

Die folgenden Original-Seiten der Zeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule“ wurden mit expliziter Genehmigung des Aulis-Verlages (Dr. Brigitte Abel) und des Friedrich-Verlages (Hubertus Rollfing) auf die Webseite www.thomas-wilhelm.net gestellt. Vielen Dank für die Erlaubnis.

Die exakte Quellenangabe des Zeitschriftenartikels ist:

SCHÜTTLER, M.; WILHELM, T.

Bewegungsanalyse im Freizeitpark

Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 60, Nr. 6, 2011, S. 18 - 24

Bewegungsanalyse im Freizeitpark

M. Schüttler u. Th. Wilhelm

1. Motivation

Die Begeisterung von Schülern für den Physikunterricht lässt im Laufe der Schuljahre bekannterweise nach. Dagegen erfreuen sich Vergnügungsparks und Volksfeste immer größerer Beliebtheit und können im Mechanik-Unterricht als Lernanlass genutzt werden. Als Lernanlass dienen hier einige der Fahr-Attraktionen des Europa-Parks in Rust, welche den Schüler verdeutlichen sollen, dass sie auch in ihrer Freizeit mit physikalischen Problemen und Phänomenen konfrontiert werden können. Es wurden Messungen [1] mit Beschleunigungssensoren [2], GPS-Sensoren [3] sowie Videoanalysen [4] durchgeführt.

Eine sicherlich aufwendige Möglichkeit sind Exkursionen zu kooperierenden Vergnügungsparks oder Schaustellern auf Volksfesten. Hier können die Schüler selbst Messungen durchführen und Videos drehen, um diese später im Unterricht zu analysieren und auszuwerten. Jedoch kann es passieren, dass die Schüler dabei ihre Aufmerksamkeit auf die falschen Dinge fokussieren. Selbst wenn eine Exkursion nicht möglich ist, kann mit bereits

aufgenommenen Messungen (siehe Abschnitt 3) Physik an interessanten Beispielen betrachtet werden. Neben der qualitativen Behandlung der Größen und ihrer Richtungen kann die Analyse von Diagrammen geübt werden; aber auch der Umgang mit Medien und die Nutzung des Computers sind relevante Ziele.

2. Messmöglichkeiten

Für die Messwerterfassung im Freizeitpark ist es hilfreich, wenn man möglichst kleine Erfassungsgeräte hat und man die Daten vor Ort ohne Computer aufzeichnen kann, die dann später im Physikraum analysiert werden. Zur Messwerterfassung sind prinzipiell die Videoanalyse [4], die GPS-Messung [3] und Beschleunigungssensoren [2] denkbar.

Bei der Videoanalyse und der GPS-Messung wird der Ort des betrachteten Körpers erfasst und daraus durch Differenzenquotienten die Geschwindigkeit und die Geschwindigkeitsänderung bzw. Beschleunigung berechnet. Damit erhält man die Beschleunigung bzw. die resultierende Gesamtkraft, wie sie ein objektiver Beobach-

ter im ruhenden Bezugssystem sieht, was didaktisch sinnvoll ist, und kann so Zusammenhänge zwischen der Geschwindigkeitsänderung und der einwirkenden Kraft herstellen [5].

Die GPS-Messung hat allerdings nicht nur den Nachteil großer Ortsungenauigkeit, sondern vor allem den Nachteil, dass die meisten Sensoren nur in für dieses Thema zu großen Zeitabständen den Ort erfassen. Damit eignet sie sich nur bedingt und nur für Bewegungen mit großen Ortsänderungen wie in großen Achterbahnen. Außerdem gibt es z.T. das Problem, dass nicht durchgehend eine quasioptische Sichtverbindung zum Satelliten besteht.

Die Videoanalyse ist durch preisgünstige Videokameras und Hochgeschwindigkeitskameras [6] dagegen auch für schnelle und sehr schnelle Bewegungen geeignet. Wenn man aber aus größeren Entfernungen filmt, braucht man statt Hochgeschwindigkeitsvideos eher Videos mit kleinen Frameraten bzw. darf nur jedes n-te Bild des Videos zur Analyse nutzen, damit die Ortsänderungen groß genug sind und man noch gute Beschleunigungswerte erhält. Die Videoanalyse hat jedoch den Nachteil, dass die Bewegung zweidimensional in einer Ebene senkrecht zum Beobachter stattfinden muss. Der Vorteil liegt dagegen darin, dass es die Möglichkeit gibt, die Messwerte nicht nur mit Diagrammen, sondern auch mit anderen Darstellungen wie ins Video eingblendete Beschleunigungsvektoren oder Energiesäulen darzustellen.

Bei einem mitgeführten 3-D-Beschleunigungssensor werden nicht die drei Beschleunigungskomponenten in die drei ruhenden Raumrichtungen gemessen, sondern drei Beschleunigungskomponenten aus Sicht des Beobachters (senkrecht, seitlich, vorne), d.h. das Koordinatensystem dreht sich mit dem Beobachter, was die Interpretation stark erschweren kann. Einfacher ist es, wenn der Beobachter nicht gedreht wird wie bei einem fliegenden Teppich (siehe Abschnitt 3.1), denn dann werden doch die Beschleunigungskomponenten in die drei ruhenden Raumrichtungen gemessen. Bei einer zweidimensionalen Kreisfahrt ist es außerdem möglich und sinnvoll, den Sensor so zu halten, dass eine Komponente die Tangentialbeschleu-

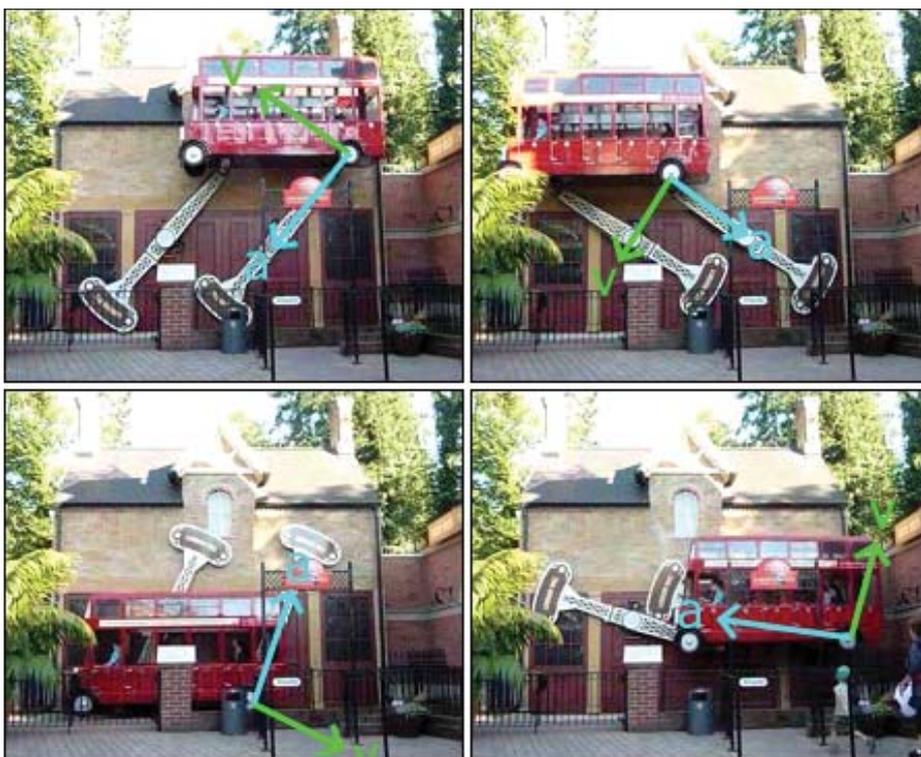


Abb. 1: Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren beim London Bus bei gleichmäßiger Kreisbewegung (Beschleunigungsvektor hellblau, damit er sich farblich gut abhebt)

nigung und eine Komponente die Radialbeschleunigung ist [2].

Ein mitgeführter Beschleunigungssensor registriert stets die Auslenkung einer seismischen Masse, was als Beschleunigung bzw. Kraft interpretiert wird. Das führt zu zwei Problemen, denen man sich bewusst sein muss.

Das erste Problem betrifft die Richtung der gemessenen Größe. Bei einer (horizontalen) Kreisbewegung wird die seismische Masse nach außen ausgelenkt, d. h. es wird die Scheinkraft gemessen, die der mitbewegte Beobachter zu spüren glaubt, bzw. die Zentrifugalbeschleunigung, die der mitbewegte Beobachter aus seiner subjektiven Sicht misst. Interessiert man sich dagegen sinnvollerweise nur für die für diese Bewegung nötige Zentripetalkraft und die objektive Beschleunigung, muss man nur das Vorzeichen ändern bzw. das Koordinatensystem umdrehen.

Das zweite Problem betrifft den Nullpunkt. Wenn der Sensor ruht, wird die seismische Masse durch die Gravitationskraft nach unten ausgelenkt und die „Erdbeschleunigung“ registriert, obwohl der Sensor wegen der zusätzlich wirkenden, gleich großen Zwangskraft nicht beschleunigt wird. Nimmt die Zwangskraft in dieser Richtung zu oder ab, führt dies zu einer Zu- oder Abnahme der gemessenen „Beschleunigung“. Bei der beschleunigten Bewegung des freien Falls wird so Null gemessen. Bei Bewegungen, bei denen die Hochachse des Sensor während der Bewegung nicht verkippt wird, wie bei einem fliegenden Teppich (siehe Abschnitt 3.1) oder einem ebenen Karussell, kann und sollte man deshalb vor Beginn der Bewegung in der Ruhe den Tara-Knopf drücken und somit alle Beschleunigungskomponenten auf Null setzen; nur dann wird die tatsächliche Beschleunigung gemessen. Bei Bewegungen, bei denen sich der Sensor im Raum dreht, wird dagegen die Erdbeschleunigung immer wieder in anderen Richtungen gemessen, eine Nullsetzung ist hier nicht möglich.

3. Beispiele für Videoanalysen

Im manchen Lehrplänen wird explizit der Umgang mit Videoanalyseprogrammen erwähnt. Bei geeigneten Attraktionen bietet eine Videoanalyse sicherlich die umfangreichsten Möglichkeiten, die Bewegung zu untersuchen (u. a. über die Darstellung von Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren). Ein zusätzlicher Vorteil von Videoanalysen ist die Betrachtung der Bewegung aus Sicht eines außenstehenden Beobachters.

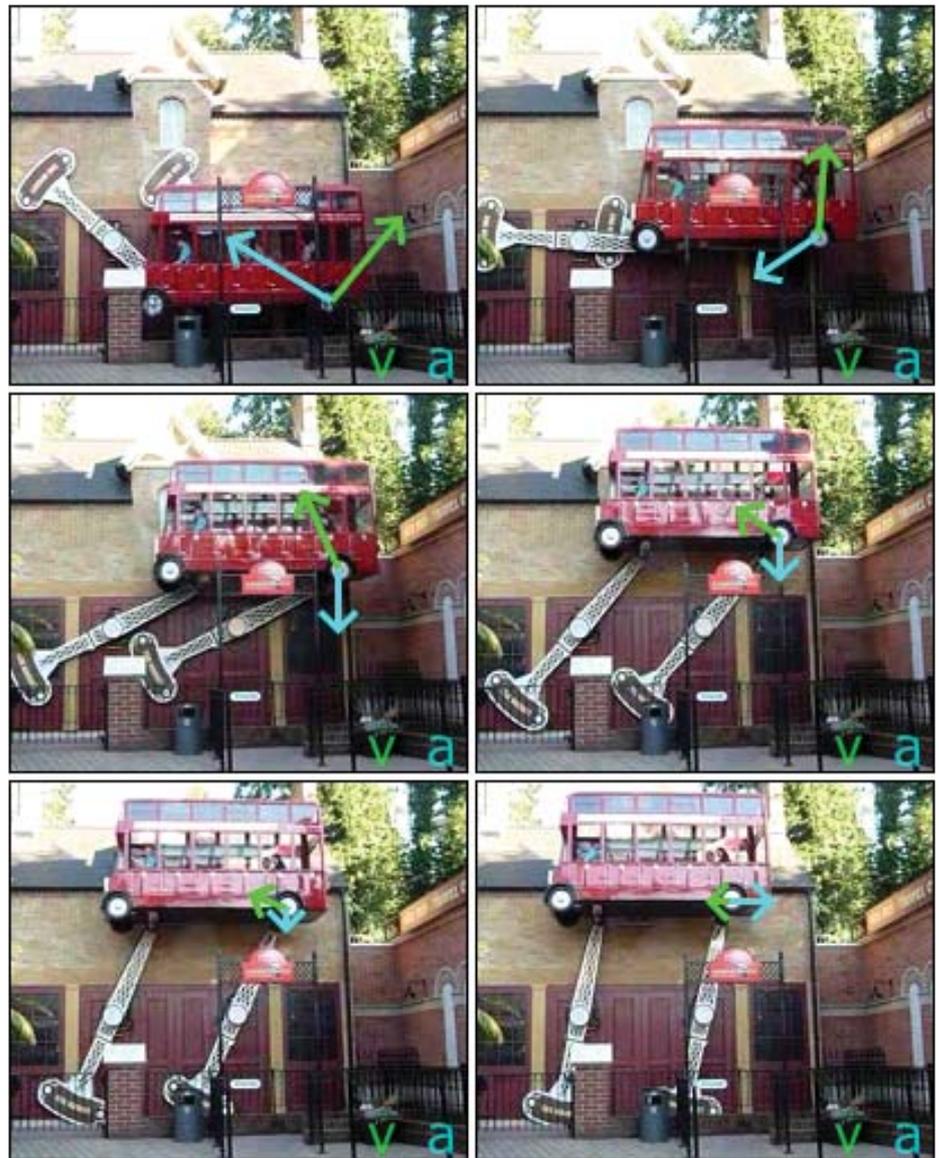


Abb. 2: Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren beim London Bus beim Abbremsvorgang

3.1 Videoanalyse einer Kreisbewegung

Überschlag-Schiffschaukeln, bei denen der Passagier immer mit dem Kopf nach oben sitzt, werden als „Fliegender Teppich“ bezeichnet. Der „London Bus“ ist ein solcher Fliegender Teppich, der eine Kreisbewegung vollführt. Bei der Videoanalyse mit der Videoanalysesoftware „measure dynamics“ [7] wurde als Objekt der hinteren Reifen des Busses gewählt, der im Video immer gut sichtbar ist. Der Ursprung des Koordinatensystems wurde dabei sinnvollerweise in den Mittelpunkt der Kreisbewegung gelegt, die dieser Reifen vollführt. Bei der Analyse wurde eine Schrittweite von 5 gewählt, d. h. nur jeder fünfte Frame wird genutzt (gefilmt mit 30 fps).

In Abbildung 1 sind die entstandenen Vektoren für Geschwindigkeit und Beschleunigung zu verschiedenen Zeitpunkten der Kreisbewegung bei konstanter Winkelgeschwindigkeit zu sehen ($\Delta t = 1,67$ s, jeder 50.-te Frame). Der Geschwindigkeits-

vektor zeigt immer tangential, der Beschleunigungsvektor immer radial nach innen.

Eine weitere Veranschaulichung der Vektoren ist in Abbildung 2 zu sehen. Es wurde eine Folge von Bildern ($\Delta t = 2/3$ s, jeder 20.-te Frame) gewählt, die den Abbremsvorgang des London Bus zeigen. Im ersten Bild sind die Vektoren noch etwa gleich lang wie diejenigen aus Abbildung 1. In den folgenden Bildern kann man nicht nur erkennen, dass die Vektoren kürzer werden, sondern auch, dass die Beschleunigungsvektoren nicht mehr zum Mittelpunkt des Kreises zeigt: Der Winkel zwischen den beiden Vektoren wird größer.

Der Bus wird auf der Kreisbahn immer langsamer, der Geschwindigkeitsvektor wird also immer kürzer. Ab einem gewissen Zeitpunkt werden selbst bei einer großen Schrittweite die Abstände aufeinander folgender Messpunkte so klein, dass die Ungenauigkeiten beim Markieren wie-

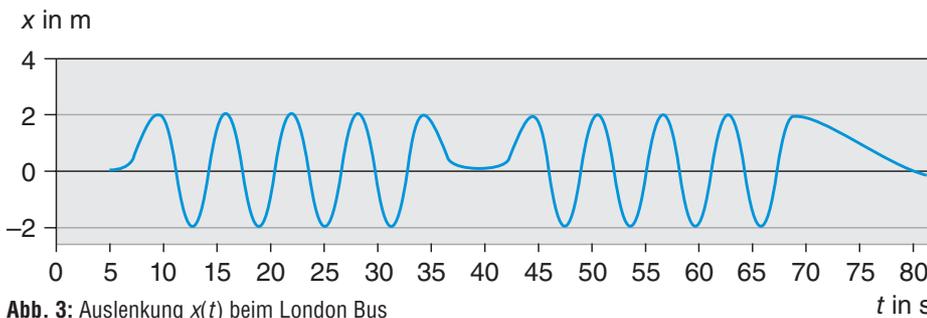


Abb. 3: Auslenkung $x(t)$ beim London Bus

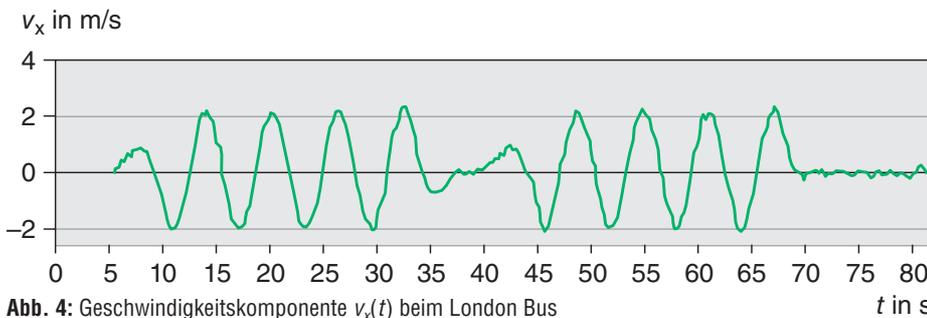


Abb. 4: Geschwindigkeitskomponente $v_x(t)$ beim London Bus

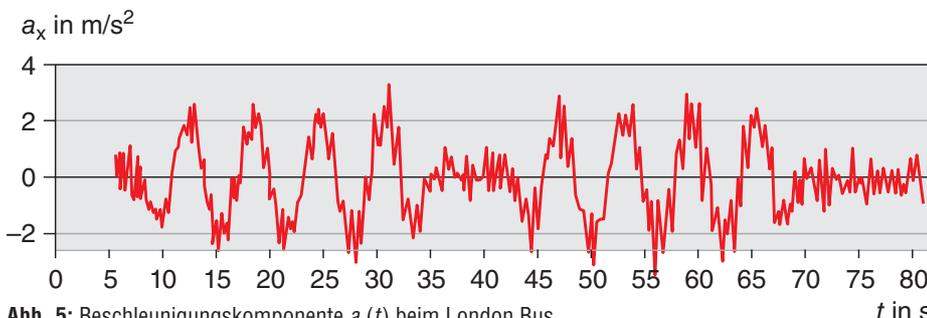


Abb. 5: Beschleunigungskomponente $a_x(t)$ beim London Bus

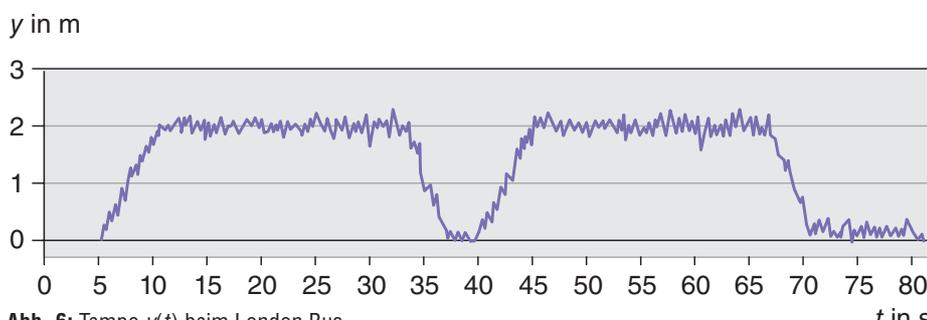
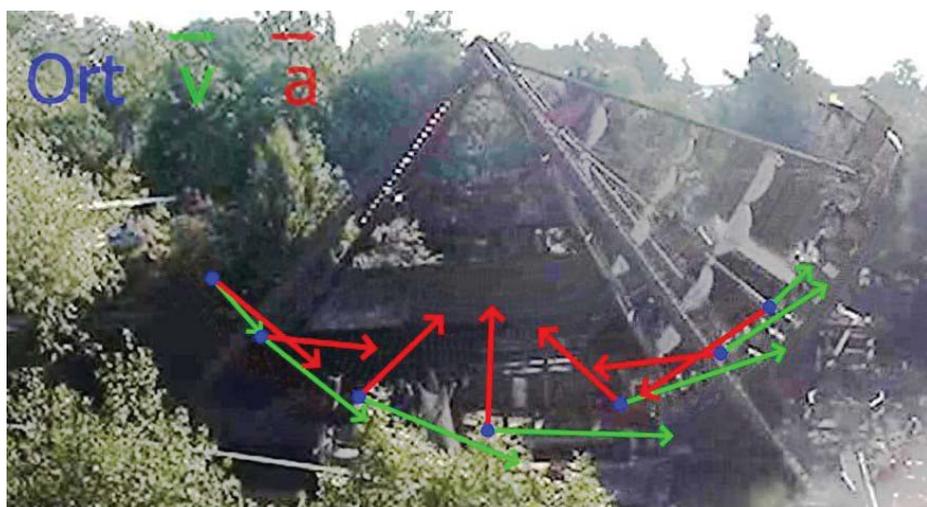


Abb. 6: Tempo $v(t)$ beim London Bus

Abb. 7: Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren bei der Vindjammer (halbe Periode)



der mehr Einfluss auf die Vektoren nehmen. Die Fehler der Ortsmarkierung werden durch Differenzenbildung bei Geschwindigkeit und Beschleunigung größer (siehe hierzu Abb. 3 bis Abb. 5).

Anhand der Schaubilder der einzelnen Komponenten kann man erkennen, dass die Kreisbewegung sowohl vorwärts als auch rückwärts vollführt wird. Trägt man den zeitlichen Verlauf des Geschwindigkeitsbetrags auf (siehe Abb. 6), so bestätigt sich die obige Behauptung: Der London Bus fährt tatsächlich die meiste Zeit mit konstanter Winkelgeschwindigkeit.

3.2 Videoanalyse einer Schiffsschaukel

Bei dem Fahrgeschäft Vindjammer handelt es sich um eine Schiffsschaukel, die an einer Stahlkonstruktion aufgehängt ist. Der Antrieb geschieht mit einem Reifen unterhalb des Schiffsrumpfes. Die Bewegung der Schiffsschaukel kann als Pendelbewegung oder Teil einer Kreisbewegung mit nicht konstantem Geschwindigkeitsbetrag angesehen werden. In Abbildung 7 ist die Geschwindigkeit und Beschleunigung für eine halbe Periode eingezeichnet.

In Abbildung 8 ist der zeitliche Verlauf der vertikalen Koordinate des Objektes dargestellt. Man kann erkennen, dass die Auslenkung nicht symmetrisch ist. Mögliche Gründe hierfür sind eine ungleiche Gewichtsverteilung (d.h. der betrachtete Punkt war nicht der Schwerpunkt) oder ein asymmetrischer Antrieb durch den Reifen unterhalb des Schiffes. Da die Skalierung im Video nur geschätzt wurde, ist die Größe der y -Werte nicht aussagekräftig.

Aus Höhe und Geschwindigkeit können potentielle und kinetische Energien berechnet werden (in Abb. 9 über die Zeit aufgetragen). Wegen der Unsicherheit der Absolutwerte der Energiewerte wurde auf die Achsen verzichtet. In dieser Abbildung kann man trotzdem den Wechsel der Energieformen erkennen: In den Umkehrpunkten verschwindet die Geschwindigkeit und damit auch die kinetische Energie. Dafür erreicht die potentielle Energie an diesen Stellen aufgrund der Maxima der y -Werte auch ihre Maxima. Die alternierende Höhe dieser Maxima resultiert aus der Asymmetrie der Pendelbewegung. Durchläuft die Schaukel den Scheitelpunkt der Bewegung, so sind Geschwindigkeitsbetrag und kinetische Energie maximal. Der Scheitelpunkt ist am tiefsten Ort der Bewegung, weshalb die potentielle Energie an diesen Punkten auch minimal ist.

Die gesamte mechanische Energie steigt in der ersten Hälfte der Messung an, da der Schiffsschaukel über den Reifen

Energie zugeführt wird. Das Abbremsen in der zweiten Hälfte der Fahrt führt zu einer Verringerung der mechanischen Energie.

3.3 Videoanalyse beim einer geradlinigen Beschleunigung

Die Achterbahn Blue Fire ist ein so genannter Launched Coaster. „Als Launched Coaster (dt. Katapult-Achterbahn oder Abschuss-Achterbahn) bezeichnet man eine Achterbahn, bei der der Zug nicht einen Hügel (Lifthill) hinaufbeför-

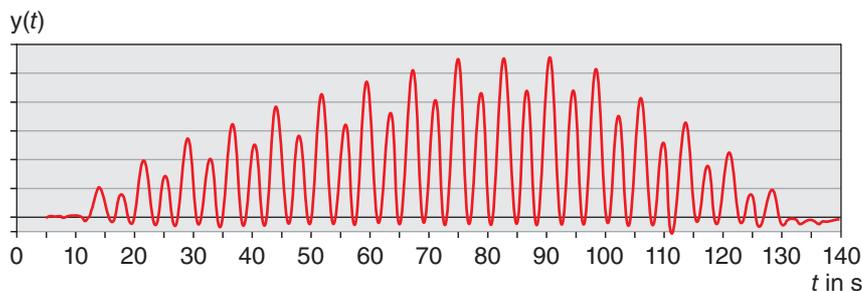


Abb. 8: Höhe $y(t)$ beim Vindjammer

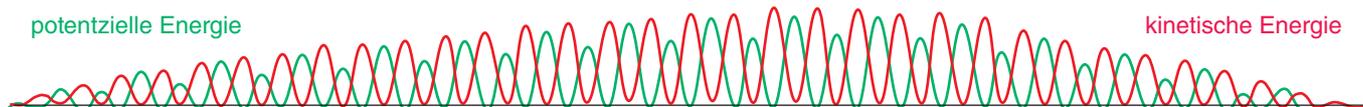
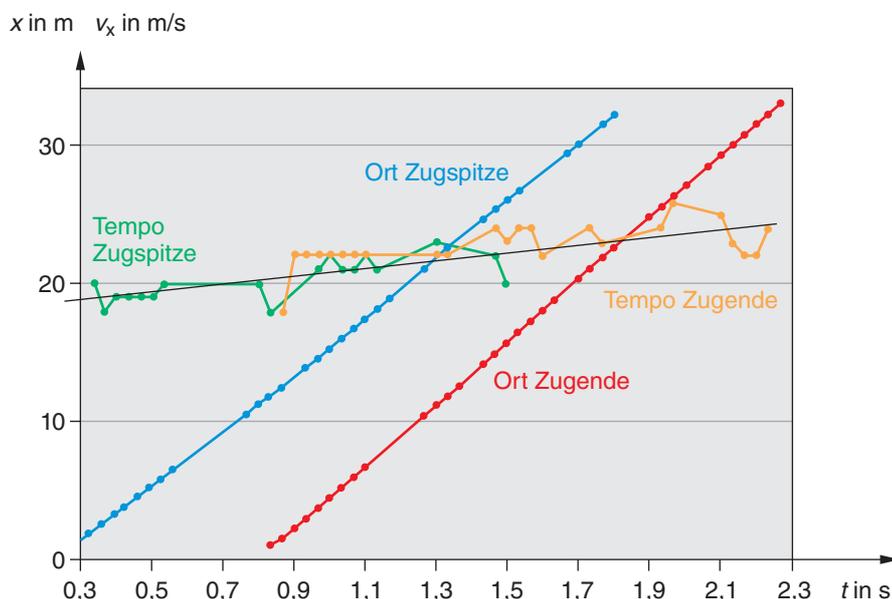


Abb. 9: Mechanische Energie beim Vindjammer



Abb. 10: Beschleunigungsstrecke der Blue Fire (markiert ist das Zugende soweit sichtbar)

Abb. 11: Ort und Tempo bei der Beschleunigungsstrecke der Blue Fire



dert wird, um dann durch Lageenergie zu beschleunigen, sondern auf einer ebenen geraden Strecke katapultartig beschleunigt wird.“ [8] Diese Beschleunigungsstrecke wurde aus größerer Entfernung und etwa orthogonal zur Bewegung aufgenommen.

Hierbei trat das Problem auf, dass nur eine eingeschränkte Sicht auf das Objekt möglich war. In einigen Frames des Videoclips ist das Objekt nicht im Sichtfeld, was unproblematisch ist, solange die Zeiträume klein genug bleiben. In Abbildung 10 erkennt man das Fehlen der Messpunkte, wenn das verfolgte Zugende hinter einem Felsen verschwindet. In Abbildung 11 sieht man, dass sowohl bei den Ortskoordinaten der Zugspitze (blau) als auch bei den Ortskoordinaten des Zugendes (rot) einzelne Messwerte fehlen. Entsprechendes gilt für die daraus berechnete Geschwindigkeit der Zugspitze (grün) und des Zugendes (orange). Aus dem Diagramm der Abbildung 11 lassen sich trotzdem interessante Schlüsse ziehen:

- $x_{\text{vorne}}(t) - x_{\text{hinten}}(t)$ bleibt für alle Zeitpunkte t konstant. Das bedeutet, der Abstand zwischen der ersten und letzten Reihe bleibt erwartungsgemäß immer gleich.
- Da der Abstand der beiden Objekte (Anfang und Ende des Zuges) konstant bleibt, muss die Geschwindigkeit beider zu jedem Zeitpunkt gleich sein. Dies kann aus dem mittleren Teil des Schaubildes abgelesen werden (kleinere Abweichungen aufgrund von Ungenauigkeiten beim Markieren der Objekte).
- Da die Geschwindigkeit beider Objekte zu einem festen Zeitpunkt gleich ist, können die beiden Kurven für v_x zusammen betrachtet werden: Man erkennt ein Ansteigen des Tempos des Zuges

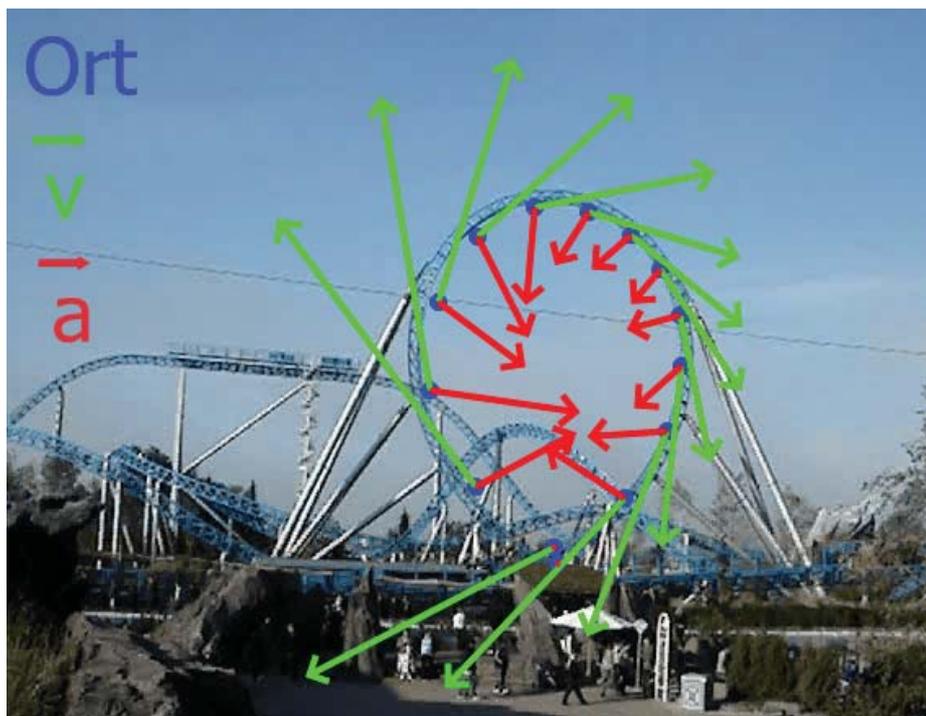


Abb. 12: Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren Looping der Blue Fire (Beschleunigungsvektor rot, damit er sich gut vom blauen Himmel abhebt)

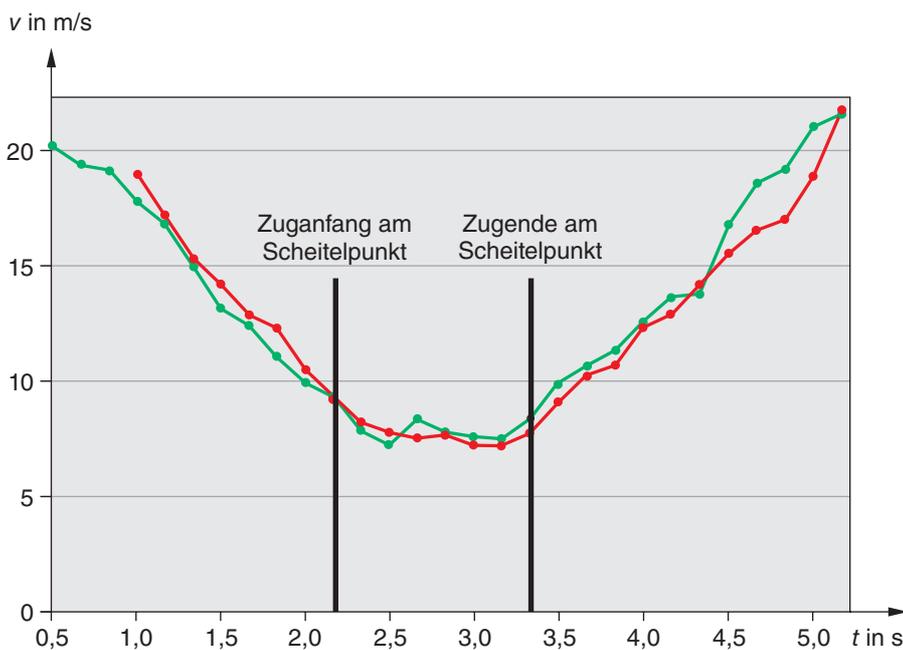


Abb. 13: Tempo $v(t)$ im Looping der Blue Fire (grün = Zuganfang, rot = Zugende)

Abb. 14: Hügelfahrt beim Silver Star



von etwa $19 \text{ m/s} \approx 68 \text{ km/h}$ auf $24 \text{ m/s} \approx 86 \text{ km/h}$ in einem Zeitraum von rund $1,8 \text{ s}$ (eine Regressionsgerade ist schwarz eingezeichnet). Dies ergibt eine durchschnittliche Beschleunigung von rund 3 m/s^2 . Bei diesem Beispiel ist es also von Vorteil, dass man mehrere Punkte verfolgen kann.

3.4 Videoanalyse beim Looping

Bei der Videoanalyse des Loopings wurden zunächst die Geschwindigkeit und die Beschleunigung der Zugspitze zu verschiedenen Zeiten betrachtet (siehe Abb. 12). Bei der Interpretation ist zu beachten, dass Reibung auftritt.

Dann wurden mehrere Punkte des Zuges betrachtet und die Komponenten und Beträge der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bestimmt. Theoretisch muss das Tempo der Punkte, die auf gleicher Höhe im Wagen liegen (gleicher Radius beim Looping) zu jedem Zeitpunkt gleich sein (siehe Abb. 13, grün = Zuganfang, rot = Zugende). Unterschiedliche Ergebnisse zeigen die Messgenauigkeit.

Am Video kann man sehen, wann sich welcher Wagen des Zuges am höchsten Punkt des Loopings befindet. Diese Zeitpunkte wurden auch in Abbildung 13 eingetragen. Das Minimum des Geschwindigkeitsbetrags wird erwartungsgemäß erreicht, wenn der Schwerpunkt des Zuges den Scheitelpunkt des Loopings passiert. Zu diesem Zeitpunkt ist die Angst vor dem „Herunterfallen“ auch am größten, da die vom Passagier verspürte Zentrifugalbeschleunigung ein Minimum erreicht.

3.5 Videoanalyse einer Hügelfahrt

Bei der Achterbahn Silver Star wurde eine Hügelfahrt analysiert. In Abbildung 14 wurden die Geschwindigkeit und die Beschleunigung der Zugspitze zu verschiedenen Zeiten eingezeichnet.

Außerdem wurde das Tempo berechnet. Es ist erwartungsgemäß beim Überfahren eines Hügels minimal (siehe Abb. 15). Beim Durchfahren des Tales konnten aufgrund der eingeschränkten Sicht keine Messpunkte markiert werden, weshalb das Maximum des Geschwindigkeitsbetrages in Abbildung 15 nicht gezeichnet wurde.

4. Beispiele zur Beschleunigungsmessung

Schwierigkeiten bereitete bei den Messungen mit den Beschleunigungssensoren hauptsächlich die unterschiedliche Betrachtung der Bewegung im beschleunigten bzw. unbeschleunigten Bezugssystem. Damit verbunden ist die Interpretation der

Messwerte: Misst der Sensor reale Beschleunigung oder Scheinbeschleunigung? Welche Lage hat der Sensor zu diesem oder jenem Zeitpunkt? In welche Richtung zeigen die Achsen? Dies alles muss bei der Behandlung von Beschleunigungsmessungen im Unterricht beachtet werden. Die Messungen mit den Beschleunigungssensoren sind also eher als Erweiterung zu den Videoanalysen (siehe Abschnitt 3) anzuraten, da mit ihnen die Sichtweise des Passagiers und damit die Trägheitskraft, welche dieser zu verspüren glaubt, diskutiert werden kann.

4.1 Beschleunigungsmessung bei der Schiffschaukel

Bei der Schiffschaukel Vindjammer genügt es, die zum Fahrgast vertikale Beschleunigungskomponente zu analysieren (rote Kurve in Abb. 16). Da der Sensor vor der Fahrt nicht auf Null gestellt wurde, wird zu Beginn die Erdbeschleunigung registriert. Während der Fahrt wird in zum Fahrgast vertikaler Richtung neben einem Anteil der Erdbeschleunigung zusätzlich die Zentrifugalbeschleunigung gemessen. Diese ist im unteren Scheitelpunkt der Pendelbewegung (Nulldurchgang) gerade am größten und erreicht einen Maximalbetrag von etwa 1,5 g. Das bedeutet, der Passagier fühlt sich mehr als doppelt so schwer wie normal, nämlich 2,5-mal so schwer (Gewichtskraft plus Zentrifugalkraft). Man kann erkennen, wie zu diesen Zeitpunkten das Antriebsrad den Rumpf des Schiffes berührt (Rauschen der Messwerte). Eine weitere Besonderheit der Kurve ist der Verlauf der lokalen Maxima (bzw. Minima der Beträge). Hier befindet sich die Schaukel gerade in den Umkehrpunkten. Eine unsymmetrische Auslenkung ist der Grund für die unterschiedliche Höhe der Peaks. Aus diesen Werten lässt sich für die maximale Auslenkung der Schiffschaukel ein Winkel von etwa 70° bestimmen, was auch die Messung in der Videoanalysesoftware ergab:

$$\frac{a_{\text{Umkehrpunkt}}}{a_{\text{Ruhe}}} \approx \frac{-0,3g}{-1,0g} = 0,3 \approx \cos 72^\circ$$

4.2 Beschleunigungsmessung in der Achterbahn

Bei Achterbahnen, bei denen der Sensor sich kippt und dreht, kann nur die Kraft bzw. Beschleunigung aus Sicht des Fahrgastes gemessen werden (siehe Abschnitt 2). Bei der Achterbahn Silver Star fiel die Auswertung der Messungen gegenüber anderen Achterbahnen wesentlich

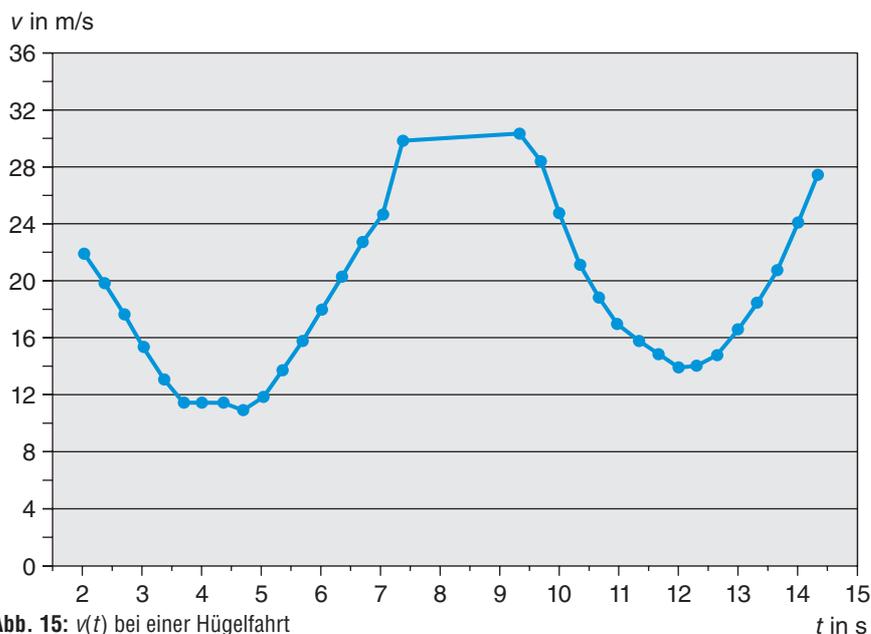


Abb. 15: $v(t)$ bei einer Hügel Fahrt

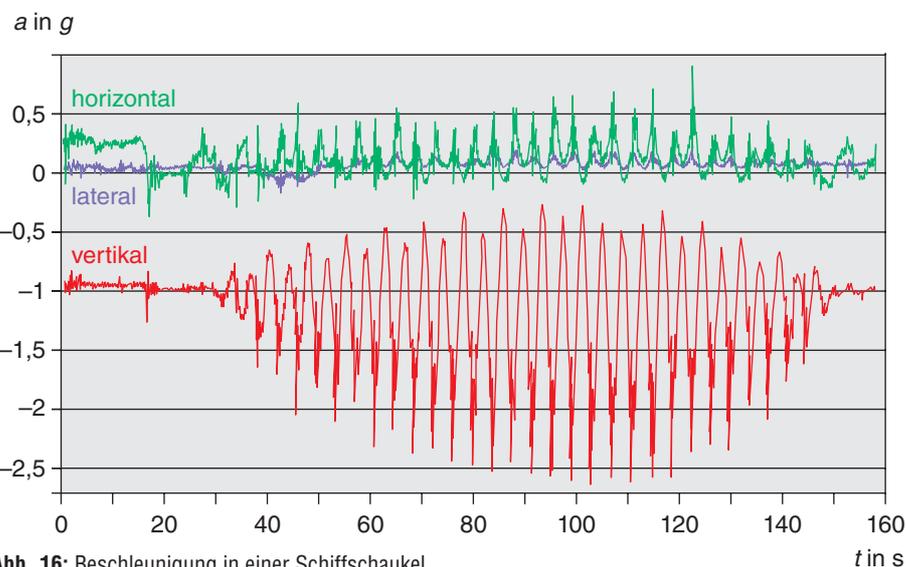
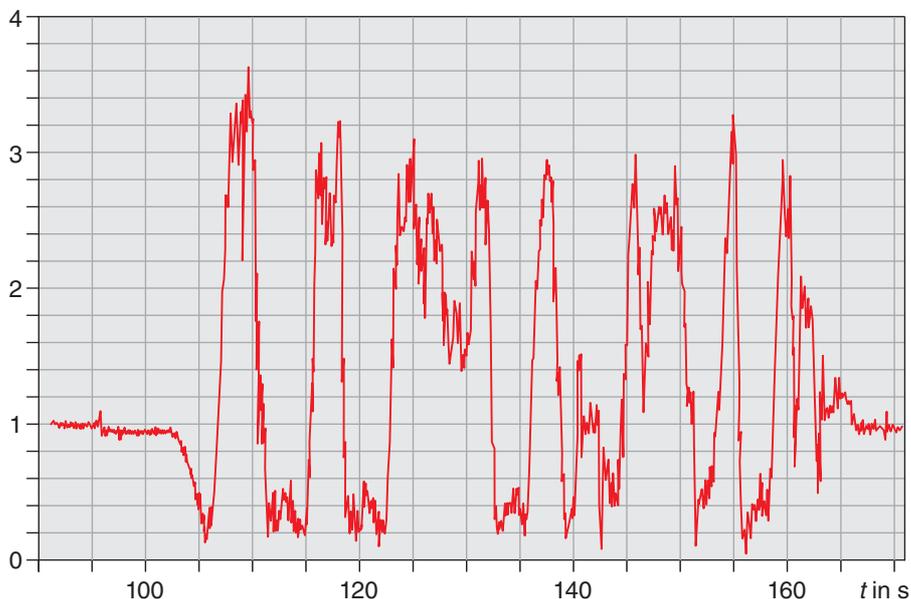


Abb. 16: Beschleunigung in einer Schiffschaukel

Abb. 17: Betrag der resultierenden Beschleunigung im Silver Star

Betrag der gemessenen Beschleunigung in g



leichter: die Bahn ist nur selten verkippt und es gibt nur wenige Kurven. Die laterale Beschleunigungskomponente verschwindet also meistens. Deshalb lässt sich mit Hilfe des Beschleunigungsbetrages (siehe Abb. 17) die Behauptung überprüfen, dass der Fahrgast über 20 Sekunden eine Beschleunigung von nur $0,2\text{ g}$ erfährt [9]. Diese Zeit sehr kleiner Beschleunigung nennt man auch Airtime. Sie bezeichnet Zeiträume, in denen der Passagier einer Achterbahn sich schwerelos fühlt oder nur von den Sicherheitsbügeln im Zug gehalten wird. Dies wird im Silver Star mit parabelförmigen Hügeln erreicht. Die Wagen der Achterbahn müssen beim Überfahren eines solchen Hügels ein bestimmtes Tempo haben, damit der Eindruck der Schwerelosigkeit einsetzt.

Betrachtet man den Beschleunigungsbetrag, so gibt es Zeiträume, in denen der Betrag der Beschleunigung gering ist. Dies ist nicht nur beim Passieren eines Hügels der Fall, sondern auch beim First Drop (erste Talfahrt). Addiert man nun die Zeiten, in denen die resultierende Beschleunigung weniger als $0,4\text{ g}$ beträgt, so erhält man rund 20 Sekunden. Die Grenze von $0,4\text{ g}$ liegt höher als $0,2\text{ g}$ und wurde gewählt, da ein Rauschen der Werte in allen Komponenten den Beschleunigungsbetrag bei kleinen Werten stark beeinflusst. Im Rahmen dieser Einflüsse und unter Berücksichtigung der Messfehler kann die obige Behauptung als bestätigt angesehen werden.

Eine weitere Behauptung des Achterbahnbetreibers ist das Erreichen einer Beschleunigung von maximal 4 g . In Abb. 17 erkennt man maximale Beschleunigungsbeträge zu den Zeitpunkten, in denen der Zug gerade die Täler der Bahn passiert. Hier addieren sich Erdbeschleunigung und Zentrifugalbeschleunigung zu maximalen Werten. Im Tal nach dem First Drop ist die Geschwindigkeit des Zuges und damit die Zentrifugalbeschleunigung maximal. Man kann einen Wert von etwa $3,6\text{ g}$ ablesen. Per Runden des Wertes wird die Behauptung bestätigt.

5. Vergleich der beiden Messmöglichkeiten

Ein Vorteil der Videoanalyse ist sicher, dass es sich dabei immer um eine objektive Betrachtung der Bewegung aus Sicht eines außen stehenden, ruhenden Beobachters handelt. Eine Schwierigkeit ist jedoch häufig, einen geeigneten Aufnahmeort für die Kamera zu finden, so dass eine zweidimensionale Bewegung ohne Verzerrung gefilmt werden kann. Andererseits ist es sinnvoll,

sich auf zweidimensionale Bewegungen zu beschränken. Ein weiterer Vorteil der Videoanalyse ist, dass bei ausgedehnten Objekten mehrere verschiedene Punkte des Objektes betrachtet werden können.

Beschleunigungssensoren haben den Vor- bzw. Nachteil, dass sie dreidimensional messen. Das wesentliche Problem ist, dass sich die Lage des Sensors ändern kann und man damit die Problematik des Bezugssystem hat. In diesem Fall können die Messwerte jedoch auch als Maß der Belastung von Passagieren dienen.

6. Fazit

Selbst einfache wirkende Bewegungen können einen komplizierten physikalischen Hintergrund haben. Die Mechanik mancher Attraktionen im Freizeitpark zu verstehen, erfordert viel Zeitaufwand, welcher in der Schule oft nicht verfügbar ist. Häufig muss auf eine detaillierte Analyse der Bewegungen verzichtet werden. Dies kann jedoch auch als Anreiz dienen: Die Schüler sollen bemerken, dass aus den Diagrammen viel mehr Informationen gewonnen werden können, als auf den ersten Blick vermutet. So können Messungen im Freizeitpark als Anlass verwendet werden, damit sich Schüler wieder gerne mit Physik beschäftigen.

Man findet aber auch Beispiele für einfache Bewegungen (geradlinige Beschleunigung, Kreisbewegung, Pendel). Insbesondere mit der Videoanalyse sind auch qualitative Betrachtungen möglich: Wie liegen Geschwindigkeit und Beschleunigung zueinander und was bedeutet das (gleiche Richtung, entgegengesetzt, senkrecht)? Der gezeigte London-Bus stellt ein Beispiel für die Behandlung der Kreisbewegung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit dar. Als Beispiel einer Kreisbewegung mit nicht-konstanter Winkelgeschwindigkeit ist die Schiffschaukel ergiebig. Zusätzlich kann die Schiffschaukel als Anwendungsbeispiel der Pendelbewegung in den Unterricht eingebaut werden. Achterbahnen sind vor allem für Energiebetrachtungen geeignet. Die grundlegende Physik lässt sich am besten per Videoanalyse erklären, die Beschleunigungsmessungen sollten in den meisten Fällen nur als Vertiefung verwendet werden. ■

Literatur

[1] Schüttler, Manuel (2011): *Physik im Freizeitpark. Möglichkeiten und Vergleich von Beschleunigungs- und GPS-Messung sowie Videoanalyse, Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg*, <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/freizeitpark.htm>

[2] Scheler, Stefan; Wilhelm, Thomas: *Neue Möglichkeiten durch Funksensoren, Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 58, Nr. 7, 2009, S. 28 - 35

[3] Backhaus, Udo; Braun, Thomas: *GPS-Messungen im Freizeitpark, Nordmeier, V.; Grötzbauch, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Bochum 2009, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin*, [4] Suleder, Michael: *Videoanalyse und Physikunterricht. Technik – Didaktik - Unterrichtspraxis*, Aulis Verlag, 2010

[5] Waltner, Christine; Tobias, Verena; Wiesner, Hartmut.; Hopf, Martin; Wilhelm, Thomas: *Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Dynamik in der Mittelstufe, Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 59, Nr. 7, 2010, S. 9 - 22

[6] Michel, Maximilian; Wilhelm, Thomas (2010): *Dynamik mit Hochgeschwindigkeitsvideos, Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 59, Nr. 7, 2010, S. 23 – 30

Scheler, Stefan; Wilhelm, Thomas: *Neue Möglichkeiten durch Funksensoren, Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 58, Nr. 7, 2009, S. 28 - 35

[7] <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/mD.htm>

[8] <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/831866>

[9] <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/1289921>

Anschrift des Verfassers:

AR Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg,
E-Mail: wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de,
WWW: www.thomas-wilhelm.net