

Bewegungsvorgänge mithilfe der digitalen Videoanalyse untersuchen

Rolf Winter, Potsdam

Illustrationen (insbesondere: Diagramme) von: W. Zettlmeier, M. Emde

II/A

Als am 21. Juli 1969 **Neil Armstrong** (1930–2012) als erster Mensch den Mond betrat, sprach er die berühmten Worte: "That's one small step for a man, one giant leap for mankind!" („Das ist ein kleiner Schritt für einen Menschen, aber ein großer Sprung für die Menschheit!“).

Anhand der Filmaufnahmen, die die Astronauten von ihren Bewegungen auf der Mondoberfläche gemacht haben, kann man erkennen, dass die Mondbeschleunigung wesentlich geringer sein muss als die Erdbeschleunigung. Die kleinen Hopser erscheinen wie ein Schweben in Zeitlupe.



Abb. 1 N. Armstrong auf dem Mond
© NASA

Der Beitrag im Überblick

Klasse: 11/12

Ihr Plus:

- ✓ viele interessante Schüler- und Lehrerexperimente
- ✓ Alltagsbezug
- ✓ Behandlung komplexer, realer Vorgänge trotz begrenzter mathematisch-formaler bzw. messtechnischer Möglichkeiten, wie z. B. eines **Elfmeterschusses**, eines **anfahrenden Zuges**, von **Bungeespringen** usw.)

Inhalt:

- Das Prinzip der digitalen Videoanalyse
- Bewegungsdiagramme eines hangabwärts rollenden Fahrrads
- Fall eines Gummiballs
- Fall mit Luftwiderstand
- Waagrechter Wurf
- Schiefer Wurf
- Videoanalyse mit Auswertungsprogrammen anhand zweier Beispiele
- Videoanalyse mithilfe von Stroboskopaufnahmen

Fachliche und didaktisch-methodische Hinweise

Der Einsatz **digitaler Medien** im Physikunterricht erweitert die Möglichkeiten des Experimentierens erheblich. Statt Bewegungsvorgänge mithilfe einer sensorgestützten Erfassung der Messwerte zu analysieren, was mit viel Vorbereitungsaufwand verbunden ist, lassen sich so **Alltagssituationen** untersuchen. Reale Vorgänge aus den Bereichen **Sport, Verkehr, Freizeitpark, Raumfahrt** und aus der **Natur** können so helfen, insbesondere den Mechanikunterricht auf neue Weise lebensnah zu gestalten. Außerdem erschließt sich damit auch die Möglichkeit, Bewegungen zu analysieren, die bisher der Auswertung im Physikunterricht nicht zugänglich waren.

Bezug zu den Physik-Lehrplänen (Beispiele)

Bayern: Physik 10.4 Profilbereich am NTG: Videoanalyse von Bewegungsabläufen

Sachsen: Gymnasium, Jahrgangsstufe 11 – Leistungskurs, Wahlpflicht 3: Erfassen und Auswerten von Messreihen mithilfe der Videoanalyse

NRW: Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule: 3 Lernerfolgsüberprüfung und Leistungsbewertung – Aufgaben zur Datenanalyse: Videoanalyse

Das Prinzip der digitalen Videoanalyse ist relativ einfach (M 2)

Ein realer Bewegungsvorgang wird mit einer Digitalkamera oder einem Smartphone als **Videoclip** aufgezeichnet. Der Clip besteht dabei aus Einzelbildern, den sog. **Frames**. Mithilfe einer Abspielsoftware mit Einzelbildfortschaltung lässt sich auf dem Computermonitor das Video Bild für Bild verfolgen.

Für die Auswertung gibt es zwei Varianten: entweder manuell „**per Hand**“ oder automatisiert mit einer speziellen **Analysesoftware**.

Auswertung per Hand

In der **ersten Variante** dient die **Maus** als eigentliches Messwernerfassungssystem.

Aus den einzelnen Frames werden **Messwertpaare** für den **Ort** des sich bewegenden Objekts gewonnen, wobei die Ortsänderungen mithilfe einer Skalierung von Pixeln in das metrische System umgerechnet werden müssen.

Bei der Aufnahme sollte dazu eine „**Eichstrecke**“ mit auf dem Clip sein (z. B. Längemaßstab), da sonst zur quantitativen Auswertung der Eichmaßstab aus der Länge eines Gegenstands geschätzt werden müsste. Mit den so gewonnenen Koordinatenpaaren kann die Bewegung des betrachteten Objekts in einem y-x-Koordinatensystem beschrieben werden (Abb. 2).

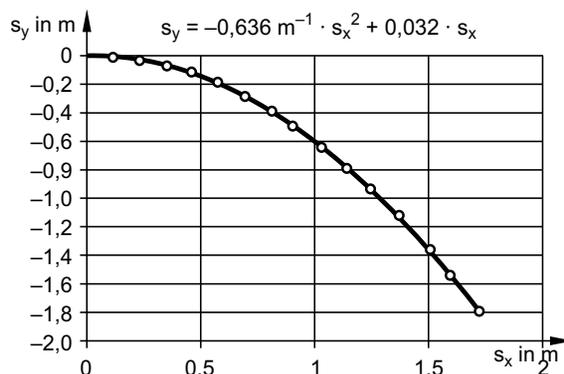


Abb. 2: Bewegung eines Objekts im y-x-Koordinatensystem (Ortskurve)

II/A

Materialübersicht

⌚ V = Vorbereitungszeit SV = Schülerversuch Ab = Arbeitsblatt/Informationsblatt
 ⌚ D = Durchführungszeit LV = Lehrerversuch Wh = Wiederholung

M 1	Wh	Die Kinematik – frischen Sie Ihr Wissen auf!
M 2	Ab	Die Videoanalyse – ein multimediales Werkzeug
M 3	LV/SV	Bewegungsdiagramme eines rollenden Fahrrads
	⌚ V: 15 min	<input type="checkbox"/> Fahrrad mit Tachometer <input type="checkbox"/> Maßband
	⌚ D: 30 min	<input type="checkbox"/> Digitalkamera <input type="checkbox"/> Kreide
		<input type="checkbox"/> PC <input type="checkbox"/> weiße Klebestreifen
M 4	LV/SV	Bewegungsdiagramme eines ins Wasser fallenden Gummiballs
	⌚ V: 10 min	<input type="checkbox"/> großes Becherglas <input type="checkbox"/> Längenmaßstab
	⌚ D: 25 min	<input type="checkbox"/> Gummiball (Flummi) <input type="checkbox"/> PC
		<input type="checkbox"/> Digitalkamera mit Stativ
M 5	LV	Der Fall mit Luftwiderstand
	⌚ V: 10 min	<input type="checkbox"/> Digitalkamera mit Stativ <input type="checkbox"/> Längenmaßstab
	⌚ D: 25 min	<input type="checkbox"/> Papiertrichter <input type="checkbox"/> PC
M 6	SV/LV	Der waagrechte Wurf
	⌚ V: 10 min	<input type="checkbox"/> Inlineskates <input type="checkbox"/> Längenmaßstab
	⌚ D: 35 min	<input type="checkbox"/> Ball <input type="checkbox"/> PC
		<input type="checkbox"/> Digitalkamera mit Stativ
M 7	SV/LV	Der schiefe Wurf
	⌚ V: 10 min	<input type="checkbox"/> Ball <input type="checkbox"/> 2 Längenmaßstäbe
	⌚ D: 35 min	<input type="checkbox"/> 3 Digitalkameras mit Stativ <input type="checkbox"/> PC
M 8	Ab	Die Videoanalyse mit Viana
M 9	Ab	Die Videoanalyse mit <i>measure Dynamics</i>
M 10	Ab	Arbeitsblatt Stroboskopaufnahme

M 1 Die Kinematik – frischen Sie Ihr Wissen auf!

Bewegungsdiagramme

Die **Bahnkurve** einer Bewegung beschreibt den räumlichen Verlauf einer Bewegung und besteht aus allen Orten, die der Körper durchläuft. Wenn die Bewegung nur in einer Ebene verläuft, kann sie in einem s_x - s_y -Diagramm dargestellt werden (Abb. 2). Spezielle Bahnkurven sind die Graphen von **linearen**, **quadratischen** oder **Exponentialfunktionen**. Aus einer Bahnkurve ist aber nicht zu entnehmen, zu welcher Zeit der Körper einen bestimmten Ort passiert.

Um den Charakter oder die Ursachen einer Bewegung zu erkennen, ist die geeignete Wahl des **Bezugssystems** meistens unerlässlich. So bewegt sich z. B. der Mars aus der Perspektive der Erde auf einer komplizierten Schleifenbahn. Wird aber anstelle der Erde die Sonne als Bezugssystem gewählt, stellt die Marsbahn eine einfache Ellipse dar.

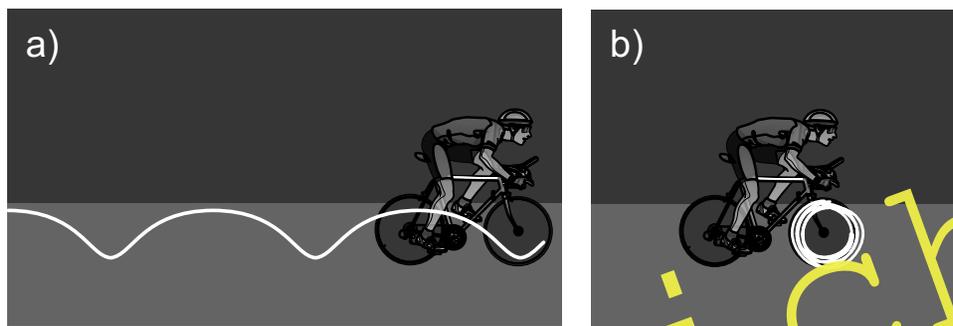


Abb. 3: Bahnkurve eines Reflektors im Bezugssystem a) der Straße und b) der Radachse © W. Zettlmeier

Ein anderes Beispiel ist die Bahnkurve der **Reflektoren in den Speichen eines Fahrrades**. Im Bezugssystem der Straße stellt sie eine Zykloide dar (Abb. 3 a), in Bezug zur Radachse aber einen Kreis (Abb. 3 b).

Der zeitliche Verlauf einer Bewegung kann in einem **Zeit-Orts-Diagramm** beschrieben werden. Darin lassen sich die Messwerte $(t; s)$ einer eindimensionalen Bewegung als Punkte in einem t - s -Diagramm darstellen. Eine Ausgleichskurve, die durch diese Punkte gelegt wird, repräsentiert einen kontinuierlichen Bewegungsverlauf. Sie ermöglicht es, Aussagen über Zwischenwerte zu treffen, zu denen keine Messpunkte vorliegen. Aus dem Verlauf der Kurve kann oft geschlossen werden, welche Zeit-Orts-Funktion $s(t)$ zur Beschreibung der Bewegung infrage kommt. Für einige Phänomene sind solche Funktionen schwer zu finden. Sind aber die **Änderungsraten** der Bewegung bekannt, lassen sich Funktionswerte dadurch bestimmen, dass ausgehend von einem Punkt der nächste Punkt anhand der bekannten Änderungsrate bestimmt wird. Dieses Vorgehen wird als **iteratives Verfahren** bezeichnet (s. M 2). Änderungsraten lassen sich beispielsweise aus Stroboskopaufnahmen der Bewegung gewinnen. Abb. 4 zeigt das Beispiel eines fallenden Papiertrichters. Man erkennt, dass der Papiertrichter zuerst beschleunigt fällt, dann aber durch den Luftwiderstand eine konstante Sinkgeschwindigkeit erreicht.

Geschwindigkeit: Die Geschwindigkeit v gibt an, wie schnell sich ein Körper zu einem bestimmten Zeitpunkt t bewegt. Diese Geschwindigkeit wird als **Momentangeschwindigkeit $v(t)$** bezeichnet. Im t - s -Diagramm entspricht sie der Steigung der Tangente zu diesem Zeitpunkt.

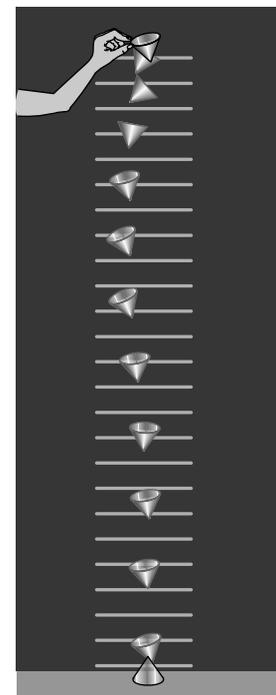
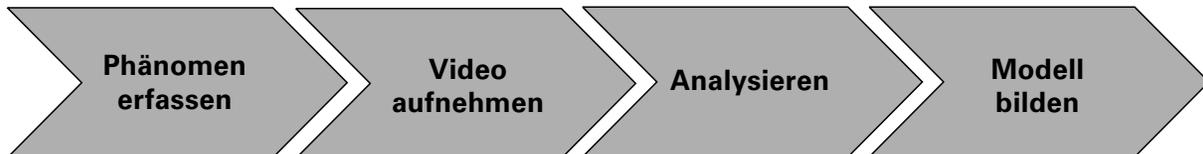


Abb. 4: Stroboskopaufnahme eines fallenden Papiertrichters © W. Zettlmeier

M 2 Die Videoanalyse – ein multimediales Werkzeug

II/A

Prinzip der Analyse eines Bewegungsvorganges mithilfe einer Videoaufnahme



1. Phänomen erfassen

Aussuchen eines geeigneten Bewegungsphänomens. Gesichtspunkte bei der Auswahl sollten vor allem der physikalische Gehalt und eine taugliche Kameraperspektive sein (wenig perspektivische Verzerrungen). Beispiele für solche Phänomene bieten sich aus dem Bereich des Sports (**Elfmeter, Weitsprung, Basketballwurf**), des Freizeitparks (**Bungeejumping, Freifallturm, Sky Shot**), des Straßenverkehrs (**anfahrende Züge, Autos, Fahrräder**) und der Natur (**Geschwindigkeit von Tieren, Wolken**) an.

2. Video aufnehmen

Herstellen eines Videoclips dieses Phänomens. Dazu eignen sich sowohl Digitalkameras als auch Smartphones oder Tablets, wobei jeweils die höchstmögliche Bildfrequenz gewählt werden sollte. Als Alternative bieten sich **Videoclips** aus dem Internet oder Fernsehschnitte an. Das gilt insbesondere für Bewegungsvorgänge, die man selbst nicht filmen kann (z.B. Sprung auf dem Mond, Autocrash, Chamäleon auf Beutefang). Zur einfacheren Auswertung sollte immer ein **Längenmaßstab** mitgeführt werden.

Variante:

Anstelle des Videoclips wird eine **Stroboskopaufnahme** der Bewegung hergestellt. Dazu beleuchtet man das sich bewegende Objekt mit einer Stroboskopblitzlampe und fotografiert über eine längere Belichtungszeit. Aus der Stroboskopfrequenz wird die Zeit zwischen zwei Bildern berechnet. Abb. 4 zeigt zum Beispiel den Fall eines Papiertrichters, der mit einer Frequenz von 15 Hz belichtet und mit einer Belichtungszeit von etwa 1 s fotografiert wurde.

3. Analysieren

Der Videoclip wird mithilfe eines **Softwareplayers**, der eine Einzelbildfortschaltung ermöglicht (z. B. **VLC Media Player, Quicktime Player**), abgespielt. Das Aufnehmen der Messwerte erfolgt durch Ausmessen der Einzelbilder. Dazu gibt es verschiedene Varianten:

Variante 1

Auf dem Bildschirm wird eine **Transparentfolie** befestigt. Dann markiert man die jeweilige Position des Objekts mithilfe eines Folienschreibers und ermittelt die Ortskoordinaten $(s_x; s_y)$ durch Ausmessen mit einem Lineal. Dazu muss ein Koordinatenursprung festgelegt werden. Die Längeneichung (Kalibrierung) erfolgt entweder anhand eines mitgeführten Längenmaßstabs oder mithilfe einer bekannten Strecke. Die zugehörigen Zeitkoordinaten erhält man aus der Bildfrequenz des Videos (siehe S. 2). Die so ermittelten Messwertpaare ermöglichen die Erstellung eines **Zeit-Weg-Diagramms**.

M 3 Bewegungsdiagramme eines rollenden Fahrrads

Aufgabe

Nehmen Sie das **Weg-Zeit-Diagramm** und das **Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm** eines einen Hang hinabrollenden Radfahrers mithilfe der Videoanalyse auf.

Lehrerversuch ⌚ Vorbereitung: 15 min Durchführung: 30 min

Materialien

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Fahrrad mit Tachometer | <input type="checkbox"/> Maßband |
| <input type="checkbox"/> Digitalkamera | <input type="checkbox"/> Kreide |
| <input type="checkbox"/> PC | <input type="checkbox"/> weiße Klebestreifen |

Versuchsaufbau

Für das Experiment wird eine etwa 100 m lange Fahrstrecke mit einem leichten Gefälle benötigt. Auf der Fahrbahn werden in 5-Meter-Abständen mit Kreide etwa 3 cm breite Querstreifen gezeichnet und mit großen Zahlen beschriftet. Zusätzlich sind auf den ersten 10 m kleine weiße unbeschriftete Querstreifen in je einem Meter Abstand aufgeklebt.



Wenn Sie das Experiment auf einer öffentlichen Straße durchführen, müssen Sie unbedingt darauf achten, dass Ihre Sicherheit und die des Verkehrs gewährleistet sind.

Versuchsdurchführung

Sie, als Lehrer, beginnen auf dem Rad ab der Startmarkierung abwärtszurollen. Sie sollten nicht in die Pedale treten, um eine möglichst ruhige Bewegung zu erreichen. In der einen Hand halten Sie die Digitalkamera oder das Smartphone mit dem Objektiv nach unten, damit sowohl der Tachometer als auch das Vorderrad, das die Markierungen überfährt, gefilmt werden (Abb. 5). Auf dem Tachometer kann die Geschwindigkeit direkt in km/h abgelesen werden. Mit der anderen Hand halten Sie den Lenker.

Zuerst spielen Sie die Aufnahme mit einem Videoplayer ab, in welchem auch die Einzelbilder betrachtet werden können.

Den zurückgelegten Weg s ermitteln Sie aus demjenigen Einzelbild, in dem sich das Vorderrad gerade über der jeweiligen Markierung befindet. Die zugehörigen Zeitkoordinaten t erhalten Sie aus der Bildfrequenz des Videos. Die Tachogeschwindigkeit v ordnen Sie jeweils dem Bild zu, in welchem die Anzeige den neuen Wert zum ersten Mal anzeigt. Anschließend tragen Sie die Bildnummern und alle Messwerte in eine Tabelle ein und stellen diese in einem t - s - und in einem t - v -Diagramm grafisch dar.



Abb. 5: Das Vorderrad überquert die Ortsmarkierung. Foto: R. Winter

II/A

M 3 Bewegungsdiagramme eines rollenden Fahrrads – Blatt 2

Variante

Wählen Sie für die Messstrecke einen Hang, an den sich eine horizontale Fahrstrecke anschließt. Auf diesem Streckenabschnitt rollen Sie, der Lehrer, auf dem Fahrrad aus, d. h., Sie werden langsamer. Die Versuchsdurchführung erfolgt analog wie oben beschrieben.

Zur Selbstkontrolle – Ergebnis

Messwertbeispiel:

Bildfrequenz des Videos: 25 Bilder/s $\rightarrow \Delta t = 0,04\text{s}$

Weg s in m	Bildnummer	Zeit t in s
0	0	0
1	70	2,80
2	91	3,64
3	107	4,28
4	121	4,84
5	134	5,36
6	146	5,84
7	157	6,28
8	167	6,68
9	177	7,08
10	187	7,48
15	229	9,16
20	264	10,56
25	297	11,88
30	327	13,08
35	355	14,20
40	381	15,24
45	406	16,24
50	429	17,16
55	452	18,08
60	474	18,96
65	495	19,8
70	517	20,68

v_{Tacho} in km/h	Bildnummer	Zeit t in s
0	0	0
5	111	4,44
7	146	5,84
9	182	7,28
12	252	10,08
14	309	12,36
16	358	14,32
18	403	16,12
20	441	17,64
21	479	19,16



Achten Sie – wenn Sie in einer Hand das Smartphone halten und mit der anderen Hand den Lenker – darauf, dass Sie nicht stürzen. Dies ist ein Lehrereperiment!

© AleksandarNakic/E+/Getty Images Plus

M 4 Bewegungsdiagramme eines ins Wasser fallenden Gummiballs

Aufgabe

Ein Gummiball fällt in ein wassergefülltes Becherglas. Nehmen Sie das **Zeit-Orts-Diagramm** dieser Bewegung mithilfe der Videoanalyse auf und erstellen Sie daraus das **Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm**.

Schülerversuch/Lehrerversuch

🕒 Vorbereitung: 10 min

Durchführung: 25 min

Materialien

großes Becherglas

Digitalkamera mit Stativ

PC

Gummiball (Flummi)

Längenmaßstab

Versuchsaufbau

Stellen Sie die Kamera so auf, dass perspektivische Verzerrungen möglichst gering sind. Dazu müssen Sie sie waagrecht auf dem Stativ justieren und auf die halbe Höhe der Fallstrecke einstellen. Das Becherglas füllen Sie mit Wasser, und den Längenmaßstab befestigen Sie mithilfe von Stativmaterial so, dass fallender Ball und Maßstab etwa gleich weit von der Kamera entfernt sind (Abb.10).

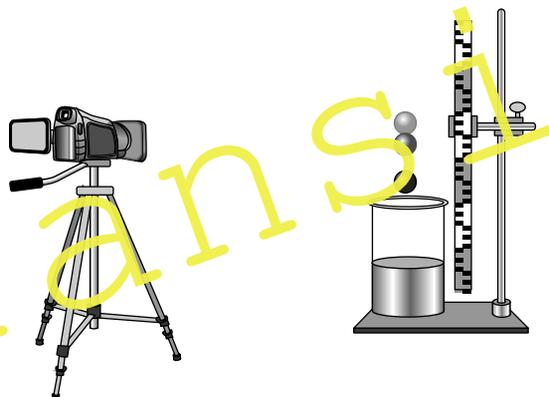


Abb. 10: Versuchsaufbau Videoanalyse eines fallenden Gummiballs © W. Zettlmeier

Versuchsdurchführung

Zuerst filmen Sie den Fall des Flummis ins Wasser und die Bewegung im Wasser. Danach spielen Sie die Aufnahme mit

einem Videoplayer ab, in welchem auch die Einzelbilder betrachtet werden können. Für die Ermittlung des zurückgelegten Weges gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- In der einfachsten Variante lesen Sie die Position des Ballmittelpunktes an dem eingeblendeten Längenmaßstab ab.
- Genauer können Sie messen, wenn Sie eine **Folie** auf den Bildschirm legen und bei jedem Einzelbild darauf die Position des Ballmittelpunktes markieren. Die gemessenen Abstände müssen Sie dann noch auf den realen Maßstab umrechnen.
- Wenn Sie die Software **Pixellineal** nutzen und das jeweilige Bild vergrößern, wird die Genauigkeit optimal ausgenutzt.
- Eine weitere Variante stellt der Einsatz eines **Analyseprogramms** dar. Entweder werden dabei die Ortskoordinaten manuell per Mausklick aus den einzelnen Frames erfasst oder, wenn sich Ball und Hintergrund deutlich in ihrer Farbe unterscheiden, automatisiert. Es gibt aber auch die Möglichkeit der **automatischen Objektverfolgung (M 8 und M 9)**.

M 4 Bewegungsdiagramme eines ins Wasser fallenden Gummiballs – Blatt 2

Die zugehörigen Zeitdaten erhalten Sie aus der Bildfrequenz des Videos. Diese ist in der Regel bei den Angaben zur Videodatei unter **Eigenschaften, Detail** gespeichert.

Das Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm erstellen Sie, indem Sie für jedes Zeitintervall die durchschnittliche Geschwindigkeit $v = (s_2 - s_1)/(t_2 - t_1)$ berechnen und diesen Wert jeweils in der Intervallmitte $t = (t_1 + t_2)/2$ auftragen.

Zur Selbstkontrolle – Ergebnis

Messwertbeispiel:

Wegmessung mit *Pixellineal*

Bildfrequenz des Videos: 30 Bilder/s $\rightarrow \Delta t = 0,033$ s

Weg-Zeit-Diagramm:

t in s	s in cm						
0	105,4	0,400	29,2	0,800	-26,0	1,600	-23,2
0,033	105,0	0,433	15,9	0,833	-26,5	1,700	-21,2
0,067	103,4	0,467	1,3	0,867	-27,0	1,800	-20,0
0,100	100,7	0,500	-8,0	0,900	-27,3	1,900	-18,2
0,133	97,0	0,533	-13,4	0,933	-27,6	2,000	-16,5
0,167	92,2	0,567	-16,5	0,967	-27,6	2,100	-14,8
0,200	86,3	0,600	-19,9	1,000	-27,6	2,200	-13,1
0,233	79,6	0,633	-20,8	1,100	-27,6	2,300	-11,4
0,267	71,8	0,667	-22,4	1,200	-27,2	2,400	-9,3
0,300	62,7	0,700	-23,7	1,300	-26,4	2,500	-7,6
0,333	52,8	0,733	-24,6	1,400	-25,8	2,600	-6,1
0,367	41,5	0,767	-25,4	1,500	-24,8	3,000	-0,9

Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm:

t in s	v in m/s						
0,017	-0,121	0,417	-4,030	0,817	-0,152	1,650	0,18
0,050	-0,485	0,450	-4,424	0,850	-0,150	1,750	0,18
0,083	-0,818	0,483	-2,818	0,883	-0,091	1,850	0,18
0,117	-1,121	0,517	-1,636	0,917	-0,090	1,950	0,20
0,150	-1,454	0,550	-0,939	0,950	0	2,050	0,16
0,183	-1,787	0,583	-0,727	0,983	0	2,150	0,22
0,217	-2,030	0,617	-0,576	1,050	0	2,250	0,14
0,250	-2,236	0,650	-0,485	1,150	0,04	2,350	0,22
0,283	-2,757	0,683	-0,394	1,250	0,07	2,450	0,18
0,317	-3,000	0,717	-0,273	1,350	0,08	2,550	0,18
0,350	-3,424	0,750	-0,242	1,450	0,10	2,650	0,14

M 5 Der Fall mit Luftwiderstand

Aufgabe

1. Nehmen Sie das Zeit-Weg-Diagramm eines fallenden Papiertrichters mithilfe der Videoanalyse auf und erstellen Sie daraus das Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm.
2. Bestimmen Sie daraus den Luftwiderstandskoeffizienten c_w des Trichters.

Schülerversuch/Lehrerversuch

🕒 Vorbereitung: 10 min

Durchführung: 25 min

Materialien

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Digitalkamera mit Stativ | <input type="checkbox"/> Längenmaßstab |
| <input type="checkbox"/> Papiertrichter | <input type="checkbox"/> PC |

Versuchsaufbau

Bauen Sie zuerst aus Papier einen Trichter zusammen. Schneiden Sie dazu aus einem DIN-A4-Blatt eine Kreisfläche mit einem Durchmesser von 20 cm aus. Aus dieser Fläche schneiden Sie einen Kreisabschnitt mit einem Mittelpunktswinkel von etwa 150° heraus und formen daraus einen **Trichter**. Die Kamera stellen Sie so auf, dass perspektivische Verzerrungen möglichst gering sind. Dazu justieren Sie sie exakt waagrecht auf dem Stativ und stellen sie auf die halbe Höhe der Fallstrecke ein. Achten Sie dabei darauf, dass Maßstab und fallender Trichter gleich weit von der Kamera entfernt sind.

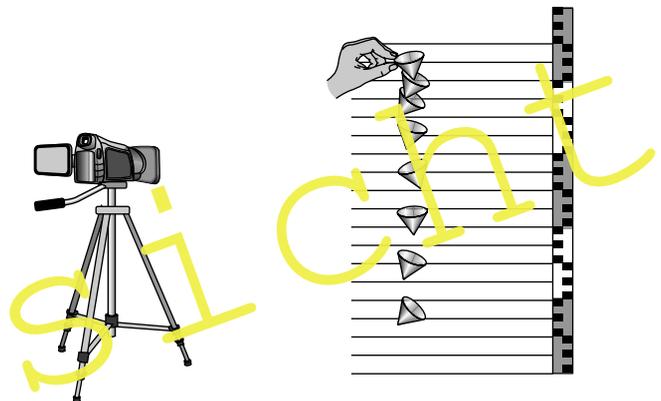


Abb.13: Versuchsaufbau Videoanalyse eines fallenden Papiertrichters © W. Zettlmeier

Versuchsdurchführung

Lassen Sie zuerst den Trichter aus etwa 2 m Höhe fallen und nehmen Sie die Fallbewegung mit der Digitalkamera auf. Danach spielen Sie die Aufnahme mit einem Videoplayer ab, in welchem auch die Einzelbilder betrachtet werden können. Für die Ermittlung des zurückgelegten Weges s gibt es verschiedene Möglichkeiten, die in **M 4** detailliert beschrieben sind.

Die zugehörigen Zeitdaten erhalten Sie aus der Bildfrequenz des Videos. Diese ist in der Regel bei den Angaben zur Videodatei unter **Eigenschaften, Detail** gespeichert. Aus diesen Daten ermitteln Sie das **Weg-Zeit-** und das **Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm**. Danach berechnen Sie den Luftwiderstandskoeffizienten c_w des Trichters.

Zur Selbstkontrolle – Ergebnisse

Zu 1. Messwertbeispiel: Wegmessung mit *Pixellineal*

Bildfrequenz des Videos:

30 Bilder/s $\rightarrow \Delta t = 0,033$ s

M 6 Der waagrechte Wurf

Aufgabe

Weisen Sie nach, dass der waagrechte Wurf die Überlagerung einer horizontalen gleichförmigen Bewegung und eines senkrechten freien Falls ist.

Schülerversuch/Lehrerversuch

🕒 Vorbereitung: 10 min

Durchführung: 35 min

Materialien

Inlineskates

Digitalkamera mit Stativ

PC

Ball

Längenmaßstab

Versuchsaufbau

Ein Skater hält einen Ball mit beiden Händen über den Kopf. Fixieren Sie die Kamera auf einem Stativ senkrecht zur Bewegungsrichtung des Skaters in genügend großem Abstand. In der Bewegungsebene bringen Sie einen Längenmaßstab an, der bei der Auswertung des Videos als Bezugsgröße dient (Abb. 16).

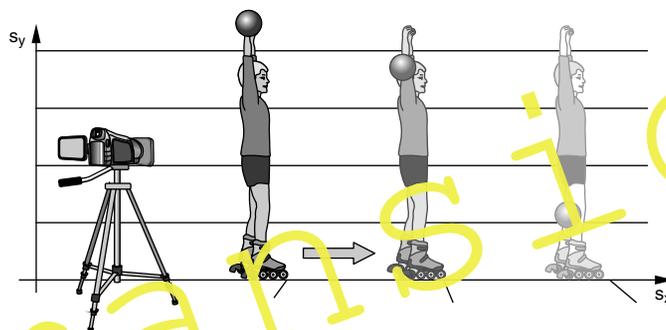


Abb. 16: Ein Skater fährt mit konstanter Geschwindigkeit und lässt einen Ball fallen. © W. Zettlmeier

Versuchsdurchführung

Nehmen Sie die Bewegung mit einer Digitalkamera auf. Wenn der Skater eine nicht zu geringe Geschwindigkeit erreicht hat, lässt er sich rollen, ohne zu beschleunigen oder abzubremesen. Dabei muss er den Ball für eine kurze Zeit in konstanter Höhe halten, bevor er ihn fallen lässt. Jegliches Werfen sollte er vermeiden. Je schneller er rollt, desto genauer werden die Messwerte.

Zunächst ermitteln Sie aus der Videoaufnahme die **Ortskoordinaten** des sich bewegenden Balls. Dazu spielen Sie die Aufnahme mithilfe eines Videoplayers mit Einzelbildfortschaltung auf dem Computer ab und bestimmen aus den Einzelbildern die Koordinaten des Balls. Die verschiedenen Möglichkeiten dazu sind in **M 4** beschrieben. Die Zeitdaten erhalten Sie aus der Aufnahmebildrate der Kamera. Die Bildrate ist in der Regel bei den Angaben zur Videodatei unter **Eigenschaften, Detail** gespeichert.

Danach berechnen Sie die Geschwindigkeiten koordinatenweise als Durchschnittsgeschwindigkeiten $v = (s_2 - s_1)/(t_2 - t_1)$ jeweils zwischen zwei benachbarten Einzelbildern und ordnen sie der Intervallmitte $t = (t_1 + t_2)/2$ zu. Die Werte für die Beschleunigung ergeben sich als Steigung in den t - v -Diagrammen der Komponenten. Die Bewegungsgleichungen können Sie sich als Gleichungen der **Trendlinien** in einem Tabellenkalkulationsprogramm anzeigen lassen.

M 7 Der schiefe Wurf

Aufgabe

Weisen Sie mithilfe der Videoanalyse eines schräg nach oben geworfenen Balls nach, dass der schiefe Wurf als eine zweidimensionale Bewegung durch zwei eindimensionale Bewegungen entlang der Koordinatenachsen beschrieben werden kann.

Schülerversuch/Lehrerversuch

🕒 Vorbereitung: 10 min

🕒 Durchführung: 35 min

Materialien

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Ball | <input type="checkbox"/> 2 Längenmaßstäbe |
| <input type="checkbox"/> 3 Digitalkameras mit Stativ | <input type="checkbox"/> PC |

Versuchsaufbau

Das Experiment sollten Sie vor der Wand eines mehrstöckigen Hauses mit einer genügend großen Freifläche davor durchführen. Stellen Sie Kamera 1 senkrecht zur Bewegungsebene mit Blick auf die Hauswand auf. Kamera 2 befestigen Sie in einem höheren Stockwerk so, dass mit ihr senkrecht nach unten gefilmt werden kann. Kamera 3 befindet sich frontal in Wurfrichtung. Sorgen Sie dafür, dass alle drei Kameras den gleichen Abstand zum Wurf haben und dass sich die beiden Kameras 2 und 3 exakt in der Wurfebene befinden. In dieser bringen Sie je einen Maßstab senkrecht für die Höhe und waagrecht für die Weite an.

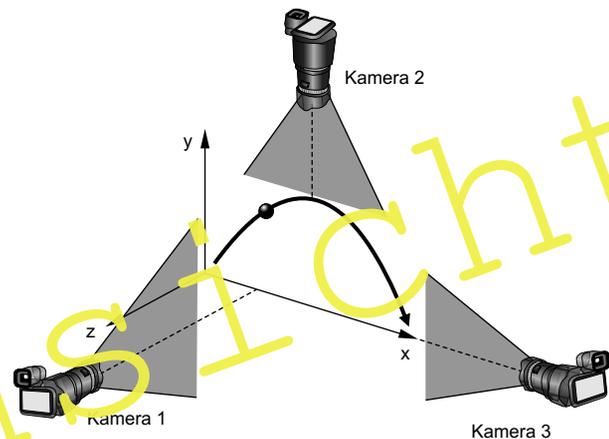


Abb. 20: Versuchsaufbau zur Videoanalyse eines schiefen Wurfs © W. Zettlmeier

Leider sind perspektivische Verzerrungen bei den Aufnahmen durch die Kameras 2 und 3 unvermeidlich, da der Ball sich während des Wurfs der Kamera nähert. Der Fehler kann verkleinert werden, wenn Sie den Abstand der Kameras relativ groß zur Wurfweite und zur Wurfhöhe wählen. Achten Sie unbedingt darauf, dass der Bildausschnitt aller drei Kameras identisch ist. Aus frontaler Sicht (Kamera 3) erscheint die Bewegung eindimensional und als senkrechter Wurf nach oben. Beim Blick von oben (Kamera 2) scheint sich der Ball gleichförmig zu bewegen (Abb. 21).

Versuchsdurchführung

Werfen Sie den Ball parallel zur Hauswand schräg nach oben. Zunächst ermitteln Sie aus den drei Videoaufnahmen jeweils die Ortskoordinaten $(x;y)$ des sich bewegenden Balls. In der einfachsten Variante lesen Sie die Positionen des Ballmittelpunktes an der eingeblendeten Messlatte ab. Genauer werden die Messungen, wenn Sie jeweils eine Folie auf den Bildschirm legen und darauf die Positionen des Ballmittelpunktes markieren. Dann zeichnen Sie ein Koordinatensystem auf die Folie, wobei Sie den Nullpunkt am Abwurfpunkt des Balls festmachen. Die auf der Folie gemessenen Koordinaten müssen Sie noch auf den realen Maßstab umrechnen. Achten Sie darauf, dass die Markierungen für alle drei Videos mit demselben Zeitpunkt beginnen.

M 7 Der schiefe Wurf – Blatt 3

Tipps

- Bei der getrennten Analyse aller drei Videos werden stets Abweichungen erkennbar sein, die auf die perspektivische Verzerrung in den Aufnahmen von Kamera 2 und 3 zurückzuführen sind.
- Bei der Markierung auf Folien empfiehlt es sich, die Spurpunkte von Kamera 3 in der Phase der Bewegung nach oben und in der nach unten farblich einzutragen, damit die zeitliche Zuordnung eindeutig ist. Zudem lässt sich damit deutlicher erkennen, dass die Abstände nach unten zunehmen.

Experimentelle Alternative

Ziel:

Deuten Sie den schiefen Wurf als Überlagerung einer horizontalen gleichförmigen Bewegung und eines senkrechten Wurfs nach oben.

Durchführung:

Wie in **M 6** rollt ein Skater mit annähernd konstanter Geschwindigkeit auf einer horizontalen Bahn. Er wirft einen Ball senkrecht nach oben. Der Skater kann den Ball wieder fangen ohne seine Geschwindigkeit ändern zu müssen. Die Auswertung des Experiments erfolgt analog zum waagrecht geworfenen Ball (**M 6**).

Messwertbeispiel:

s-t-Diagramm beider Koordinaten

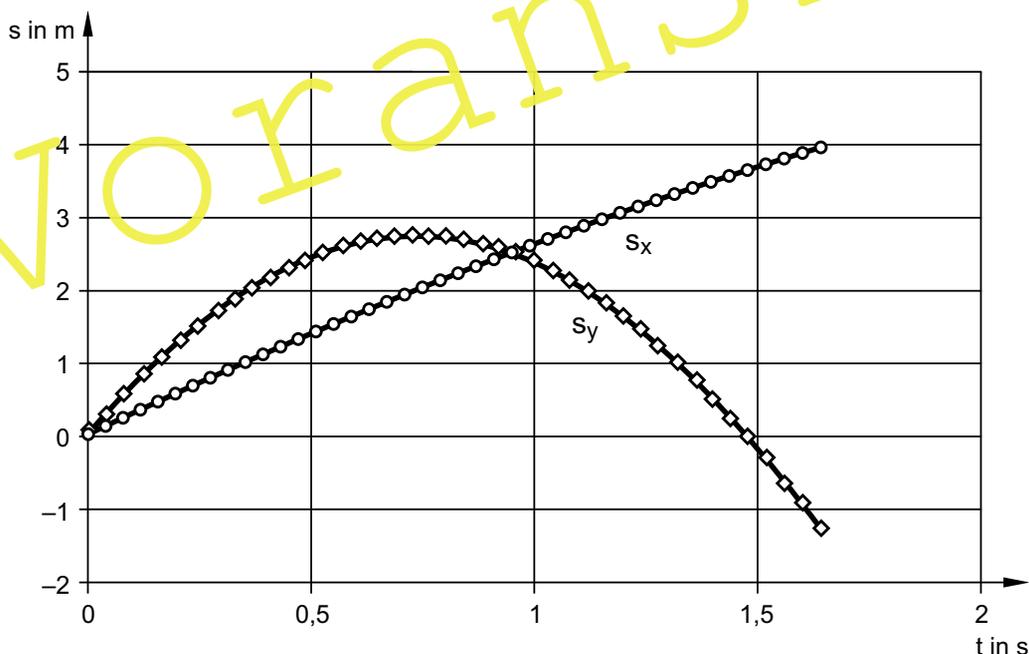


Abb. 22: Weg-Zeit-Diagramm der beiden Bewegungskomponenten beim schiefen Wurf

Auswertung:

Für den außenstehenden Beobachter bewegt sich der Ball nach dem Loslassen unabhängig vom Skater in einem schiefen Wurf. Die Bahnkurve hat nahezu die Form einer nach unten geöffneten Parabel. Der Skater wirft senkrecht nach oben. In seinem gleichförmig bewegten Bezugssystem ist es ein senkrechter Wurf nach oben.

M 8 Die Videoanalyse mit Viana

Videoauswertungsprogramm „Viana“ (Videoanalyse)

Viana war das erste Programm, das neben der Möglichkeit der manuellen Analyse von Videoaufnahmen auch eine automatische Analysefunktion enthielt. Es wurde 1997 an der Universität Essen entwickelt. Zur Erkennung des zu analysierenden Objekts wird die Farbanalyse verwendet. Das heißt, dass jeder einzelne Frame nach einer zu wählenden Farbe abgesucht wird, anhand der das Objekt automatisch identifiziert und markiert wird. Der Umfang des Programms wurde in den Folgejahren mehrmals erweitert und ergänzt. Beispielsweise kann jetzt mithilfe der Funktion *Live-Video* das Bild einer Webcam angezeigt und dann mit demselben Funktionsumfang wie bei einer geladenen Videodatei sowohl die automatische als auch die manuelle Analyse durchgeführt werden. Außerdem wurde neben der automatischen Messwerterfassung durch Farbanalyse die automatische Datenerhebung durch Bewegungserkennung eingeführt. Es gibt aber auch immer noch Nachteile. Nach wie vor werden weder Bedienungsanleitung noch Beispieldateien mitgeliefert.

Die aktuelle Version 5.5 mit dem Namen *Viana.NET* kann unter der Internetadresse

<http://www.viananet.de/downloads>

kostenlos heruntergeladen werden.

Beispielanalyse „Federpendel“

1. Menü *Start* wählen

– Dialogfeld *Video*

- Button *Video laden*: Federpendel.avi (Quelle: Rolf Winter)

– Dialogfeld *Vorbereiten*

- Button *Videoinfo*: Bildrate 5 Bilder/s, Codec MS Video, 123 Einzelbilder

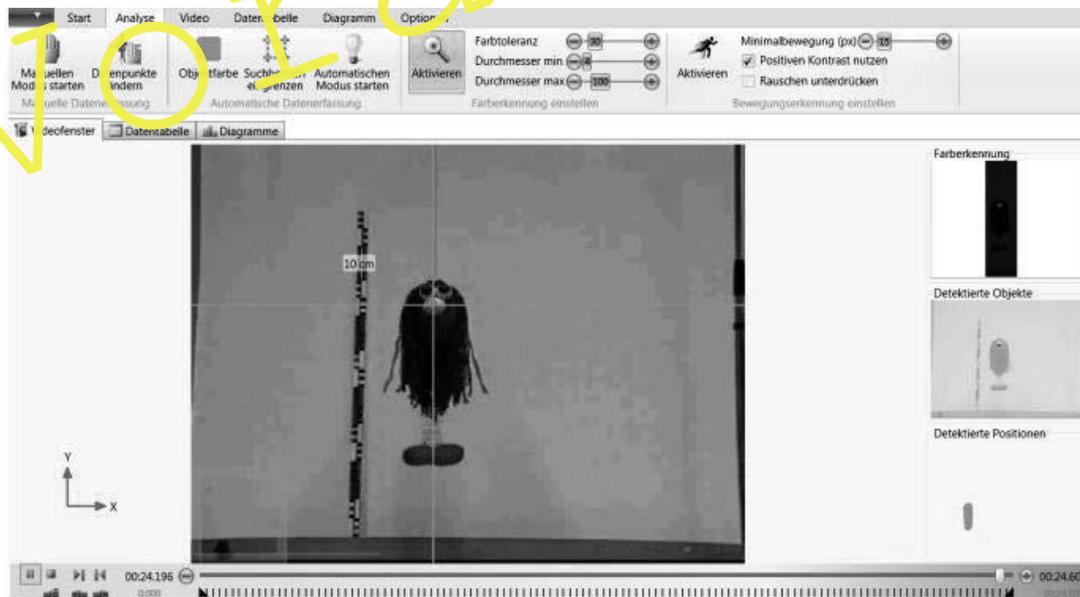


Abb. 23 Screenshot Viana: Menü Analyse mit Federpendel „Lolita“, Foto: R. Winter

M 8 Die Videoanalyse mit Viana – Blatt 2

Beispielanalyse „Federpendel“

- Button *Video einmessen*: Festlegen des Koordinatenursprungs und der Referenzstrecke (exakte Anweisung bekommt man in Form von Hinweisfenstern)
- Button *Koordinatensystem*: Richtung der Achsen festlegen
- Button *Objekt verfolgen*: Anzahl der zu verfolgenden Objekte festlegen (maximal 3)

2. Menü *Analyse* wählen

- Zeitleiste des *Videoplayers* (unterer Bereich): Start- und Endframe durch Verschieben der Markierungen wählen. Es wird leider nur die Zeit und nicht die Framenummer angezeigt.
- Dialogfeld *Manuelle Datenerfassung*
 - Button *Manuellen Modus starten*: Es beginnt die Datenerfassung per Mausklick
 - Button *Datenpunkte ändern*: Möglichkeit der Anpassung einzelner Datenpunkte

Oder – Dialogfeld *Automatische Datenerfassung*

- Button *Objektfarbe wählen*: Definieren der Anfangsfarbe des Objekts (Nase von Lolita)
- Button *Suchbereich eingrenzen*: Verringerung des Messbereichs von links und rechts
- Button *Automatischen Modus starten*: Beginn der Messwertenerfassung
- Dialogfeld *Farberkennung einstellen*
 - Button *Aktivieren*: Feinjustierung von Farbtoleranz und Durchmessergrenzen

Oder – Dialogfeld *Bewegungserkennung einstellen*

- Button *Aktivieren*: Verwendung der Bewegungserkennung anstatt der Farberkennung (nur sich bewegendes Objekt wird erkannt)

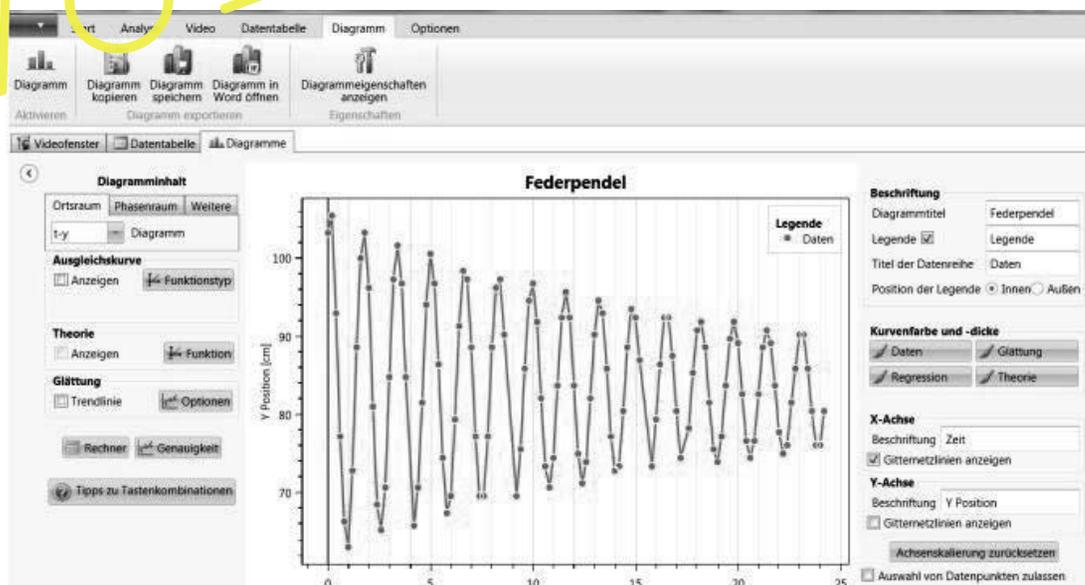


Abb. 24 Screenshot Viana: Menü Diagramm mit y-t-Diagramm Federpendel, Foto: R. Winter

M 9 Die Videoanalyse mit *measure Dynamics*

measure Dynamics ist ein ausgereiftes Programm, das gegenüber anderer Videoanalyse-Software eine Reihe von Vorteilen bietet. Zum Beispiel:

- Synchron zum ablaufenden Video entstehendes Diagramm
- Vorhandensein vieler Beispielvideoclips und bereits vollständig analysierter und ausgewerteter Bewegungen
- Möglichkeit der Einblendung von Pfeilen für die physikalischen Größen, entweder angeheftet an das sich bewegende Objekt oder ortsfest (Abb. 27)
- Einfaches Erstellen von Stroboskopbildern aus jedem beliebigen Video (Abb. 26)

Die Bedienung von *measure Dynamics* ist ähnlich wie bei anderen Programmen, bei denen die Messwerte mithilfe einer automatischen Farberkennung oder einer automatischen Objektverfolgung erfasst werden (z. B. M 8). Das Programm ist leider kostenpflichtig. Es gibt aber eine kostenlose Demoversion, welche im Unterschied zur Vollversion eine Zeitverzögerung beim Start und eine wasserzeichenähnliche Einblendung besitzt (Abb. 25).



Abb. 25: Screenshot der Demoversion von *measure Dynamics* mit y-t-Diagramm des Federpendels, Foto: R. Winter

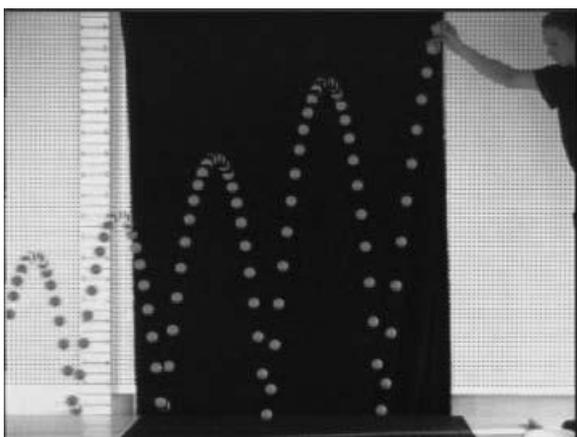


Abb. 26: Stroboskopaufnahme eines hüpfenden Flummis © V. Nordmeier: Vortrag zur DPG-Frühjahrstagung Hannover 2016

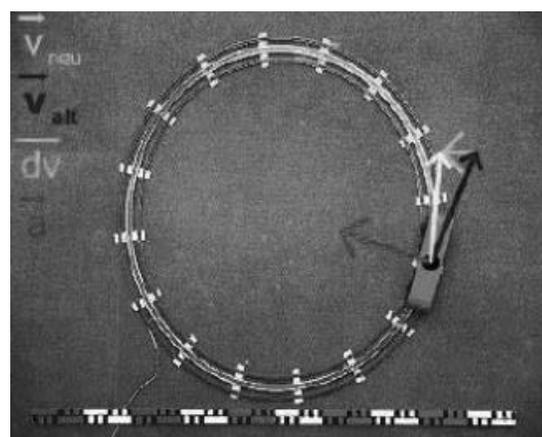


Abb. 27: Elektrische Spielzeugeisenbahn, Foto: R. Winter

II/A

M 10 Arbeitsblatt Stroboskopaufnahme

Abb. 28 zeigt ein Experiment mit einem Wurfgerät, das aus 2 Kugeln und einem Auslösemechanismus besteht. Wenn man den Auslösemechanismus (im Bild links oben) betätigt, wird die dunkle Kugel waagrecht weggeschlagen, während die helle Kugel gleichzeitig senkrecht nach unten fällt. Im Experiment beleuchtet man mit einer Stroboskopblitzlampe, die eine Frequenz von $1/29$ Hz besitzt. Die zweite Position der hellen Kugel ist durch die Halterung verdeckt. Auf dem Tisch liegt ein Längenmaßstab, dessen schwarze Quadrate 1 cm lang sind. Die eingefärbten Strecken sind 10 cm lang.

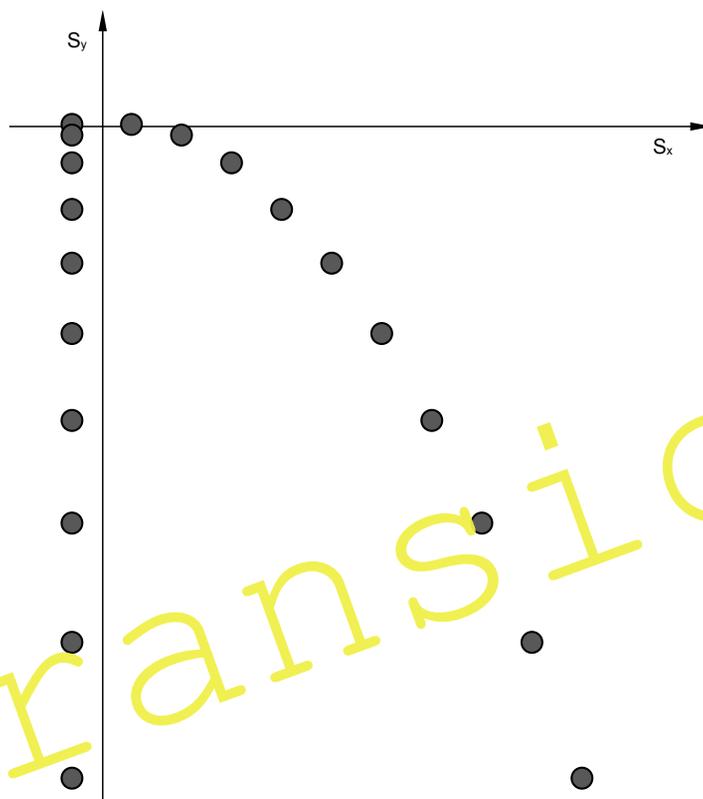


Abb. 28: Stroboskopaufnahme einer waagrecht geworfenen und einer zeitgleich gestarteten frei fallenden Kugel © M. Emde

Aufgaben

1. Beschreiben Sie den Zusammenhang zwischen den Bewegungen beider Kugeln.
2. Bestimmen Sie aus der Stroboskopaufnahme die Koordinaten aller Positionen der dunklen Kugel bezüglich des eingezeichneten Koordinatensystems und der realen Länge. Erstellen Sie dann mit einem Tabellenkalkulationsprogramm jeweils das t - s_x -, t - s_y -, t - v_x - und das t - v_y -Diagramm.

Hinweis: Berechnen Sie die durchschnittlichen Geschwindigkeiten zwischen benachbarten Messpunkten und ordnen Sie diese dem Zeitpunkt der jeweiligen Intervallmitte zu.

3. Ermitteln Sie die horizontale Anfangsgeschwindigkeit v_0 .
4. Bestimmen Sie die vertikale Beschleunigung a_y . Wie groß ist die prozentuale Abweichung vom theoretischen Wert g ?

Erläuterungen und Lösungen

M 1 Die Kinematik – frischen Sie Ihr Wissen auf!

Aufgabe 1

a) $t = \frac{s}{v} = \frac{72 \text{ km}}{20 \text{ km/h}} = 3,6 \text{ h} = 216 \text{ min}$

b)

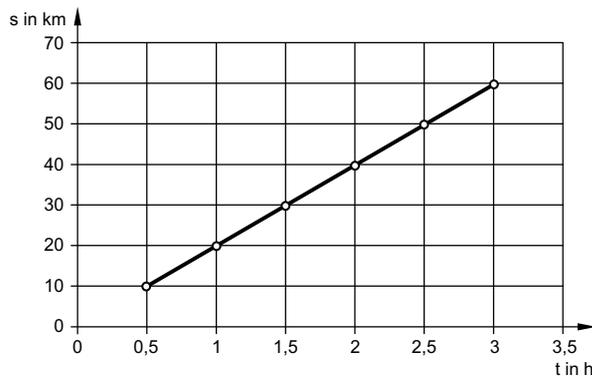


Abb.29: Weg-Zeit-Diagramm einer Fahrradtour mit gleichbleibender Geschwindigkeit.

c) $s(105 \text{ min}) = 20 \text{ km/h} \cdot 105/60 \text{ h} = 35 \text{ km}$

Aufgabe 2 b)

t in s	0,0	1,9	3,9	3,9	4,8	5,0	6,5	7,3	8,1	9,0	9,9
s in m	0	10	25	30	40	50	60	70	80	90	100
t₁ in s	0,0	0,95	2,45	3,45	4,35	5,20	6,05	6,90	7,70	8,55	9,45
v in m/s		5,3	9,1	11,1	11,1	12,5	11,1	12,5	12,5	11,1	11,1

Wenn keine weiteren Angaben über die Art der Bewegung vorliegen, gibt es für das Eintragen der Geschwindigkeit in das Diagramm keine Alternative zur Wahl des Intervallmittelpunkts. Bei dieser Methode wird die Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen zwei Zeitpunkten t_1 und t_2 als Schätzwert für die Momentangeschwindigkeit im Mittelpunkt zwischen t_1 und t_2 verwendet. Nähme man stattdessen die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_1 bzw. t_2 , wäre das Intervall größer und die Genauigkeit in der Regel kleiner.

Aufgabe 2

a)



Abb.30: Weg-Zeit-Diagramm eines 100m-Sprinters

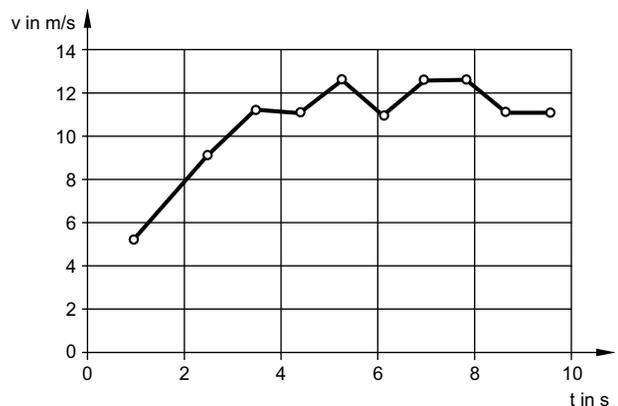


Abb. 31: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm eines 100-m-Sprinters

Der RAABE Webshop: Schnell, übersichtlich, sicher!



Wir bieten Ihnen:



Schnelle und intuitive Produktsuche



Übersichtliches Kundenkonto



Komfortable Nutzung über
Computer, Tablet und Smartphone



Höhere Sicherheit durch
SSL-Verschlüsselung

Mehr unter: www.raabe.de