels $a = \Delta x / (\Delta t)^2$ die Erdbeschleunigung messen. Anhand des Augenmaßes schätzt man oft die Energieerhaltung ab.

Dieses Experiment mittels Videoanalyse auszuwerten, bereitete bisher große Schwierigkeiten, da bei regulär 30 fps der Moment, in dem die Metallkugel die Glasplatte 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 Glasplatte hat. Glaubt man den daraus resultierenden Messwerten, so wird die Kugel scheinbar in der Luft weit vor der Glasplatte abgebremst und fliegt dann wieder nach oben.

Schon bei Hochgeschwindigkeitsvideos mit 300 fps sieht man deutlich, dass die Kugel die Glasplatte berührt. Durch die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen erhält man wesentlich mehr Informationen, denn in fest vorgegebenen sehr kurzen Intervallen wird der Ort und damit auch der Ortsunterschied zum vorangegangenen Bild erfasst. In dem durchgeführten Experiment mit einer Fallhöhe von ca. 50 cm sind 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 Vi-

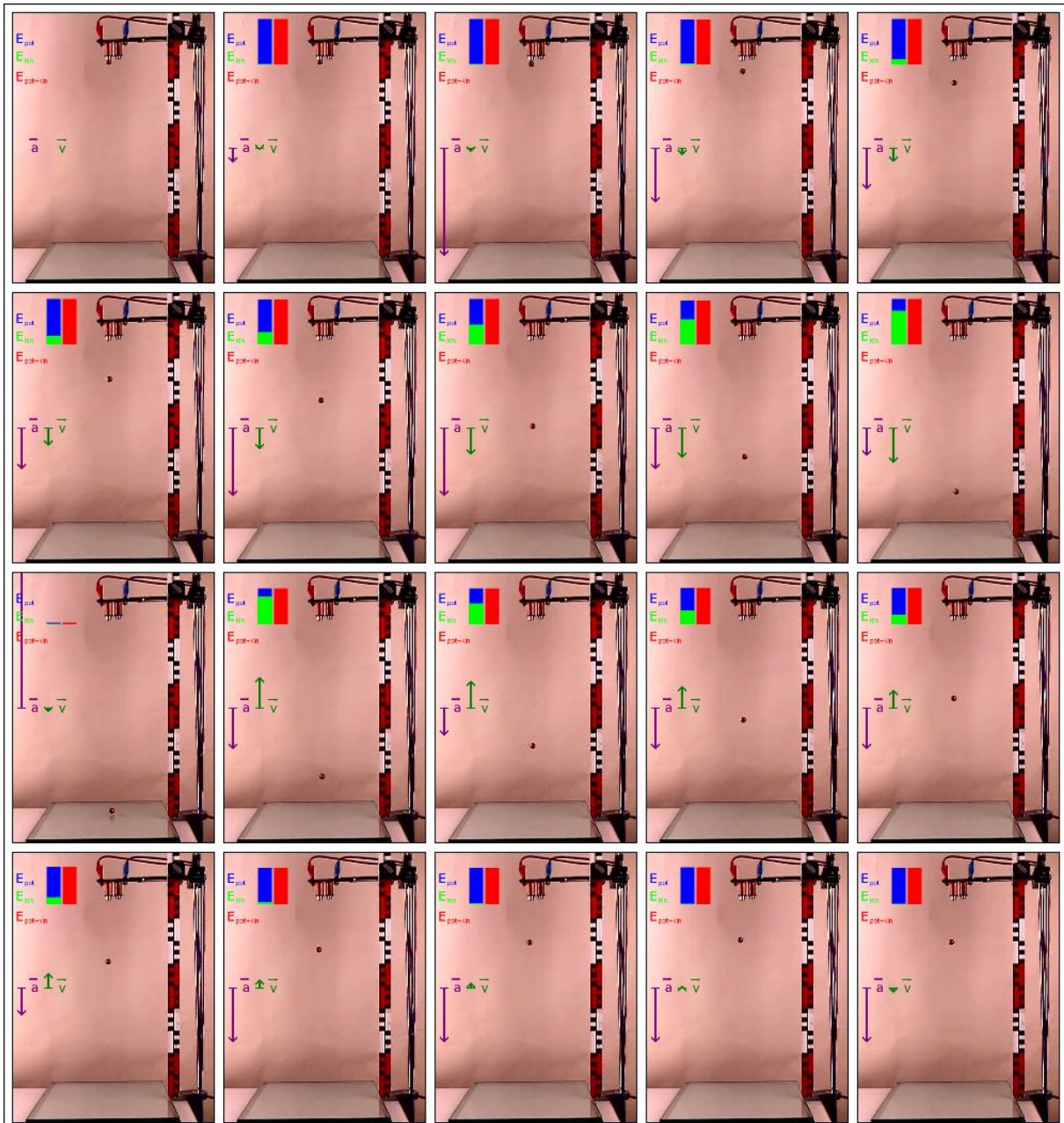


Abb. 1: Bildermatrix: Ausgabe jedes 5. Frames des Originalvideos mit Einblendung der Energien (links oben) und der wesentlichen kinetischen Größen (links mittig). Der Zeitabstand zwischen den Bildern ist $1/60 \text{ s} \approx 16,7 \text{ ms}$.

deoanalyseprogramm *measure dynamics*⁵ wählt man dazu nur die Einstellung „Schrittweite 3“ (siehe [2, 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.

Mittels der Tabellenkalkulation im verwendeten Videoanalyseprogramm *measure dynamics* werden neben den kinetischen Größen Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung auch die potentielle, die kinetische und die Summe beider Energien berechnet und visuell dargestellt. In der Schule ist die gleichzeitige

Betrachtung von kinetischen und energetischen Größen nicht sinnvoll, da die Schüler durch zu viele Informationen abgelenkt werden („cognitive overload“).

Die Bildermatrix in Abb. 1 zeigt einen kompletten Stoßvorgang der Metallkugel. Die Matrix besteht aus jedem fünften Frame des Originalvideos (300 fps). Das erste Bild stellt die Ausgangssituation dar und enthält noch keinerlei Messdaten. Gut erkennbar ist, dass im elften Bild eine starke Beschleunigung nach oben auf die Kugel wirkt und dass die potentielle und die kinetische Energie null sind.

3.1.1. Die Metallkugel – kinematisch betrachtet

Im Folgenden werden die Geschwindigkeiten und die Beschleunigungen der Kugel betrachtet. Die

⁵ Verwendet wird hier die Version 1.4 f build 377.

betrachteten Größen sind im Video ortsfest links mittig im Bild angeordnet [3, S. 3]. Die Geschwindigkeit ist als grüner, die Beschleunigung als violetter Pfeil dargestellt.

Im zweiten Bild hat die Kugel scheinbar eine Beschleunigung, obwohl sie sich noch nicht bewegt hat. Diese Fehldarstellung hängt mit der glättenden Berechnung der Beschleunigung im Videoanalyseprogramm *measure dynamics* 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 [4, 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 Werteberechnung einfließen und damit Geschwindigkeit und Beschleunigung auch von der „Zukunft“ beeinflusst werden.

Auf der Bildermatrix ist gut zu erkennen, dass die Beschleunigungen (mit Ausnahme des zweiten und elften Bildes) annähernd konstant bleiben. Berücksichtigt man, dass die ersten beiden sowie die letzten beiden Beschleunigungswerte um die Stoßvorgänge herum sowie die während des Stoßvorgangs selbst und die zu Beginn des Fallens der Kugel fehlerbehaftet sind, kann man mit den restlichen Messwerten die mittlere Erdbeschleunigung mittels Tabellenkalkulation berechnen lassen. Vor dem ersten Auftreffen auf die Glasplatte ergibt sich ein Mittelwert von $g = -9,89 \text{ m/s}^2$ bei einem Standardfehler von $\pm 1,09 \text{ m/s}^2$ und 24 in die Berechnung eingehende Werte. Bestimmt man den Mittelwert aller (korrekt berechneten) Beschleunigungswerte zwischen allen Stößen, erhält man $g = -9,33 \text{ m/s}^2$ bei einem Standardfehler von $\pm 0,39 \text{ m/s}^2$ (4 %) und insgesamt 132 Einzelmesswerten. Der ermittelte Wert weicht also nur um 5 % vom Literaturwert ab, jedoch liegt dieser nicht innerhalb des Messfehlers. Die Genauigkeit der Messung mit der Videoanalysesoftware hat so mit der Hochgeschwindigkeitskamera zugenommen und liegt fast im Bereich anderer Messwertersfassungssysteme.

Eine weitere Bereicherung stellt die realistischere Darstellung der Beschleunigung im Moment des Auftreffens dar (vgl. Abbildung 2). Bei 30 fps ist der Peak der Beschleunigung beim Aufschlag (bei $t = 0,333 \text{ s}$) wesentlich flacher (etwa 70 m/s^2 statt 250 m/s^2)⁶ und deutlich breiter als bei 100 fps. Die Hochgeschwindigkeitsvideoanalyse kommt damit der Wirklichkeit deutlich näher. Tatsächlich ist der

Moment des Auftreffens noch viel kürzer und damit die Beschleunigung in diesem Moment erheblich größer.

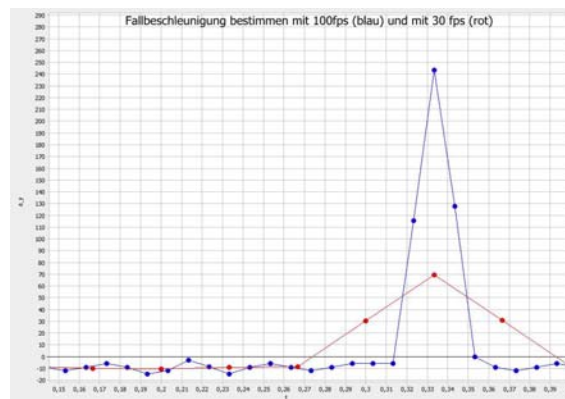


Abb. 2: Auftragung der Beschleunigung bei 100 fps (blau) und bei 30 fps (rot) gegen die Zeit.

3.1.2. Die Metallkugel – energetisch betrachtet

Ein wichtiges Thema in Lehrplänen ist das Thema „Energie“. So steht z.B. in Bayern die ganze achte Jahrgangsstufe des Gymnasiums unter dem Thema „Energie“. Den Schülerinnen und Schülern soll verdeutlicht werden, dass Energie niemals verloren geht, sondern reversibel oder irreversibel umgewandelt wird.

Mit dem Experiment der fallenden Metallkugel kann man diese umkehrbaren und nicht umkehrbaren Energieumwandlungen veranschaulichen. Vor dem ersten Stoß wird die potentielle Energie der Kugel (blaue Kurve in Abb. 3) in kinetische Energie (grüne Kurve) umgewandelt, wobei die Summe beider Energien (rote Kurve) gleich bleibt. Nach dem Stoßvorgang ist die potentielle Energie null, die gesamte Energie, welche die Kugel hat, steckt in der kinetische Energie. Gut erkennbar am Diagramm (Abb. 3) und in der Bildermatrix (Abb. 1) ist, dass die kinetische Energie während dem Fallen bzw. Hochsteigen reversibel in potentielle Energie und wieder zurück in kinetische Energie umgewandelt wird.

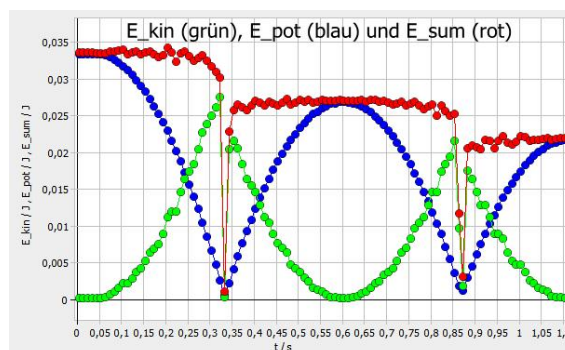


Abb. 3: Energiedarstellung der potentiellen (blau) und der kinetischen (grün) Energie, sowie der Summe beider Energien (rot).

Beim Auftreffen auf die Glasplatte ist die potentielle Energie vollständig in kinetische Energie umgewan-

⁶ Betrachtet man die Werte ohne die oben erwähnte Glättung, so werden die Unterschiede erheblich größer (140 m/s^2 bei 30 fps und 400 m/s^2 bei 100 fps), da weniger Frames in die Berechnung der Werte einfließen.

delt, doch diese „verschwindet“ scheinbar für den Moment des Auftreffens. Die Metallkugel und das Glas wirken beim Aufprall der Kugel wie eine extrem starke Feder. 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.

3.2. Der Looping mit der Darda-Bahn

Spielzeuge in den Physikunterricht mit einzubeziehen, fördert in der Regel das Interesse der Schülerinnen und Schüler an der Thematik. Die Darda-Bahn ist eines der Spielzeuge, mit denen zumindest einige Jungen in der Klasse in Kontakt gekommen sind. Im folgenden Abschnitt wird die Physik hinter der Fahrt eines federbetriebenen Darda-Autos durch einen Looping beschrieben.

3.2.1. Der Looping – kinematisch betrachtet

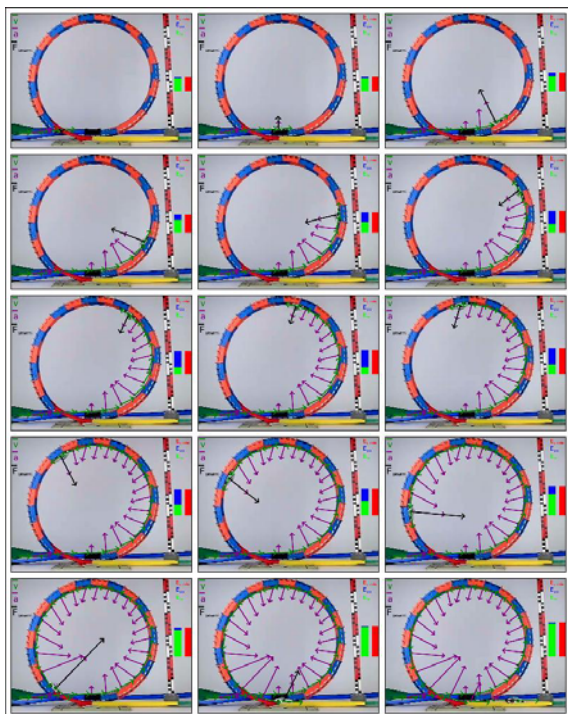


Abb. 4: Bildermatrix: Ein Darda-Auto durchfährt einen Looping. Abgebildet ist jeder 14. Frame des Originalvideos (der Zeitabstand zwischen ist damit $14/300 \text{ s} \approx 4,7 \text{ ms}$).

Das Video wurde wie im vorangegangenen Experiment mit 300 fps aufgenommen. Da hier eine zweidimensionale Bewegung vorliegt, werden die jeweiligen von der Videoanalysesoftware ermittelten und in den Bildern der Abb. 4 dargestellten Geschwindigkeiten (grüne Pfeile) und Beschleunigungen (violette Pfeile) an den zugehörigen Ort „gestempelt“ [5]. Zusätzlich ist die im jeweiligen Frame auf das Fahrzeug wirkende momentane Gesamtkraft (schwarzer Pfeil) eingezeichnet. Um ein Überschneiden der Vektorpfeile zu verhindern und damit

die Übersichtlichkeit zu bewahren, wird nur jeder siebte Frame in die Analyse mit einbezogen. Betrachtet werden zuerst wieder die kinetischen Größen.

In Abb. 5 ist gut erkennbar, dass die Geschwindigkeit auch beim Durchfahren des Loopings tangential zur Bahn verläuft. Dies stimmt mit der physikalischen Realität überein. Die Beschleunigung zeigt ins Innere des Kreises, welcher durch den Looping beschrieben wird. Fährt der Wagen in den Looping hinein, so wirkt auf ihn eine radiale Zwangskraft in Richtung des Kreismittelpunktes. Zusätzlich wirkt die Gewichtskraft entgegen der Fahrtrichtung, so dass sich das Tempo des Wagens verringert. Erkennbar ist dies an der Neigung des Beschleunigungsvektors *gegen* die Fahrtrichtung. Betrachtet man Abb. 5, so ist offensichtlich, dass noch eine andere Kraft im Spiel sein muss, da sich der Beschleunigungsvektor im oberen Bereich sichtlich *in* Fahrtrichtung neigt. Das Tempo des Wagens erhöht sich, noch bevor der Wagen den höchsten Punkt durchfahren hat. Das liegt sicher an der noch nicht ganz entspannten Feder des Fahrzeugs, die hier noch immer eine Kraft in Fahrtrichtung bewirkt.

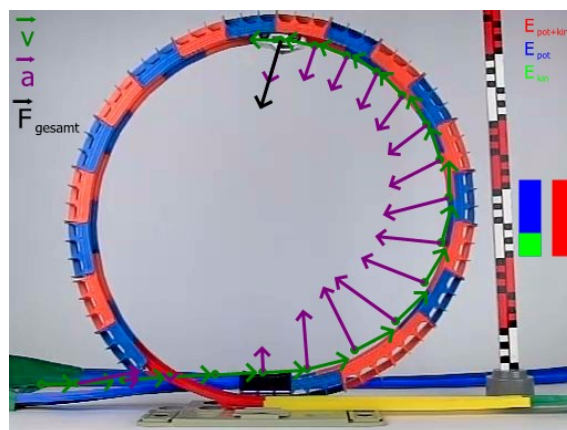


Abb. 5: Ein Darda-Auto durchfährt den höchsten Punkt des Loopings. Eingezeichnete Größen: Geschwindigkeit (grün), Beschleunigung (violett), Gesamtkraft (schwarz), kinetische Energie (hellgrün), potentielle Energie (blau) und Summe beider Energien (rot).

3.2.2. Der Looping – energetisch betrachtet

Anfangs hat das Fahrzeug fast keine potentielle, nur kinetische Energie (vgl. roter, grüner und blauer Balken rechts mittig im 1. Bild von Abb. 4). Beim Einfahren in den Looping wird der Anteil der potentiellen Energie in der Summe beider Energien größer. Selbst im höchsten Punkt ist die kinetische Energie nicht null. Nach Durchfahren dieses Punktes des Loopings wird die potentielle Energie des Fahrzeugs wieder in kinetische Energie umgewandelt.

Auffällig ist, dass die Summe beider Energien im Verlauf des Experimentes zunimmt (vgl. Bildermatrix Abb. 4). Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der Energien, ergeben sich die Graphen der Abb. 6.

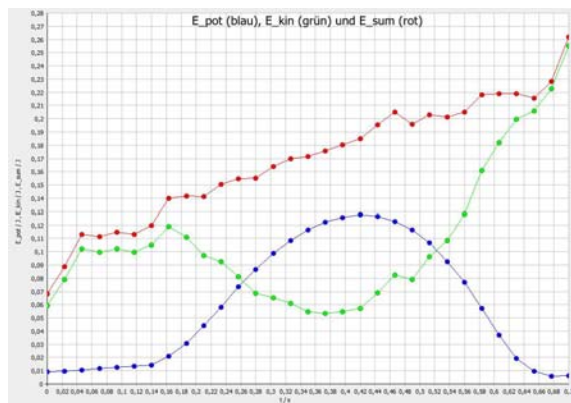


Abb. 6: Darstellung des zeitlichen Verlaufes der potentiellen Energie (blau), kinetischen Energie (grün) und der Summe beider Energien (rot) beim Durchfahren eines Darda-Loopings.

Die potentielle Energie (blauer Graph) nimmt beim Einfahren in den Looping zu und nach Durchfahren des höchsten Punktes ebenso wieder ab, bis das Ausgangsniveau wieder erreicht ist. Oberflächlich betrachtet verhält sich auch die kinetische Energie, wie man es erwarten würde. Sie nimmt ab, wenn das Fahrzeug in den Looping einfährt und nimmt wieder zu, wenn der höchste Punkt etwa erreicht wurde. Bei genauerer Betrachtung stellt man fest, dass das Minimum der kinetischen Energie zeitlich vor dem Maximum der potentiellen Energie liegt und die kinetische Energie nach Durchlaufen des höchsten Punktes größer wird als vor dem Looping.

Die Abbildung zeigt deutlich, dass die Summe beider Energien im Verlauf des Experimentes annähernd linear zunimmt (roter Graph). Es gibt eine Energie in diesem System, die mit der Videoanalyse nicht erfasst wird bzw. erfasst werden kann.

Die Energiezunahme liegt am Aufbau und der Funktionsweise von Darda-Autos. Darda-Autos werden durch einen Federmotor angetrieben. 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. Die versteckte Energie steckt also in der Spannenergie der Feder.

4. Qualitative Experimente

Die günstigen Hochgeschwindigkeitskameras eröffnen der Schulphysik auch Themengebiete, welche vorher kaum vorstellbar waren, oder ermöglichen der Lehre der Hochschulphysik neue Zugänge. Man kann beispielsweise das Verhalten verschiedener Lichtquellen bei 50 Hz Wechselspannung, das Vermischen zweier Flüssigkeiten oder auch das Aufstehen eines Stehaufkreisels in Zeitlupe betrachten, ohne den Ablauf des Experimentes zu stören oder in irgendeiner Art zu beeinflussen. Andere an die Alltagserfahrung der Schülerinnen und Schüler anknüpfende Experimente sind zum Beispiel das Verhalten eines fallenden Wassertropfens auf einer ruhenden Wasseroberfläche oder das Platzen eines wasserge-

füllten Luftballons. Die beiden letztgenannten werden hier mit ihren physikalischen Hintergründen besprochen.

4.1. Der Wassertropfen

Trifft ein Wassertropfen mit seinem nach unten gerichteten Impuls auf eine ruhende Wasseroberfläche, so übt dieser eine Kraft auf die Wasseroberfläche aus. Da die Wasseroberfläche eine gleich große Kraft auf den Wassertropfen ausübt, sollte dieser eigentlich zerplatzen. Die Oberflächenspannung des Wassers verhindert das Zerplatzen des Tropfens und hat die Ausbildung der Wasserkrone zur Folge (vgl. erstes und zweites Bild in Abb. 7).

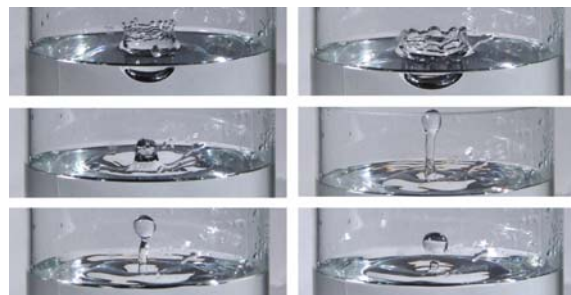


Abb. 7: Bilderserie: Ein Wassertropfen fällt in ein Wasserglas (Aufnahmegeschwindigkeit 60 fps, es wurden beim Jet (zwischen drittem und viertem Bild) Bilder ausgelassen)

In Abb. 7 ist gut erkennbar, dass der Impulsübertrag vom Wassertropfen auf die Wasseroberfläche zur Ausbildung einer kugelförmigen Luftblase im Wasser führt. Der Kraftstoß des Tropfens wirkt senkrecht auf die Wasseroberfläche und lenkt die Wassermoleküle der Oberfläche aus. Die Oberflächenspannung führt zu einer radial von der Aufschlagstelle wegweisenden Kraft, die wiederum die Entstehung der Luftkugel erklärt.

Die Gewichtskraft und die Oberflächenspannung üben eine rücktreibende Kraft auf die ausgelenkten Wassermoleküle aus, die Luftblase kollabiert. Beim rückströmenden Wasser heben sich die parallel zur ursprünglichen Wasseroberfläche wirkenden Anteile der Kräfte auf, übrig bleiben die senkrechten Anteile der Kräfte. Diese addieren sich und es entsteht der Wasserjet, an dessen Spitze sich eine Wasserkugel bildet (vgl. Abb. 7, Bilder drei, vier und fünf).

Der Jet verjüngt sich unterhalb dieser Kugel und es kalben sich ein oder sogar mehrere Wassertropfen ab, wenn die Energie des ursprünglichen Tropfens groß genug war. Grund hierfür ist, dass die Oberflächenspannung des Wassers den Jet zurückzieht, aber die Kugel zu träge ist, dieser Bewegung zu folgen. In seltenen Fällen kommt es vor, dass ein Wassertropfen auf der Wasseroberfläche tanzt, bevor er von der Wasseroberfläche verschluckt wird.

Das Kollabieren des Tropfens und der resultierende Jet haben eine Auslenkung der Wasseroberfläche verursacht. Die Bindungskräfte zwischen den Wassermolekülen üben wie bei einer Feder rücktreiben-

de Kräfte auf die ausgelenkten Moleküle aus. Da die Dämpfung des Wassers nicht kritisch ist, resultiert eine sich ausbreitende Kreiswelle um die Stelle, in die der Wassertropfen aufgeschlagen ist.

Bei diesem Experiment kann man verschiedene Vorteile der Kamera nutzen. Einerseits liefert die Kamera bei 600 fps, was einer 20-fachen Zeitlupe entspricht, ein genügend langsam ablaufendes Video, um die verschiedenen physikalischen Details des Vorganges zu erklären. Andererseits kann man auch nutzen, dass die Kamera eine Sekunde lang bis zu 60 Fotos bei voller Auflösung aufnimmt, um dann eine Bildermatrix zu erstellen (vgl. Abb. 7). Beides eröffnet viele weitere Einsatzmöglichkeiten im Physikunterricht bei der qualitativen Beschreibung des Vorganges.

4.2. Der platzende, wassergefüllte Luftballon

Das Platzen eines Luftballons geht so schnell vonstatten, dass die höchste Framerate eingestellt werden muss, um ausreichend viele Bilder für die Auswertung zu erhalten. In Abb. 8 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 aufeinanderfolgende 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.



Abb. 8: Zeitlicher Verlauf eines platzenden Luftballons.

An jedem Punkt der Ballonoberfläche wirken tangential zur Oberfläche Zugkräfte, die sich gegenseitig kompensieren. Sticht man in die Oberfläche ein (vgl. 2. Bild, Abb. 8), so fallen um die Einstichstelle die jeweils entgegen gerichteten Kräfte weg und die Störung breitet sich aus (3. und 4. Bild Abb. 8). Da sich die Gummihaut des Ballons schlagartig zusammenzieht, führt die Adhäsion zwischen Ballonoberfläche und Wasser zur Ausbildung des feinen Wassernebels (Gischt), da durch die Adhäsion einzelne

Wassermoleküle herausgerissen werden. Die einzelnen Wassermoleküle finden sich nach und nach zu kleineren und größeren Tropfen zusammen. Außerdem bildet die große Wassertraube eine eigene Wasseroberfläche aus. Gut erkennbar ist auf allen Bildern, dass die Grundform des Wasserballons aufgrund der Trägheit des Wassers erhalten bleibt.

Die größeren Wassertropfen links oben im letzten Bild der Matrix erklären sich bei genauerer Betrachtung des oberen Abschlusses des Ballons in der Bilderserie von Abb. 8. Die Wassertraube ist an dieser Stelle am Längsten mit der Gummihaut bedeckt. Das schnelle Zusammenziehen der Ballonoberfläche führt dazu, dass die Gummihaut links oben in den Tropfen hinein peitscht und dadurch Wassertropfen herausgeschlagen werden.

5. Nutzen für den Physikunterricht

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 oder damit eine Unterrichtseinheit abschließen oder von einem Themengebiet in ein anderes überleiten.

Mit der Hochgeschwindigkeitskamera werden physikalische Vorgänge sichtbar, die bislang dem schulischen Physikunterricht verborgen geblieben sind. Experimente können aufgenommen und verlangsamt betrachtet bzw. analysiert werden. Dadurch können neue Themenbereiche und andere Herangehensweisen Einzug in die Schulphysik halten und es besteht nun auch die Möglichkeit, schnell ablaufende physikalische Phänomene im Alltag verlangsamt ablaufen zu lassen.

Bei schnell ablaufenden Vorgängen oder Vorgängen mit kurzen großen Beschleunigungen ist außerdem 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.

6. Literatur

- [1] Michel, Maximilian (2010): Die Hochgeschwindigkeitskamera im Physikunterricht - Physik unter der (Zeit-) Lupe, Staatsexamens-

arbeit Universität Würzburg,
<http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Hochgeschwindigkeit.htm>

- [2] Wilhelm, Thomas; Ossau, Wolfgang (2009): Bierschaumzerfall – Modelle und Realität im Vergleich – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58, Nr. 8
- [3] 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
- [4] Mück, Tobias; Wilhelm, Thomas (2009): Neue Möglichkeiten der Videoanalyse am Beispiel von Sportbewegungen – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58, Nr. 7
- [5] Michel, Christine; Wilhelm, Thomas (2008): Lehrvideos mit dynamisch ikonischen Repräsentationen zu zweidimensionalen Bewegungen – In: In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008,

Lehmanns Media, Berlin, 2008, ISBN 978-3-86541-317-8

7. Dem Beitrag beigefügte Medien

Dem Beitrag sind die folgenden Videos beigefügt:

- a) Beispielvideo 1: Metallkugel, die auf einer Glasplatte aufspringt mit Darstellung der kinematischen Größen und der Energien (ursprünglich gefilmt mit 300 fps, hier Darstellung in Echtzeit mit 30 fps)
- b) Beispielvideo 2: Spielzeugauto im Looping (ursprünglich gefilmt mit 300 fps, hier Darstellung in Echtzeit mit 30 fps)
- c) Beispielvideo 3: Ins Wasser fallender Wassertropfen (gefilmt mit 600 fps, hier Darstellung in 20-facher Zeitlupe mit 30 fps)
- d) Beispielvideo 4: Der platzende, wassergefüllte Luftballon(gefilmt mit 1200 fps, hier Darstellung in 40-facher Zeitlupe mit 30 fps)