Hochgeschwindigkeitskameras im Physikunterricht

Physik unter der (Zeit-)Lupe

Schriftliche Hausarbeit
zum ersten Staatsexamen
für das Lehramt an Gymnasien

von

Maximilian Michel

Dezember 2010

Betreuer und Prüfer:
AR Dr. Th. Wilhelm

Julius-Maximilians-Universität
Würzburg
Fakultät für Physik und Astronomie
Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik

Inhaltsverzeichnis

Vorwort **4**

1. Allgemeines zu Hochgeschwindigkeitskameras **5**
1.1. Funktionsweisen von Hochgeschwindigkeitskameras 5
1.2. Die Casio EX F1 7
1.3. Die Casio EX FS 10 - klein und kompakt 8
1.4. Systematischer Fehler von Hochgeschwindigkeitskameras mit CMOS-Sensoren 9
1.4.1. Theoretische Überlegungen zum „Rolling-Shutter“ 9
1.4.2. Experiment zur Bestimmung der Zeitunschärfe 10
1.4.3. Durchführung und Ergebnis des Experimentes zur Zeitunschärfe . . 12
1.5. Experimentelle Bestimmung der tatsächlichen Framerate 14

2. Praktische Hinweise für den Anwender **16**
2.1. Erstellen von Hochgeschwindigkeitsfilmen 16
2.1.1. Licht ins Dunkle bringen – Das richtige Ausleuchten 16
2.1.1.1. Die Wahl der richtigen Lichtquelle 16
2.1.1.2. Das Ausleuchten 17
2.1.1.3. Beispiele für verschiedene Ausleuchtungsmethoden 17
2.1.1.4. Günstige Studiolichtalternative 19
2.1.2. Filmen von Hochgeschwindigkeitsvideos 20
2.1.2.1. Aufnahmegeschwindigkeit 20
2.1.2.2. Zoom und Fokus 20
2.1.2.3. Die Remote-Funktion 21
2.1.3. Belichtungs- und Kontrasteinstellungen 22
2.1.4. Bearbeiten und Auswerten von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen . . 22
2.2. Verwendete Prorgamme 22
2.2.1. MPEG-Streamclip – eine Kurzanleitung 23
2.2.2. Aufrichten von Hochkantaufnahmen mit MPEG-Streamclip 24
2.3. Videoanalyse mit measure dynamics 25
2.3.1. Allgemeines zu measure dynamics 25
2.3.2. Hinweise zu den Aufnahmen 25
2.3.3. Hinweise zur Analyse 25
2.3.4. Messwerterfassung 26
2.3.5. Weitere Messwerte bearbeiten 27
2.3.6. Messfehlerabschätzung bei measure dynamics 27

3. Die Hochgeschwindigkeitskamera im Mechanik-Unterricht **30**
3.1. Das Wiesnersche-Mechanikkonzept 30

3.2. Stöße zwischen Luftkissengleitern . . . 32
3.2.1. Die harte Feder . . . 32
3.2.2. Die weiche Feder . . . 33
3.3. Der Looping . . . 35
3.3.1. Der Looping - theoretisch betrachtet . . . 35
3.3.2. Das rollende Auto im Looping der Darda-Bahn . . . 38
3.3.2.1. Betrachtung der Energie . . . 39
3.3.2.2. Betrachtung der kinetischen Größen . . . 41
3.3.3. Das angetriebene Auto im Looping der Darda-Bahn . . . 42
3.3.3.1. Der Darda-Looping – kinematisch betrachtet . . . 42
3.3.3.2. Der Darda-Looping – energietisch betrachtet . . . 43
3.3.4. Der Looping und die Carrera-Bahn . . . 44
3.3.4.1. Der Carrera-Looping – kinetisch betrachtet . . . 44
3.3.4.2. Der Carrera-Looping – energetisch betrachtet . . . 45
3.4. Das Maxwell-Rad – das Yoyo der Physiker . . . 47
3.4.1. Das Maxwellrad – die Theorie . . . 47
3.4.2. Das Maxwellrad – Betrachtung der Energien . . . 50
3.4.3. Das Maxwellrad – kinetisch betrachtet . . . 52
3.4.4. Betrachtung der Streuung der Messwerte in diesem Experiment . . . 53
3.5. Die Metallkugel auf der Glasplatte . . . 54
3.5.1. Die Metallkugel – kinematisch betrachtet . . . 55
3.5.2. Die Metallkugel – energetisch betrachtet . . . 58
3.5.3. Resüme . . . 61

4. Qualitative Versuche mit der Hochgeschwindigkeitskamera 63
4.1. Das Verhalten verschiedener Lichtquellen bei *50 Hz* . . . 63
4.1.1. Die Glühbirne . . . 63
4.1.2. Die Leuchtstoffröhre . . . 66
4.1.3. Die lichtemittierenden Dioden - kurz LED . . . 68
4.2. Der platzende Luftballon . . . 69
4.2.1. Der wassergefüllte Luftballon . . . 69
4.2.2. Der rauchgefüllte Luftballon . . . 71
4.3. Wassertropfen auf Wasseroberfläche . . . 71
4.3.1. Der Fall des Regentropfens . . . 72
4.3.2. Das Auftreffen auf die Wasseroberfläche . . . 72
4.3.3. Die Entstehung der Kreiswellen . . . 74
4.4. Vermischen zweier Flüssigkeiten . . . 74
4.4.1. Theoretische Grundlagen . . . 74
4.4.2. Das Experiment . . . 75
4.4.2.1. Das Eintropfen . . . 76
4.4.2.2. Der „freejet“ . . . 77
4.4.2.3. Der Stauwirbel . . . 78
4.4.3. Bedeutung für die Schule . . . 79

Zusammenfassung und Fazit 80

Literaturverzeichnis 83

Anhang **84**

A. Anleitungen zur Casio EX F1 und Casio EX FS10 **85**
A.1. Schnellstart HS-Aufnahmen mit der Casio EX F1 86
A.2. Schnellstart HS-Aufnahmen mit der Casio EX FS10 88
A.3. Bedienungsanleitung Casio EX FS 10 und md für Phywe 90

B. Inhalt der DVD **106**

Danksagung **109**

Selbstständigkeitserklärung **111**

Vorwort

„Nicht so schnell!“ und *„Nochmal langsam, bitte!“* sind wahrscheinlich häufige Gedanken der Schüler. Es ist anzunehmen, dass allzu oft diese Gedanken unausgesprochen bleiben. Wird derselbe Sachverhalt Schritt für Schritt erläutert und verinnerlicht, kann er auch gelernt und begriffen werden. Dies ist ohne Frage bei theoretisch-fachlichen Unterrichtsinhalten möglich, bei Schulexperimenten hingegen nur selten realisierbar. Viele Versuche verlaufen zu schnell, um die einzelnen Schritte wahrnehmen zu können. Die Dauer eines Experimentes zu verlängern oder Abläufe zu verlangsamen ist oft nur mit Hilfsmitteln möglich gewesen, welche wiederum selbst einen Einfluss auf das Experiment hatten. Ein Experiment exakt zu wiederholen kann wohl als *unmöglich* bezeichnet werden. An genau dieser Stelle setzen die für Schulen bezahlbaren Hochgeschwindigkeitskameras von Casio an. Mit geringem Aufwand können nun Experimente gefilmt und verlangsamt betrachtet werden. Der entscheidende Vorteil ist, dass die Schüler *immer das selbe* Experiment sehen, welches nicht durch äußere Eingriffe zu einem verlangsamten Ablauf gebracht wurde. Es können Momente angehalten, Bild für Bild ausführlich besprochen und für die Festigung des Lernstoffes können die Videos jedem Schüler gefahrlos mit nach Hause gegeben werden.
Ein weiterer Aspekt, welcher für den Einsatz solcher Kameras spricht, ist, dass schnelle sowie alltägliche Phänomene genauer unter die (Zeit-)Lupe genommen werden können. Schüler können der Frage nachgehen, was passiert, wenn das Licht eingeschaltet wird? Oder: Wie sieht eine schwingende Gitarrensaite aus? Was passiert, wenn ein Luftballon zerplatzt? Was passiert, wenn Regentropfen in eine Pfütze fallen?
Einige Lehrkräfte setzen die Videoanalyse im Physikunterricht seit Längerem ein. Insbesondere bei schnell ablaufenden Experimenten war der Analyse enge Grenzen gesetzt, da die Anzahl der Videobilder zu gering oder das Objekt durch seine Bewegung undeutlich zu erkennen war.

In dieser Ausarbeitung werden die Hochgeschwindigkeitskameras mit ihren technischen Besonderheiten kurz und allgemein besprochen. Kapitel 2 gibt dem interessierten Leser Tipps und Tricks für Videoaufnahmen und -analysen mit auf den Weg, welche sich im Laufe dieser Ausarbeitung entwickelt und als nützlich erwiesen haben. Bevor in Kapitel 4 völlig neue Möglichkeiten bei qualitativen Betrachtung von Experimenten für den Schulphysikunterricht vorgestellt werden, zeigt Kapitel 3 die Verbesserungen bei der Videoanalyse auf, welche sich durch den Einsatz der Hochgeschwindigkeitskamera im Mechanikunterricht ergeben. Die Experimente stellen eine kleine Auswahl möglicher Experimente und ihrer physikalischen Grundlagen vor. Einige weitere Aufnahmen von Experimenten befinden sich auf der beiliegendeliegen DVD als Videodateien.

1. Allgemeines zu Hochgeschwindigkeitskameras

1.1. Funktionsweisen von Hochgeschwindigkeitskameras

Digitale Hochgeschwindigkeitskameras gibt es seit einiger Zeit. Eingesetzt werden sie vor allem in der Analyse von Crash-Tests und in einigen Bereichen der Wissenschaft, wie beispielsweise in der Verhaltensforschung in der Biologie. Einige Camcorder haben auch eine „Slow-Motion“-Funktion, bei der die hohe Bildrate nur kurzzeitig (etwa 1-2 s) möglich ist. Erst mit der Markteinführung der Casio EX F1 im Jahr 2008 konnten kompakte Kameras über längere Zeiträume Hochgeschwindigkeitsaufnahmen machen. Mit *Hochgeschwindigkeitsfotografie* werden in einer frühen Definition mindestens drei Bilder in Folge bei mehr als 128 Bildern pro Sekunde bezeichnet (vgl. [MV]). Umgangssprachlich werden Videoaufnahmen mit einer Bildrate von mehr als 30 Vollbildern pro Sekunde auch *Hochgeschwindigkeitsvideo* bzw. *Slow-Motion* genannt. Lange Zeit war ein großer technischer Aufwand nötig, um High speed Aufnahmen machen zu können. Die Belichtung und die schnelle Bewegung des lichtempfindlichen Filmes war hierbei das größte Problem. Mit der Entwicklung und Verbesserung von Halbleitermaterialien war es möglich, in Videokameras das bewegte Zelluloid durch einen unbeweglichen Sensor zu ersetzen. Dies führte wiederum zu einer kompakteren Bauweise von Kameras und Fotoapparaten. In der Anfangszeit der digitalen Hochgeschwindigkeitskameras wurden CCD-Sensoren eingesetzt. Der Nachteil dieser Sensoren ist, dass der Lichteinfall für den Ausleseprozess unterbrochen werden muss (vgl. [BEO09]), wodurch der Einsatz eines extrem schnellen und präzisen Verschlusses notwendig wird. Die Entwicklung von CMOS Sensoren schafft hier Abhilfe. Es wird ausgenutzt, dass CMOS - Sensoren bei Lichteinfall permanent Signale aussenden können (vgl. [BEO09]). Inzwischen werden auch bei wissenschaftlichen Hochgeschwindigkeitskameras vermehrt CMOS Sensoren eingebaut, da diese sowohl mit, als auch ohne Verschluss betrieben werden können. Die Daten müssen „nur“ schnell genug ausgelesen und erfasst werden. Bei diesen hohen Auslesegeschwindigkeiten wird entsprechend mehr Licht benötigt, je höher die Bildzahl pro Sekunde ist. Daher ist eine gute Ausleuchtung des Objektes notwendig. Hierzu mehr in Kapitel 2.1.1 auf Seite 16.
Die Hochgeschwindigkeitskameras lassen sich je nach Datenverarbeitungsprinzip in zwei Gruppen[1] einteilen: Die erste Gruppe ist auf externe Bild- und Datenverarbeitung konzipiert und kann fast ausschließlich nur an einen Computer angeschlossen betrieben werden. Bei der zweiten Gruppe findet die Bildver- und -bearbeitung intern statt, sodass sie auch ohne eine Verbindung zu einem PC verwendet werden kann.

1. Gruppe: Die Kamera ist mit einem PC verbunden und die Daten werden direkt nahezu ohne Verarbeitung an diesen übertragen und in einer Steckkarte mit großem

[1] In [MV] wird gar eine Dreiteilung der modernen Hochgeschwindigkeits-Kamerasysteme vorgenommen.

RAM-Modul zwischen gespeichert. Anschließend werden sie mit einer Software weiterverarbeitet. Bei entsprechender Ausstattung kann man so bis zu 1.000.000 Bilder pro Sekunde erhalten.

Nachteil: Die Nachteile dieser Methode sind im Wesentlichen der Preis (ab ca. 20 000 €, vgl. [MV]) und die eingeschränkte Mobilität, denn die großen Datenmengen müssen schnell verarbeitet, gespeichert und komprimiert werden.

Vorteil: Die Vorteile stellen sehr hohe Frameraten bei gleichzeitig guter Auflösung dar (diese verursachen das große Datenvolumen, vgl. [MV]). Des Weiteren sind die Objektive meist wechselbar, weshalb sie oft mit sehr lichtstarken und extrem scharfen Festbrennweiten und Makrolinsen in der Wissenschaft Anwendung finden. Die Kameras speichern zusätzlich bei jedem Frame ein Zeitsignal, was im Nachhinein eine exakte zeitliche Analyse des beobachteten Vorganges erlaubt. Außerdem kann die Belichtungszeit unabhängig von der Bildrate eingestellt werden.

2. Gruppe: Dank der „Pixelmanie“ und einem regelrechten HD-Boom auf dem Markt der kompakten Digitalkameras werden immer günstiger immer schnellere Bildverarbeitungsprozessoren in die Kameras eingebaut, um das Datenvolumen durch die High-Definition-Aufnahmefunktionen der Kamera bewältigen zu können.

Nachteil: Der Nachteil liegt in der kompakten Bauweise. In den Kameras ist bereits der Bildverarbeitsungsprozessor eingebaut, der den verschiedenen Ansprüchen wie Preis, Leistung und Stromverbrauch gerecht werden muss. Daher ist durch den Prozessor die Datenverarbeitung pro Zeit begrenzt. Dem wird dadurch Abhilfe verschafft, dass weniger Zeilen des Sensors ausgelesen werden. Folglich kann man mehr Bilder pro Sekunde erhalten. Die Qualität reicht dabei selbstverständlich nicht an die der ersten Gruppe heran, ist jedoch ausreichend, um schnelle Vorgänge zu betrachten und diese mit einer Videoanalyse-Software wie measure dynamics verarbeiten zu können. In der Regel arbeiten diese Kameras mit dem *ROIC*-Verfahren[2] (vgl. [MV]), das heißt, der Sensor wird permanent Zeile für Zeile ausgelesen. Durch das zeilenweise Auslesen kommt es insbesondere bei sehr hohen Bildraten innerhalb des Bildes zur Zeitverschiebung. Dieses Phänomen heißt *Rolling Shutter* und wird in Kapitel 1.4 auf Seite 9 genauer beschrieben. Die Anwendung in der Wissenschaft ist ebenfalls nur eingeschränkt möglich, da die Kameras kein Zeitstempel haben und somit die angegebene Framerate unter Umständen abweichen kann (vgl. Kapitel 1.5 sowie [MV]).

Vorteil: Neben der Mobilität, die aus der kompakten Bauweise resultiert, ist ein wesentlicher Vorteil der Preis, welcher dem einer guten Mittelklassekamera entspricht (ab etwa 300 € UVP, im Handel bereits ab 90 € zu erhalten[3]). Außerdem kann die Kamera mit verhältnismäßig günstigen Klasse 4 (Schreibgeschwindigkeit $> 4\ MB/s$) Speicherkarten genutzt werden (vgl. [MV]).

Casio nutzt in ihrer Reihe der hochgeschwindigkeitsfähigen Kameras das Prinzip der Verkleinerung des auszulesenden Bereiches und das ROIC-Verfahren, um die Bildrate bei der

[2] Die Abkürzung *ROIC* stammt aus dem Englischen und heißt „read out integrated circuit“, mit anderen Worten: geschlossener Auslesekreis.

[3] Amazonpreis 89,97€ am 11. November 2010.

EX F1 auf bis zu 1.200 Vollbilder pro Sekunde zu erhöhen. Im Gegensatz dazu arbeiten viele Videokameras mit dem Zeilensprungverfahren, also dem abwechselndem Auslesen von geraden und ungeraden Zeilen. Daraus entsteht ein schlecht auswertbarer Kamm-Effekt.

1.2. Die Casio EX F1

Abbildung 1.1.: Die Casio EXILIM EX-F1

Im März 2008 hat Casio seine erste Bridgecam[4] mit Highspeed-Funktion der Öffentlichkeit vorgestellt – die „Casio EX F1“. Ihr vollständiger Name ist „Casio Exilim Highspeed EX F1“. Inzwischen wird diese Kamera nicht mehr vertrieben. Die Aufnahmemöglichkeiten sind manigfaltig und hier nur kurz dargestellt. Man hat die Wahl zwischen

- 60 Fotos/s bei einer Auflösung von 6 Megapixeln (max. eine Sekunde)
- 60 Halbbilder/s im Full-HD Format (Auflösung: 1920×1080 Pixel)
- 30 Vollbilder/s im HD-Video-Format (1280×720)
- 30 Vollbilder/s im „normalen“ Video-Format (640×480)
- 300 Vollbilder/s im ersten Hochgeschwindigkeitsmodus, also 10× Zeitlupe (512×384)
- 600 Vollbilder/s im zweiten Hochgeschwindigkeitsmodus, 20× Zeitlupe (432×192)
- oder sogar 1.200 Bilder/s in der maximalen Framerate, 40× Zeitlupe (336×96).

Im Vergleich hierzu zeichnet eine „herkömliche“ PAL-Videokamera 25 Bilder/s im Zeilensprungverfahren, also 25 Halbbilder, oder zum Teil alternativ 12,5 ganze Bilder pro Sekunde auf. Hier kann man schon ahnen, welches Potential eine Hochgeschwindigkeitskamera für die Videoanalyse im Schulunterricht haben kann. Zudem können die Videos

[4] Bridgecams sind Kameras, die eine Brücke zwischen digitaler Kompaktkamera und digitaler Spiegelreflexkamera schlagen. Da die Kompaktkameras inzwischen auch längere Videosequenzen aufzeichnen können, stellt die hier verwendete Kamera auch einen Brückenschlag zur Videokamera dar.

auch in der Casio-Kamera geschnitten werden.
Erstaunlich ist auch, zu welch günstigem Preis diese Hochgeschwindigkeitstechnologie angeboten wird. Das Modell, das als Grundlage dieser Ausarbeitung diente, ist die Casio EX F1. Die unverbindliche Preisempfehlung ist bei 799 € und damit im Bereich von Amateur-Spiegelreflexkameras gelegen. Casio bietet inzwischen nur noch günstigere Alternativen zur EX F1 an. Diese bieten allerdings keine so hohe Frame-Rate, außerdem ist die Auflösung geringer[5]. Beispielsweise die Casio EF FH20, welche maximal 1000 fps[6] bei einer Auflösung von 224x56 bzw. im YouTube-Modus 224x80 Pixel liefert. Dieser Modus optimiert das Video für das Hochladen auf YouTube. Sie kostet 499 € UVP[7]. Casio hat auch kleine Kompaktkameras mit Highspeed-Videofunktion ab 299 € UVP, wie beispielsweise die Casio Exilim EX FC 100 oder die teurere „Schwester“ Casio Exilim EX H10 (UVP 329 €). Aktuell[8] gibt es sechs verschiedene Hochgeschwindigkeitskameras von Casio:

- Casio EX-F1 (300 fps bis 1200 fps)
- Casio EX-FH20 (210 fps bis 1000 fps)
- Casio EX-FH25 (120 fps bis 1000 fps)
- Casio EX-FH100 (120 fps bis 1000 fps)
- Casio EX-FC100 (210 fps bis 1000 fps)
- Casio EX-FS10 (210 fps bis 1000 fps),

die Werte in Klammern beschreiben jeweils die geringste und die höchste Anzahl von Bildern pro Sekunde im Hochgeschwindigkeitsmodus. Ungeachtet dessen bieten die Kameras immer auch reguläre Aufnahmen mit 30 fps an.

1.3. Die Casio EX FS 10 - klein und kompakt

Ein weiteres Modell, welches von Casio 14 Monate nach der EX F1, im Mai 2009, auf den Markt gebracht worden ist, ist die Casio EX FS10. Ihr Vorteil ist unbestreitlich ihre geringe Größe, aber auch, dass die Videos gleich im avi-Format und Motion-Jpeg-Codec gespeichert werden. Damit entfallen einige Schritte zwischen Aufnehmen des Experimentes und dem Analysieren mit measure dynamics. Bei dieser Kamera hat man die Wahl zwischen:

- Einzelbilder mit einer Auflösung von 9,1 Megapixel
- 30 Fotos in Serie (Wahl zwischen 30 Fotos in 1 s, 2 s, 3 s, 6 s bzw. 10 s.)
- 30 Vollbilder/s im HD-Modus (Auflösung: 1280×720 Pixel)
- 30 Vollbilder/s im STD Videoformat (640×480)

[5] Stand November 2010.
[6] *fps* heißt frames per second und ist die offizielle Abkürzung für Bilder pro Sekunde.
[7] Unverbindliche Preisempfehlung.
[8] Am 10. November 2010, vgl. [HP-].

Abbildung 1.2.: Die Casio EX-FS10

- 210 Vollbilder/s, entspricht 7× Zeitlupe (Auflösung 480 × 360)
- 420 Vollbilder/s, 14× Zeitlupe (224 × 168)
- 1000 Vollbilder/s, $33,\bar{3}\times$ Zeitlupe (224 × 64)

Zusätzlich hat man die Möglichkeit, Vorwegaufnahmen zu machen, d.h. die 5 *s vor* dem Starten der Aufnahme[9] sind ebenfalls in der Videodatei enthalten. Verständlicherweise reduziert sich die Laufzeit des Akkus bei dieser Einstellung.

1.4. Systematischer Fehler von Hochgeschwindigkeitskameras mit CMOS-Sensoren

Hochgeschwindigkeitskameras lesen sehr schnell viele Informationen aus. Leicht einsichtig ist, dass das Auslesen, Umwandeln der Informationen und das Zusammensetzen dieser zu einem ganzen Bild (Frame) durch den Sensor nur nacheinander erfolgen kann, obwohl die CMOS-Sensoren permanent Signale ausgeben (Stichwort ROIC). Da eingebaute, mobile Prozessoren in der Regel nicht so leistungsstark sind, kommt es in Grenzbereichen auf den einzelnen Bildern zu Zeitunschärfen (*Rolling-Shutter-Effekt*). Sie entstehen durch das zeitversetzte Auslesen der einzelnen Pixel. Der einzelne Frame stellt also nicht die Momentansituation mit einer Belichtungszeit von $\Delta t = \frac{1}{\#\text{ fps}}$ dar, wobei # fps die Anzahl der Bilder pro Sekunde ist. Genau genommen ist ein Bild die Summe der einzelnen Bildpunkte, welche in Wirklichkeit unterschiedliche Momentaufnahmen des Motives sind. Dieser Effekt wird als Rolling-Shutter-Effekt bezeichnet.

1.4.1. Theoretische Überlegungen zum „Rolling-Shutter“-Effekt von Hochgeschwindigkeitskameras

Das Hauptaugenmerk richtet sich auf die Zeitverschiebung zwischen den Zeilen, da dieser Effekt wesentlich deutlicher zu Tage tritt als die Zeitverschiebung zwischen benachbarter Pixel einer Zeile. Betrachten wir zuerst speziell die verwendete Kamera.

[9] Bei Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sind es „nur“ 2 *s*.

Die Casio EX F1 hat eine maximale Framerate von 1200 fps (Bildgröße: 336×96 Pixel), dies bedeutet, dass in der Zeit $\Delta t = \frac{1}{1200} s$ 96 Zeilen ausgelesen werden. Man kann annehmen, dass für die 96 Zeilen tatsächlich die komplette Zeit Δt nötig ist. Übersetzt in die Formelsprache heißt das:

$$\Delta t = \sum_{i=1}^{96} \Delta t_i,$$

wobei Δt_i die benötigte Zeit für Zeile i beschreibt. Wird vorausgesetzt, dass die Verarbeitungszeit der Zeilen ($= \Delta t_i$) für alle i Zeilen annähernd gleich ist, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{1}{1200} s = \sum_{i=1}^{96} \Delta t_1 = 96 \cdot \Delta t_1 \\ \Rightarrow \Delta t_1 &= \frac{1}{1200 \cdot 96} s = \frac{1}{115\ 200} s \cong 8{,}7 \cdot 10^{-6} s = 8{,}7\ \mu s \end{aligned}$$

Die Casio EX F1 benötigt demnach bei ihrer höchsten Framerate (1200 fps) nur etwa 9 Mikrosekunden für eine Zeile! Unter der Voraussetzung, dass die Verarbeitungszeit für alle Pixel gleich lang ist, benötigt die Kamera auf einen Bildpunkt bezogen

$$\Delta t_{\text{Pixel}} = \frac{1}{1200 \frac{1}{s} \cdot 96 \cdot 336} = \frac{1}{38\ 707\ 200} s \cong 2{,}5 \cdot 10^{-8} s \cong 25\ ns$$

Dies bedeutet, dass pro Pixel etwa 25 Nanosekunden benötigt werden. Die zeitliche Verschiebung benachbarter Pixel einer Zeile ist also um den Faktor $3 \cdot 10^{-2}$ kleiner als der Effekt zwischen den Zeilen, sodass die Zeitverschiebung der Zeilen wesentlich mehr ins Gewicht fällt als die zeitliche Verschiebung innerhalb einer Zeile.

Andere Kameras haben eventuell ein anderes Ausleseschema, daher muss zuerst die Art des Auslesens herausgefunden werden. Der Einfachheit halber sei ein zeilenweises Auslesen wie bei der Casio EX F1 angenommen. Es sei also eine Highspeed-Kamera mit einer maximalen Framerate von # fps gegeben. Damit ergibt sich die Zeit pro Frame $t_{\#\ \text{fps}} = \frac{1}{\#\ \text{fps}}$, was bei einer Auflösung von n Zeilen und unter den Voraussetzungen wie oben auf

$$\Delta t = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i = n \cdot \Delta t_1 \tag{1.1}$$

führt. Die Kamera benötigt also für eine Zeile die Zeit

$$\Delta t_1 = \frac{1}{\#\text{fps} \cdot n}. \tag{1.2}$$

1.4.2. Experiment zur Bestimmung der Zeitunschärfe

Um den Effekt der Zeitunschärfe eines Frames zu veranschaulichen und diese Unschärfe zu bestimmen, wird ein einfaches Experiment aufgebaut. Für diesen Versuch wird ein regelbarer Frequenz-Generator (wie das hier verwendete Modell „310“ der Firma Oorx) sowie

eine Steckplatte mit 5 weißen LED's, die in gleichen Abständen auf einer Geraden angeordnet sind, benötigt. Außerdem braucht man zwei Verbindungskabel, um den Frequenz-Generator mit den LED's zu verbinden. Am Frequenz-Generator wird eine Sägezahn-Funktion gewählt, welche mit der Offset-Einstellung so geregelt wird, dass das Minimum bei 0 V und das Maximum bei etwa 10 V liegt. Da die LED's im vorliegenden Fall in Reihe geschaltet werden, gilt:

$$U_{\text{Gesamt}} = 2{,}0V \cdot \# \text{ LED},$$

wobei # LED die Anzahl der LED's angibt. Bei 5 LED's also $U_{\text{Gesamt}} = 10V$. Da der Strom bei der Reihenschaltung

$$I_{\text{Gesamt}} = I_1 = I_2 = \ldots = I_{\text{LED}} = 20\ mA$$

ist, muss also darauf geachtet werden, dass der Frequenz-Generator eine Spannung von $U_{\text{Gesamt}} = 10V$ und eine Stromstärke von $I_{\text{Gesamt}} = 0{,}020\ A$ bereit stellt. Steht kein solcher Frequenz-Generator zur Verfügung, sollte eine Mischung aus Reihen- und Parallelschaltung (ggf. mit Vorwiderständen) genutzt werden. Vor der Durchführung des Experimentes sind folgende theoretische Grundlagen und Überlegungen anzustellen:

- Die Wahl von fünf LED's ist nicht völlig aus der Luft gegriffen. Wird der Bildausschnitt wie in Abbildung 1.3 gewählt, so kann das Bild der Höhe nach in vier gleich große Abschnitte unterteilt werden, welche sich für die folgenden Berechnungen als geschickt erweisen.

Abbildung 1.3.: Empfehlenswerter Bildausschnitt zum Test von Zeitverschiebungen beim Auslesen des CMOS-Sensors von Hochgeschwindigkeitskameras (hier von der Casio EX F1).

- Auch der Abstand der LED's ist nicht zufällig, sondern ein Kompromiss zwischen einer guten Sichtbarkeit[10] und der logischen Forderung nach einer möglichst unbeeinflussten Wahrnehmung der einzelnen LED's durch den Sensor.

- Wählt man einen Frequenzgenerator mit beleuchteter LCD-Frequenzanzeige, so kann man auf jedem Bild nicht nur die LED's, sondern auch die zugehörige Frequenz gut erkennen (wie bei dem hier verwendeten Modell „310“ von Oorx)

- Die Wahl des Frequenzbereiches, in dem die Zeitunschärfe sichtbar sein müsste, sind folgendermaßen zu überlegen:

[10] Anzahl der Pixel, also der Größe des Objektes im Frame.

Das Bild teilt sich in vier gleich große, durch LED's begrenzte Bereiche. Zuerst die allgemeine Herleitung, wobei x die Anzahl der Frames pro Sekunde (mit der Einheit $[x] = \frac{1}{s}$) und n die Anzahl der Abschnitte, also $n = \#\text{ LED} - 1$ (analog zur obigen Rechnung mit n als Anzahl der Zeilen) beschreibt. f_0 ist die Frequenz, bei der auf einem Frame alle LED's zum ersten Mal den gleichen Zustand[11] haben. Für f_0 gilt

$$f_0 = x \cdot n$$

Ziel ist es jedoch, dass jeweils die (bei fortlaufender Nummerierung der LED's) geraden bzw. die ungeraden Leuchtdioden den gleichen Zustand haben, also wird sinnvollerweise für $f_0' = \frac{f_0}{2}$ gewählt:

$$\Rightarrow f_0' = \frac{1}{2} \cdot x \cdot n$$

Im Falle der vorliegenden Casio EX F1 mit $x = 1200\ \frac{1}{s}$ und $n = 4$ ergibt sich so

$$f_0 = 2400\ Hz.$$

Warum werden in diesem Experiment LED's verwendet?

Im Wesentlichen stehen drei künstliche Lichtquellen zur Verfügung:

1. Die *Glühbirne*: Ihr Grundprinzip ist hier das Problem. Durch den Strom wird der Draht so stark erhitzt, dass er glüht. Da dieser erhitzte Draht nur langsam abkühlt (beim Ausschalten noch etwa eine Sekunde, vergleiche Experiment 4.1.1 auf Seite 63) nimmt ihre Leuchtleistung bereits bei 50 Hz Wechselspannung (was einem pulsierendem Stromfluss mit 100 Hz entspricht) auch für Hochgeschwindigkeitskameras kaum merklich ab. Daher ist sie für Experimente mit Wechselspannungen im Kilohertzbereich ungeeignet.

2. Die handelsübliche *Leuchtstoffröhre* (*Quecksilberdampfröhre*) ist hier ebenfalls ungeeignet, da in ihr ultraviolettes Licht erzeugt und durch die fluoriszierende Beschichtung der Röhreninnenwand in sichtbares Licht umgewandelt wird. Im Experiment 4.1.2 auf Seite 66 kann man deutlich sehen, dass diese fluoriszierende Schicht, wenn auch andersfarbig „nachleuchtet“, also eine gewisse Remanenz-Zeit hat.

3. Die *LED*: Gleichfarbige LED's haben den Vorteil, dass sie *gleichartig* und *gleichzeitig* reagieren. Dies bedeutet auch, dass nach Überschreiten einer Grenzspannung *gleichzeitig alle* LED's aufleuchten und ihre Helligkeit linear von der Spannung abhängt. Da sie insbesondere nach Unterschreiten der Grenzspannung nicht nachleuchten, sind sie für dieses Experiment bestens geeignet.

1.4.3. Durchführung und Ergebnis des Experimentes zur Zeitunschärfe

Die Bestimmung der Zeitverschiebung wurde auf zweierlei Arten durchgeführt.

[11] Die Zustände sind: die LED ist an oder aus *und* die Spannung nimmt zu oder ab.

1. Im abgedunkelten Raum (Abb. 1.4), da hier insbesondere das Flackern wesentlich deutlicher sichtbar ist. Nachteilig ist allerdings, dass sich von Frame zu Frame nur sehr wenig ändert, was eine geringere Belastung des Prozessors und somit eventuell eine höhere Bildverarbeitungsrate zur Folge haben kann. Diese wiederum könnte dann eine kleinere Zeitverschiebung innerhalb des Bildes verursachen.

Abbildung 1.4.: Test der Kamera im Dunkeln.

2. In einem mit Leuchtstoffröhren beleuchteten Raum, mit unruhigem, ungleichmäßigem Hintergrund (Abb. 1.5), da sich innerhalb eines Bildes viele Farbinformationen ändern. Damit wird der Prozessor evtl. stärker belastet und so die maximale Zeitverschiebung provoziert.

Abbildung 1.5.: Test der Kamera im mit Leuchtstoffröhren beleuchteten Raum.

Auf dem aufgenommenen Videos „Kameratest_1“ und „Kameratest_2“ ist klar zu erkennen, dass ab einer Frequenz von 2390 Hz kein Flackern mehr wahrnehmbar ist. Erst ab 2490 Hz ist wieder ein ganz leichtes Flimmern zu sehen. Dies bestätigt die Vermutung, dass die Zeitverschiebung innerhalb des Bildes zwischen der ersten und der letzten Zeile $\Delta t \approx \frac{1}{1200} s$ ist. Die Vermutung, dass bei geringen Unterschieden von Bild zu Bild der Prozessor weniger Daten verarbeiten muss und sich damit die Zeitverschiebung verringert, kann mit den vorliegenden Daten nicht bestätigt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Zeitverschiebung innerhalb eines Frames existiert, jedoch scheint diese unabhängig von der Änderungsrate der Bildinformationen zu sein.

1.5. Experimentelle Bestimmung der tatsächlichen Framerate

Nachdem die Zeitunschärfe in einem einzelnen Frame als vernachlässigbar klein gelten kann, bleibt noch die Frage, ob die gewählte Framerate tatsächlich exakt erreicht wird (vgl. [MV]). Bei einer qualitativen Betrachtung spielt dieser Effekt kaum eine Rolle. Bei der quantitativen Analyse werden Geschwindigkeiten und Beschleunigungen eventuell mit systematischen Fehlern berechnet. Für dieses Experiment wird ein Fadenglühzähler benötigt. Das hier verwendete Modell ist der „Digitalzähler 575 50“ der Firma Leybold Heraeus, benötigt. Die Glühfadenanzeige hat den Vorteil, dass sie *immer gut* sichtbar ist. Neuere Digitalzähler zeigen oftmals nicht alle Zwischenwerte an, sodass sie für diese Betrachtungen ausscheiden. Das Experiment an sich ist relativ einfach: Der Digitalzähler ist so einzustellen, dass die Zeit auf Milisekunden genau dargestellt wird. Das Display wird mit den verschiedenen Frameraten aufgenommen. Als sinnvoll hat es sich herausgestellt, erst die Anzeige des Zählers einzuschalten, dann die Aufnahme zu beginnen, während der Aufnahme den Zeitmesser zu starten und ein bis zwei Sekunden lang laufen zu lassen. Die Aufnahmen können kameraintern oder mit dem Programm MPEG-Streamclip so zurecht geschnitten werden, dass das fertige Video laut Fadenglühzähler bei 0 ms beginnt und bis 2.000 ms läuft. Sofern das Video im avi-Format vorliegt, kann es direkt mit measure dynamics geöffnet und die Anzahl der im entsprechenden Zeitinervall aufgenommenen Frames abgelesen werden. Die Videos im mov-Format (wie die von der Casio EX F1) können mit dem kostenlosen Programm GSpot[12] ausgewertet werden. Mit dem Programm GSPOT kann allerdings nur die *Gesamtanzahl* der Frames eines Videos ausgelesen werden, nicht die Anzahl der vergangenen Frames bis zu einem bestimmten Zeitpunkt im Video.

Casio EX F1: Bei der Casio EX F1 werden in zwei Sekunden bei eingestellten 300 fps statt 600 tatsächlich 624 fps aufgenommen (vgl. Video „Zeitzaehler-2s-300fps.mov“). Dies entspricht einer Framerate von 312 fps, was einer Abweichung von +4% vom Sollwert entspricht. Bei 600 fps beträgt die gemessene Framerate 607,5 fps (in zwei Sekunden werden 1215 Frames aufgenommen, vgl. „Zeitzaehler-2s-600fps.mov“), sie weicht also um +1,25% ab. Am genauesten wird die maximale Framerate bei eingestellten 1200 fps erreicht. In zwei Sekunden werden 2406 Frames aufgenommen, was 1203 fps, also einer Abweichung von 0,25%, entspricht (vgl. „Zeitzaehler-2s-210fps.mov“).

Casio EX FS10: Bei dieser, doch erheblich günstigeren Kamera, stellt sich heraus, dass bei eingestellten 210 fps und 420 fps auch tatsächlich 210 fps bzw. 420 fps aufgenommen werden (vgl. „Zeitzaehler-1s-210fps.avi“ und „Zeitzaehler-1s-420fps.avi“). Lediglich bei der höchsten Framerate weicht die Framerate um 0,7% ab und es werden statt 1000 fps tatsächlich 1007 fps aufgenommen (vgl. „Zeitzaehler-1s-1000fps.avi“).

Diese Werte beruhen jeweils lediglich auf *einer* Messung, keiner Messreihe. Die Gründe und die Einflüsse auf die Abweichungen der Frameraten, wie zum Beispiel die extreme Änderung der Bildinformationen durch Lichtwechsel, wurden im Rahmen dieser Staatsexamensarbeit nicht weiter untersucht. Stattdessen liegen den jeweiligen Berechnungen

[12] Dieses Programm ermittelt verschiedene Videoinformationen, wie beispielsweise den Codec der Audio- und der Videodatei sowie das Containerformat des Filmes.

in Kapitel 3 für die Zeitintervalle die an der Kamera eingestellte Framerate zugrunde. Bei dieser systematischen Abweichung wurden beispielsweise *alle* Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zu gering berechnet. Dies hat lediglich einen Einfluss auf die jeweiligen Absolutbeträge, jedoch nicht qualitative Ergebnisse, wie beispielsweise die Richtung der entsprechenden Pfeile. Anders verhält es sich bei den Energien und Energieumwandlungen, denn die kinetische Energie wird systematisch zu gering berechnet. Die Energieerhaltung kann auf diese Weise nicht nachgewiesen werden. Am deutlichsten tritt diese Abweichung beim Maxwellrad in Kapitel 3.4 bei der nicht ganz vollständigen Umwandlung von potentieller in kinetische und Rotationsenergie zu Tage. Es empfiehlt sich, die Abweichung der tatsächlichen von der eingestellten Framerate mitsammt ihren Ursachen in anderen Arbeiten genauer zu untersuchen.

2. Praktische Hinweise für den Anwender

2.1. Erstellen von Hochgeschwindigkeitsfilmen

Für die Erstellung von Videos zur Verwendung im schulischen Physikunterricht gilt es einige Punkte zu berücksichtigen. Es sollte auf einen möglichst ruhigen und nicht ablenkenden Hintergrund geachtet werden. Für eine Videoanalyse mit Videoanalyseprogrammen sollte sich nichts oder möglichst wenig (außer dem Objekt selbst) bewegen. Außerdem erleichtert ein guter Kontrast die automatische Analyse, da die Computerprogramme den Umriss des Objektes anhand von Farbdifferenzen im Bild finden. Sind diese zu schwach, kann der Computer nicht mehr oder nicht immer zwischen dem eigentlichen Objekt und dem Hintergrund differenzieren. Im Hinblick auf quantitative Messungen empfiehlt es sich, einen Maßstab oder ein Objekt bekannter Länge im Bild zu platzieren, um später eine Skalierung zu erleichtern. Für die Aufnahmen selbst sollte unbedingt ein Stativ verwendet werden. Damit ist sichergestellt, dass *immer derselbe* Bildausschnitt zu sehen ist und tatsächlich nur die Bewegung des beobachteten Objektes bestimmt wird. Manche Videoanalysesoftware, wie beispielsweise MEASURE DYNAMICS oder COACH 6, haben die Möglichkeit, bei bewegter Kamera in jedem Bild einen Referenzpunkt im Hintergrund als Koordinatennullpunkt sowie das bewegte Objekt zu kennzeichnen. Der Ort, die Ortsänderung und die Beschleunigung werden dann mit entsprechend höherem Messfehler in Bezug auf den gewählten Koordinatenursprung berechnet.

2.1.1. Licht ins Dunkle bringen – Das richtige Ausleuchten

2.1.1.1. Die Wahl der richtigen Lichtquelle

Prinzipiell gilt: Je höher die Bildrate ist, desto mehr Licht wird benötigt. Allerdings sind nicht alle Lichtquellen geeignet. Beispielsweise scheiden Leuchtstoffröhren (umgangssprachlich fälschlicherweise als „Neonröhren“ bezeichnet) aus, da sie bei der Wechselspannung von 230 V und 50 Hz farblich flackern, abhängig davon, ob Strom fließt oder nicht (vgl. Experiment Leuchtstoffröhre 4.1.2 auf Seite 66). Die Richtung des Stromflußes ist bei Leuchstoffröhren und Glühbirnen unerheblich, lediglich bei LED's (Lichtemmitierende Diode) sind sie abhängig von der Stromflußrichtung.
Da das menschliche Auge nur etwa 15 Bilder pro Sekunde unterscheiden kann, fällt eine 100 Hz Farbänderung der Leuchtstoffröhre oder das Flackern von LED's nicht auf. Verwendet man jedoch eine Hochgeschwindigkeitskamera, so wird beim Abspielen der Bilder in Zeitlupe das Flackern meist sichtbar. Bei der Casio EX F1 kann man bereits ab 300 fps das flackernde Licht der Leuchtstoffröhre beobachten.
Lichtemmitierende Dioden oder Leuchtstoffröhren sind für die Beleuchtung bei Hochgeschwindigkeistaufnahmen eingeschränkt nutzbar. Sinnvoll ist ihr Einsatz nur, wenn sie mit

geglätteter Gleichspannung betrieben werden. Besser geeignet sind hier Glühfadenlampen, wie beispielsweise Halogenlampen. Da sie *immer* nachglühen, lässt ihre Leuchtkraft bei 50 Hz Wechselspannung unwesentlich nach und das Videobild flackert kaum wahrnehmbar. Völlig ohne Flackern ist das Sonnenlicht, jedoch kann man dieses nicht immer zuverlässig verwenden, da Sonnenstand und Bewölkung in kurzer Zeit variieren können und dadurch zu starken Farb- bzw. Kontrastveränderungen der Aufnahmen führen.
In dieser Ausarbeitung wird hauptsächlich ein Studiolichtsystem von Hedler verwendet, welches aus zwei 2000 W und einem 1000 W Scheinwerfer mit Stativen, drei Softboxen (für ein weiches, gleichmäßiges Licht), sowie drei „4-Klapprahmen 360°“ (für hartes Licht) besteht. Damit kann in fast jeder Situation das Objekt gut ausgeleuchtet werden. Kapitel 2.1.1.4 zeigt eine preiswerte Alternative zu dem preisintensiven Studiolichtsystem auf.

2.1.1.2. Das Ausleuchten

Unterschiedliche Situationen erfordern unterschiedliche Beleuchtung. Die Möglichkeiten reichen von einem gut ausgeleuchteten Vordergrund bei gleichzeitig unterbelichtetem Hintergrund bis hin zur reinen Beleuchtung des Hintergrundes. Letzteres empfiehlt sich insbesondere bei der computergestützten Videoanalyse von bewegten metallischen Objekten, beispielsweise von der Kugel beim Affenschuß oder beim Kugelfallversuch. So ist ein Lackieren oder Mattieren der metallischen Oberfläche für eine gute Objekterkennung nicht nötig[1].

2.1.1.3. Beispiele für verschiedene Ausleuchtungsmethoden

Im Wesentlichen gibt es vier verschiedene Arten der Ausleuchtung, die auch anhand von Fotobeispielen veranschaulicht werden sollen.

1. Das Licht kommt nur von vorne (Abb. 2.1). Das Objekt und die farbigen Markierungen, welche für eine Videoanalyse angebracht worden sind, sind sehr gut zu erkennen. Dies erleichtert eine Auswertung der Bewegung mit einem Computer, sofern sich das Objekt genügend vom Hintergrund abhebt (dies kann man gegebenenfalls mit der 2. Ausleuchtungsart in den Griff bekommen). Diese Methode des Lichteinsatzes bietet sich insbesondere bei nicht glänzenden und farbig markierten Objekten an. Glänzende oder metallische Oberflächen reflektieren das Licht der Scheinwerfer zu stark, was bei einer Videoanalyse zu Fehlern bei der Objekterkennung führen kann. Grund hierfür ist, dass sich die reflektierten Lichtstreifen von Bild zu Bild ändern und somit eine farberkennungsbasierte Analyse erschweren. Außerdem verändert sich durch die Reflektionen scheinbar die Form des Objektes, sodass hier auch bei formerkennungsbasierter Software die Analyse beeinträchtigt wird.

2. In der zweiten Lichtsituation (Abb. 2.2) wird zusätzlich der Hintergrund mit einem Scheinwerfer (hier ohne Softbox) angestrahlt. Dadurch wird der Hintergrund überstrahlt, der Kontrast zwischen Vorder- und Hintergrund wird verstärkt und das Objekt hebt sich deutlicher ab.

[1] Bei mattierten oder lackierten metallischen Objekten kann es bei frontaler Beleuchtung trotz ihrer Oberflächenbehandlung zu sich verändernden Reflektionen kommen, die eine automatische Videoanalyse erschweren.

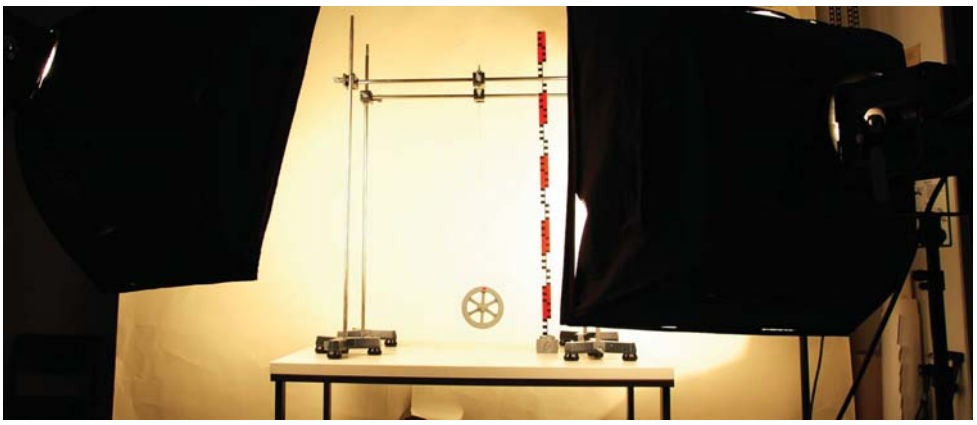


Abbildung 2.1.: Beleuchtungssituation 1: Licht kommt ausschließlich von vorne.

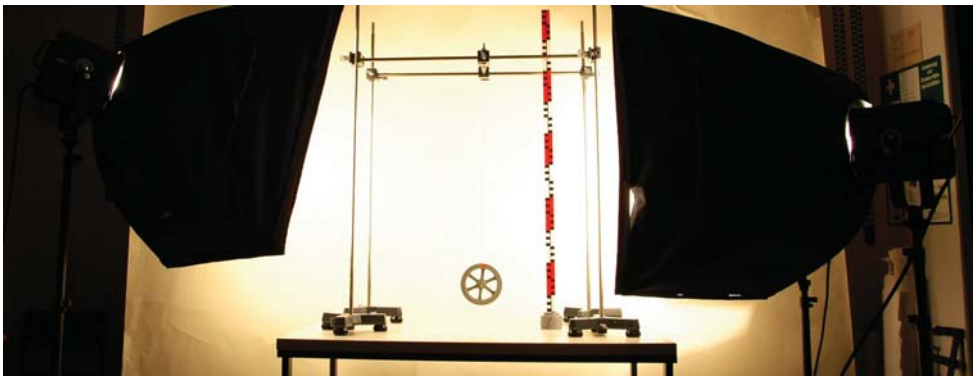


Abbildung 2.2.: Beleuchtungssituation 2: Das Objekt wird weich von vorne, der Hintergund mit einem Scheinwerfer ohne Softbox angestrahlt.

3. Hier wird der Hintergrund mit den beiden Softboxen beleuchtet (Abb. 2.3), allein der Maßstab wird direkt und hart angestrahlt, um ihn für eine Videoanalyse nutzen zu können. Es sind fast ausschließlich die Umrisse des Objektes zu erkennen. Diese Methode bietet sich vor allem bei metallischen Objekten wie Kugeln an, da diese nicht umständlich farbig markiert und mattiert werden müssen. Der Nachteil ist, dass hier farbige Aufkleber oder Markierungen am Objekt selbst kaum erkennbar sind.

4. Der seitliche Lichteinfall (Abb. 2.4) ermöglicht es, Bewegungen von Gasen und Flüßigkeiten gut sichtbar zu machen. Das seitlich auftreffende Licht wird von den Tropfen bzw. den Rauchteilchen in der Luft reflektiert. So heben sie sich gut vom schwarzen Hintergrund ab, wie im Beispiel des platzenden Luftballons, 4.2 Seite 69.

Für alle Ausleuchtungsvarianten gilt es jedoch zu beachten, dass die Objekte keine Schatten werfen. Diese können im besten Falle nur stören, im ungünstigsten Falle aber die automatische Videoanalyse am Computer unmöglich machen, da Farbe und Form des Objektes durch den Schattenwurf verändert werden.

Abbildung 2.3.: Beleuchtungssituation 3: Das Licht beleuchtet fast vollständig den Hintergrund. Der Maßstab wird mit einem schmalen Lichtstreifen angeleuchtet, damit er für eine spätere Computeranalyse als Längenmaß genutzt werden kann.

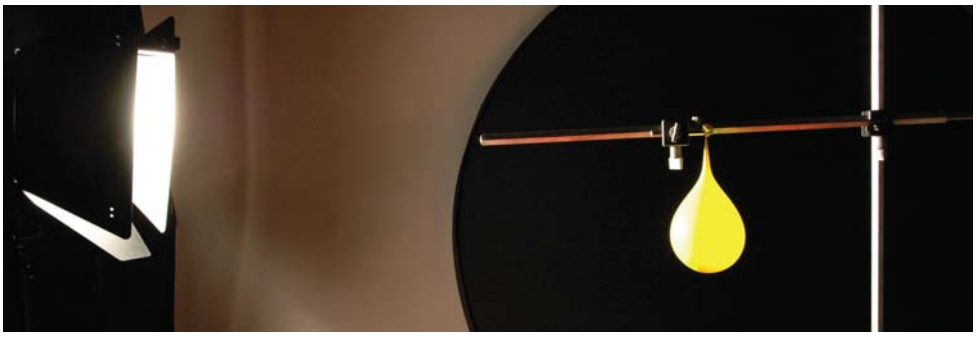


Abbildung 2.4.: Beleuchtungssituation 4: Das Objekt wird hart von der Seite mit einem schmalen Lichtstreifen beleuchtet, der Hintergund ist unbeleuchtet.

2.1.1.4. Günstige Studiolichtalternative

Es muss nicht unbedingt ein teures Studiolicht sein, um das Motiv schön und weich auszuleuchten. Bereits ab 70 € kann man ähnlich ausleuchten, wie mit dem in dieser Ausarbeitung verwendeten Studiolicht. Hierfür werden benötigt:

- zwei 500 W Bauscheinwerfer, am besten mit Stativ (im Baumarkt für je ca. 20 €)
- eine hitzebeständige Diffusorfolie ca. 70 × 70 cm (im Fotofachhandel für ca 10 € plus evtl. Versand)
- etwas Stativmaterial aus der Physiksammlung

Das linke Bild von Abbildung 2.5 (Seite 20) zeigt einen Baustrahler mit einer davor gehängten Diffusorfolie. Die Folie ist etwa 20 cm mal 20 cm groß und sollte wegen der großen Hitzeentwicklung etwa 15 bis 20 cm vom Scheinwerferglas entfernt montiert sein. In Abbildung 2.5 rechts sieht man ein Anwendungsbeispiel.

Abbildung 2.5.: Aufbau und Anwendungsbeispiel für ein selbtsgebautes Studiolicht.

2.1.2. Filmen von Hochgeschwindigkeitsvideos

2.1.2.1. Aufnahmegeschwindigkeit

Eine Faustregel aufzustellen, um die Framerate vorzuwählen, ist schwierig. Wie viele Bilder benötigt werden, um sinnvolle Auswertungen zu betreiben, hängt stark von den jeweiligen Versuchen ab. Bei vielen Versuchen reichen bereits 210 fps bzw. 300 fps für eine Videoanalyse aus. Für eine rein qualitative Betrachtung empfehlen sich 420 bzw. 600 fps. Dadurch werden die Details des Vorgangs besser sichtbar. In wenigen Fällen werden tatsächlich die 1.200 fps für eine Analyse benötigt.

Für fast alle quantitativen Experimente reichen 210 bzw. 300 fps völlig aus. Durch die bei Hochgeschwindigkeitsaufnahmen verkürzte Belichtungszeit des einzelnen Frames kann es sinnvoll sein, einerseits 210 bzw. 300 fps einzustellen, andererseits durch die Wahl der Schrittweite nur jeden 7. bzw. 10. Frame zu analysieren. Dies entspräche wieder einer Aufnahmegeschwindigkeit von 30 fps. Der Grund für diese scheinbar widersprüchliche Vorgehensweise liegt in der deutlich veringerten Bewegungsunschärfe des jeweiligen Objektes. Die Objekte werden so immer noch scharf (bzw. schärfer) abgebildet und sind für die automatische Objekterkennung einfacher und sicherer zu erfassen.

Nachdem das Licht eingerichtet und die sinnvolle Anzahl der Frames pro Sekunde gewählt ist, müssen noch weitere Einstellungen vorgenommen werden: Es empfiehlt sich, die Kamera in der Höhe so zu justieren, dass die Objekt- und die Bildebene parallel zueinander sind. Damit vermeidet man perspektivische Verzerrungen[2], die bei computergestützter Videoanalyse zu fehlerhaften Berechnungen führen.

2.1.2.2. Zoom und Fokus

Um Weitwinkel- oder Televerzeichnungen des Videobildes zu vermeiden, wählt man eine mittlere Zoomposition. Am besten ist die Zoomposition geeignet, die etwa der Brennweite von 50 mm bei einem Kleinbild-Objektiv entspricht. Häufig entstehen Probleme auch beim Fokussieren. Ist das Objekt zu Beginn der Aufnahme außerhalb des Fokusbereiches (meist die Mitte des Bildes), so haben die Kameras in der Regel Probleme beim Scharfstellen. Dies führt zu unscharfen, schlechter auswertbaren Videos. Abhilfe schafft hier die Möglichkeit,

[2] Abhängig vom Blickwinkel können Strecken verkürzt dargestellt werden.

manuell zu fokussieren. Dazu stellt man einen kontrastreichen Gegenstand mit feinen Strukturen oder klaren Grenzen an jene Stelle, an der man später das Objekt erwartet und legt die Schärfe auf dieses Hilfsobjekt.

2.1.2.3. Die Remote-Funktion

Viele Kamerahersteller bieten eine PC-Fernsteuerung der Kamera an. Dazu wird in der Regel eine Software und ein Verbindungskabel benötigt. Die Möglichkeiten der Fernsteuerung von Kameras hängen sehr vom Hersteller und dem Modell ab. Die Casio EX F1 hat diese Remote-Funktion. Dies erleichtert in einigen Situationen die Kamerabedienung im hohen Maße. Außerdem können Videos und Bilder direkt auf dem PC gespeichert werden, wobei die Bilder und Videos zusätzlich auf der Speicherkarte in der Kamera gesichert werden. Für die Fernsteuerung benötigt man ein kostenloses Programm[3] von Casio. Damit das Programm einwandfrei funktioniert, sind (vgl. [CCC09, Seite 4]) mindestens Windows XP (mit SP3), ein Intel Pentium III (1,2 GHz), ein High-Speed USB Anschluss sowie mindestens 120 MB freier Speicherplatz und 2 GB Arbeitsspeicher[4] von Nöten. Nach einem Update und Neustart der Kamera ist unter dem Menüpunkt „Einstellungen“ bei dem Unterpunkt „USB“ die Option „PC Control“ zu finden.

Um die Remote Funktion zu nutzen, sind folgende vier Schritte notwendig (vgl. Bedienungsanleitung [CCC09, Seite 11]):

1. Die Kamera einschalten und unter dem Menüpunkt „USB“ die „PC-Control“-Funktion wählen, danach die Kamera wieder ausschalten.

2. Mit dem standardmäßig beiliegendem USB-Kabel die ausgeschaltete (!) Kamera und den Computer miteinander verbinden.

3. Die Kamera einschalten.

4. Das Program „EX-F1-Control“ öffnen.

5. In der Dialogbox „Device0“ auswählen und auf „Connection“ klicken.

Nun kann die Kamera über den PC ferngesteuert werden, allerdings stehen hierbei nicht alle Funktionen zur Verfügung. Sinnvoll ist eine Livebild Funktion, die im Remote-Programm unter „System“ im Unterpunkt „Monitor Screen“ auswählbar ist. Dies erleichtert insbesondere das manuelle Fokussieren und die Auswahl des Zoombereiches. Im Vergleich zum Bild auf dem Kameradisplay fehlen hier jedoch die Kenntlichmachungen des eingschränkten Aufnahmebereiches, welcher bei 600 fps und bei 1200 fps deutlich vom angezeigten Bildbereich abweicht. Eine Besonderheit ist die Möglichkeit der *Intervallfotografie*. So können mit der Casio EX F1 nicht nur (extreme) Zeitlupen-, sondern auch *Zeitrafferaufnahmen*[5] gemacht werden. Die weiteren Funktionen, wie Weißabgleich, Einstellung der Lichtempfindlichkeit, Anzahl der Frames pro Sekunde etc. sind selbsterklärend.

[3] zu finden unter http://www.casio-europe.com/de/support/qv/download/controller/

[4] Anm. d. Autors: Mit nur 1 GB Arbeitsspeicher funktioniert es auch problemlos.

[5] Bei der Zeitrafferaufnahme können Einstellung der Intervallzeit in Sekunden, Stunden und Tagen vorgenommen werden.

2.1.3. Belichtungs- und Kontrasteinstellungen

Falls für den besseren Kontrast ein nichtgrauer Hintergrund verwendet wird, empfiehlt es sich, die Aufnahme mit einer (Foto-)Handelsüblichen 18 % Graukarte zu beginnen. Die automatischen Belichtungs- und Kontrasteinstellungen der Kameras sind genau auf diese Karten eingestellt. Damit ist sichergestellt, dass Kontrast und Beleuchtung optimal eingestellt sind. Ist keine solche Karte zur Hand, kann auch ein hellgraues T-Shirt oder ähnliches verwendet werden.

2.1.4. Bearbeiten und Auswerten von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Die Casio EX F1 nimmt einerseits die Videos mit 300, 600 bzw. 1200 fps auf, speichert sie allerdings nur mit 30 Bildern pro Sekunde ab. Dadurch entsteht der Zeitlupeneffekt, der den Prozess 10×, 20× oder sogar 40× langsamer anzeigt als er in Wirklichkeit war. Nicht jedes Programm kann jedoch den „H264“-Codec[6] dieser Kamera ver- bzw. bearbeiten. Daher ist ein Recodieren oftmals notwendig. Neben dem Recodieren ist für eine quantitative Analyse in der Regel auch das Drehen des Filmes und das Nachbearbeiten von Helligkeit, Kontrast und Sättigung des Bildes sowie die nachträgliche Änderung der Framerate sehr empfehlenswert.
In dieser Ausarbeitung wird für diese Zwecke die Windows-Version des Programms MPEG Streamclip von Apple verwendet. Neben Schneiden und Bearbeiten des Bildes ist auch die Betrachtung und der Export einzelner Frames möglich. Das Drehen des Clips ist etwas aufwendiger, da neben der Rotation auch bei „Zoom“ und dem Seitenverhältnis „X/Y“ die Zahlenwerte verändert werden müssen (vgl. Kapitel 2.2.2). Unter „Vorschau“ kann man das Bild mit den aktuelle Einstellung sehen. Von Vorteil ist, dass es kostenlos und auch für Windows erhältlich ist. Das Programm bietet die Möglichkeit, die Framerate zu ändern, allerdings wird dabei die Videodatei extrem groß. Da in measure dynamics (ab Version 1.4 build 390) die Framerate auch manuell einstellbar ist, kann auf eine vorhergehende Korrektur der Framerate verzichtet werden. Mit dem Programm Avifrate kann man nach Bearbeitung mit MPEG-Streamclip die Framerate ändern, ohne dass die Datei größer wird. Dies ist bei der Verwendung von Vorgängerversionen bzw. bei anderer Videoanalysesoftware sinnvoll. Eine kurze Bedienungsanleitung, sowie die weiteren benötigten Programme mit URLs sind im nachfolgenden Kapitel zu finden.

2.2. Verwendete Prorgamme

Es werden in dieser Ausarbeitung weitestgehend kostenlose Programme genutzt. Einzig das Videoanalyseprogramm „measure dynamics“ von Phywe ist kostenpflichtig. Die weiteren verwendeten Programme, jeweils in der für Windows kompatiblen Version, sind:

- „Quicktime-Player“ in der kostenlosen Version. Dies wird für das „MPEG-Streamclip“ benötigt. Zu finden ist dies unter http://www.apple.com/quicktime/
- „MPEG-Streamclip“, dessen grundlegende Handhabung im Folgenden kurz genauer beschrieben wird. Zu finden unter http://www.squared5.com/

[6] Ein Codec, welcher sehr häufig bei HD-Aufnahmen verwendet wird.

- „avifrate“, ein sich selbst erklärendes Programm, um die Framerate in den Videos zu korrigieren. Zu finden ist es unter http://www.am-softhome.com/avifrate.html

Seit der Version 1.4 build 390 von measure dynamics ist das letzte Programm überflüssig, da die Framerate unter „Skalierung“ eingestellt werden kann.

2.2.1. MPEG-Streamclip – eine Kurzanleitung

Mit dem Programm MPEG-Streamclip kann nicht nur der Codec und das Containerformat geändert, sondern auch die Videos geschnitten, Farbton sowie Sättigung und Helligkeit des Bildes eingestellt und auch das Video aufgerichtet werden. Es hat sich herausgestellt, dass die standardmäßig vorgegebenen Größen für das Aufrichten nicht ausreichen. Abbildung 2.6 zeigt, welche Grundeinstellungen für das Recodieren und welche Feineinstellungen für das Rotieren vorzunehmen sind. Diese Einstellungsmöglichkeiten können unter „File“ im Unterpunkt „Export to AVI...“ gewählt werden. In dieser Staatsexamensarbeit sind, sofern es notwendig war, folgende *Grundeinstellungen* vorgenommen worden:

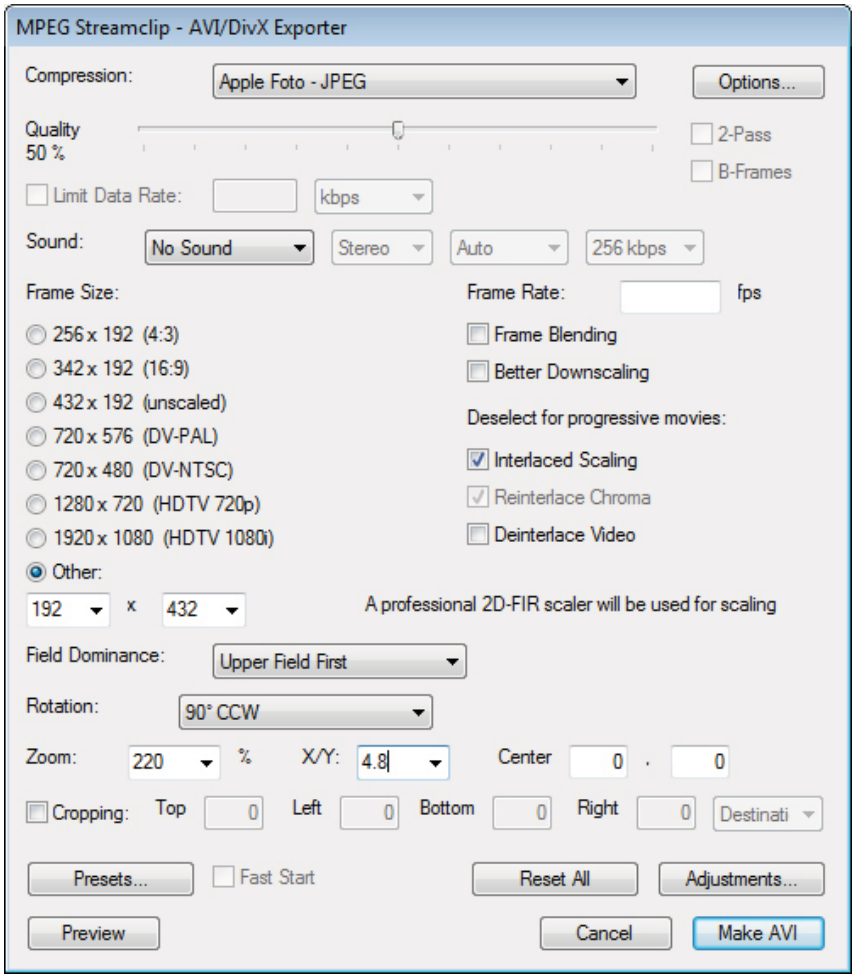


Abbildung 2.6.: Einstellungen für das Aufrichten eines 600 fps Videos.

- *Compression*: „Apple Foto - JPEG“. Da das Format *jpg* bzw. *jpeg* sehr weit verbreitet ist, gibt es hier höchstwahrscheinlich die geringsten Kompatibilitätsprobleme.

- *Quality*: 50 % reicht für die meisten Fälle aus. Ist das Video zu lang, kann man auch auf bis zu 20 % gehen.
- *Sound*: „No Sound“. Nur diese Einstellung ist sinnvoll. Da das Video vorher keine Tonspur hat, wird auch bei dem neu codierten Video keine Tonspur benötigt.
- *Frame Rate*: Diese Einstellung am besten leer lassen. Stellt man die aufgenommene Framerate ein, wird das Video extrem groß. Möchte man die Framerate unbedingt an der Videodatei ändern, empfiehlt es sich, das Program „avifrate“ zu nutzen. Dieses Programm ändert nur im Header der Videodatei die Framerate. Dadurch bleibt die Dateigröße erhalten.
- *Adjustments*: Unter diesem Menüpunkt können Helligkeit, Kontrast und Sättigung eingestellt sowie ein Wasserzeichen eingefügt werden. Falls die Videoanalyse die Markierung nicht erkennt, hilft es oft, die Sättigung und den Kontrast zu erhöhen und evtl. auch die Helligkeit etwas zu verringern.
- *Presets*: Hier kann man Standardeinstellungen, beispielsweise die Einstellungen für die Drehungen, speichern.

2.2.2. Aufrichten von Hochkantaufnahmen mit MPEG-Streamclip

Durch Ausprobieren haben sich für die Drehung des Filmes folgende Einstellungen ergeben:

Casio EX F1: *Rotation*: 90° CCW (≙ Counterclockwise, gegen den Uhrzeigersinn) bzw. 90° CW (Clockwise, im Uhrzeigersinn). Weitere Einstellungen:

Optionen \ Bildrate	300 fps	600 fps	1200 fps
Framesize „Other“	384 × 512	192 × 432	96 × 336
X/Y	1.75	4.8	12
Zoom	133,3%	220%	350%

Casio EX FS10: *Rotation*: 90° CCW bzw. CW. Weitere Einstellungen:

Optionen \ Bildrate	210 fps	420 fps	1000 fps
Framesize „Other“	360 × 480	168 × 224	64 × 224
X/Y	1.8	1.8	12.6
Zoom	133 3%	133 3%	350%

2.3. Videoanalyse mit measure dynamics

2.3.1. Allgemeines zu measure dynamics

Für die Videoanalyse wird in dieser Ausarbeitung ausschließlich measure dynamics verwendet. Zwei Gründe sind hierfür maßgeblich. Zum einen ist es das beste Programm für die Videoanalyse (es ist Gewinner des Comenius EduMedia-Siegels 2007), zum anderen besteht ein guter Kontakt zum Programmierer der Software, Herrn Suleder. Insbesondere durch diesen Kontakt konnte measure dynamics im Funktionsumfang an die Analyse von Hochgeschwindigkeitsvideos angepasst werden. Seit Version 1.4 build 368 kann es mit frameratenkorrigierten Videos zuverlässig umgehen, seit Version 1.4 build 390 kann die Frameratenkorrektur unter „Skalierung“ sogar direkt im Programm vorgenommen werden. Die Videoanalyse wird erheblich erleichtert, wenn *einzigartige Farbkombinationen und Formen* für eine Markierung am Objekt verwendet und bei der Videobearbeitung der *Kontrast erhöht* werden.

2.3.2. Hinweise zu den Aufnahmen

Wie bereits erwähnt, ist es wichtig, dass das Objekt sowohl von der Farbe, als auch von der Form einmalig im Videobild ist. Ist dies nicht von Vornherein der Fall, kann durch Objektmarkierungen nachgeholfen werden. Dies empfiehlt sich insbesondere dann, wenn einzelne Punkte des Objektes von Interesse sind. Ein Beispiel hierfür ist das Maxwellrad (Kapitel 3.4, Seite 47). Neben dem Schwerpunkt in der Mitte des Rades, wird auch die Bewegung eines Randpunktes betrachtet. Hierfür wird ein eckiger weißer Aufkleber mit einem großen schwarzen Punkt in der Mitte auf den Rand des Rades geklebt. Da die Kombination aus dem weißen Aufkleber und dem schwarzen Punkt in dem Bild einmalig ist, wird die Analyse der Rotation erst möglich.
Damit measure dynamics das Video abspielen und auswerten kann, sollte es in einem gängigen Format mit einem verbreiteten Codec vorliegen. Als hochkompatibel hat sich das avi-Format mit dem Motion-jpeg-Codec herausgestellt, welches von fast allen Casio-Hochgeschwindigkeitskameras verwendet wird.

2.3.3. Hinweise zur Analyse

Es gibt verschiedene Tricks, mit denen die automatische Analyse in measure dynamics erleichtert bzw. genauer wird. Als erstes empfiehlt es sich, den Analysebereich auf den wesentlichen Bereich des Videos einzuschränken. Wird die „Automatische Analyse“ aufgerufen, erscheint ein Rahmen mit roten Ecken im Videofenster. Diese Ecken kann man mit der Maus anklicken und verschieben.
Wird das Objekt nicht zuverlässig erkannt, können unter „Optionen“ (direkt über dem „Start“-Button) eine Reihe weiterer Möglichkeiten eingestellt werden: Zum einen kann die Empfindlichkeit schrittweise erhöht bzw. verringert werden (Regler nach rechts bzw. links ziehen). Zum zweiten besteht die Möglichkeit, den Suchradius einzuschränken. Durch diese Einstellung sucht das Programm im nachfolgenden analysierten Frame die Markierung innerhalb des Suchradius um die vorangegangene Objektposition. Schließlich besteht die Möglichkeit, die Farbanalyse zu verfeinern. Dies geschieht allerdings pauschal, der Nutzer kann diese Verfeinerung nicht weiter beeinflussen.

Wird bei einem besonders großen Projekt bzw. einem Projekt, in dem viele Graphenfenster geöffnet sind, eine weitere Analyse durchgeführt, wird das Programm sehr langsam. Dieses Problem kann umgangen werden, indem das Projekt unter einem anderen Namen gespeichert, in dieser Kopie sämtliche Graphenfenster geschlossen, die gewünschte Analyse durchgeführt, sowie das Projekt erneut gespeichert und wieder das ursprüngliche Projekt geöffnet wird. Die Tabelle mit den neu erhaltenen Messwerten kann nun in das aktuelle Projekt importiert werden. Dazu wird im Tabellenfenster auf den Button ganz links geklickt. Auf ihm ist ein Ordner mit einer Tabelle abgebildet. Dann wird die Tabelle der neu durchgeführten Analyse gewählt und diese in das bereits vorhandene „alte“ Projekt geladen. Durch das Klicken auf die Aktualisierungs-Buttons werden die jeweiligen Graphen aktualisiert.
Falls das Importieren nicht ohne Weiteres funktionieren sollte, kann das Programm beendet, die Tabelle (csv Datei) des neuen Projektes in den entsprechenden Ordner kopiert und ihr der Namen des alten Projektes gegeben werde. Wird das alte Projekt gestartet, ist die Tabelle manuell importiert worden.

2.3.4. Messwerterfassung

Unter der standardmäßig gewählten Einstellung „Messwerte glätten“ wird folgender Berechnungsalgorithmus angesetzt:

$$\begin{array}{llll}
t_1: & x_1 & & \\
t_2: & x_2 & v_2 = \frac{x_3 - x_1}{\Delta t} & \\
t_3: & x_3 & v_3 = \frac{x_4 - x_2}{\Delta t} & a_3 = \frac{v_4 - v_2}{\Delta t} \\
t_4: & x_4 & v_4 = \frac{x_5 - x_3}{\Delta t} & \\
t_5: & x_5 & &
\end{array}$$

Die Geschwindigkeit und die Beschleunigung wird immer der zeitlichen Mitte des Intervalles, aus dem es berechnet wird, zugeordnet. Die Beschleunigung rechnet sich aus fünf Ortsmessungen zusammen und ist damit ein Mittelwert aus einem langen Zeitintervall von $4\Delta t$. Die aktuellen Werte von Geschwindigkeit und Beschleunigung werden also sowohl vom kurz vergangenen, als auch vom nachfolgenden Bild, also von Vergangenheit *und* Zukunft beeinflusst.
Herkömmliche Videoanalysesoftware berechnet dagegen nach dem folgenden Algorithmus, der in measure dynamics durch das Entfernen des Häckchens bei „Messwerte glätten“ gewählt werden kann:

$$\begin{array}{llll}
t_1: & x_1 & & \\
t_2: & x_2 & v_1 = \frac{x_2 - x_1}{\Delta t} & \\
t_3: & x_3 & v_2 = \frac{x_3 - x_2}{\Delta t} & a_2 = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}
\end{array}$$

Es werden die Geschwindigkeiten dem zweiten der beiden Zeitwerte zugeordnet, obwohl sie eigentlich zu dem gesamten Intervall zwischen den beiden Ortswerten gehören. Sie sind also um $+\frac{\Delta t}{2}$ verschoben. Die Beschleunigungen werden nach demselben Algorithmus berechnet und ebenfalls dem letzten der beiden Zeitwerte zugeordnet, was wiederum eine Verschiebung um $+\frac{\Delta t}{2}$ zur Folge hat. Letztendlich steht die Beschleunigung zu spät am falschen Zeitpunkt.

2.3.5. Weitere Messwerte bearbeiten

measure dynamics bietet ein großes Spektrum an Möglichkeiten die Messwerte weiter zu verarbeiten. Die Ähnlichkeit zu Tabellenkalkulationsprogrammen wie Excel täuscht; die Werte werden anders berechnet. Wird eine neue Spalte gewählt, wird automatisch nachgefragt, welche Werte in dieser Spalte berechnet werden sollen. Klickt man rechts neben „[Momentan definierte Formel]“, klappt sich eine Liste mit den gängigsten Untersuchungsgrößen aus. Es stehen die Beträge von Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung, die Kraftkomponenten, diverse Energien bis hin zum Drehwinkel, Tangential- und Radialbeschleunigungskomponenten oder die vorangegangenen x und y Positionen zur Auswahl. Formeln und Einheiten werden automatisch gesetzt, können aber auch geändert werden. Außerdem besteht die Möglichkeit Werte aus einem anderen Tabellenfenster zu übernehmen. Dazu öffnet man eine neue Spalte und gibt als Formel „TABLE1:v_y“ ein, um beispielsweise in Tabelle 2 die y-Werte der Geschwindigkeit von Tabelle 1 zu übernehmen.

2.3.6. Messfehlerabschätzung bei measure dynamics

An dieser Stelle wird der Versuch unternommen eine allgemeine Fehlerrechnung für Videoanalysesoftware vorzunehmen. Der erste Ansatz ist die *Fehlerfortpflanzung*. Zuerst werden dazu die möglichen Fehlerquellen betrachtet:

Skalierung: Bei der Skalierung treten die ersten (allerdings vernachlässigbaren) Fehler auf. Nimmt man an, dass beim Skalieren sowohl am Anfang als auch am Ende aufgrund der pixeligen Auflösung des Videos nur auf ein Pixel genau gemessen werden kann, ist der Fehler der Skalierung $\sigma_s = \pm\sqrt{2}\frac{s}{\#_{pxl}}$, wobei s die Länge des Referenzobjektes (Maßstab) und $\#_{pxl}$ die Anzahl der Pixel (einheitenlos) dieser Länge ist. Ist beispielsweise das Referenzobjekt 1m lang ($s = 1$ m) und $\#_{pxl} = 100$ Pixel, dann ist der Skalierungsfaktor $f = \frac{s}{\#_{pxl}} = \frac{1m}{100\ \text{Pixel}} = 0{,}01\ \frac{m}{\text{Pixel}}$. Auch die Länge s ist fehlerbehaftet, wobei der Fehler bei parallaxenfreier Aufnahme vernachlässigt werden kann. $\#_{pxl}$ ergibt sich aus der Differenz $\#_{p_\text{ende}} - \#_{p_\text{anfang}}$. Beide sind fehlerbehaftet. Es kann

$$\sigma_{\#_{p_\text{ende}}} = \sigma_{\#_{p_\text{anfang}}} \geq 1 \text{ Pixel}$$

angenommen werden. Daraus ergibt sich

$$\sigma_{\#_{pxl}} = \sqrt{\sigma^2_{\#_{p_\text{ende}}} + \sigma^2_{\#_{p_\text{anfang}}}} \geq \sqrt{2} \text{ Pixel.}$$

Mit dem *Fehlerfortpflanzungsgesetz* ergibt sich

$$\sigma_f = \bar{f} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_s}{\bar{s}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\#_{pxl}}}{\overline{\#_{pxl}}}\right)}$$

mit $\bar{x}$ als Mittelwert aller x. Da $\sigma_s \approx 0$ ist, gilt weiter

$$\sigma_f \approx \bar{f} \cdot \frac{\sigma_{\#_{pxl}}}{\overline{\#_{pxl}}}.$$

Mit $\frac{1}{\#_{pxl}} = \frac{f}{s}$ erhält man schließlich

$$= \frac{\bar{f}^2}{\bar{s}} \cdot \sigma_{\#_{pxl}} \left(= \frac{s}{\#_{pxl}{}^2} \cdot \sigma_{\#_{pxl}} \right).$$

Im Beispiel ergibt sich dann

$$\sigma_f = \left(0{,}01 \frac{m}{\text{Pixel}}\right)^2 \cdot \frac{1}{1m} \cdot \sqrt{2}\ \text{Pixel} = 0{,}00014\ \frac{m}{\text{Pixel}} = \frac{\sqrt{2}}{10000}\ \frac{m}{\text{Pixel}}.$$

Dieser Fehler kann also vernachlässigt werden, wenn die Referenzlänge groß genug ist. Viel größeren Einfluss hat der Fehler in der falschen bzw. nicht exakten Objekterfassung.

Messwerterfassung: Der nächste, wesentlich größere Fehler tritt bei der Objekterfassung auf. In den meisten Experimenten dieser Arbeit sind rechteckige Markierungen am Objekt angebracht worden (vgl. Abbildung 2.7). Der einfarbige, dicke Punkt in der Mitte ist mit der rechteckigen Markierung idealerweise im Videobild einmalig in Form und Farbe. Die Markierung am Objekt ist unabhängig von dem später in der Software angegebenen Suchbereich. Durch die Markierung wird die Analyse nicht nur erleichtert, sondern zum Teil erst möglich. Wegen der hohen Aufnahmegeschwindigkeit kommt es durchaus vor, dass der Punkt unscharf wird oder verwischt und die Videoanalyse innerhalb der Großmarkierung das Objekt am falschen Ort zu finden glaubt. Durch die Verfeinerung der Empfindlichkeit (Regler nach rechts verschieben), dem Einschränken des Suchradius oder des Analysebereiches[7] kann in vielen Fällen eine ausreichende Genauigkeit erreicht werden. Da hier eine Fehlerrechnung

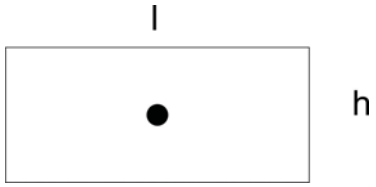


Abbildung 2.7.: Großmarkierung auf dem Objekt mit einfarbigen Punkt in der Mitte.

durchgeführt werden soll, wird angenommen, dass alle Messpunkte, die außerhalb der Großmarkierung liegen, grobe und vermeidbare Fehler sind. Diese können auch noch nachträglich mittels der manuellen Analyse[8] korrigiert werden.
Spätestens bei der Messwertberechnung beginnt es, äußerst kompliziert und unübersichtlich zu werden, da bereits zu jeder Koordinate $_x$ und $_y$ durch die Skalierung Fehler zugeordnet werden müssen, welche sich über mehrere Einzelmesswerte hinweg bis zum Ergebnis fortpflanzen. Herr Suleder, der Programmierer von measure dynamics, verfolgt diese Schritte in seinem Buch „Unterrichtshilfen Naturwissenschaften“

[7] Den Analysebereich kann man durch das entsprechende Ziehen der roten Ecken am Bildrand einschränken.

[8] Zuerst auf „manuelle Analyse“ klicken, anschließend in der Tabelle den entsprechenden Frame auswählen und im Bild das Objekt markieren. Am Ende nur noch die Tabelle aktualisieren. *Nicht* auf „Tabelle initialisieren“ klicken, denn sonst werden die Messwerte der automatischen Analyse gelöscht.

noch weiter (vgl. [Sul10, Seite 16 – 18]). Die Betrachtung der Fehlerfortpflanzung ist allerdings in den vorliegenden Fällen nicht nötig, da bei der Videoanalyse mit Hochgeschwindigkeitskameras eine Vielzahl von Messwerten vorliegt. Je nach dem, wie sich die Größe von Interesse in der graphischen Auftragung verhält, kann beispielsweise *Mittelwert* und *Standardabweichung* (vgl. Kapitel 3.5, Seite 54) oder Regressionsgerade mit Standardfehler, wie in Kapitel 3.4 (Seite 47) von Interesse sein.

Mittelwert und Standardabweichung: Im Kapitel 3.5 wird eine Metallkugel auf eine Glasplatte fallen gelassen. Aus den gemessenen Beschleunigungen, die die Kugel erfährt, soll die Erdbeschleunigung möglichst exakt berechnet werden. Dazu wird die vom measure dynamics Projekt „Quant-Ex-Metallkugel-300fps.prj“ ermittelte Messwerttabelle „Quant-Ex-Metallkugel-300fps-Excel.xls“ mit einem Tabellenkalkulationsprogramm geöffnet. Den *Mittelwert* erhält man beispielsweise durch „=MITTELWERT(J10:J33)“, wobei J10 der erste, und J33 der letzte einbezogene Messwert ist. Die *Standardabweichung* dieser Werte wird mit „=STABW(J10:J33)“, der *Standardfehler* schließlich mit „=STABWN(J10:J33)/ANZAHL(J10:J33)ˆ 0,5“ berechnet.

Regressionsgerade und Standardfehler: Wird ein linearer Zusammenhang einer Reihe von Messwerten vermutet (wie beispielsweise der Betrag der Winkelgeschwindigkeit in Kapitel 3.4), kann man dies mittels einer Regressionsgeraden nachweisen und die Streuung der Messwerte angeben. In „Quant-Ex-Maxwellrad-PhyWe-Regressionsgrade.xls“ sind von Spalte X bis AH Beispiele für die Regressionsgeraden angegeben. Es wurde die Regressionsgerade und die Abweichung des Betrags der Winkelgeschwindigkeit sowohl bei der Abwärts- als auch bei der Aufwärtsbewegung des Maxwellrades berechnet.
Um den Anstieg m, den Fehler des Anstieges sowie den y-Abschnitt einer *Regressionsgeraden* der Form $y = m \cdot x + b$, welche von den Parametern x und y abhängt, vollständig berechnen zu lassen, markiert man zwei Spalten und fünf Zeilen. In das Eingabefeld schreibt man „=RGP(N8:N1002;D8:D1002;WAHR;WAHR)“, wobei N8:N1002 die y-Werte und D8:D1002 die x-Werte beschreiben. Das erste „WAHR“ gibt an, ob $b \in \mathbb{R}$ gilt oder $b = 0$ („FALSCH“) gelten muss. Das letzte „WAHR“ gibt lediglich an, ob Regressionskenngrößen (Korrelationskoeffizient, etc.) auch angegeben werden oder nicht. Der *Standardfehler der Regressionsgeraden* gibt an, wie stark die Messwerte um die Regressionsgerade streuen und wird mit „=STFEHLERYX(N1009:N2047;D1009:D2047)“ berechnet.

3. Die Hochgeschwindigkeitskamera im Mechanik-Unterricht

Die Videoanalyse wird bisher hauptsächlich im Mechanikunterricht eingesetzt, da sie die Analyse zweidimensionaler Bewegungen erheblich vereinfacht. Es entsteht jedoch bei der Auswertung der Videos, welche mit herkömmlichen Kameras aufgezeichnet wurden, der Wunsch, mehr Bilder pro Sekunde auswerten zu können, da schnelle Stoßprozesse nur unzureichend analysierbar sind. Zur Verdeutlichung ein Beispiel: Eine Metallkugel fällt auf eine Glasplatte und wird von dieser reflektiert. Bei 25 Bildern pro Sekunde kommt es vor, dass sich die Kugel zwischen zwei Frames scheinbar kaum bewegt, tatsächlich aber bereits Kontakt mit der Glasplatte hatte. So entstehen starke Fehler, insbesondere bei der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsbestimmung.
Sofern es möglich war, behalf man sich mit dem Verlängern der Stoßdauer. Auf der Luftkissenbahn beispielsweise wurde der Stoßprozess mit weichen Federn verlangsamt. Hierbei wird jedoch ein nicht unerheblicher Teil der Bewegungsenergie in thermische Energie umgewandelt.
Wird eine andere Methoden der Messwertbestimmung genutzt, findet unweigerlich ein Eingriff in das Experiment statt. Die Kabel der Messgeräte, ihre Masse und ihr Luftwiderstand beeinflussten den Verlauf des Experimentes. Andere Versuchsaufbauten werden unübersichtlich, kompliziert bzw. fehleranfällig. Bei der Bestimmung der Fallbeschleunigung mit der Metallkugel beispielsweise beschränkt sich für die Videoanalyse der Versuchsaufbau selbst auf das absolut notwendigste (vgl. Experiment in Kapitel 3.5, Seite 54). Es werden Lichtschranken ebensowenig benötigt, wie (für Schüler) unüberschaubare Schaltkreise mit mechanischen Signalgebern, welche durch Aufschlagen der Kugel die Zeitnahme beenden. Sowohl Lichtschranken als auch Kontaktunterbrecher werden erfahrungsgemäß erst nach mehrmaligem Wiederholen gut getroffen, bis endlich *ein* vernünftiger Messwert vorliegt. Bei den Hochgeschwindigkeitskameras hat man oft schon beim ersten Versuch vernünftige Messwerte. Da der Ort des Objektes in *jedem Frame* bestimmt werden kann, stehen wesentlich mehr Messwerte für die Auswertung zur Verfügung.
Ein weiterer Vorteil ist, dass derselbe Versuch immer wieder und zeitverzögert betrachtet werden kann. Dadurch hat die Lehrkraft die Möglichkeit auf entscheidende Phasen eines Experimentes einzugehen. Dadurch wird der Unterricht noch anschaulicher und die Physik für Schüler leichter nachvollziehbar. Im Folgenden wird eine Auswahl von Experimenten des Mechanikunterrichts mit der Hochgeschwindigkeits-Videoanalyse betrachtet. Für die Analyse wird hier das Programm MEASURE DYNAMICS verwendet.

3.1. Das Wiesnersche-Mechanikkonzept

Die Betrachtung der Mechanik erfolgt in dieser Ausarbeitung aus dem Blickwinkel des Wiesner'schen Mechanikkonzeptes für die 7. Klasse (im Folgenden mit *WMK* abgekürzt),

ein zweidimensional-dynamisches Mechanikkonzept. Es stellt eine Weiterentwicklung des *Jungschen Stoßratenkonzeptes*, einem Mechanikkonzept, welches Ende der 60er Jahre von Walter Jung, Horst Reul und Hannelore Schwedes entwickelt wurde, dar. Der Schwerpunkt liegt auf der Dynamik und der vektoriellen Betrachtung von Geschwindigkeit und Kraft. Während bei Jung die Kraft $\vec{F} = \frac{\sum \overrightarrow{\text{Stöße}}}{\Delta t}$ als Stoßrate über die eigenständige Größe $\overrightarrow{\text{Stoß}} = m \cdot \Delta\vec{v}$ eingeführt wird (vgl. [WTW+10, Seite 7 – 8]), legen Wiesner et al. mehr Wert auf die *Newtonsche Bewegungsgleichung*, das heißt die integrale Form des zweiten Newtonschen Gesetzes in elementarisierter Form (*Wiesnersches Kraftstoßkonzept*):

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta\vec{v}. \qquad \text{(vgl. [WTW+10, Seite 10])} \tag{3.1}$$

Diese Produktschreibweise ist für viele Schüler verständlicher und nachvollziehbarer. Außerdem hat sie einige Vorteile. So werden komplexe Bewegungen aus dem Alltag mit „Je [...], desto [...]“ Formulierungen beschreibbar, ohne den Quotienten „Beschleunigung“ ($= \frac{\Delta v}{\Delta t}$) einführen zu müssen.
Anhand des Schülertextes „Einführung in die Mechanik“ [HTW+08], welcher im Rahmen der Forschungsarbeiten von Wiesner et.al. zur Dynamik im Mechanikunterricht entstanden ist, lassen sich die Kernpunkte und der Aufbau des WMK gut ablesen. So wird von Anfang an zwischen dem *Tempo* $|\vec{v}| = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ als *Schnelligkeit* eines Gegenstandes (vgl. [HTW+08, Seite 4]), *Richtung* und *Ziel* einer Bewegung (vgl. [HTW+08, Seite 6 – 7]) und schließlich der *Geschwindigkeit* $\vec{v}$, welche sich aus dem Tempo und einer Richtung (durch „$\vec{}$“ repräsentiert) zusammensetzt (vgl. [HTW+08, Seite 7]), unterschieden. Somit ist der Grundstein für eine mehrdimensionale Betrachtung der Dynamik gelegt.
Ein zentraler Begriff im WMK ist die durch einen Kraftstoß hinzugefügte *Zusatzgeschwindigkeit* $\Delta\vec{v}$. Die Schülerinnen und Schüler lernen, dass sich die Endgeschwindigkeit $\vec{v}_E$ aus der vektoriellen Addition[1] der alten Geschwindigkeit $\vec{v}_A$ und der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ ergibt, also $\vec{v}_E = \vec{v}_A + \Delta\vec{v}$.
Die Newtonsche Bewegungsgleichung (3.1) wird anschließend Schritt für Schritt hergeleitet und besprochen, wobei immer nur der Einfluss der verschiedenen Faktoren auf die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ betrachtet wird. So wird die Kraft als eine Einwirkung auf den Körper betrachtet, welche eine Zusatzgeschwindigkeit zur Folge hat. Diese Einwirkung hat eine *Einwirkungsrichtung* und eine *Einwirkungsstärke*, welche zusammengesetzt die Kraft $\vec{F}$ ergeben, wobei $F = \left|\vec{F}\right|$ proprotional zum Tempo der Zusatzgeschwindigkeit ist. Die direkte Proportionalität von *Einwirkungszeit* Δt und dem Tempo der Zusatzgeschwindigkeit wird durch die höhere Endgeschwindigkeit $\vec{v}_E$ bei längerer Einwirkungszeit Δt bei gleicher Kraft $\vec{F}$ veranschaulicht. Im letzten Schritt wird mit einfachen Beispielen die umgekehrte Proportionalität zwischen Masse m und Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ aufgeführt. All dies schließt mit der *Newtonschen Bewegungsgleichung* (3.1) ab. Neben der Proportionalität, die bei der Newtonsche Bewegungsgleichung gezeigt wurde, wird insbesondere darauf hingewiesen, dass die *Richtung* der Kraft $\vec{F}$ und die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ *gleich* sind (vgl. [HTW+08, Seite 20]).
Der Einsatz von computergestützter Videoanalyse bietet sich bei diesem Mechanikkonzept an, da so der Ort, die Geschwindigkeit und die Zusatzgeschwindigkeit eines Zeitintervalles (Beschleunigung) bestimmt und mittels Vektorpfeilen veranschaulicht werden können.

[1] Die Endgeschwindigkeit kann man durch Ansetzen des einen Vektorpfeiles an die Spitze des anderen veranschaulichen.

3.2. Stöße zwischen Luftkissengleitern

Für die einen ist mit dem Einzug der Luftkissenschiene in die Schule ein revolutionärer Schritt von der in den Übungen berechneten Theorie reibungsfreier eindimensionaler Bewegungen getan, für die anderen ist diese Schiene der Innbegriff der Realitätsferne der Schulphysik. Fakt ist, dass mit der Luftkissenschiene physikalische Bewegungsvorgänge sehr kontrollierbar geworden sind. Es kann unter anderem die konstante Reibung (mittels eines Schwämmchens am Wagen, nach [WH02, Seite 7]) oder eine geschwindigkeitsabhängige Reibung mittels Magneten am Wagen, welche einen von der zeitlichen Änderung des Magnetfeldes abhängigen Wirbelstrom in der Aluminiumschiene zur Folge haben (ebenfalls nach [WH02, Seite 7]), gezielt verdeutlicht und einzeln betrachtet werden.

Mit der Hochgeschwindigkeitskamera sind Stoßprozesse mit Impulsübertragung eher als mit einer normalen Kamera betrachtbar, da diese normalerweise extrem schnell stattfinden. Um diese Stoßprozesse dennoch auszuwerten, werden exemplarisch zwei Versuche mit zwei unterschiedlichen Federn durchgeführt, einer extrem harten und einer sehr weichen Feder. Anhand dieser beiden Experimente sollen die Vorzüge der Hochgeschwindigkeitskamera in diesem Teilbereich verdeutlicht werden. Diese Impulsübertragung ist ein Vorgang, bei dem es genügt, die Geschwindigkeit vor und nach dem Stoß zu betrachten und die mittlere Kraft über die Dauer des Impulses nach Gleichung (3.1) zu bestimmen.

3.2.1. Die harte Feder

Ist die Feder sehr hart, dann ist die Kontaktzeit der beiden Luftkissenwagen extrem kurz (etwa 5 Frames bei 300 fps, vgl. Projekt „F3-mm-steht-bewegt.prj“). Dann empfiehlt es sich über diese Kontaktzeit zu mitteln und die durchschnittliche Beschleunigung zu berechnen. Da hier die eindimensionale Bewegung in x-Richtung betrachtet wird, entsprechen sich (mit Ausnahme des Vorzeichens) die Werte von Tempo und Geschwindigkeit, daher wird im Folgenden auf die Vektorschreibweise verzichtet. Einsichtig ist, dass für das jeweilige Δt die Gleichung $\Delta t = \#\text{Frames} \cdot \frac{1}{300}$ gilt. Die Wagen haben in diesem Versuch eine Masse von $m_{Wagen\ 1/2} = 299\ g$.
Der Stoßprozess für Wagen 1 beginnt bei Frame 39 mit dem ersten Kontakt beider Wagen (vgl. „F3-mm-stehend-bewegt.prj“) und endet bei Frame 44 (Wagen 1 und Wagen 2 berühren sich gerade nicht mehr). Es wird zuerst die Geschwindigkeit von Wagen 1 vor dem Stoß gemittelt (mit $x_f \hat{=}$ Position im Frame f):

$$x_0 = 0{,}012\ m, \qquad x_{39} = 0{,}138\ m$$

(es werden nur drei Nachkommastellen betrachtet, da andernfalls eine Messgenauigkeit vorgespiegelt würde, die mit Videoanalyse nicht möglich ist). Die Geschwindigkeit von Wagen 1 vor dem Stoß ist:

$$v_{\text{Wagen 1}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_{39} - x_0}{39 \cdot \frac{1}{300}} = 0{,}969\ \frac{m}{s}$$

Wagen 1 verharrt nach dem Stoßvorgang in Ruhe, hat also dann das Tempo 0. Damit ist

$$\Delta v = 0 - |v_{\text{Wagen 1}}| = -\,|v_{\text{Wagen 1}}| = -0{,}969\ \frac{m}{s}$$

Damit ergibt sich nach Gleichung (3.1):

$$F_{\text{Wagen 1}} \cdot \Delta t = 0{,}299\ kg \cdot (-0{,}969)\ \frac{m}{s} = -0{,}290\ kg\frac{m}{s}.$$

Dies führt auf eine durchschnittliche Kraft von

$$F_{\text{Wagen 1}} = -17{,}384\ N.$$

Wagen 2 hat vor dem Stoß eine extrem geringe Geschwindigkeit $v_{\text{Wagen 2 vor}} = 0{,}008\ \frac{m}{s}$. Dies folgt aus $\Delta x = x_{39} - x_0 = (0{,}209 - 0{,}208)\ m = 0{,}001m$. Nach dem Stoß hat der Wagen 2 zwischen Frame 44 und 104 $\Delta x = x_{104} - x_{44} = (0{,}392 - 0{,}216)\ m = 0{,}176\ m$ zurückgelegt. Das entspricht einer Geschwindigkeit von

$$v_{\text{Wagen 2}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_{104} - x_{44}}{60 \cdot \frac{1}{300}} = 0{,}880\ \frac{m}{s},$$

wodurch man auf

$$\Delta v_{\text{Wagen 2}} = v_{\text{Wagen 2 nach}} - v_{\text{Wagen 2 vor}} = 0{,}880 - 0{,}008 = 0{,}872\ \frac{m}{s}$$

kommt. Für den Kraftstoß ergibt sich

$$F_{\text{Wagen 2}} \cdot \Delta t = 0{,}261\ kg\frac{m}{s}$$

bzw. für die gemittelte Kraft

$$F_{\text{Wagen 2}} = 15{,}644\ N.$$

Man sieht, dass die gemittelten Impulsänderungen $F \cdot \Delta t = \Delta p$ ($\Delta p =$ Kraftstoß in Ns) annähernd gleich sind. Die leichte Verringerung der Kraft von Wagen 2 erklärt sich durch Übertragungsverluste des Impulses durch die Federn. Eine Betrachtung der kinetischen Energien ist zwar möglich, jedoch nicht ergiebig, da die Bewegungsenergie von Wagen 1 fast vollständig auf Wagen 2 übertragen wird und keine weiteren Energien auftreten. Durch eine höhere Zeitauflösung könnte die Kontaktzeit genauer bestimmt werden. Für die Ermittlung der Geschwindigkeit kann man dann große Schrittweiten wählen, alternativ kann auch eine weichere Feder verwendet werden.

3.2.2. Die weiche Feder

Um die Stoßzeit künstlich zu verlängern, wird nun eine weiche Feder verwendet, der gleiche Versuch erneut durchgeführt und wieder mit 300 fps gefilmt. Durch die weiche Feder wird die Übertragung der Energie deutlich verzögert, was von einem kurzen Kraftstoß (Impulsänderung) zu einer länger andauernden Impulsübertragung führt. Die Masse der Gleiter hat sich durch die weicheren Federn auf $m = 0{,}303\ kg$ erhöht. Analog wie bei der harten Feder werden die Geschwindigkeiten vor und nach dem Stoß über einen sehr langen Zeitraum gemittelt und die Impulsübertragung aus diesen Werten bestimmt. Auch

hier berechnet sich das Zeitintervall folgendermaßen $\Delta t = \#\text{Frames} \cdot \frac{1}{300}$. Es liegt hier das „measure dynamics“-Projekt „F1-mm-stehend-bewegt.prj“ zugrunde.
Wagen 1 befindet sich zu Beginn der Analyse (Frame 67) am Ort $x_{67} = 0{,}013\ m$ (vgl. Tabelle 1 des Projektes). In Frame 220 beginnt der Impulsübertragungsprozess, die Position von Wagen 1 ist bei Frame 220 $x_{220} = 0{,}249\ m$. Nach 75 Frames berühren sich die Federn gerade nicht mehr, der Impulsübertragungsprozess ist abgeschlossen und Wagen 1 befindet sich am Ort $x_{295} = 0{,}308\ m$. Frame 331 ist der Bezugsframe, welcher in die Analyse eingeht, der Wagen befindet sich dann am Ort $x_{331} = 0{,}309\ m$. Für den ersten Wagen ergibt sich somit:

$$\Delta x_{\text{vor Stoß}} = x_{220} - x_{67} = 0{,}236\ m$$

Damit ergibt sich die Geschwindigkeit von Wagen 1 vor dem Stoß

$$v_{\text{Wagen 1 vor}} = 0{,}463\ \frac{m}{s}.$$

Nach dem Stoß ist

$$\Delta x_{\text{nach Stoß}} = x_{331} - x_{295} = 0{,}001\ m,$$

und der Wagen hat demnach eine Geschwindigkeit von

$$\begin{aligned} v_{\text{Wagen 1 nach}} &= 0{,}008\ \frac{m}{s} \\ \Delta v_{\text{Wagen 1}} &= v_{\text{Wagen 1 nach}} - v_{\text{Wagen 1 vor}} = -0{,}455\ \frac{m}{s}. \end{aligned}$$

Für den Kraftstoß heißt das, er ist im Mittel

$$F_{\text{Wagen 1}} \cdot \Delta t = 0{,}303\ kg \cdot \Delta v = -0{,}138\ kg\frac{m}{s},$$

die Kraft, die auf Wagen 1 wirkt ist dann

$$F_{\text{Wagen 1}} = -0{,}551\ N.$$

Für den Wagen 2 werden aus der Tabelle 2 des Projektes folgende Werte ausgelesen: $x_{67} = 0{,}428\ m$, $x_{220} = 0{,}428\ m$, $x_{295} = 0{,}489\ m$ und $x_{331} = 0{,}545\ m$. Damit ergibt sich

$$\begin{aligned} \Delta x_{\text{vor Stoß}} &= x_{220} - x_{67} = 0{,}004\ m \\ v_{\text{Wagen 2 vor}} &= 0{,}008\ \frac{m}{s}, \end{aligned}$$

sowie

$$\begin{aligned} \Delta x_{\text{nach Stoß}} &= x_{331} - x_{295} = 0{,}056\ m \\ v_{\text{Wagen 2 nach}} &= 0{,}467\ \frac{m}{s}. \end{aligned}$$

Mit diesen beiden Geschwindigkeiten ergibt sich

$$\Delta v = v_{\text{Wagen 2 nach}} - v_{\text{Wagen 2 vor}} = 0{,}459\ \frac{m}{s}.$$

Dies in Gleichung (3.1) eingesetzt liefert

$$F_{\text{Wagen 2}} \cdot \Delta t = 0{,}303\ kg \cdot \Delta v = 0{,}139\ kg\frac{m}{s}$$

und die mittlere Kraft auf Wagen 2 ist somit

$$F_{\text{Wagen 2}} = 0{,}556\ N.$$

Es wird deutlich, dass der Betrag der Kraft praktisch gleich ist. Es gilt also das dritte newtonsche Gesetz: $\vec{F}_{1\to 2} = -\vec{F}_{2\to 1}$. Die Luftkissenbahn mit den beiden Gleitern zeigt klar die Impulserhaltung (genau dafür wurde die Bahn konzipiert). Das Videoanalyseprogramm kann seine Vorteile bei diesen Experimenten nicht herausstellen, denn Vektorpfeile machen bei eindimensionalen Bewegungen kaum Sinn, die Richtung der Bewegung ist hier immer eindeutig. Deutlich wird auch, dass die Hochgeschwindigkeitskamera offensichtlich bei einer eindimensionalen Bewegung gut auswertbare Ergebnisse liefert, jedoch kommen ihre Vorzüge deutlicher in den weiteren Experimenten zu tragen, bei denen zweidimensionale Bewegungen betrachtet werden.

3.3. Der Looping

Physik als eigenes Unterrichtsfach steht in Bayern seit der Einführung des G8-Lehrplans formal erst in der 8. Jahrgangsstufe auf dem Stundenplan. Bereits in der siebten Jahrgangsstufe werden im Rahmen des Faches „Natur und Technik“ zwei Wochenstunden Physik unterrichtet. Die Energie ist das Hauptthema der 8. Klasse. Bereits in der 7. Klassenstufe werden sie im Fach Natur und Technik unter anderem an die physikalischen Hintergründe von Bewegungen herangeführt. Inbesondere in diesen ersten beiden Jahren, sollte ein starker Alltagsbezug hergestellt werden. Damit ist gewährleist, dass das Interesse am Fach nicht allzu sehr nachlässt. Die Physik von Objekten zu betrachten, welche die Schüler interessiert und fasziniert, kann helfen, das Interesse aufrecht zu erhalten.
Viele Schüler stehen lange an, um nur eine Fahrt mit einem Looping zu genießen. Das „kribbeln“ im Bauch wird durch die Zwangskräfte verursacht, welche auf den Wagen und die Insassen wirken. Bevor jedoch eine echte Achterbahn betrachtet wird, empfielt es sich, die Theorie anhand von Modellen zu vermitteln. Die Darda®- oder die Carrera®-Bahn sind fast allen Jugendlichen bekannt. Die meisten haben mit einer der Bahnen schon gespielt, einige haben auch eine der beiden Bahnen zu Hause. Für die Videoanalyse sind zweidimensionale Bewegungen wie beispielsweise ein Looping von großem Interesse. Im Folgenden werden nach einer theoretischen Einführung, die Loopingfahrten mit beiden Bahnen betrachtet.

3.3.1. Der Looping - theoretisch betrachtet

Bevor die Experimente aufgebaut, aufgenommen und analysiert werden, wird die Theorie des Loopings näher betrachtet. Der Einfachheit halber sei angenommen, dass ein Looping

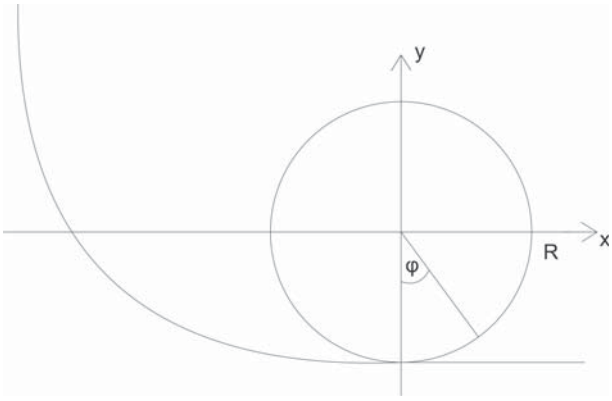


Abbildung 3.1.: Skizze des Versuchaufbaus mit Koordinatensystem

durch eine Kreisbahn mit Radius R beschrieben wird, dessen Mittelpunkt auch der Mittelpunkt des Koordinatensystems ist (vgl. Abb. 3.1). Des Weiteren sei φ wie in Abbildung 3.1 der Winkel, welcher an der negativen y-Achse gegen den Uhrzeigersinn angetragen wird. Die Kreisbahn sei durch die Funktion $c : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^2$:

$$\varphi \mapsto c(\varphi(t)) = R \cdot \begin{pmatrix} \sin(\varphi(t)) \\ -\cos(\varphi(t)) \end{pmatrix} \tag{3.2}$$

beschrieben. Für die weitere Berechnungen werden der *Tangenteneinheitsvektor* $\vec{e}_T = \frac{\dot{c}}{|\dot{c}|}$ und der *Normaleneinheitsvektor* $\vec{e}_N = \frac{\dot{\vec{e}}_T}{|\dot{\vec{e}}_T|}$ benötigt:

$$\begin{aligned}
\dot{c} &= R \cdot \dot{\varphi}(t) \cdot \begin{pmatrix} \cos(\varphi(t)) \\ \sin(\varphi(t)) \end{pmatrix}, \\
|\dot{c}| &= \sqrt{R^2 \cdot \dot{\varphi}^2(t) \cdot \underbrace{(\cos^2(\varphi(t)) + \sin^2(\varphi(t)))}_{=1}} = R \cdot \dot{\varphi}(t) \\
\Rightarrow \vec{e}_T &= \frac{\dot{c}}{|\dot{c}|} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi(t)) \\ \sin(\varphi(t)) \end{pmatrix} \qquad (3.3) \\
\dot{\vec{e}}_T &= \dot{\varphi}(t) \cdot \begin{pmatrix} -\sin(\varphi(t)) \\ \cos(\varphi(t)) \end{pmatrix}, \\
\left|\dot{\vec{e}}_T\right| &= \sqrt{\dot{\varphi}^2(t) \cdot (\cos^2(\varphi(t)) + \sin^2(\varphi(t)))} = \dot{\varphi}(t) \\
\Rightarrow \vec{e}_N &= \frac{\dot{\vec{e}}_T}{\left|\dot{\vec{e}}_T\right|} = \begin{pmatrix} -\sin(\varphi(t)) \\ \cos(\varphi(t)) \end{pmatrix}. \qquad (3.4)
\end{aligned}$$

Das Auto, das durch den Looping fährt, wird durch die (allgemeine) newtonsche Bewegungsgleichung mit Zwangskräften für zweidimensionale Bewegung (vgl. [Mül09, Seite 420]) beschrieben:

$$m \cdot \vec{a} = \vec{F}_{Sonst} + F_z \cdot \vec{e}_N.$$

Da die Beschleunigung in Tangential- und Normalkomponente

$$\vec{a} = \dot{v} \cdot \vec{e}_T + \frac{v^2}{R} \cdot \vec{e}_N$$

zerlegt werden kann, gilt:

$$m \cdot a \cdot \vec{e}_T + \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \vec{e}_N = \vec{F}_{\text{sonst}} + F_Z \cdot \vec{e}_N \tag{3.5}$$

Wird die Gleichung (3.5) mit $\vec{e}_T$ multipliziert, ergibt sich mit $\vec{e}_T \cdot \vec{e}_T = 1$ und $\vec{e}_T \cdot \vec{e}_N = 0$ (da $\vec{e}_T \perp \vec{e}_N$):

$$m \cdot a = \vec{F}_{\text{sonst}} \cdot \vec{e}_T. \tag{3.6}$$

Da hier der reibungsfreie Fall angenommen wird, ist die Kraft $\vec{F}_{\text{sonst}} = \vec{F}_g = \begin{pmatrix} 0 \\ -mg \end{pmatrix}$ die Gewichtskraft. Damit ist

$$m \cdot a = -m \cdot g \cdot \cos(\varphi(t)) \qquad \Leftrightarrow \; a = -g \cdot \cos(\varphi(t)). \tag{3.7}$$

Für die Bestimmung der Zwangskraft F_Z wird (3.5) mit $\vec{e}_N$ multipliziert. Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} \frac{m \cdot v^2}{R} &= \vec{F}_g \cdot \vec{e}_N + F_Z \\ \Leftrightarrow F_Z &= \frac{m \cdot v^2}{R} - \vec{F}_g \cdot \vec{e}_N = \frac{m \cdot v^2}{R} + m \cdot g \cdot \cos(\varphi(t)) \end{aligned} \tag{3.8}$$

Da ein reibungsfreies und daher abgeschlossenes System betrachtet wird, gilt für die Energien $E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = E_{\text{ges}} = \text{const.}$ Wenn der Wagen vom Lifthügel mit der Höhe $h = y_0$ losfährt und keine weitere Energie zu- oder abgeführt wird, ist $E_{\text{ges}} = m \cdot g \cdot y_0$. Insgesamt gilt also

$$\begin{aligned} E_{\text{ges}} = m \cdot g \cdot y_0 &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot y \\ \Leftrightarrow m \cdot g \cdot (y_0 - y) &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \qquad \Leftrightarrow v^2 = 2 \cdot g \cdot (y_0 - y) \end{aligned} \tag{3.9}$$

Setzt man Gleichung (3.9) in die Gleichung (3.8) ein, erhält man:

$$F_z = \frac{2 \cdot m \cdot g}{R}(y_0 - y) + m \cdot g \cdot \cos(\varphi(t))$$

Da $m \cdot g \cdot y_0 = E_{\text{ges}}$ und $y = -R \cdot \cos(\varphi(t))$ ist (vgl. (3.2)), gilt schließlich für die Zwangskraft:

$$F_z = 2 \cdot \frac{E_{\text{ges}}}{R} + 3 \cdot m \cdot g \cdot \cos(\varphi(t)) \tag{3.10}$$

Soll ein Fahrzeug den Looping bewältigen, muss die Zwangskraft im höchsten Punkt des Loopings größer als Null sein, also $F_Z > 0$. Die Durchfahrtsbedingung ist also

$$0 < 2 \cdot \frac{m \cdot g \cdot y_0}{R} + 3 \cdot m \cdot g \cdot \cos(\varphi(t)).$$

Für die gesuchte Starthöhe y_0 ergibt sich:

$$\begin{aligned} 2 \cdot m \cdot g \cdot y_0 &> -3 \cdot R \cdot m \cdot g \cdot \cos(\varphi(t)) \\ \Leftrightarrow y_0 &> -\frac{3}{2} \cdot R \cdot \cos(\varphi(t)) \end{aligned}$$

Dies muss für alle Werte von $\cos\varphi(t)$ auf der rechten Seite gelten, insbesondere, wenn die rechte Seite bei $\cos(\varphi(t)) = -1$ maximal ist. Damit ergibt sich für die Durchfahrtsbedingung im reibungsfreien Fall:

$$y_0 > \frac{3}{2} \cdot R \tag{3.11}$$

Der Wagen muss aus einer Höhe von mehr als $h = 2{,}5 \cdot R$ bezüglich des Ein- und Ausfahrtspunktes des Loopings starten.
Mit Hilfe der Energieerhaltung kann auch das Tempo des Wagens im tiefsten Punkt der Bahn berechnet werden, die dort mindestens notwendig ist, damit der Looping durchfahren werden kann (Dieses Tempo ist gleichzeitig das maximale Tempo des Fahrzeuges auf der Bahn). Da der reibungsfreie Fall betrachtet wird, gilt:

$$E_{\text{ges}} = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}}$$

Da der Wagen am Anfang (zum Zeitpunkt t_0) nur potentielle, jedoch keine kinetische Energie hat, ist

$$E_{\text{ges}} = E_{\text{pot}}(t_0) = m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot \frac{5 \cdot R}{2} \tag{3.12}$$

Im tiefsten Punkt hat der Wagen nur kinetische, keine potentielle Energie und man erhält:

$$\begin{aligned} E_{\text{ges}} &\overset{(3.12)}{=} m \cdot g \cdot \frac{5 \cdot R}{2} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \qquad \Big| \cdot \frac{2}{m} \\ \Leftrightarrow 5 \cdot g \cdot R &= v^2 \\ \Rightarrow v &= \sqrt{5 \cdot g \cdot R}. \end{aligned} \tag{3.13}$$

Mit anderen Worten: Ist das Tempo kleiner als $v = \sqrt{5 \cdot g \cdot R}$, schafft das Fahrzeug den Looping nicht. Die Mindestmaximialgeschwindigkeit, die der Wagen im tiefsten Punkt mindestens haben muss, hängt im reibungsfreien Fall *nur* von dem Radius des Loopings ab.

3.3.2. Das rollende Auto im Looping der Darda-Bahn

Um der Theorie möglichst nahe zu kommen, rollt das Auto im ersten Experiment eine Rampe hinunter und dann durch den Looping (vgl. Abb. 3.2). Der Durchmesser dieses Loopings beträgt 0,51 m, das heißt, dass der Radius $R = 0{,}255\ m$ misst. Das verwendete Auto hat eine Masse von $m = 0{,}024\ kg$. Damit muss die Startenergie mindestens $E_{\text{Start, mind}} = 0{,}150\ J$ betragen. Die Darda-Bahn hat flexible Schienen, das hat einerseits den Vorteil, dass Bahnkonstruktionen wie diese möglich sind, andererseits auch den Nachteil, dass Energieverluste auftreten, da das Fahrzeug beim Durchfahren die Bahn durchbiegt. Dieses Experiment eignet sich dazu, die Zentripedal- und Gegenkräfte bzw. deren Beschleunigungen einzuführen.

3.3.2.1. Betrachtung der Energie

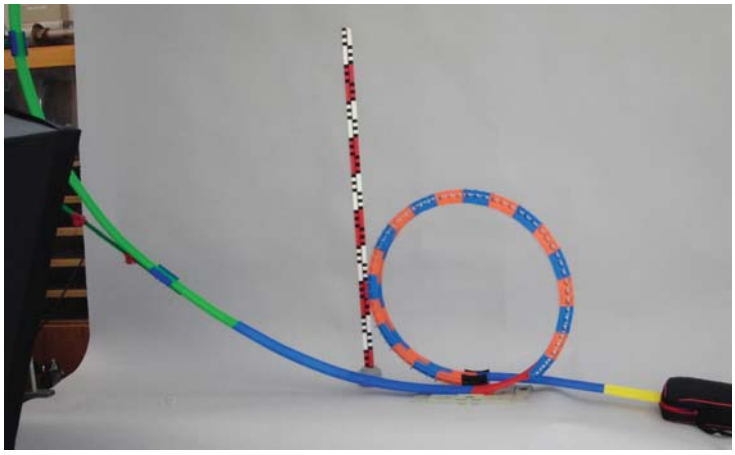


Abbildung 3.2.: Versuchsaufbau des ersten Teilexperiments. Links ist die Aufhängung, in der Mitte der kreisförmige Looping und rechts ein Bremskissen zu sehen.

Wird das Experiment wie in Abbildung 3.2 aufgebaut, kann die Energieumwandlung von potentieller in kinetische Energie (welche beim Durchfahren des Loopings auch teilweise in Rotationsenergie umgewandelt wird) beobachtet werden. Der Aufnahmebereich, welcher dem Projekt „Quant-Ex-Darda-Looping-h=100cm.prj“ zugrunde liegt, beschränkt sich auf den Looping. Das Fahrzeug wird mit der Masse $m = 0{,}024\ kg$ bei einer Höhe von $h = 1{,}00\ m$ (bezüglich dem tiefsten Punkt des Loopings) losgelassen und hat demnach beim Starten eine Gesamtenergie von $E_{\text{ges}} = E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h = 0{,}235\ J$. Lässt man sich mit measure dynamics die potentielle, die kinetische und die Summe beider Energien berechnen und als Graph ausgeben, erhält man Graphen wie in Abbildung 3.3, Seite 40.

Wird die potentielle Energie (blaue Kurve) betrachtet, so ist deutlich zu sehen, dass diese bis zum Scheitelpunkt zunimmt, im Scheitelpunkt maximal ist und anschließend wieder fast bis 0 J abnimmt. Die kinetische Energie verhält sich ebenfalls (scheinbar) erwartungsgemäß; sie nimmt beim Einfahren in den Looping ab, ist etwa beim Scheitelpunkt minimal und nimmt dann einigermaßen gleichmäßig wieder zu. Die beiden Ausreißer bei etwa $t = 0{,}09\ s$ und $t = 0{,}49\ s$ sind auf die automatische Objekterkennung der Videoanalyse-Software zurückzuführen. Betrachtet man die kinetische Energie in Abb. 3.3 genauer, so fällt auf, dass sie am Anfang ($E_{\text{kin}} \approx 0{,}19\ J$) größer ist als am Ende ($E_{\text{kin}} \approx 0{,}12\ J$). Werden zu jedem Zeitpunkt die Summe beider Energien betrachtet, ist leicht zu erkennen, dass die Abnahme der Energie in guter Näherung linear ist.
Die Darda-Bahn-Schienen verursachen durch ihre seitliche Führung Reibung am Wagen, diese wiederum führt zur Abnahme der Energie. Je nachdem wie gut das Fahrzeug in der Spur bleibt und wie stark sich die Bahn verbiegt, wird mehr oder weniger Engergie irreversibel umgewandelt. Um die beiden Energieverluste zu kompensieren, muss zu Beginn des Experimentes mehr potentielle Energie aufgewendet werden als in der Theorie berechnet. Will man ermitteln, wie viel Energie irreversibel umgewandelt wird, kann man die Energieerhaltung ansetzen:

$$E_{\text{ges}} = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} + E_{\text{irr}}$$

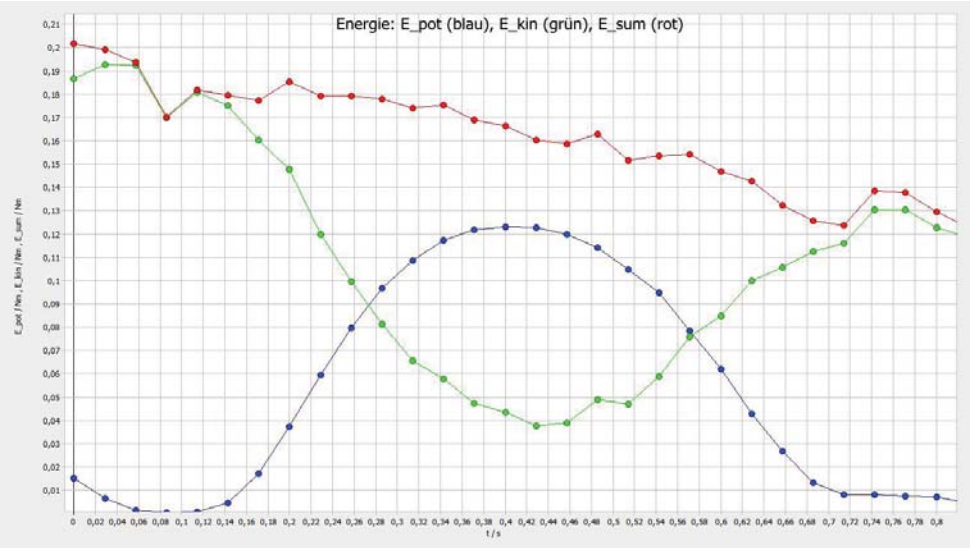


Abbildung 3.3.: Verlauf der potentiellen, der kinetischen und der Summe beider Energien.

E_{irr} bezeichnet die irreversibel umgewandelte Energie. Die Gesamtenergie wird durch die Anfangswerte zum Zeitpunkt t_0 bestimmt:

$$\begin{aligned} E_{\text{ges}}(t_0) &= E_{\text{pot}}(t_0) + \underbrace{E_{\text{kin}}(t_0)}_{=0} + \underbrace{E_{\text{irr}}(t_0)}_{=0} = E_{\text{pot}}(t_0) \\ &= m \cdot g \cdot h(t_0) = 0{,}235\ J, \end{aligned}$$

denn die Masse des Wagens beträgt $m = 0{,}024\ kg$ und die Starthöhe bezüglich des tiefsten Punktes der Bahn ist $h(t_0) = h_0 = 1{,}00\ m$. Die irreversibel umgewandelte Energie beträgt zu jedem Zeitpunkt:

$$E_{\text{irr}}(t) = E_{\text{ges}} - E_{\text{pot}}(t) - E_{\text{kin}}(t) = m \cdot g \cdot h_0 - m \cdot g \cdot h(t) - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2(t).$$

Es sei t_0 der Startpunkt, t_1 der Zeitpunkt, in dem das Fahrzeug zum erstem Mal den tiefsten Punkt der Bahn durchfährt. Im Zeitpunkt t_2 durchfahre der Wagen zum zweiten Mal den tiefsten Punkt. Zwischen t_1 und t_2 befindet sich das Fahrzeug demnach im Looping. Auf eine genaue Zeitangabe wird an dieser Stelle verzichtet, denn das geschnittene und analysierte Video beginnt mit dem ersten Frame, in dem das Fahrzeug zu sehen ist. Der tatsächliche Startzeitpunkt des Wagens ist auf dem Video nicht erkennbar. Betrachtet man die irreversibel umgewandelte Energie im ersten Streckenabschnitt (Abschnitt *vor* dem Looping), wird die kinetische und die potentielle Energie zu dem Zeitpunkt t_1 benötigt (vgl. Projekt „Quant-Ex-Darda-Looping-h=100cm.prj“, Tabelle 2; 24. Frame des Videos): $E_{\text{kin}}(t_1) = 0{,}181\ J$, $E_{\text{pot}}(t_1) = 0{,}001\ J$. Die umgewandelte Energie beträgt

$$E_{\text{irr}}(t_1) = 0{,}235\ J - 0{,}001\ J - 0{,}181\ J = 0{,}053\ J$$

Im ersten Streckenabschnitt werden $0{,}053\ J$ irreversibel umgewandelt. Zum Zeitpunkt t_2 (156. Frame) ist $E_{\text{kin}}(t_2) = 0{,}130\ J$ und $E_{\text{pot}}(t_2) = 0{,}008\ J$. Damit ergibt sich

$$E_{\text{irr}}(t_2) = 0{,}235\ J - 0{,}008\ J - 0{,}130\ J = 0{,}097\ J$$

Auf der gesamten Strecke werden in diesem Experiment 0,097 J nicht umkehrbar umgewandelt. Im Looping selbst werden

$$E_{\text{irr Looping}} = E_{\text{irr}}(t_2) - E_{\text{irr}}(t_1) = 0{,}097\ J - 0{,}053\ J = 0{,}044\ J$$

umgewandelt. Im (steiferen) Looping ist der Energieverlust geringer als auf der (flexiblen) Beschleunigungsstrecke. Bezogen auf die Startenergie beträgt der „Energieverlust“ 41%.

3.3.2.2. Betrachtung der kinetischen Größen

Auf den beiden Bildern in Abb. 3.4 ist gut erkennbar, dass die Geschwindigkeit (grüne Vektorpfeile) tangential zur Bahnkrümmung verläuft. Dies deckt sich, zumindest qualitativ, mit der physikalischen Theorie. Betrachtet man das Tempo des Fahrzeugs in Tabelle 2, stellt man fest, dass der Wagen zum Zeitpunkt t_1 (Einfahrt in den Looping) ein Tempo von $|\vec{v}(t_1)| = 3{,}883\ \frac{m}{s}$ und zum Zeitpunkt t_2 (Ausfahrt aus dem Looping) „nur“ noch von $|\vec{v}(t_2)| = 3{,}297\ \frac{m}{s}$ hat. Die von der Gleichung (3.13) geforderte Mindestgeschwindigkeit für den Looping mit Radius $R = 0{,}255\ m$ im reibungsfreien Fall beträgt im tiefsten Punkt $|v| = 3{,}54\ \frac{m}{s}$, also etwa 12,7 km/h. Das Tempo ist beim Einfahren $\sim 10\%$ größer, beim Ausfahren $\sim 7\%$ geringer als die durch die Theorie geforderte Mindestgeschwindigkeit. Die Bahn übt also eine bremsende Kraft auf den Wagen aus.

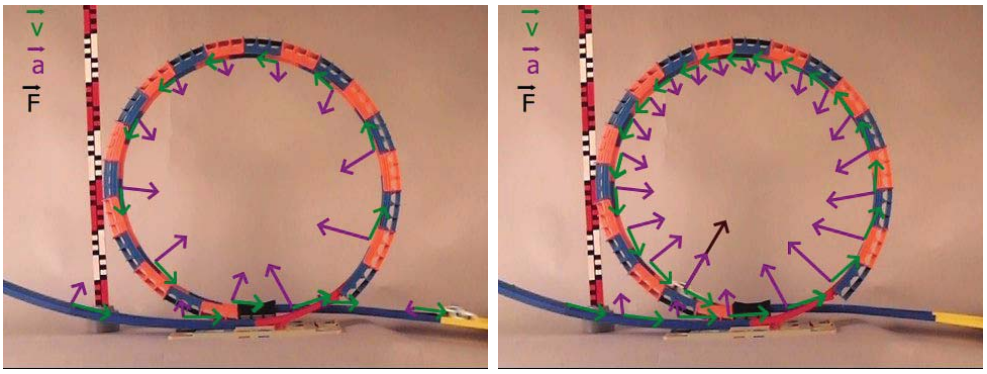


Abbildung 3.4.: In die Bilder sind die Beschleunigung $\vec{a}$ und die Geschwindigkeit $\vec{v}$ eingestempelt, wobei links der Wert jedes 12. Frames und rechts der Wert jedes 6. Frames berücksichtigt wird.

Der Blick auf die Beschleunigungen ist noch aufschlussreicher. Bereits auf der gekrümmten Bahn *vor* dem Looping wirkt eine Beschleunigung von der Bahn auf das Fahrzeug[2]. Die auf das Fahrzeug wirkende Beschleunigung wird durch den violetten Pfeil visualisiert. Die Neigung eines Beschleunigungspfeiles in Fahrtrichtung zeigt, dass auf den Wagen, neben der Normalbeschleunigung durch die Zentripedalkraft der Bahn, auch eine Beschleunigung in Fahrtrichtung wirkt; ist der Pfeil gegen die Fahrtrichtung geneigt, wirkt demnach eine abbremsende Kraft. Auf beiden Bildern der Abbildung 3.4 ist deutlich erkennbar, dass der Wagen zwischen Einfahren in den Looping und dem Durchfahren des Scheitelpunktes abgebremst wird. Nach Passieren des höchsten Punktes des Loopings wird der Wagen

[2] An dieser Stelle sei angemerkt, dass auf jeden Wechselwirkungspartner gleich große Kräfte wirken. Kräfte auf feststehenden Unterlagen, wie beispielsweise die Kraft vom Wagen auf die Bahn, können jedoch mit Videoanalyseprogrammen nicht gemessen werden. Aber die Gesamtkraft auf das Gefährt ist proportional zur Beschleunigung.

wieder schneller. Der Grund für den Tempo-Unterschied zwischen Ein- und Ausfahrt ist am besten im rechten Bild der Abbildung 3.4 zu erkennen. Im Scheitelpunkt ist der Beschleunigungspfeil gegen die Fahrtrichtung geneigt, das Fahrzeug wird durch die Reibung abgebremst. Gut zu erkennen ist, dass die stärkste Beschleunigung des Wagens durch die Zentripedalkraft verursacht wird.

3.3.3. Das angetriebene Auto im Looping der Darda-Bahn

Die Autos der Darda-Bahn werden mittels eines Rückziehmotors angetrieben. Beim Zurückziehen wird die im Motor eingebaute Spiralfeder gespannt. Lässt man das Auto los, entspannt sich die Feder und das Auto beschleunigt. Mit diesem Experiment kann verdeutlicht werden, dass „versteckte Energien“ existieren, welche nicht mit der Videoanalyse erfasst werden können, aber trotzdem die Bewegung eines Objektes beeinflussen.
Für das Experiment wird eine Darda-Bahn mit großem Looping (wie in Experiment 3.3.2, Seite 38) und ein leichtes Darda-Auto mit gut funktionierender Feder benötigt. Die Bahn wird geschlossen aufgebaut, um längere Anfahrtstrecken auf dem Tisch zu bekommen. Die hohen Geschwindigkeiten erfordern den Einsatz von Steilkurven, da sonst der Wagen aus der Bahn geschleudert wird.
Im Experiment „Qual-Ex-Darda-Looping.prj“ wird wieder der Wagen mit der Masse $m = 24\ g$ verwendet. Das Fahrzeug startet in der rechten Kurve, beschleunigt auf der blauen Geraden (im Hintergrund) und in der linken Kurve. Dieser Beschleunigungsweg ist notwendig, damit das Fahrzeug ausreichend Energie hat, um den Looping zu durchfahren. Für diese Aufnahmen reichen 300 fps aus. In die Analyse ist jedes 7. Frame eingegangen. Im Folgenden werden zuerst die kinematischen, anschließend die energetischen Größen der Loopingfahrt betrachtet und interpretiert.

3.3.3.1. Der Darda-Looping – kinematisch betrachtet

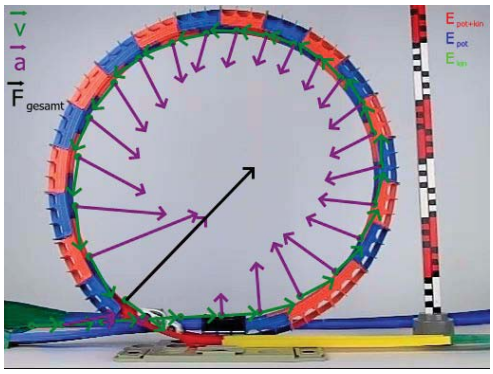


Abbildung 3.5.: Geschwindigkeit und Beschleunigung bei der Loopingdurchfahrt.

In Abbildung 3.5 ist, wie in Abbildung 3.4, gut erkennbar, dass die Geschwindigkeit (grüne Vektorpfeile) tangential zur Bahnkrümmung verläuft. Die auf den Wagen wirkenden Beschleunigungen scheinen zunächst ebenfalls, wie in Experiment 3.3.2, bis zum Scheitelpunkt des Looping *gegen*, nach Durchfahren dieses Punktes *in Fahrtrichtung* geneigt zu sein. Das Tempo des Wagens nimmt bis zum höchsten Punkt ab, danach nimmt das Tempo wieder zu. Das Tempo beim Einfahren in den Looping (Frame 35) beträgt $|\vec{v}_{35}| = 2{,}88\ \frac{m}{s}$,

beim Ausfahren (Frame 203) ist es mit $|\vec{v}_{203}| = 4{,}31\ \frac{m}{s}$ wesentlich größer. Das Fahrzeug wird während der Loopingdurchfahrt offensichtlich schneller. Betrachtet man den Scheitelbereich des Loopings, sieht man, dass in den Frames 112 und 119, also noch *vor* Passieren des Scheitelpunktes die Beschleunigung des Wagens radial erfolgt. Im Scheitelpunkt (Frame 126) wirken auf das Fahrzeug deutlich erkennbar neben der Zentripedalkraft auch eine beschleunigende Kraft in Fahrtrichtung. Die Beschleunigung des Wagens erfolgt durch die noch nicht vollständig entspannte Feder. Dies wird durch die energetische Betrachtung im folgenden Kapitel noch deutlicher.

3.3.3.2. Der Darda-Looping – energietisch betrachtet

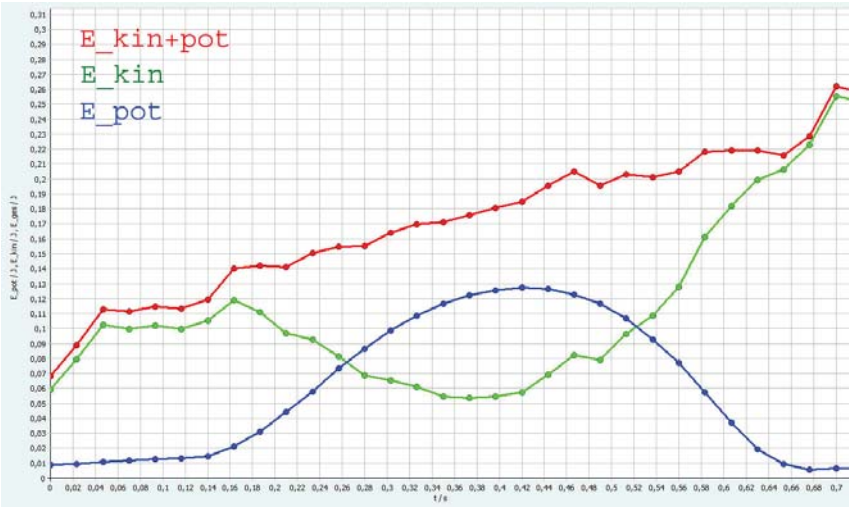


Abbildung 3.6.: Verlauf der potentiellen, der kinetischen und der Summe beider Energien.

Die potentielle Energie verläuft erwartungsgemäß. Sie ist im Scheitelpunkt des Loopings maximal und beim Ein- und Ausfahren in den tiefsten Punkten minimal. Die kinetische Energie nimmt bis etwa zum höchsten Punkt des Loopings ab, danach wieder zu. Die kinetische Energie ist am Ende (Frame 203) mit $E_{\text{kin, 203}} = 0{,}22\ J$ jedoch etwa doppelt so groß wie bei der Einfahrt in den Looping (Frame 35: $E_{\text{kin, 35}} = 0{,}11\ J$). Betrachtet man die Summe beider Energien (insbesondere zwischen dem 14. und 203. Frame) fällt auf, dass diese in guter Näherung linear *zunimmt*. Der Ausreißer bei Frame 140 ($t \approx 0{,}47\ s$) ist auf einen Fehler in der Objekterfassung zurückzuführen und kann vernachlässigt werden. Neben den beiden erfassten Energien steckt eine weitere Energie in dem System, welche durch das Videoanalyseverfahren nicht erfassbar ist. Der Vergleich von Abbildung 3.6 mit Abbildung 3.3 (Seite 40) macht deutlich, dass die Energieumwandlung der nicht erfassten Energie in kinetische Energie so groß ist, dass diese die irreversible Energieumwandlung durch Reibung mehr als kompensiert. Da die Energieumwandlung durch Reibung annähernd linear ist, muss die Energieumwandlung der nicht erfassten Energie ebenfalls annähernd linear sein. Ein Blick in das Innere des Darda-Wagens offenbart den Energiespeicher: die Spiralfeder, die *vor* dem Versuch aufgezogen wurde und ihre Spannenergie während des Experimentes (offensichtlich) näherungsweise linear in kinetische Energie des Fahrzeuges umwandelt.

Dieser Versuch eignet sich gut, um den Schülerinnen und Schülern Zwangskräfte (Normalkraft der Bahn bzw. die Zentripedalkraft) und ihre Wirkung vor Augen zu führen. Ein Blick auf die Messresultate macht zudem deutlich, dass in einem System Energie „versteckt“ sein kann. Schließlich wird auch der Umgang mit Graphen geübt, da die versteckte Energie aus der zeitlichen Änderung der Summe der Energien abgelesen werden kann.

3.3.4. Der Looping und die Carrera-Bahn

In einigen Kinderzimmern ist die Darda-Bahn inzwischen durch eine Carrera-Bahn verdrängt worden. Besonders spektakulär sind auch hier die Loopingfahrten. Dieser Looping kann ebenso gut aufgenommen, analysiert und ausgewertet werden wie der Darda-Looping. Da den Carrera-Wagen permanent elektrische Energie zugeführt wird, ist zu erwarten, dass sich sowohl die kinetischen als auch die energetischen Größen anders verhalten als bei der Darda-Bahn. Der im Projekt „Quant-Ex-Looping-Carrera_300fps-viper-62g.prj“ verwendete Looping hat einen Durchmesser von $d = 0{,}367\ m$, was einem Radius von $R = \frac{d}{2} = 0{,}1835\ m$ entspricht. Die verwendete rote Dodge Viper wiegt $m = 0{,}062\ g$. Für die Analyse ist der Wagen mit einem kleinen schwarzen Punkt auf einem gelben Aufkleber an der Tür versehen worden. Dieser deutliche Kontrast erleichtert die automatische Analyse erheblich. Drei Messwerte sind manuell korrigiert, da der Wagen hinter dem Looping durchfährt. Damit der Wagen den Looping durchfahren kann, muss der Geschwindigkeitsregler ganz durchgedrückt und, sofern vorhanden, der Turbo-Knopf betätigt werden. Aufgrund der dann notwendig hohen Geschwindigkeit des Fahrzeuges empfiehlt es sich, *nach* dem Looping eine Steilkurve einzubauen, damit der Wagen nicht aus der Kurve heraus geschleudert wird.

3.3.4.1. Der Carrera-Looping – kinetisch betrachtet

Abbildung 3.7 zeigt wieder deutlich, dass die Geschwindigkeit tangential zur Bahn verläuft. Es scheint so, als ob die Vektoren immer gleich lang sind. Das Geschwindigkeitsdiagramm (linkes Bild der Abbildung 3.8, Seite 45) bestätigt diesen Eindruck nur bedingt. Beim Durchfahren des Loopings wird der Wagen etwa um ein Drittel langsamer. Im höchsten Punkt (Frame 95) ist er nur noch $|\vec{v}_{95}| \approx 1{,}92\ \frac{m}{s}$ schnell, wohingegen er beim Einfahren in den Looping (Frame 26) noch $|\vec{v}_{26}| \approx 3{,}05\ \frac{m}{s}$ schnell ist.

Die Beschleunigung nimmt beim Einfahren in den Looping extrem stark zu. Die Beschleunigung senkrecht zur Bahn kurz *bevor* das Fahrzeug in den Looping fährt, hängt mit der Berechnungsweise (vgl. Kapitel 2.3.4, Seite 26) von measure dynamics zusammen. Der Wagen „ahnt“ schon, dass er im nachfolgenden Frame eine starke Beschleunigung erfahren wird. In Abbildung 3.7 und 3.8 wird trotz Glättung deutlich, dass sich die Beschleunigung sehr stark in einer kurzen Zeit ändert. Dies ist ein Grund, weshalb echte Loopings *klothoidenförmig* gebaut werden. Durch diese Bauform setzt die Zentripedalkraft nicht schlagartig ein, wodurch wiederum das Gesundheitsrisiko für die Fahrgäste reduziert wird ([Mül09, Seite 440]).
Nachdem der Wagen eine starke Normalbeschleunigung erfahren hat und sich entlang der Kreisbahn bewegt, wirken auf das Fahrzeug neben der Normalbeschleunigung auch die Gravitation. Dies erklärt, weshalb der Beschleunigungspfeil in der ersten (rechten) Hälfte des Loopings gegen, in der zweiten (linken) Hälfte in die Fahrtrichtung geneigt ist.

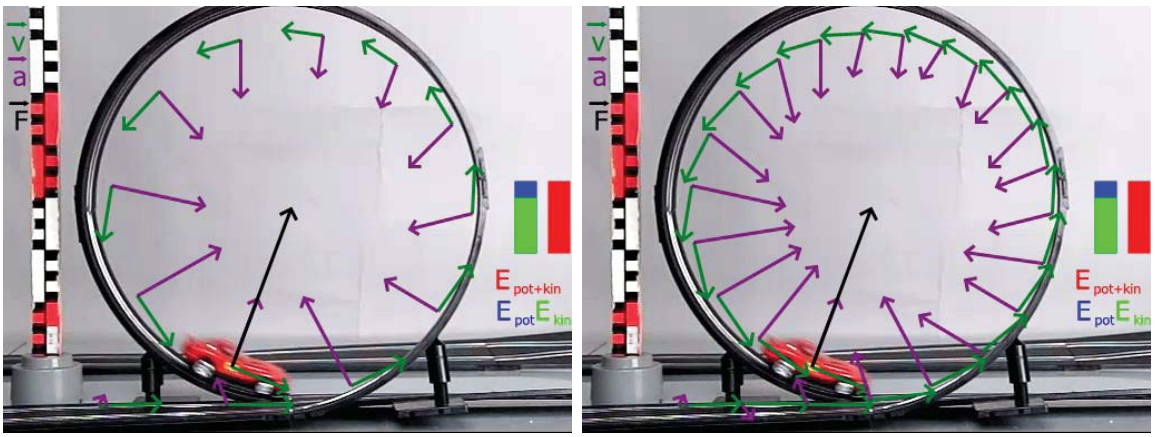


Abbildung 3.7.: Beschleunigung und Geschwindigkeit bei der Durchfahrt durch den Carrera-Looping.

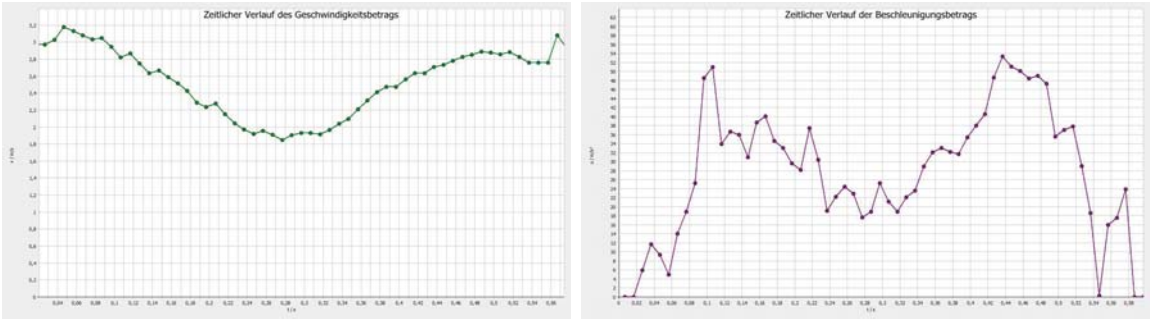


Abbildung 3.8.: Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdiagramm der Carrera-Bahn.

Im Beschleunigungsdiagramm (linkes Bild, Abbildung 3.8) erkennt man dies durch die Abnahme des Beschleunigungsbetrags $a = |\vec{a}|$ (nach dem sprunghaften Anstieg bei der Einfahrt in den Looping) bis etwa zum Scheitelpunkt. Nach dem der Wagen den höchsten Punkt passiert hat, nimmt die Beschleunigung wieder zu und „bricht“ beim Verlassen des Loopings wieder ein, da dann der Wagen nicht mehr auf eine Kreisbahn gezwungen wird.

3.3.4.2. Der Carrera-Looping – energetisch betrachtet

Es ist spannend zu betrachten, wie sich die Energien (insbesondere die kinetische Energie) verhalten, da bei der Carrera-Bahn von außen elektrische Energie zugeführt wird. Die Fahrzeuge haben auf ebener Strecke eine maximale Geschwindigkeit, bei der sich Antriebskraft und Reibungskraft kompensieren, und damit auch eine maximale kinetische Energie (vgl. [KW11]). In der Abbildung 3.9 ist deutlich zu erkennen, dass die kinetische Energie beim Durchfahren des Loopings etwas abnimmt. Beträgt die kinetische Energie in Frame 26 noch $E_{\text{kin } 26} = 0{,}095\ J$, so beträgt sie im Scheitelpunkt (Frame 95) nur $E_{\text{kin } 95} = 0{,}059\ J$. Sie hat also um 38% abgenommen. Die Summe aus beiden Energien verläuft aber auf den ersten Blick trotzdem nahezu parallel zur potentiellen Energie, was daran liegt, dass sich die potentielle Energie wesentlich stärker ändert als die kinetische Energie. Da die kinetische Energie bis zum Scheitelpunkt deutlich geringer abfällt als die potentielle Energie zunimmt, wird dem System offensichtlich in diesem Bahnabschnitt viel

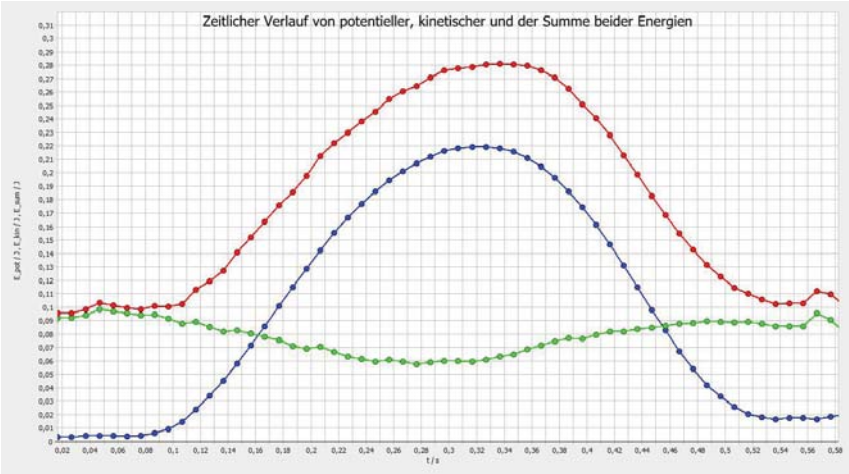


Abbildung 3.9.: Zeitlicher Verlauf von potentieller, kinetischer Energie, sowie der Summe beider Energien.

Energie zugeführt. Nach Durchfahren des Scheitels steigt die kinetische Energie hingegen flacher an als die Lageenergie abnimmt. Die potentielle Energie an sich weist keinen ungewöhnlichen Verlauf auf.
Der Kurvenverlauf der Summe beider Energien spricht für eine Überführung von mehr elektrischer Energie in der ersten Hälfte des Loopings als beispielsweise auf der Geraden. Dabei bleibt der Anteil der elektrischen Energie, welcher in kinetische Energie umgewandelt wird, nahezu gleich und der Anteil, der in potentielle Energie verwandelt wird, steigt stark an. Dies erklärt, weshalb die kinetische Energie kaum abnimmt, wohingegen die potentielle Energie deutlich ansteigt. Die Abnahme der Summe beider Energien begründet sich einerseits durch die Verringerung der Lageenergie, andererseits durch die (indirekt in [KW11] beschriebene) begrenzte kinetische Energie. Die zusätzlich in das System eingebrachte elektrische Energie wird im zweiten Loopingteil durch Reibung wieder abgeführt, bis das Ausgangsniveau erreicht ist.
Möglich ist dies, da die elektrische Leistung $P = U \cdot I$ eines Elektromotors mit zunehmenden Tempo $|\vec{v}|$ des Wagens abnimmt. Wenn die externe Betriebsspannung konstant bleibt, fließt im Motor mit zunehmender Drehzahl $\omega \sim |\vec{v}|$ weniger Strom. Ist mehr Leistung erforderlich, steigt die Stromstärke an. Insgesamt sieht man, dass die Stromstärke (und damit die Leistung) im Motor stark variiert und dass die Reibung durch die Führungsschiene und im Motor sehr groß ist.

Die Carrera-Bahn hat einiges mehr zu bieten als den Looping. Spannend ist beispielsweise auch die Gegenüberstellung einer geglückten und einer missglückten Kurvenfahrt oder der Vergleich der Kurvenfahrten einer flachen und einer Steilkurve mit gleichem Radius.

3.4. Das Maxwell-Rad – das Yoyo der Physiker

In einigen Lehrplänen wird das Maxwell-Rad als *das* Demonstrationsexperiment für reversible Energieumwandlung vorgeschlagen und in fast allen physikalischen Einführungsvorlesungen dafür genutzt. Aus Zeitgründen verzichten in der Praxis viele Lehrer auf das Experiment, war es doch bisher nicht nur unspektakulär, sondern hatte neben der umkehrbaren Energieverwandlung von potentieller in Bewegungsenergie kaum eine auswertbare Aussage geliefert. Um die Rotationsgeschwindigkeit des Rades zu messen, bedarf es bisher einer Lichtschranke. Als Ergebnis konnte man beispielsweise die Rotationsgeschwindigkeit im tiefsten Punkt bestimmen. Selbst bisherige Videoanalysen scheiterten an der hohen Drehgeschwindigkeit des Rades, sodass oft nicht mehr feststellbar war, ob sich eine angebrachte Markierung um beispielsweise $\alpha = 120°$ oder um $\alpha = -240°$ gedreht hat, also ob sich die Rotationsrichtung umgekehrt hat. Ist der Winkelunterschied zwischen zwei Messframes $\Delta\alpha = 120°$, kann man nicht mehr über Δx und Δy Tempo und Beschleunigung bestimmen. Die Hochgeschwindigkeitskameras ermöglichen hier neue, tiefergehende Betrachtungen. Es sind nicht nur die verschiedenen Energien des Energieumwandlungsprozesses, sondern auch kinetische Größen, wie die Radial- und Winkelgeschwindigkeit zu jeder Zeit des Experimentes beobachtbar.
Das in diesem Abschnitt verwendete Maxwell-Rad stammt von der Firma PHYWE. Laut Produktionsangaben hat es einen Durchmesser von $d = 0{,}130\ cm$, ein Trägheitsmoment von $J = 10 \cdot 10^{-4}\ kg \cdot m^2$ und eine Masse von $m = 0{,}470\ kg$. Da die Fadenlänge $l = 0{,}80\ m$ beträgt, empfiehlt es sich, ein Hochformatvideo[3] zu machen. Da das Video zunächst als Querformatvideo ausgegeben wird, muss anschließend das Video mit „MPEG-Streamclip“ oder einem ähnlichen Videobearbeitungsprogramm wieder um 90° gedreht werden. Durch das Aufrichten des Bildes kann sich die Videodatei vergrößern und die Videoanalyse mehr Zeit in Anspruch nehmen.
Für die Analyse sind Punkte auf dem Rand des Schwungrades und auf der Rotationsachse angebracht worden. Um diese Markierungen gut verfolgen zu können, empfiehlt sich ein Aufbau wie in Abbildung 2.1 (Seite 18). Der nachfolgende, theoretische Teil baut im Wesentlichen auf [Dem05, Seite 146] und [PHY] auf.

3.4.1. Das Maxwellrad – die Theorie

Das Maxwellrad besitzt am Anfang potentielle Energie. Auf das Rad wirkt die Gewichtskraft $\vec{F}_g$ und die Kraft durch den Faden $\vec{F}_{\text{Faden}}$. Das Rad besitzt durch den Schwerpunkt eine Achse mit einem kleinen, jedoch für die Rotation des Rades nicht vernachlässigbaren Radius $r_A = |\vec{r}_A|$ (vgl. Abbildung 3.10). Der augenblickliche Drehpunkt befindet sich an der Achsenoberfläche immer genau an der Stelle, an der sich der Faden von der Achse löst. Die Gesamtbewegung kann man sich aus einer Translationsbewegung des Schwerpunktes und einer Rotationsbewegung um den Schwerpunkt zusammengesetzt denken. Der Drehpunkt der Gesamtbewegung liegt auf der Achsenoberfläche (vgl. Bild 3.10), das Drehmoment wird hierbei durch die Gewichtskraft erzeugt. Für die Rotation des Rades um den Schwerpunkt ist der Drehpunkt die Achsenmitte. Das Drehmoment wird durch die Fadenkraft erzeugt. Es wird angenommen, dass die Fadenkraft (und damit auch der Faden) senkrecht verläuft. Diese Annahme ist gerechtfertigt, denn die Fadenlänge ist viel

[3] Hochformat bedeutet, dass die Kamera um 90° gedreht wurde.

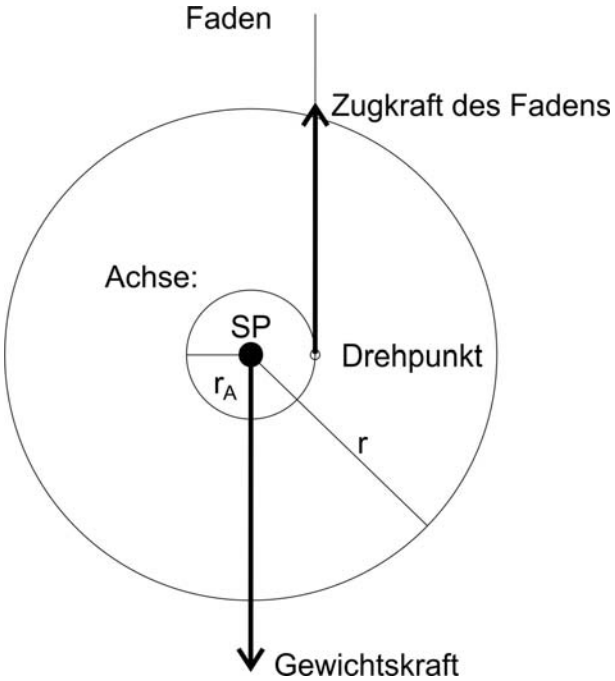


Abbildung 3.10.: Das Maxwellrad (schematisch) mit den auf das Rad wirkenden Kräften. r_A ist hierbei der Radius der Achsenstange, welcher viel kleiner ist, als der Radius des Maxwellrades ($r_A \ll r$).

größer als der Radius der Achse ($l \gg r_A$). Die Auslenkung φ des Fadens zur idealen senkrechten Lage ist $\arctan\left(\frac{r_A}{l}\right) = \varphi \approx 0$. Da Reibungsverluste vernachlässigt werden können, gilt die Energieerhaltung. Generell kann also angenommen werden, dass

$$\begin{aligned} E_{\text{sum}}(t) &= E_{\text{pot}}(t) + E_{\text{kin}}(t) + E_{\text{rot}}(t) \\ &= m \cdot g \cdot y(t) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot |\vec{v}_{\text{Schwerpunkt}}(t)|^2 + \frac{1}{2} \cdot J \cdot |\vec{\omega}(t)|^2 \end{aligned}$$

gilt, wobei m die Masse des Maxwellrades, y die momentane Höhe, $\vec{v}_{\text{Schwerpunkt}}$ die Geschwindigkeit des Schwerpunktes, J das Trägheitsmoment sowie $\vec{\omega}$ die Winkelgeschwindigkeit beschreiben. Mit $\vec{r}_A \perp \vec{\omega}$ gilt zusätzlich $\vec{r}_A \times \vec{\omega} = r_A \cdot |\vec{\omega}|$, wobei r_A der Radius der Aufhängungsachse ist:

$$|\vec{v}_{\text{Schwerpunkt}}| = |\vec{\omega}| \cdot r_A$$

(vgl. Abbildung 3.10). Dabei ist letztere Berechnung von rein theoretischer Natur, da dank der Videoanalyse die Schwerpunktsgeschwindigkeit direkt erfasst werden kann.
Wegen der Energieerhaltung und den Anfangsbedingungen $t_0 = 0$, $\vec{v}_{\text{Schwerpunkt}}(t_0) = 0$ $\vec{\omega}(t_0) = 0$, sowie $y(t_0) = h$ ($\hat{=} l = 0{,}80\ m$) gilt:

$$E_{\text{sum}}(t_0) = E_{\text{pot}}(t_0) = m \cdot g \cdot h,$$

und damit ist allgemein im reibungsfreien Fall zu jedem Zeitpunkt:

$$m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot y(t) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot |\vec{v}_{\text{Schwerpunkt}}(t)|^2 + \frac{1}{2} \cdot J \cdot |\vec{\omega}(t)|^2$$

Für die Betrachtung der resultierenden, auf den Schwerpunkt des Rades wirkenden Kräfte wird angesetzt:

$$\vec{F}_{\text{SP}} = m \cdot \vec{a}_{SP} = \vec{F}_g + \vec{F}_{\text{Faden}}.$$

Da die Gewichtskraft $\vec{F}_g$ und die Kraft durch den Faden $\vec{F}_{\text{Faden}}$ bei der Abwärtsbewegung in genau entgegengesetzte Richtungen wirken, kann auch die vektorielle Schreibweise durch die Betragsschreibweise folgendermaßen ersetzt werden :

$$\begin{aligned} m \cdot |\vec{a}_{\text{SP}}| &= \left|\vec{F}_g\right| - \left|\vec{F}_{\text{Faden}}\right| && \mid \div m \\ |\vec{a}_{\text{SP}}| &= \frac{1}{m}\left(\left|\vec{F}_g\right| - \left|\vec{F}_{\text{Faden}}\right|\right) = g - \frac{1}{m}\left|\vec{F}_{\text{Faden}}\right| \end{aligned}$$

Durch die Fadenkraft wird in Abhängigkeit des Kraftarmes $\vec{r}_A$ ein *Drehmoment* bzgl. des Schwerpunktes auf das Maxwellrad ausgeübt:

$$\vec{M} = \vec{r}_A \times \vec{F}_{\text{Faden}} = J \cdot \vec{\alpha}$$

Die Größe $\vec{\alpha}$ beschreibt die Winkelbeschleunigung. Der Betrag der Bahngeschwindigkeit des Schwerpunktes (rotierendes Bezugssytem) hat aus der Sicht des Drehpunktes den gleichen Betrag wie der Schwerpunkt im ruhenden Bezugssystem. Dieser wiederum ist gleich dem Betrag der Bahngeschwindigkeit des Drehpunktes. Durch diese Gleichheit gilt auch für die Beträge der Beschleunigungen $|\vec{a}_{\text{SP}}| = |\vec{a}_{\text{Drehpunkt}}|$. Mit anderen Worten: vom Drehpunkt aus bewegt sich der Schwerpunkt genauso schnell nach unten wie sich vom Schwerpunkt aus der Drehpunkt nach oben bewegt. Der Abstand zwischen dem Schwerpunkt und dem Drehpunkt ist ebenfalls immer gleich und er beträgt $|\vec{r}_A|$. Das heißt wiederum, dass die Winkelgeschwindigkeiten und -beschleunigungen gleich sind. Es gilt demnach $|\vec{a}_{\text{SP}}| = |\vec{a}_{\text{Drehpunkt}}| = |\vec{r}_A| \cdot |\vec{\alpha}| = |\vec{r}_A| \cdot \frac{1}{J} \cdot \left|\vec{F}_{\text{Faden}}\right| \cdot |\vec{r}_A|$, sowie $\vec{r}_A \perp \vec{F}_{\text{Faden}}$ und damit

$$\begin{aligned} \left|\vec{M}\right| &= J \cdot \frac{|\vec{a}_{\text{SP}}|}{|\vec{r}_A|} = |\vec{r}_A| \cdot \left|\vec{F}_{\text{Faden}}\right| \\ \Rightarrow \left|\vec{F}_{\text{Faden}}\right| &= J\frac{|\vec{a}_{\text{SP}}|}{|\vec{r}_A|^2}. \end{aligned}$$

Setzt man dies in die Gleichung für die Schwerpunktsbeschleunigung ein, erhält man:

$$\begin{aligned} |\vec{a}_{\text{SP}}| &= |\vec{g}| - J \cdot \frac{m \cdot |\vec{a}_{\text{SP}}|}{|\vec{r}_A|^2} && \Big| + J \cdot \frac{|\vec{a}_{\text{SP}}|}{m \cdot |\vec{r}_A|^2} \\ g &= |\vec{a}_{\text{SP}}| + |\vec{a}_{\text{SP}}| \cdot J \cdot \frac{1}{m\,|\cdot\vec{r}_A|^2} && \Big| \div \left(1 + \frac{J}{m\,|\vec{r}_A|^2}\right) \\ |\vec{a}_{\text{SP}}| &= \frac{g}{1 + \frac{J}{m \cdot |\vec{r}_A|^2}} = \text{const}_1\,. \end{aligned}$$

Für die Aufwärtsbewegung haben die Gewichtskraft $\vec{F}_g$ und die Kraft des Fadens $\vec{F}_{\text{Faden}}$ die gleiche Richtung. Somit gilt:

$$\left|\vec{F}_{\text{SP}}\right| = m \cdot |\vec{a}_{\text{SP}}| = \left|\vec{F}_g\right| + \left|\vec{F}_{\text{Faden}}\right|$$

Der Betrag der Beschleunigung für die Aufwärtsbewegung berechnet sich dann mit:

$$|\vec{a}_{\mathrm{SP}}| = \frac{g}{1 - \frac{J}{m \cdot |\vec{r}_A|^2}} = \mathrm{const}_2\,.$$

Während der Ab- und Aufwärtsbewegung ist der Betrag der Schwerpunktsbeschleunigung konstant, da $|\vec{a}_{\mathrm{SP}}|$ nur von den Konstanten $g = 9{,}81\ \frac{m}{s^2}$, $J = 10 \cdot 10^{-4}\ kg\ m^2$, $m = 0{,}470\ kg$, sowie $|\vec{r}_A| = 2{,}5 \cdot 10^{-3}\ m$ abhängt. Für die Abwärtsbewegung ergibt sich die Beschleunigung $|\vec{a}_{\mathrm{SP}}| = \mathrm{const}_1 = 0{,}0287\ \frac{m}{s^2}$, für die Aufwärtsbewegung zu $|\vec{a}_{\mathrm{SP}}| = \mathrm{const}_2 = -0{,}0287\ \frac{m}{s^2}$. Umgeformt erhält man für die Abwärtsbewegung:

$$J = m\,|\vec{r}_A| \left(\frac{g}{|\vec{a}_{\mathrm{SP}}|} - 1 \right)$$

bzw. für die Aufwärtsbewegung

$$J = m\,|\vec{r}_A| \left(\frac{g}{|\vec{a}_{\mathrm{SP}}|} + 1 \right)$$

Im tiefsten Punkt bleibt der Drehimpuls erhalten und der Faden rollt sich wieder auf die Achse des Maxwellrades auf. Hat das Drehmoment beim Abrollen des Rades die Bewegung unterstützt, hemmt es diese und das Rad wird wieder langsamer. Vernachlässigt man die Reibungsverluste, wird insgesamt die potentielle Energie in kinetische und Rotationsenergie, anschließend wieder vollständig zurück in potentielle Energie umgewandelt.

3.4.2. Das Maxwellrad – Betrachtung der Energien

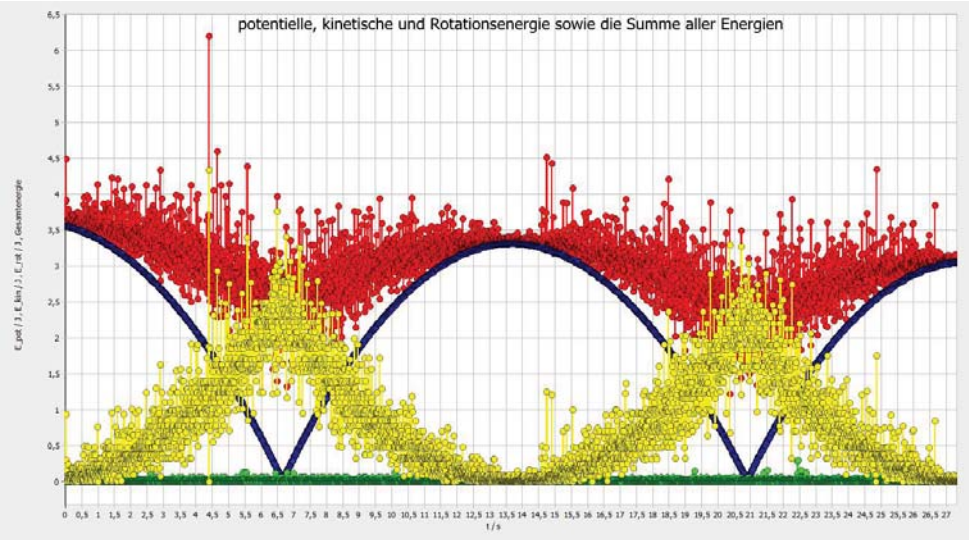


Abbildung 3.11.: Potentielle Energie (blau), kinetische Energie (grün) sowie Rotationsenergie (gelb) und die Summe dieser Energien (rot)

Die Energien, die in diesem Experiment auftreten und berechnet werden können, sind, wie bereits erwähnt, die potentielle Energie ($E_{\mathrm{pot}} = m \cdot g \cdot h$), die kinetische Energie des Schwerpunktes (Translationsenergie),sowie die Rotationsenergie (E_{rot}) und die Summe dieser drei

Energien (E_{sum}). Die potentielle und die kinetische Energie erhält man leicht durch die Analyse des Schwerpunktes (vgl. Tabelle 1, „Quant-Ex-Maxwellrad-Phywe.prj“), wobei die Schrittweite 2 gewählt wurde. Für die Bestimmung der Rotationsenergie wird jedoch der Betrag der Winkelgeschwindigkeit $\omega = |\vec{\omega}|$ benötigt. Diese erhält man durch die Gleichung:

$$r \cdot \omega = |\vec{v}_{\text{rot}}| \qquad \Longleftrightarrow \qquad \omega = \frac{|\vec{v}_{\text{rot}}|}{r} \tag{3.14}$$

Es werden noch der Radius und die Rotationsgeschwindigkeit benötigt. Den Radius $r = 0{,}0568\ m$ erhält man durch die Messung des Abstandes zwischen Rotationsachse und *Messpunkt* am Rand des Rades. Hierfür kann beispielsweise die Messfunktion von measure dynamics genutzt werden. Nicht sinnvoll ist es als Radius den Durchmesser $d = 0{,}130\ m$ zu halbieren, da der Messpunkt nicht am äußersten Rand, sondern etwas innerhalb angebracht ist.
Ein wenig schwieriger wird es bei der Bestimmung der momentanen Rotationsgeschwindigkeit $\vec{v}_{\text{rot}}$. Hierzu wurde in der Tabelle 2 des Projektes der Randpunkt analysiert. Die so erhaltene Geschwindigkeit ist eine Überlagerung der vertikalen Bewegung und der Rotation, sie ist also nicht die gesuchte Rotationsgeschwindigkeit. Um diese Geschwindigkeit $\vec{v}_{\text{rot}}$ zu erhalten, müsste noch die Schwerpunktsgeschwindigkeit von der gemessenen Geschwindigkeit von Tabelle 2 abgezogen werden. In measure dynamics ist diese Rechnung theoretisch möglich, da Werte von Tabellenblatt 1 mit dem Befehl „TABLE1:{*Name der Spalte*}“ in das Tabellenblatt 2 übernommen werden können. Da die Geschwindigkeit des Schwerpunktes, wie sie in Tabelle 1 bestimmt wird, aufgrund der zu geringen Unterschiede zwischen den Messframes zwar innerhalb der Messgenauigkeit streuen, jedoch keine verlässliche Geschwindigkeit ausgeben, wird als Rotationsgeschwindigkeit bzw. -tempo der Geschwindigkeitswert aus Tabelle 2 verwendet. Auf diese Weise ergibt sich der Wert $|\vec{v}_{\text{rot}}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, woraus $\omega = \frac{1}{r} \cdot \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ bestimmt wird. Trägt man schließlich die berechneten Werte der Energien graphisch auf, erhält man ein Diagramm wie in Abbildung 3.11.
Dieses Diagramm ist in vielerlei Hinsicht bemerkenswert. Die kinetische Energie des Schwerpunktes ist vernachlässigbar klein, selbst wenn die verlässlicheren Werte aus Tabelle 3 genutzt werden. Die potentielle Energie verläuft offensichtlich wie eine an der x-Achse gespiegelte Parabel und sowohl die potentielle als auch die kinetische Energie weisen eine vernachlässigbare Varianz auf. Offensichtlich gibt es bei der Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit ω große Streuungen, welche sich letztendlich auf die Summe der Energien überträgt. Deutlich ist in diesem Diagramm, dass sich die Streuung mit abnehmender Geschwindigkeit reduziert. Außerdem ist zu sehen, dass die potentielle Energie fast im gleichen Maße abnimmt wie die Rotationsenergie zunimmt. Erstaunlich ist, dass die Summe der Energien in den gleichen Punkten wie die potentielle Energie lokale Maxima und Minima annimmt und nicht konstant ist. Es scheint, dass hier die Rotationsenergie zu gering berechnet wurde. Die Rotationsenergie wird aus $E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot |\vec{\omega}|^2$ und $|\vec{\omega}|^2$ wird wiederum aus $|\vec{\omega}| = \frac{|\vec{v}_{\text{rot}}|}{r}$ (vgl. Gleichung (3.14)) bestimmt. Das Rotationstempo $|\vec{v}_{\text{rot}}|$ berechnet sich in jeder Komponente aus der Ortsänderung, was geometrisch einer Sekante entspricht. Die Geschwindigkeit $|\vec{v}_{\text{rot}}|$ und damit $|\vec{\omega}|$ wird nicht über die Bogenlänge und damit zu gering berechnet. Zudem wird das Tempo systematisch zu gering berechnet, da die tatsächliche Framerate von der eingestellten abweicht. Damit ist der ermittelte Betrag der Winkelgeschwindigkeit $|\vec{\omega}|$ kleiner (oder höchstens näherungsweise gleich) dem

realen Betrag der Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_{\text{real}}$, $|\vec{\omega}| < |\vec{\omega}_{\text{real}}|$. Dies macht sich bei höheren Winkelgeschwindigkeiten stärker bemerkbar, da einerseits die Unterschiede zwischen Bogenlänge und Sekante, andererseits die Abweichung des ermittelten zum realen Tempo größer werden.

3.4.3. Das Maxwellrad – kinetisch betrachtet

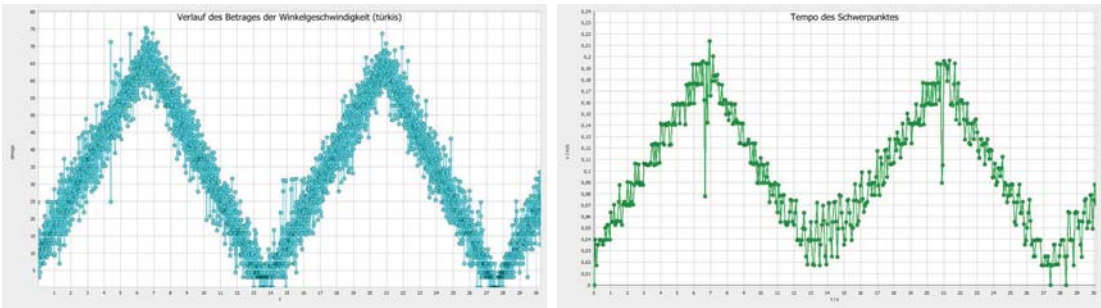


Abbildung 3.12.: Der Betrag der Winkelgeschwindigkeit (türkis) und das Tempo des Schwerpunktes (grün).

In der theoretischen Abhandlung (Kapitel 3.4.1, ab Seite 47) wird erläutert, dass die auf das Rad wirkenden Kräfte außerhalb des Schwerpunktes in einem Drehmoment resultieren, wodurch sich das Rad um den Drehpunkt am Rand der Aufhängungsachse zu drehen beginnt. Dies wiederum ist Ursache für eine Änderung der Winkel- und der Schwerpunktsgeschwindigkeit. Das linke Diagramm von Abbildung 3.12 zeigt deutlich, dass die Winkelgeschwindigkeit (türkis) bis zum unteren Umkehrpunkt annähernd gleichmäßig zunimmt und sich danach ebenso gleichmäßig reduziert, wobei die Messwerte eine große Streuung aufweisen. Verwendet man für die Bestimmung des Schwerpunkttempos nur die Daten aus Tabelle 1 des Projektes, so entsteht der Eindruck, als ob sich dieser mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Grund hierfür ist, dass der Ortsunterschied zwischen den analysierten Frames bei der gewählten Schrittweite 2 viel zu gering ist. Als Ergebnis erhält man eine „Geschwindigkeit“, welche durch die Streuung in der Objekterkennung verursacht sind. Wählt man eine größere Schrittweite, beispielsweise Schrittweite 10 (Tabelle 3), erhält man einen nachvollziehbaren Geschwindigkeitsverlauf (rechtes Bild von Abbildung 3.12). Für die Berechnungen der für die Rotationsgeschwindigkeit v_{rot} notwendigen Zwischenwerte $DeltaV_x$ und $DeltaV_y$ reichen diese Werte allein schon wegen der Anzahl nicht aus.

Im rechten Geschwindigkeitsdiagramm von Abbildung 3.12 ist gut zu erkennen, dass das Tempo des Schwerpunktes bis zum unteren Umkehrpunkt gleichmäßig zu-, beim Zurückkehren in die Ausgangslage ebenso gleichmäßig abnimmt. Dies bestätigt die theoretischen Überlegungen, dass die Beschleunigung des Schwerpunktes konstant und verhältnismäßig klein ist. Die starke Geschwindigkeitsabnahme im unteren Umkehrpunkt erklärt sich durch die Änderung der Bewegungsrichtung. Noch deutlicher ist diese Richtungsänderung bei der Betrachtung der Schwerpunktsgeschwindigkeit in Abbildung 3.13 zu erkennen. Im unteren Umkehrpunkt ruht zu einem Zeitpunkt das Rad, bevor es die Richtung ändert. Dies zeigt auch, dass der Impuls (im Gegensatz zum Drehimpuls) nicht erhalten bleibt.

Abbildung 3.13.: Diagramm der Vertikalgeschwindigkeit des Schwerpunktes

Auf die graphische Darstellung der Beschleunigung und der Winkelbeschleunigung wird verzichtet, da diese Diagramme durch die stufenförmige Zunahme, phasenweise konstanten Werte bzw. durch die zum Teil erhebliche Streuung der Winkelbeschleunigung mehr verwirren als Klarheit bringen. Sinnvoller wäre es durch die Geschwindigkeitsdiagramme eine Kurve einzufitten und diese abzuleiten, um somit die Beschleunigung zu erhalten.

3.4.4. Betrachtung der Streuung der Messwerte in diesem Experiment

Es ist deutlich zu sehen, dass die Messwerte von ω bzw. der sich auch daraus berechnete Wert E_{rot} stark streuen. An dieser Stelle wird exemplarisch eine Fehlerrechnung für ω am konkreten Analysebeispiel unternommen. Die Betrachtung des linken Bildes von Abbildung 3.12 legt die Vermutung nahe, dass der Betrag der Winkelgeschwindigkeit linear mit der Zeit ansteigt bzw. abfällt. Um diesen linearen Anstieg bzw. Abfall zu erhalten, werden die Daten aus Tabelle 2 exportiert und mit Excel bearbeitet. Es werden exemplarisch die Regressionsgeraden für den ersten Bewegungsabschnitt (Abrollen des Rades bis zum unteren Umkehrpunkt, Frame 0 bis 2000) und den zweiten Bewegungsabschnit (Aufrollen des Rades bis zum oberen Umkehrpunkt, Frames 2002 bis 4090) betrachtet. Da anhand der Messwerte die genauen Endpunkte der Abschnitte nicht erkennbar sind, werden mit measure dynamics die jeweiligen Frames ermittelt: Die Bewegungsrichtung des Schwerpunktes kehrt sich bei Frame 2000 um, bei Frame 4090 befindet sich das Maxwellrad im oberen Umkehrpunkt. Mit diesen Werten liefert Excel eine Regressionsgerade für den ersten Abschnitt (von Frame 0 bis 2000) derart:

$$\omega_1 = (10{,}82 \pm 0{,}05)t,$$

(vgl. „Quant-Ex-Maxwellrad-Phywe-Regressionsgerade-2.xls“) mit einem Standardfehler von $\sigma_{\omega_1} = \pm 4{,}27\ \frac{1}{s}$, was einer Abweichung von 39% entspricht. Für die Regressionsgerade des Winkelgeschwindigkeitsbetrags ω des zweiten Teils ergibt sich analog

$$\omega_2 = (-9{,}42 \mp 0{,}06)t + (129{,}64 \pm 0{,}63),$$

wobei hier der Standardfehler σ_{ω_2} der Regressionsgeraden $\pm 3{,}94\ \frac{1}{s}$ ist, also etwa 42% entspricht. Beachtet man die Berechnungsweise der Geschwindigkeit und damit den Betrag der Winkelgeschwindigkeit und schränkt die Regressionsrechnungen an beiden Enden jeweils um zwei Messwerte ein, ergibt sich für den ersten Bewegungsabschnitt

$$\omega_1 = (10{,}83 \pm 0{,}05)t,$$

wobei der Standardfehler der Abweichung $\pm 4{,}24\ \frac{1}{s}$ ist, was einer prozentualen Abweichung von ebenfalls 39% entspricht! Mit der gleichen Methode wird die Regressionsgerade von ω der Aufwärtsbewegung des Rades bestimmt:

$$\omega_2 = (-9{,}42 \mp 0{,}06)t + (129{,}72 \pm 0{,}63)$$

Der Standardfehler des zweiten Bewegungsabschnittes beträgt $\pm 3{,}95\ \frac{1}{s}$, was einer Abweichung von immerhin noch 42% entspricht. Das Ausschließen von je vier von ca. tausend Messwerten hat also einen kaum relevanten Einfluss auf das Ergebnis. Erklärt werden kann die extreme Streuung durch die Fortpflanzung der Fehler beim Messen, bei der Datenerfassung und der weiteren Berechnung der Messwerte. Unberücksichtigt bleibt, dass die Messwerte für die Beschleunigung systematisch zu gering berechnet wurden.

3.5. Die Metallkugel auf der Glasplatte

Das Experiment mit der Metallkugel auf der Glasplatte ist ein Experiment, um den Schülerinnen und Schülern die Energieerhaltung zu demonstrieren. Eine Metallkugel wird an einer elektromagnetischen Halterung befestigt (vgl. Abb. 3.15, Seite 59). Diese ist über ein Stativgestänge an den Tisch geklemmt. Die Glasplatte unter der Metallkugel wird so ausgerichtet, dass die Kugel möglichst mittig auf die Platte auftrifft. Unterbricht man den Stromkreis der elektromagnetischen Halterung, wird die Metallkugel nicht mehr (elektro-) magnetisch angezogen und sie fällt herab. Für eine nachvollziebahre Videoanalyse empfiehlt es sich einen Maßstab[4] im Bild zu platzieren.
Die Hochgeschwindigkeitskamera liefert bereits ab 300 fps zu viele Einzelbilder, sodass der Ortsunterschied zwischen aufeinanderfolgenden Frames für eine vernünftige Orts- und Geschwindigkeitsbestimmung viel zu gering ist. In diesem Experiment wird daher bei der Aufnahme 300 fps gewählt und außerdem bei der Analyse nur jedes dritte Bild (Einstellung in measure dynamics ist „Schrittweite 3“) in die Analyse miteinbezogen, sodass die effektive Bildrate 100 fps beträgt. Wird der Startframe der Analyse geschickt gewählt, ist der Frame, in dem zum ersten Mal die Metallkugel auf die Glasplatte trifft, in der Analyse enthalten. Damit ist sichergestellt, dass in diesem Punkt die Auswertung korrekt durchgeführt wird. In measure dynamics ist das einfach möglich, indem man im Video an diesen Zeitpunkt geht und von dort die Analyse startet. Das Programm erfasst die Orte von dort aus sowohl rückwärts als auch vorwärts.
Mit Hilfe der Tabellenkalkulationsfunktion der Videoanalysesoftware measure dynamics können neben den automatisch bestimmten kinematischen Größen *Ort*, *Geschwindigkeit* und *Beschleunigung* auch nachträglich *potentielle* und *kinetische Energie* sowie die *Summe beider Energien* ermittelt werden (vgl. „Quant-Ex-Metallkugel-300fps.prj“). Für die

[4] Der Maßstab steht bzw. liegt idealerweise in der Ebene, in dem sich das Objekt die meiste Zeit befindet; sonst entstehen Messfehler durch die perspektivische Verzerrung.

Beschreibung der physikalischen Hintegründe des Experimentes werden in dieser Ausarbeitung zuerst die kinematischen Größen und im Anschluss die Energien betrachtet. Trotzdem sind in den Bildern stets *alle* relevanten Größen dargestellt.
Im Schulalltag ist die gleichzeitige Betrachtung kinematischer *und* energetischer Größen nicht empfehlenswert, da die Schülerinnen und Schüler mit unnötigen Informationen überfordert und abgelenkt werden. Für den Schuleinsatz können entweder nur die Informationen von Interesse berechnet und ausgegeben oder, bei der Verwendung vorhandener Videoanalysen, ausschließlich die Filter mit den betrachteten Informationen aktiviert werden.

3.5.1. Die Metallkugel – kinematisch betrachtet

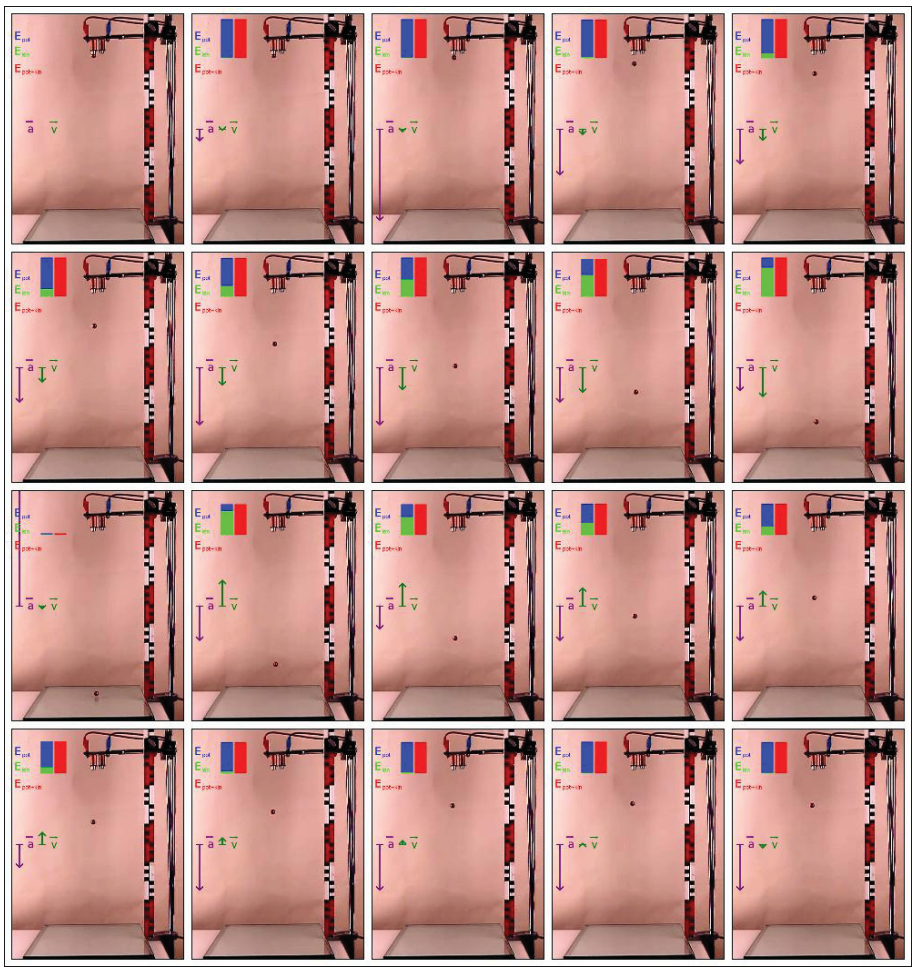


Abbildung 3.14.: Kugelfallversuch: Ausgabe jedes fünften Frames in einer Bildermatrix.

Wird das Experiment durchgeführt, wie beschrieben analysiert und nur jedes fünfte Bild in einer Tabelle ausgegeben, erhält man eine Bilderserie wie in Abb. 3.14. Das Experiment kann man grob in zwei Bereiche untergliedern, den freien Fall (alle Bilder der Serie außer dem 11. Bild) und den Stoßprozess (Bild 11 bzw. Abbildung 3.15, Seite 59 linkes Bild):

Der freie Fall: Das erste Bild in Abbildung 3.14 zeigt lediglich die Ausgangsituation und beinhaltet noch keine Messwertdarstellungen. Im zweiten Bild, welches gleichzeitig

das erste Bild des Videos ist, befindet sich die Metallkugel in Ruhe in der Halterung. Die Kugel hat anfangs schon eine geringe Geschwindigkeit $\vec{v}$ (ortsfester grüner Vektorpfeil links mittig), was auf eine Ungenauigkeit der Messung zurückzuführen ist. Die Beschleunigung $\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$ wird als ortsfester violetter Pfeil links mittig dargestellt. Im zweiten Bild ist sie relativ klein, aber nicht Null, obwohl sie eigentlich Null sein müsste. Dieser Fehler wird durch die Datenberechnung in measure dynamics hervorgerufen (vgl. Kapitel 2.3.4, Seite 26). Die Beschleunigung im dritten Bild ist wieder erheblich größer, ab dem vierten Bild hat sie ungefähr einen festen Wert erreicht. Wird der Mittelwert der Beschleunigungen vor dem ersten Auftreffen gebildet, ergibt sich eine mittlere Beschleunigung von $\bar{a}_1 = -9{,}89\ \frac{m}{s^2}$ bei einem Standardfehler von $\pm 1{,}09\ \frac{m}{s^2}$ sowie einer Standardabweichung von $\pm 5{,}44\ \frac{m}{s^2}$ und 24 gemessenen Werten. Zwischen dem ersten und dem zweiten Auftreffen ist die Beschleunigung $a_2 = (-9{,}24 \mp 0{,}32)\ \frac{m}{s^2}$, wobei 44 Werte eingehen. Der Mittelwert der Fallbeschleunigung in diesem Experiment liegt insgesamt bei $\bar{a} = -9{,}33\ \frac{m}{s^2}$, wobei die Standardabweichung $\pm 4{,}48\ \frac{m}{s^2}$ und der Standardfehler $\pm 0{,}39\ \frac{m}{s^2}$ beträgt. Diese Berechnung beruht auf 132 Werten, wobei die Beschleunigung durch die Abweichung der Framerate systematisch zu gering berechnet wird.

Die starken positiven Beschleunigungen bei den Stoßvorgängen sind nicht in diese Rechnung eingeflossen, da ihre Ursachen unabhängig vom Ortsfaktor sind. Außerdem gehen bei der Standardeinstellung von measure dynamics für die Ermittlung der Beschleunigung fünf Ortspunkte ein. Der beobachtete Körper ruht zu Beginn der Analyse. In den ersten beiden Frames, in denen sich der Körper erstmals bewegt, wird dem Objekt eine falsche Beschleunigung zugeordnet (vgl. Kapitel 2.3.4, Seite 26). Das Gleiche passiert auch, wenn der Körper wieder ruht. Um diese Fehlinformationen auszuschließen, fließen die ersten beiden und die letzten beiden Beschleunigungswerte des Fallvorganges nicht in die Berechnung des Mittelwertes der Beschleunigung ein.

Das Video, die Abbildung 3.14 und die Rechnung zeigen deutlich, dass die Kugel (mit Ausnahme des Stoßvorganges) gleichmäßig von der Erde angezogen wird, also in jedem Frame (mit Ausnahme der Frames kurz vor und kurz nach dem Stoß) annähernd die gleiche Zusatzgeschwindigkeit erhält. Der experimentell bestimmte Wert der Fallbeschleunigung weicht um etwa 5 % nach unten vom Literaturwert ab. Der Messfehler beträgt 4 %. Damit liegt der Literaturwert nicht innerhalb des Messfehlers. Der Grund für diese Abweichung vom Literaturwert kann die systematisch zu gering berechnete Beschleunigung[5] oder die Rotation der Metallkugel sein, welche ein Teil der Energie speichert. Außerdem beeinflussen die Remanenz des Elektromagnete und die Luftreibung die Messung. Entscheidend sind aber die Messungenauigkeit und die doppelte Differenzbildung bei der Berechnung der Beschleunigung.

Nach dem Stoß, welcher im nachfolgenden Punkt beschrieben wird, ist die Geschwindigkeit der Metallkugel (nicht ganz verlustfrei) umgekehrt worden. Die durch die Gewichtskraft bedingte Zusatzgeschwindigkeit der Metallkugel führt solange zu einer Verringerung der Geschwindigkeit in positiver y-Richtung, bis die Kugel die Geschwindigkeit $v = 0$ hat, also einen kurzen Zeitpunkt in der Luft „ruht“. Da die

[5] Die tatsächliche Framerate weicht von der eingestellten Framerate um etwa 4% ab, wodurch Geschwindigkeit und Beschleunigung zu gering berechnet werden.

Metallkugel weiterhin die Zusatzgeschwindigkeit erfährt, kehrt sie ihre Bewegungsrichtung um und das Tempo der Kugel wird wieder größer[6]. Schließlich trifft sie wieder auf die Glasplatte auf und der Vorgang wiederholt sich erneut.

Der Stoßprozess: Im 11. Bild der Abbildung 3.14, Seite 55 (Vergrößert: rechtes Bild von Abbildung 3.15, Seite 59) trifft die Kugel auf die Glasplatte auf und wird schlagartig auf 0 $\frac{m}{s}$ abgebremst. Sie erfährt eine Zusatzgeschwindigkeit, die der ursprünglichen Geschwindigkeit der Kugel entgegengesetzt ist. Die Kraft wirkt noch weiter, sodass die Kugel nach dem Aufschlagen wieder eine Geschwindigkeit entgegen ihrer anfänglichen Richtung bekommt.
Die Kugel übt in diesem Zeitintervall einen Kraftstoß auf die Glasplatte aus. Umgekehrt übt diese einen gleich großen entgegengerichteten Kraftstoß auf die Kugel aus. Mit der Videoanalyse kann letzterer Kraftstoß erfasst werden, da dieser eine starke Zusatzgeschwindigkeit auf die Metallkugel bewirkt, welche wiederum eine Geschwindigkeits- und Ortsänderung zur Folge hat. Um die Kraft und den Kraftstoß berechnen zu können, werden die Daten aus der Videoanalyse genutzt.
Die Kugel trifft genau in Frame 100 auf die Glasplatte. Betrachtet werden außerdem die Frames vor und der nach dem Stoß, für die eine Geschwindigkeit ermittelt wurde, wobei zu berücksichtigen ist, dass in diesem Fall nur jeder dritte Frame des ursprünglichen Videos analysiert wurde. Die Metallkugel bewegt sich in diesem Experiment kaum messbar in x-Richtung, sodass die gemessene horizontale Bewegung in x Richtung hauptsächlich durch Fehler bei der Objekterkennung verursacht wird. Demnach kann ohne Einschränkungen angenomme werden, dass sich die Kugel nur in y-Richtung bewegt. Wegen der Genauigkeit der Skalierung, werden in der Rechnung drei signifikante Stellen der Geschwindigkeit betrachtet. Die Geschwindigkeiten im 97., 100. und 103. Frame betragen jeweils:

$$v_{97} = -2{,}61\ \frac{m}{s}, \qquad v_{100} = -0{,}237\ \frac{m}{s}, \qquad v_{103} = 2{,}26\ \frac{m}{s}.$$

Dies führt auf

$$\begin{aligned}
\Delta v_1 &= v_{100} - v_{97} = 2{,}37\ \frac{m}{s} \\
\Delta v_2 &= v_{103} - v_{100} = 2{,}50\ \frac{m}{s} \\
\Delta v_3 &= v_{103} - v_{97} = 4{,}87\ \frac{m}{s}
\end{aligned}$$

Die Zeitdifferenz Δt_1 zwischen zwei Frames beträgt bei 300 fps:

$$\Delta t_1 = \frac{1}{300}\ s,$$

zwischen vier Frames ($\hat{=}$ drei Zeitintervalle):

$$\Delta t_2 = \frac{3}{300}\ s = \frac{1}{100}\ s,$$

[6]Die Geschwindigkeit selbst wird negativ und immer kleiner.

zwischen sieben Frames also

$$\Delta t_6 = \frac{6}{300}\ s = \frac{1}{50}\ s.$$

Die Masse der Kugel beträgt $m = 8\ g = 8 \cdot 10^{-3}\ kg = 0{,}008\ kg$. Wird nun dies alles auf Gleichung (4.1) angewendet, so erhält man für den Kraftstoß $F \cdot \Delta t$ bzw. für die Kraft $\vec{F}$ im ersten Intervall:

$$F \cdot \Delta t_2 = m \cdot \Delta v_1 = 0{,}0190\ kg\frac{m}{s} \qquad \Longrightarrow F = 1{,}90\ kg\frac{m}{s^2}$$

Für das zweite betrachtete Intervall:

$$F \cdot \Delta t_2 = m \cdot \Delta v_2 = 0{,}0199\ kg\frac{m}{s} \qquad \Longrightarrow F = 1{,}99\ kg\frac{m}{s^2},$$

und schließlich für das gesamte Intervall:

$$F \cdot \Delta t_6 = m \cdot \Delta v_3 = 0{,}0389\ kg\frac{m}{s} \qquad \Longrightarrow F = 1{,}95\ kg\frac{m}{s^2}.$$

Bei der Betrachtung der (in die Analyse eingebezogenen) Frames vor, während und nach dem Stoß sind zwei Punkte auffällig:

1. Die Geschwindigkeit ändert durch den Stoß ihr Vorzeichen, kehrt also die Richtung um. Die gemessene Geschwindigkeit in x-Richtung ist auf Fehler in der automatischen Datenerfassung des Analyseprogrammes zurückzuführen und vernachlässigbar klein.
2. Das Tempo in Frame 103 ist um 0,356 $\frac{m}{s}$ kleiner als das Tempo vor dem Stoß (Frame 97). Der Stoßvorgang scheint also irreversibel zu sein, was auch die weitere Analyse der Energien in der ganzen Bewegung vor und nach dem Stoß im Abschnitt 3.5.2 bestätigt.

Isoliert betrachtet könnte die in Punkt 2 getroffene Aussage auch daran liegen, dass der Aufschlagzeitpunkt nicht exakt getroffen wurde, da sie sich nur auf den Frame *vor* und *nach* dem Stoß beruft. Allerdings trifft dieser Einwand hier nicht zu, da auf dem Video ersichtlich ist, dass genau dieser Moment des Auftreffens im Video enthalten ist.

3.5.2. Die Metallkugel – energetisch betrachtet

Das Thema Energie steht in der 8. Klasse des bayerischen G8-Lehrplans im Mittelpunkt, u.a auch die mechanische Energie und die Energieumwandlungen. Mittels der Videoanalyse kann den Schülerinnen und Schülern die Energieerhaltung und Energieumwandlung gut vor Augen geführt werden. Dieses Unterkapitel beschreibt die Energieerhaltung am Beispiel der Metallkugel.

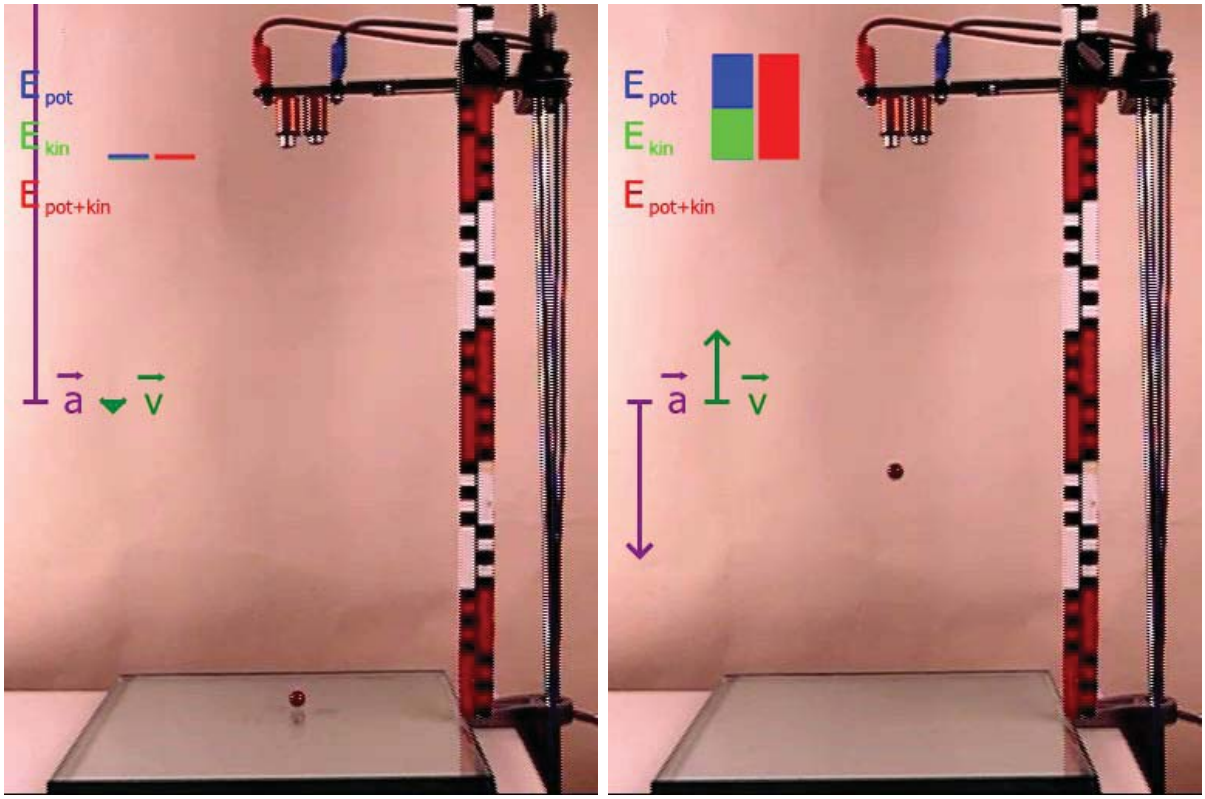


Abbildung 3.15.: Die Metallkugel schlägt im linken Bild auf die Glasplatte auf. Deutlich erkennbar: Die Beschleunigung ist extrem groß, die Geschwindigkeit und die Energien sind gleich Null. Das rechte Bild zeigt die Situation nach dem Aufschlag, jedoch noch vor dem Umkehrpunkt beim Hochsteigen der Kugel.

Mit dem gleichen Videoanalyseprojekt wie in Kapitel 3.5.1 werden die Energien berechnet. Hierbei ist darauf zu achten, dass das Koordinatensystem richtig liegt[7], damit die Berechnung der potentiellen Energie korrekt ist. Die Kugel hat die Masse von $8 \cdot 10^{-3}\ kg$, die y-Koordinate entspricht der Höhe h. Damit gilt:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m(\vec{v})^2 = 0{,}5 \cdot 0{,}008\ kg \cdot (v_x^2 + v_y^2)$$
$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h = 0{,}008\ kg \cdot 9{,}81 \frac{m}{s^2} \cdot y$$

Die Energiebalken, die im Video gezeichnet werden, sind modifizierte Vektordarstellungen. Der Startpunkt wurde fixiert und der Vektorpfeil durch einen breiten Balken ersetzt, dessen Endpunkt die jeweilige Energie ist. Da das Programm „erst“ ab 0,0002 J nicht den 0-Punkt darstellt, werden bei der obigen Berechnung von E_{kin} noch 0,0002 J addiert. Dies hat nur Darstellungsgründe, da die Addition die Werte selbst praktisch nicht ändert[8], aber verhindert, dass die Energien null werden. Wird nämlich die Energie Null, so wird die zugehörige Darstellung des Energiebalkens ein Kreis mit Durchmesser der Balkenbreite

[7]Seit der measure dynamics Version „1.4 f build 377“ kann man das Koordinatensystem auch nachträglich ändern und für das aktuelle Tabellenblatt übernehmen.

[8]Die Werte werden nur um ca. 1-2 % verfälscht.

und verdeckt dabei eventuell die anderen Energien. Die Energiebalken sind in den Bildern der Abbildungen 3.14 und 3.15 links oben eingeblendet. Die potentielle Energie der Kugel ist blau, die kinetische grün und die Summe beider Energien rot dargestellt. Die Säule für die potentielle Energie wird auf die Säule der kinetischen Energie gesetzt.

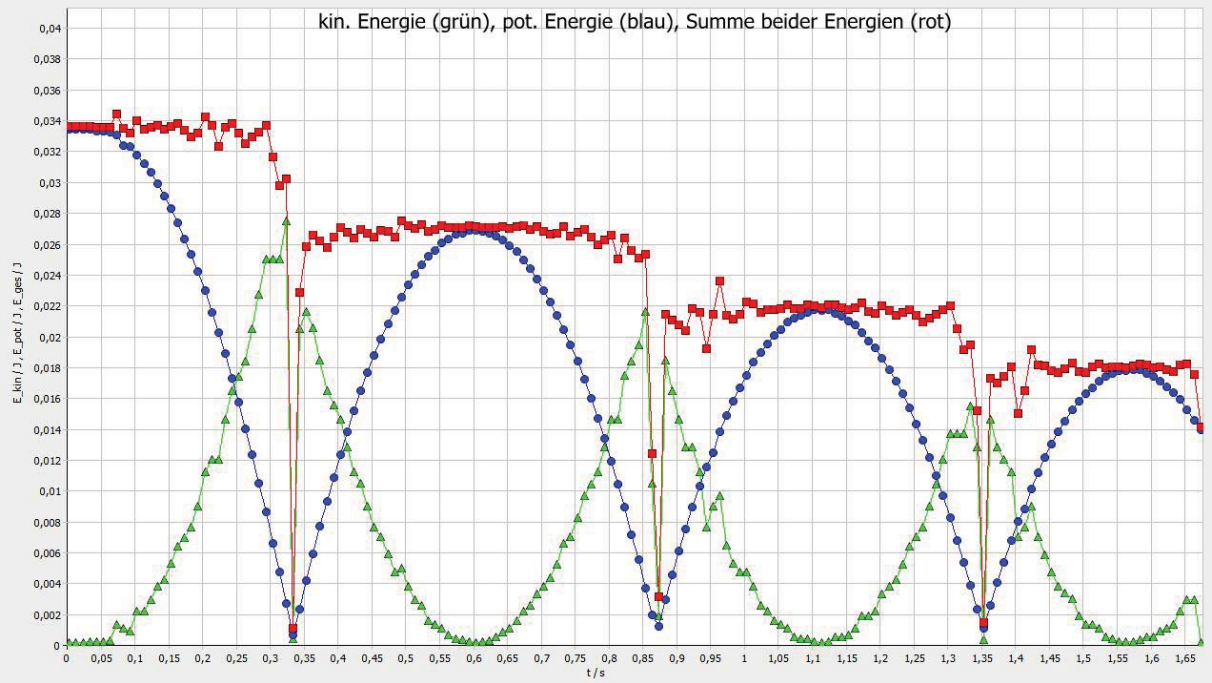


Abbildung 3.16.: Betrachtung der potentiellen, kinetischen und der Summe beider Energien über die Dauer des Experimentes mit drei Stößen auf der Glasplatte.

Der freie Fall: Im 2. Bild der Bildermatrix von Abbildung 3.14 ist gut zu erkennen, dass die Kugel kaum kinetische Energie besitzt, daher ist die Summe der Energien gleich der potentiellen Energie der Kugel. Fällt die Kugel herab, so nimmt ihre kinetische Energie in dem Maße zu, wie die potentielle Energie abnimmt, wobei die Summe beider Energien annähernd konstant bleibt (in Abbildung 3.16 gut erkennbar). Anhand der Abbildung 3.16 kann abgelesen werden, dass der größte Fehler durch die Geschwindigkeitsbestimmung entsteht, welche wiederum quadratisch in die kinetische Energie eingeht.
Kurz vor dem Stoß ist die potentielle Energie (fast) vollständig in kinetische Energie umgewandelt. Kurz nach dem Stoß hat die Kugel wieder fast ausschließlich kinetische Energie, welche bei der Aufwärtsbewegung in potentielle Energie umgewandelt wird. Die Kugel kehrt die Bewegungsrichtung wieder um, wenn die kinetische Energie vollständig in potentielle Energie verwandelt ist. Anschließend wird die potentielle Energie in kinetische Energie zurückverwandelt. Dabei ist die Summe beider Energien annähernd gleich, wobei durch die Stöße Energie irreversibel abgebaut wird.

Der Stoßprozess: Beim Stoß selbst hat die Kugel die Geschwindigkeit $v = 0\ \frac{m}{s}$ und befindet sich etwa auf der Höhe von $y = 0$. Das heißt, sowohl die kinetische als auch

die potentielle Energie ist 0, was wiederum bedeutet, dass die Summe beider Energien ebenfalls Null wird. In Abbildung 3.16 (Seite 60) kann man dies gut erkennen, da beim Auftreffen der Kugel alle Graphen einbrechen und (im Rahmen der Messgenauigkeit) den Wert Null annehmen. Da die Energie nicht „verschwinden“ und wieder „auftauchen“ kann, muss es eine andere Erklärung geben:
Die Kugel und die Glasplatte wirken im Moment des Aufpralles wie eine sehr starke Feder. Durch minimale, nicht sichtbare Verformungen von Kugel und Glasplatte wird diese Feder gespannt und die kinetische Energie der Kugel in Spannenergie der Feder umgewandelt. Durch die Deformation der Glasplatte wird die Kristallstruktur des Glases an einigen Stellen aufgebrochen. Dadurch wird ein (kleiner) Teil der Energie irreversibel verwandelt. Dieser „Energieverlust“ ist in „Quant-Ex-Metallkugel-300fps-Excell.xls“ berechnet worden. Der Mittelwert der Summe aus potentieller und kinetischer Energie (roter Balken) ist vor dem ersten Stoß $\bar{E} = 0{,}0332\ J$, zwischen dem ersten und dem zweiten Stoß $\bar{E} = 0{,}0264\ J$ (wobei die Standardfehler kleiner sind als die angegebenen drei signifikanten Stellen) und nimmt demnach um $\Delta E = 0{,}0068\ J$ ab. Es findet also eine irreversible Energieumwandlung statt, wobei $\Delta E = 0{,}0068\ J$ in Form von Wärme abgegeben bzw. durch das Aufbrechen der Kristalstrukturen der Glasplatte abgebaut wird. Letzteres ist sogar zu sehen, da die Metallkugel in der Glasplatte kleine „Sprünge“ hinterlässt. Entspannt sich dieses Glasplatte-Metallkugel-Feder wieder, wird die verbliebene Energie in kinetische Energie transformiert.
Die Energie zwischen zweiten und dritten Stoß beträgt $\bar{E} = 0{,}0214\ J$, sodass hier die Energiedifferenz $\Delta E = 0{,}0050\ J$ beträgt. Nach dem dritten Stoß hat die Kugel nur noch eine Energie von $\bar{E} = 0{,}0178\ J$, was zu einem Energieverlust von $\Delta E = 0{,}0036\ J$ führt.

3.5.3. Resüme

Bei diesem Versuch ist deutlich zu sehen, welchen Vorteil die Hochgeschwindigkeitskamera gegenüber „herkömlichen“ Kameras mit Bildraten von 30 fps hat: Bei 300 Bildern pro Sekunde ist der Moment, in dem die Kugel auf die Platte aufschlägt immer in einem Frame zu sehen, was bei 30 fps nur selten der Fall ist.
Des Weiteren kann die Realität wesentlich besser dargestellt werden! Bei jedem Auftreffen der Kugel (und nur dort) erfährt diese eine sehr große Beschleunigung. Bei 100 fps kommt dieser Peak sehr deutlich heraus (vgl. Abb. 3.17). Die Peaks haben eine Dauer von etwa $0{,}05\ s$. Die Peaks bei 30 fps bzw. bei 25 fps sind erheblich flacher (um etwa $\frac{2}{3}$ kleiner), dafür etwa drei mal so breit.
Auffällig ist, dass die Messwerte für die Bestimmung der Beschleunigung bei 100 fps mehr streuen als bei geringeren Bildfolgezahlen. Das liegt an der Größe der Intervalle, aus denen die Beschleunigung berechnet wird. Je größer die Intervalle sind, desto glatter wird die Fallbeschleunigung, wobei im Bereich der Peaks die Messung zu ungenau wird. Wird nur die Erdbeschleunigung betrachtet, reichen 25 fps bzw. 30 fps aus. Für die weiteren physikalischen Betrachtungen (kinetische / potentielle Energie, Position der Kugel, Geschwindigkeit, etc.) sind höhere Bildfolgezahlen empfehlenswert, um der Realität möglichst nahe zu kommen. Durch zu hohe Bildfrequenzen wird der Ortsunterschied des Objektes zwischen den einzelnen Frames jedoch zu gering, sodass die Messwerterfassung Probleme

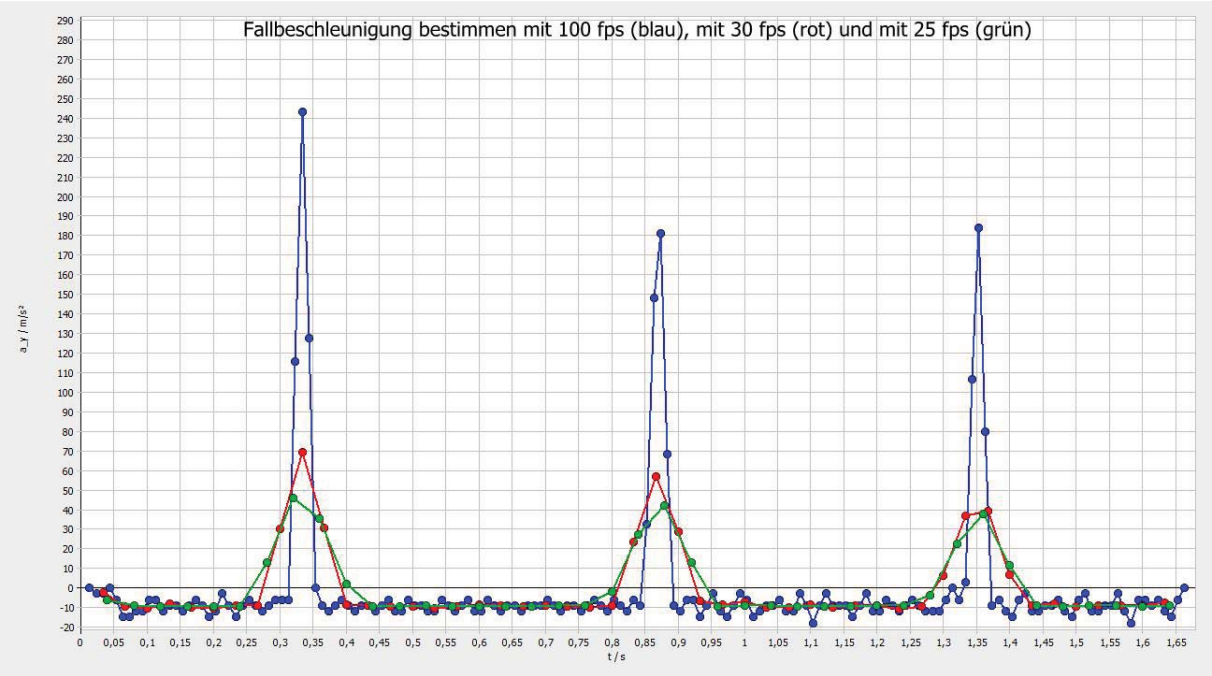


Abbildung 3.17.: Vergleich der Beschleunigungen bei 100 fps (blau), bei 30 fps (rot) und bei 25 fps (grün).

bereitet. Außerdem geht bei den hier betrachteteb Hochgeschwindigkeitskameras mit einer Erhöhung der Bildfolgezahl auch immer eine Verschlechterung der Bildqualität einher. Empfehlenswert für dieses Experiment sind 100 bis 300 fps, wobei für die Analyse 100 fps herangezogen werden sollten.

4. Qualitative Versuche mit der Hochgeschwindigkeitskamera

4.1. Das Verhalten verschiedener Lichtquellen bei $50\ Hz$ Wechselspannung in Zeitlupe

Ganz selbstverständlich schaltet man morgens das Licht ein und macht sich gar keine Gedanken darüber, was beim Einschalten genau passiert. Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera kann man den Einschaltvorgang deutlich verlangsamen und sehen, was sonst verborgen bleibt. Betrachtet wurden die drei Hauptlichtquellen der modernen Gesellschaft jeweils bei 50 Hz: Die Glühbirne, die Leuchtstoffröhre und die Leuchtdiode. Da bei der Leuchtstoffröhre und bei der Glühbirne die Stromflussrichtung keinen Einfluss auf die Leuchtkraft haben, ist ein „Flackern“ von 100 Hz zu erwarten.
Um die Details der Vorgänge besser auswerten zu können, werden die Videos mit 1200 Bildern pro Sekunde aufgenommen. Allen Schaltvorgängen liegt die Schaltskizze 4.1 zugrunde.

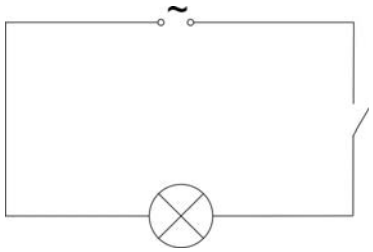


Abbildung 4.1.: Schaltskizze

4.1.1. Die Glühbirne

Im 19. Jahrhundert erfunden und bis heute weiterentwickelt steht sie nun kurz vor dem endgültigen Verbot innerhalb von Europa: die Glühbirne. Ihre Funktionsweise ist bemerkenswert einfach: Ein Leiter wird in einem Gas (in der Regel ein 93% Stickstoff-7%Argon-Gemisch[1] oder in einem Edelgas wie Xenon oder Krypton) von Strom durchflossen. Aufgrund der extremen „Reibung“ erhitzt sich der Leiter so stark, dass er zu glühen beginnt. Diese Art der Lichterzeugung hat einen sehr schlechten Wirkungsgrad, denn die elektrische Energie wird hauptsächlich in thermische Energie und nur ein geringer Anteil in Licht umgewandelt.

[1] vgl. [Rab67, Seite 45].

Betrachten wir nun die verschiedenen Situationen einer 6 V / 5 A Glühbirne bei 6 V Wechselspannung:

Die Schaltung ist relativ einfach, zwischen Glühbirne und Spannungsquelle ist ein Schalter eingebaut. Um eine Zeitangabe im Millisekundenbereich zu erhalten, läuft zusätzlich eine spezielle Uhr[2] im Bild mit, welche bereits vor der Durchführung des Experimentes gestartet worden ist und nur für die Bestimmung von Zeitdifferenzen benötigt wird.

Der Einschaltvorgang: Zwischen dem Schließen des Stromkreises (oberes Bild der Abb. 4.2 bzw. Video „Qual-Ex-Gluehbirne_einschalten.avi“) und dem ersten Erscheinen eines Leuchtens (mittleres Bild derselben Abbildung) beträgt der Zeitunterschied $\Delta t = 127\ ms$ (vgl. Anzeige auf den Bildern), also etwa $\frac{1}{100}\ s$. Zwischen dem zweiten und dem dritten Bild vergehen $\Delta t = 399\ ms$. Insgesamt beträgt der Zeitunterschied zwischen dem ersten und dem letzten Bild $\Delta t = 527\ ms$, also circa eine halbe Sekunde.

Dieser Effekt könnte also schon mit der Wechselspannung zusammenhängen, vermutlich ist dies aber die Zeit, die der Draht von Beginn des Stromflusses bis zur Glühemission benötigt. Es fällt auf, dass die Glühbirne scheinbar stufenförmig heller wird. Wie das Experiment gezeigt hat, beträgt die Zeit von der einen bis zur nächsten Stufe 0,01 s, was 100 Hz entspricht. In Abbildung 4.3 ist der komplette Einschaltvorgang zu sehen. Dargestellt ist hier jeder 9. Frame des Einschaltvorganges, insgesamt 65 Frames. Der in Abbildung 4.3 dargestelle Einschaltvorgang dauert also insgesamt 0,054 s. Das Einschaltverhalten einer Glühbirne bei Gleichspannung ist nicht ganz so interessant, da hierbei lediglich die Dauer des Einschaltvorgangs zu erkennen ist. Die Lichtintensität nimmt unterdessen kontinuierlich zu.

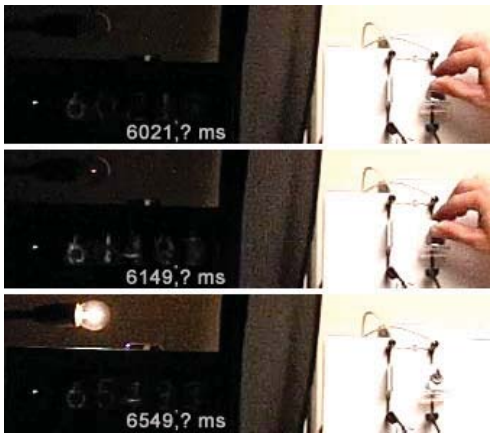


Abbildung 4.2.: Einschaltvorgang einer kalten 6 V / 5 A-Glühbirne (drei Frames zu verschiedenen Zeiten)

Der Betriebszustand: Interessant ist, dass im Betrieb mit Wechselstrom je nach verwendeter Glühbirnenart einmal ein leichtes Flackern zu sehen ist, beispielsweise bei einer 75 W 230 V ($\hat{=}$0,326 A) Glühbirne, und bei anderen Glühbirnen wie beispielsweise bei der 30 W 6 V ($\hat{=}$5 A) nicht. Der Vergleich einer 10er Lichterkette, (230 V

[2]Modell „Digitalzähler 575 50“ der Firma Leybold-Heraeus.

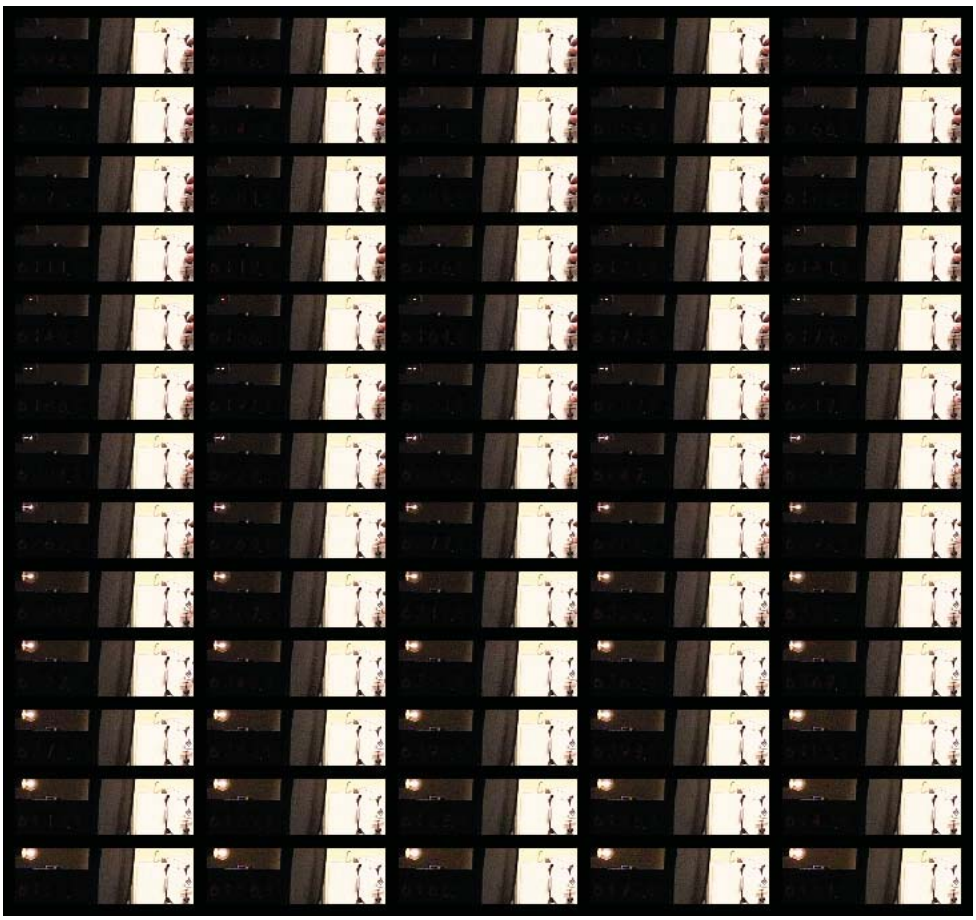


Abbildung 4.3.: Einschalten einer 6 V 5 A Glühbirne mit 1200 fps aufgenommen, wobei nur jeder 9. Frame dargestellt wurde. Es wurde jeder 9. Frame ausgewählt und ausgegeben.

12 $W \cong 0{,}052\ A$, wobei jedes Birnchen 1,2 W und 24 V hat) mit einem 230 V 2000 W ($\cong$ 8,7 A) Scheinwerfer zeigt deutlich, dass die Neigung zum Flackern mit steigender Stromstärke abnimmt (siehe hierzu „Qual-Ex-Gluehbirne-I-klein-1200fps.avi“ und „Qual-Ex-Gluehbirne-I-gross-1200fps.avi“). Vermutlich hängt das mit der wesentlich größeren Energie zusammen, welche bei Glühbirnen fast ausschließlich in Wärme umgewandelt wird.

Der Ausschaltvorgang: Auf Abbildung 4.4 sind auf vier Bildern von der Stromunterbrechung bis hin zum kaum noch wahrnehmbaren Glühen vier Momente des Ausschaltens festgehalten. Das oberste Bild ist der Moment des Stromunterbrechens bei $t_{aus} = 5254\ ms$. Auf dem zweiten Bild sind seit dem Ausschalten $\frac{1}{100}\ s = 0{,}01\ s$ und auf dem dritten Bild weitere 0,01 s, also seit Beginn $\frac{1}{50}\ s = 0{,}02\ s$ vergangen. Hier ist gut zu erkennen, weshalb sich eine Glühbirne als Leuchtmittel für Hochgschwindigkeitsaufnahmen eignet: Obwohl kein Strom fließt, nimmt die Helligkeit nach $\frac{1}{50}\ s$, also einer kompletten (!) Schwingung des Stroms, kaum ab. Bis das Glühen der Wendel kaum noch erkennbar ist, vergehen insgesamt 1,04 Sekunden.

Abbildung 4.4.: Der Ausschaltvorgang einer Glühbirne. Zwischen den ersten drei Bildern vergehen jeweils 10 ms. Auf dem letzten Bild ist das letzte wahrnehmbare Glühen zu sehen. Zwischen dem Betätigen des Schalters und dem letzten Wahrnehmbaren Glühen vergehen $\Delta t = 1020\ ms$.

4.1.2. Die Leuchtstoffröhre

Die handelsübliche Leuchtstoffröhre, welche häufig fälschlicherweise als „Neonröhre“ bezeichnet wird, verdrängt die Glühbirne an mehr und mehr Orten. Ihre Erscheinungsformen sind manigfaltig. Den Wenigsten ist bekannt, dass viele Energiesparlampen von ihrer Funktionsweise her nahezu identisch mit der von Leuchtstoffröhren in den Klassen- und Büroräumen sind. Ein Grund mehr sie an dieser Stelle genauer unter die (Zeit-)Lupe zu nehmen: Prinzipiell funktioniert eine Leuchtstoffröhre folgendermaßen (nach [Mes06, Seite 469] und [TM09, Seite 1221]): Die Kathode in der Leuchtstoffröhre erhitzt sich, wodurch Elektronen austreten. Durch die Zündspannung ionisiert sich das in der Röhre enthaltene Gas. Außerdem werden die Elektronen durch diese Zündspannung beschleunigt (in der Regel Niederdruck-Quecksilberdampf). Die durch Stöße angeregten Valenzelektronen fallen wieder zurück in den Ausgangszustand und senden dabei Photonen aus. Bei Niederdruck-Quecksilberdampflampen wird ultraviolettes Licht ausgesandt, welches durch eine Beschichtung am Rand der Röhre in sichtbares Licht umgewandelt wird. Durch entsprechende chemische Verbindungen wird das UV-Licht beispielsweise in warm- bzw. kalt-weißes oder Tageslicht umgewandelt. Da es sehr viele Einsatzzwecke gibt, wird hier nicht weiter auf die einzelnen Leuchtstoffe in der Beschichtung und ihre speziellen Effekte eingegangen.

Der Einschaltvorgang: Der Startvorgang einer Leuchtstoffröhre besteht aus drei Schritten, welche nach Bedarf mehrfach hintereindander durchgeführt werden (vgl. Video „Qual-Ex-Leuchtsoffroehre-einschalten.avi“):

1. Die ganze Spannung liegt am parallel zur Leuchtstoffröhre (welche ausgeschaltet nicht leitend ist) geschalteten Starter an und der fließende Strom führt zu einer Glimmentladung und Erwärmung des Starters.
2. Mittels der Erwärmung der Glimmlampe wird der Starter durch einen Bimetallstreifen geschlossen und ein starker Strom fließt durch die Heizwendel der Leuchtstoffröhre und eine in Reihe geschaltete Spule (Drossler). Durch die Heizwendel werden innerhalb der Leuchtstoffröhre Elektronen freigesetzt.
3. Durch das Abkühlen der Glimmlampe und damit des Bimetalls im Starter wird der Stromkreis wieder unterbrochen und durch den Drossler (Spule) eine hohe Spannung (zwischen 600-2000 V) induziert, welche das Zünden des Gases zur Folge hat.

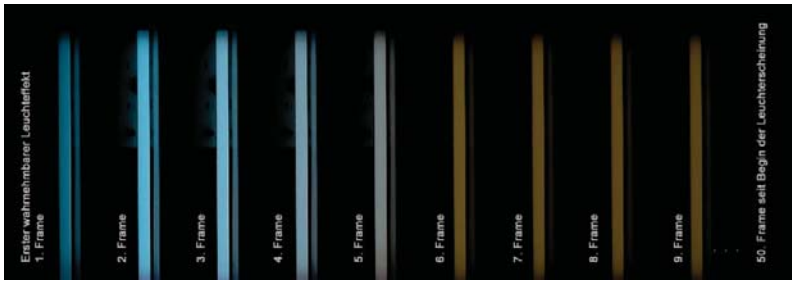


Abbildung 4.5.: Einschalten und Nachleuchten einer Leuchtstoffröhre nach dem ersten Zünden. Nach dem Beginn des Aufflackerns dauert es 50 Frames bis kein Leuchten mehr erkennbar ist, was einer Zeit von $\Delta t = \frac{5}{120}\ s \approx \frac{1}{20}\ s$ entspricht.

Der Betriebszustand: Wenn die Leuchtstoffröhre gestartet ist, liegt ein Wechselstrom an der Kathode bzw. Anode an. Da der anliegende Strom die Polung in Abständen von 50 Hz ändert, wird jede Seite der Röhre abwechselnd zur Anode bzw. Kathode. Beim Wechseln der Polung fließt zwischenzeitlich kein Strom, daher findet auch kurzzeitig keine Anregung von Valenzelektronen des Gases statt, denn das elektronengefüllte Gas reagiert sehr sensibel auf Spannungsänderung. Durch diese Unterbrechung der Photonenausstrahlung werden auch die Leuchtstoffe in der Beschichtung der Röhre nicht weiter auf den instabilen Zustand angeregt, sodass sie von ihrem metastabilen Zwischenzustand nach und nach unter Aussendung von sichtbarem Licht in ihren Grundzustand übergehen. Erkennbar ist dies an der Farbveränderung und Abschwächung des ausgesandten Lichtes (vgl. Abb 4.6 und „Qual-Ex-Leuchtstoffroehre-betrieb.avi“).

Der Ausschaltvorgang: Schaltet man eine Leuchtstoffröhre aus, so leuchtet sie noch einige Zeit nach. Dieser Nachleuchteffekt ist allerdings so schwach, dass er nur bei direkter Beobachtung der Leuchtstoffröhre erkennbar ist, ein „Ausblenden“ wie bei Glühbirnen ist nicht zu beobachten.

Abbildung 4.6.: Eine komplette 100 Hz Schwingung einer Leuchtstoffröhre im Wechselstromkreis. Gut erkennbar ist die Farbänderung vom kalt-weißen Licht (bei anliegender Spannung) zum gelblich-weißen Licht, wenn keine Spannung anliegt. Diese vierzehn Bilder stellen die Situation nacheinander dar, sodass ein Zeitintervall von $\Delta t = \frac{14}{1200}\ s \approx \frac{1}{100}\ s$ dargestellt wird.

4.1.3. Die lichtemittierenden Dioden - kurz LED

Zur Zeit sind sie auf dem Vormarsch: Die LED's. Ihr Prinzip ist so einfach wie genial: An einen Halbleiter wird eine Spannung angelegt. Je nach dem, wie hoch die Spannung und wie sie gepolt ist, wird die LED zu einem leitenden oder nicht leitenden Bauelement. Ist sie in Durchlassrichtung geschaltet, werden n-p-Paare durch die Spannung erzeugt. Beim Rekombinieren muss eine Potentialstufe überwunden werden. Die dabei frei werdende Energie wird in Form von Photonen ausgesandt. Je nach Material ist diese Energiestufe unterschiedlich groß und die ausgesandten Photonen haben eine entsprechend größere oder kleinere Frequenz. Das Licht hängt demnach vom verwendeten Material und der resultierenden Energeistufe ab (vgl. [Mes06, Seite 943] und [TM09, Seite 1452]). Im Bereich des sichtbaren Lichtes gibt es rote, grüne und gelbe LED's. Es sind auch weiße LED's erhältlich. Dabei gibt es unterschiedliche Methoden, dieses weiße Licht zu erzeugen ([Sch03]). Einerseits kann weißes Licht durch die *additive Überlagerung* der Farben rot, grün und blau erreicht werden, andererseits kann man auch (ähnlich wie bei der Leuchtstoffröhre) ultraviolettes Licht erzeugen, welches dann mittels einer luminiszenten Schicht in sichtbares Licht umgewandelt wird. Die meisten LED's, welche sichtbares Licht aussenden, benötigen eine Spannung von ca. 2 V und eine Stromstärke von 0,020 mA. Ihr Wirkungsgrad ist sehr hoch, da sie den elektrischen Strom direkt in Licht umwandeln und nur sehr wenig Wärme produzieren. Außerdem verschleißen sie unter normalen Umständen kaum, sodass sie eine lange Lebenserwartung haben. Sie sind allerdings noch verhältnismäßig teuer, ihre Lichtfarben schwer regelbar und sie sind nur eingeschränkt dimmbar. Ihre direkte Umwandlung von Strom in Licht führt, wie Experimente mit der Grätz-Gleichrichterschaltung zeigen, bei Wechselspannung zu einem 50 Hz, bei pulsierendem Gleichstrom in Durchlassrichtung zu einem 100 Hz Flackern (vgl. Video „Qual-Ex-Graetz-Schaltung_4_1200fps.avi“).

Der Vorteil der LED's ist, dass gleichfarbige LED's gleichartig und gleichzeitig reagieren. Bei Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera kann die in Kapitel 1.4 (Seite 9) erwähnte Zeitunschärfe innerhalb eines Bildes zur Verfälschung von Beobachtungen führen. Beispielsweise (wie in Abb. 4.7) fangen alle LED's eigentlich gleichzeitig an zu leuchten,

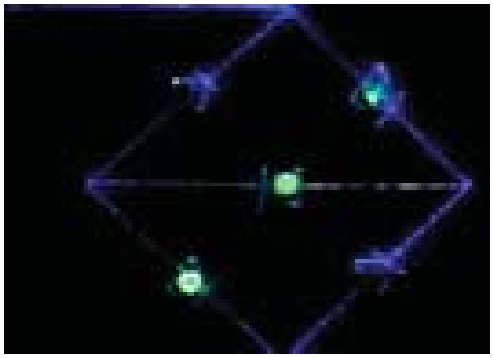


Abbildung 4.7.: Grätz-Gleichrichterschaltung mit LED's. Deutlich erkennbar ist im Video eine Zeitverschiebung, denn die LED's blinken in Wirklichkeit *gleichzeitig*.

da aber die Zeilen von oben nach unten ausgelesen werden, wirkt es auf Abb. 4.7, als ob die LED's unten eher leuchten als oben.

4.2. Der platzende Luftballon

Der Luftballon – er gehört zu jedem Kindergeburtstag dazu. Viele Jungen erfreut es einen Luftballon platzen zu lassen, um die Mädchen mit dem lauten Knall zu ärgern. Eventuell füllen sie die Luftballons vorher mit Wasser und bewerfen sich auch gegenseitig damit. In diesem Experiment soll der Frage nachgegangen werden, wie sich ein mit Rauch oder mit Wasser gefüllter Luftballon verhält. Der Luftballon wird vor einem schwarzen Hintergrund aufgehängt und seitlich angestrahlt. Damit sind die zum Teil schwachen Reflektionen im Rauch bzw. die Konturen und Formen der Wasseroberfläche deutlich besser zu erkennen.

4.2.1. Der wassergefüllte Luftballon

In der Abbildung 4.8 ist der Verlauf des platzenden Luftballons in 16 Einzelbildern festgehalten. In „Qual-Ex-Wasserballon_1200fps.avi“ ist der gesamte Vorgang als Video zu sehen. Die Bilder zeigen die einzelnen Situationen vom Einstechen mit einer Nadel (erstes und zweites Bild der ersten Zeile) bis hin zur Bildung erster größerer Tropfen am Rand (viertes Bild in der vierten Zeile). Die ersten 15 Bilder zeigen die Situation nach je einem Frame bei 1200 fps. Zwischen dem vorletzten und dem letzten Bild sind jedoch 30 Frames, also $\Delta t = \frac{1}{1200} \cdot 30s = \frac{1}{40}s$ vergangen.
Anhand dieser Bilderfolge ist gut zu erkennen, wie der gespannte Gummi des Luftballons um das Wasser herum sich plötzlich zusammenzieht und dabei an der Oberfläche des Wassers entlang streift. Letzteres hat einen feinen Wassernebel bzw. Gischt zur Folge, die sich wiederum aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers nach und nach zu größeren Tropfen zusammenfindet. Insgesamt fällt auf diesen Bildern auf, dass das Wasser, welches anfangs die Form des Luftballons hatte, diese Form sehr lange beibehält. Im Video „Qual-Ex-Wasserballon_600fps“ ist dies noch besser zu erkennen. Hier ist auch erkennbar, warum ein platzender wassergefüllter Luftballon eine große Wasserpfütze hinterläßt, obwohl zwei Auffanggefäße (eine pneumatische Wanne und ein flaches großes Becken) darunter stehen.

Abbildung 4.8.: Zeitlicher Verlauf eines platzenden Wasserballons (16 Frames).

Dieses Experiment ist gut dazu geeignet die Trägheit des Wassers zu veranschaulichen (das Wasser behält die Grundform des Luftballons bei). Zusätzlich kann man die Wirkung der Oberflächenspannung erkennen, die dazu führt, dass einerseits der Luftballon so platzt, wie er platzt, andererseits die Grundform des Ballons erhalten bleibt und sich aus dem feinen Wassernebel größere Tropfen bilden.
Zuerst wird die Gummihaut des Ballons betrachtet: An jedem Punkt der gespannten Oberfläche wirken Zugkräfte tangential zur Oberfläche in alle Richtungen. Die wirkendenden Kräfte gleichen sich aus und die Ballonoberfläche bleibt in Ruhe. Sticht man in die Haut der gespannten Ballonhülle, so entfallen um das Loch der Einstichstelle einseitig Zugkräfte. Der gespannte Gummi zieht sich zusammen und diese Störstelle breitet sich extrem schnell aus.
Die Gischt ist folgendermaßen erklärbar: Bevor der Luftballon zerplatzt, haftet das Wasser aufgrund der Adhäsion[3] an der Balloninnenfläche. Der Gummi des Luftballons zieht sich schlagartig zusammen. Daher werden Wassermoleküle von der Oberfläche mitgerissen, noch bevor sich eine stabile Oberfläche ausgebildet hat. Die vielen kleinen Wassermoleküle finden sich schnell wieder zusammen und bilden Tropfen. Außerdem bildet sich an der großen Wassertraube eine stabile Wasseroberfläche aus.
Dass sich links größere Wassertropfen bilden, erklärt sich bei der Betrachtung des oberen Endes des Ballons während des Vorganges. Durch das spezielle Zusammenziehen des

[3] Adhäsion ist eine molekulare Wechselwirkung zwischen zwei in Kontakt tretenden kondensierten Phasen. In diesem Fall zwischen Gummihaut (Festkörper) und Wasser (Flüssigkeit).

Gummis im Uhrzeigersinn (vgl. Abbildung 4.8) ist das linke obere Ende der Wassertraube noch mit einer Gummihaut bedeckt, während die rechte obere Seite schon unbedeckt ist. Da das Zusammenziehen entlang der Oberfläche verläuft, „peitscht“ das linke obere Ende des Gummis von links unten in die Wassertraube hinein und verursacht das Ausbilden größerer Wassertropfen auf der linken Seite der Traube.

4.2.2. Der rauchgefüllte Luftballon

Abbildung 4.9.: Luftballon mit Zigarettenrauch beim Platzen.

Wird ein mit Zigarettenrauch gefüllter Luftballon beim Platzen betrachtet, so ist ebenfalls zu sehen, dass sich die gespannte Gummihaut entlang ihrer Oberfläche zusammenzieht. Grund ist die tangential zur Oberfläche wirkende Spannkraft des Luftballongummis. Dies führt dazu, dass der Rauch auf vier Bildern ziemlich eindeutig die Konturen des Luftballons behält, bis er aufsteigt und diffundiert.

4.3. Wassertropfen auf Wasseroberfläche

Einfache Beobachtungen können für Wissenschaftler ein Rätsel von mehreren Jahren darstellen. Der Regentropfen, der in eine Pfütze fällt, ist hierfür ein Beispiel. Da hier die komplexen Zusammenhänge der Mechanik und der Spannung der Wasseroberfläche eng miteinander verwoben sind, ist dieses Experiment als Abschluss des Mechanikunterrichtes der 10. Klasse[4] geeignet. Der Versuch ist an den von Herrn Lochner (vgl. [Loc09]) durchgeführten angelehnt. Für den Versuch wird eine große Wanne, Stativmaterial und eine etwa zu einem drittel mit Wasser gefüllte Plastiktüte benötigt. Des Weiteren wird eine Stecknadel verwendet, um *ein kleines* Loch in die Plastiktüte zu stechen. Die Bilderserie

[4]Nach dem neuen G8-Lehrplan.

der Abbildung 4.10 auf Seite 73 bzw. das Videos „Qual-Ex-Wassertropfen-1200fps.avi“[5] legen folgende Erklärung nahe:

4.3.1. Der Fall des Regentropfens

Aufgrund der Massenanziehung und dem dritten Newton'schen Gesetz

$$\vec{F}_{1\to 2} = -\vec{F}_{2\to 1} = m \cdot \vec{a}$$

(*actio=reactio*, jede Kraft verursacht eine gleichgroße entgegengerichtete Kraft) wirken auf die Erde und den Wassertropfen die gleichen Kräfte $\vec{F}$. Abhängig von der jeweiligen Masse erfahren sie eine Beschleunigung $\vec{a} = \frac{1}{m} \cdot \vec{F}$. Da die Masse der Erde sehr viel größer ist als die eines Regentropfens, ist nachvollziehbar, dass die Beschleunigung, welche die Erde durch den Wassertropfen erfährt, vernachlässigbar klein ist.
Der Wassertropfen wird also gleichmäßig beschleunigt, bis er eine Grenzgeschwindigkeit $\vec{v}_{\text{Grenz}}$ erreicht. Diese wird durch die Gewichtskraft und der gegen die Fallrichtung wirkenden, abbremsenden Luftreibungskraft $\vec{F}_R$ verursacht. Die anziehende Gewichtskraft und die Reibungskraft sind dann betragsmäßig gleich groß und befinden sich im Gleichgewicht $\vec{F} + \vec{F}_R = 0$. Dem Wassertropfen mit der Masse m kann also der Impuls $\vec{p} = m\vec{v}_{\text{Grenz}}$ zugeordnet werden.
Eigentlich wird nur die Schreibweise

$$m \cdot \Delta\vec{v} = \int \vec{F}_{\text{Tropfen}} \,\mathrm{d}\,t = \overline{\vec{F}}_{\text{Tropfen}} \cdot \Delta t$$

dem vorliegenden realen Fall (Video „Qual-Ex-Wassertropfen-1200fps.avi“) gerecht, da die Kraft $\vec{F}_{\text{Tropfen}}$ während der betrachteten Zeit Δt nicht konstant ist. Mit $\overline{\vec{F}}_{\text{Tropfen}}$ wird die mittlere Kraft des Tropfens beschrieben.

4.3.2. Das Auftreffen auf die Wasseroberfläche

Trifft der Wassertropfen auf eine (ruhende) Wasseroberfläche, so findet über die Dauer des Aufpralls Δt eine Impulsübertragung $\Delta\vec{p} = m\Delta\vec{v} = \overline{\vec{F}}_{\text{Tropfen}} \cdot \Delta t$ statt. Für den Moment des Aufpralls kann aufgrund der Trägheit des Wassers die Oberfläche als „quasi-fest“ angenommen werden. Der Wassertropfen überträgt seinen Impuls und erfährt gleichzeitig eine Kraftwirkung $\vec{F}_{\text{Tropfen}} = -m \cdot \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$. Auf die Wasseroberfläche wirkt nun nach dem 3. Newtonschen Gesetz eine Kraft $\vec{F}_{\text{Wasseroberfläche}} = -\vec{F}_{\text{Tropfen}}$, welche dem Betrag nach gleich der mittleren Kraft des Tropfens ist. Die erste Kraftwirkung $\vec{F}_{\text{Tropfen}}$ führt zum Zerplatzen des Wassertropfens und in Folge der Oberflächenspannung zur Ausbildung einer Wasserkrone (vgl. Abb. 4.10 Bilder 1 und 2). Die Annahme einer festen Wasseroberfläche ist nur bedingt richtig, da die Oberflächenspannung des Wassers einen erheblichen Einfluss auf die Ausbildung der Wasserkrone hat. Im Video „Qual-Ex-Wassertropfen-petrischale_1_trockennass!.avi“ trifft ein Wassertropfen genau auf den Rand einer Wasserlache. In Abbildung 4.11 ist das unterschiedliche Reflexionsverhalten des Wassertropfens beim Auftreffen auf die teilbenetzte Petrischale dargestellt. Trifft ein Wassertropfen auf einen dünnen (und daher harten) Wasserfilm, so werden die Tropfen unter einem steileren Winkel reflektiert

[5] Insbesondere bei der Betrachtung Frame für Frame.

als beim Auftreffen auf eine „nur“ harte, glatte Oberfläche wie beispielsweise das Glas der Petri-Schale. Eine mögliche Ursache sind die wirkenden Adhäsionskräfte, die zu einer sofortigen Benetzung der Oberfläche führen. Wird nun eine größere Wasserdicke betrach-

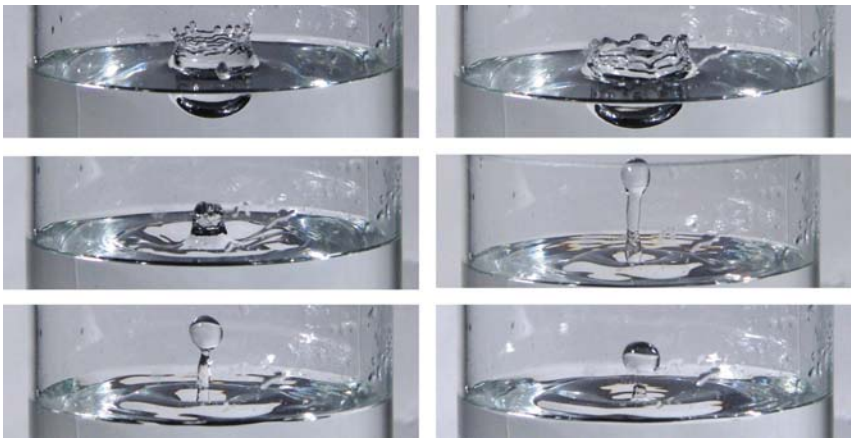


Abbildung 4.10.: Bilderserie: Ein Wassertropfen fällt in ein Wasserglas. Aufnahmegeschwindigkeit: 60 Bilder/s. Es wurden beim Jet Bilder ausgelassen.

tet, so ist gleichzeitig mit der Ausbildung der Wasserkrone auch die Entstehung einer kugelförmigen Eindellung der Wasseroberfläche zu erkennen (wie beispielsweise in Video „Qual-Ex-Wassertropfen-1200fps.avi“ bzw. in Abbildung 4.10 Bild 1 und 2 zu sehen). Die Ursache für diese „Luftkugel“ ist der Impuls des Wassertropfens, der eine senkrecht zur Wasseroberfläche nach unten wirkende Kraft auf die Wasseroberfläche zur Folge hat. Die Oberflächenspannung führt zu einer radial von der Aufschlagstelle wegweisenden Kraft, die wiederum die Entstehung der „Luftkugel“ erklärt. Gleichzeitig wirkt die Oberflächenspannung auch an der Wasserkrone und führt dazu, dass sich die Kugel fast vollständig schließt (vgl. Abbildung 4.10 Bild 1).

Abbildung 4.11.: Ein Wassertropfen trifft halb auf die trockene Petrischale, halb auf eine Wasserlache (vgl. „Qual-Ex-Wassertropfen-petrischale_1_trocken-nass!.avi“).

4.3.3. Die Entstehung der Kreiswellen

Die Spannung der Wasseroberfläche übt eine rücktreibende Kraft auf die ausgelenkten Wassermoleküle aus. Das Ergebnis ist, dass die Krone nach unten, die „Luftbeule“ nach oben gezogen wird. Insgesamt ziehen diese entgegengerichteten Kräfte die Ausbildung von Kreiswellen entlang der Oberfläche nach sich. Die Luftblase kollabiert in sich und das einströmende Wasser kollidiert (vgl. Abbildung 4.10, Bild 3 und 4). Die parallel zur ursprünglichen Wasseroberfläche wirkenden Kräfte der Wasserteilchen heben sich bei der Kollision auf. Übrig bleiben die nach oben gerichteten Anteile der Kräfte, welche zu der Entstehung des Wasserjets führen. An dessen Spitze bildet sich eine Kugel (vgl. Abbildung 4.10 Bilder 4 und 5). Der Jet verengt sich unterhalb dieser Kugel, was auf dem 5. und 6. Bild derselben Abbildung gut zu sehen ist. Wenn die kinetische Energie des ursprünglichen Wassertropfens ausreichend groß war, trennen sich ein oder mehrere Tropfen vom Jet ab, da dieser von der Spannung der Oberfläche zu schnell zurückgezogen wird und die Masse der Wasserkugel zu träge ist, um dieser Bewegung zu folgen[6] (siehe Abbildung 4.10 Bild 6 und 7). In seltenen Fällen kommt es vor, dass ein Wassertropfen auf der Wasseroberfläche „tanzt“ und erst nach einer gewissen (wenn auch extrem kurzen) Zeit von der Wasseroberfläche wieder „verschluckt“ wird[7] (siehe Video „Quant-Ex-2Wassertropfen-Wasser.avi“). Das Zurückziehen der Wassersäule und der entstehende Wassertropfen verstärken die Ausbildung der Kreiswelle.

4.4. Vermischen zweier Flüssigkeiten

4.4.1. Theoretische Grundlagen

Werden zwei Flüssigkeiten miteinander vermischt, wie beispielsweise Milch und Kaffee, so folgt dies komplexen pysikalischen Gesetzmäßigkeiten, die in diesem Kapitel näher betrachtet werden. Verwirbelungen und schließlich das Vermischen wird im Wesentlichen durch die Strömung verursacht. Diese wird zwar seit 150 Jahren intensiver erforscht, ist aber noch nicht endgültig berechenbar. Ein wesentliches Problem ist, dass trotz nahezu gleicher Anfangsbedingungen die Ergebnisse bei wiederholter Versuchsdurchführung variieren. Diese Empfindlichkeit gegenüber nur leichten Veränderungen der Anfangsbedingungen ist ein Kennzeichen für ein deterministisches Chaos (vgl. [DD04, Seite 14]).
Es liegt genau genommen ein turbulentes System vor, denn ein chaotisches System im physikalischen Sinn hat nur eine beschränkte Anzahl von Freiheitsgraden und es ist ausschließlich bezüglich der Zeitskala „chaotisch“ (nach [MS00, Seite 25 – 26]). Turbulente Systeme hingegen haben, wie sie in der Strömungslehre und in der Natur fast ausschließlich auftreten, eine sehr viel höhere Anzahl[8] an Freiheitsgraden und sind auch über den Raum chaotisch [MS00, Seite 25]. Bisherige Erfolge bei der Berechnung und Beschreibung von chaotischen Systemen helfen bei turbulenften Strömungen kaum weiter. Navier und

[6] Phänomenologisch ähnlich ist der Effekt der Tropfenbildung bei einem Wasserhahn, jedoch spielt dabei die Beschleunigung des Wassers durch die Gravitation und die daraus resultierende Verjüngung des Strahls die entscheidende Rolle. Aber hier erfahren die Wasserteilchen außer der Oberflächenspannung die gleiche Gewichtskraft, die zur Beschleunigung nach unten beiträgt.

[7] Weshalb es zu diesem Phänomen kommt, ist nicht sicher geklärt.

[8] Es gibt Hinweise, dass es unendlichdimensionale Systeme mit einer unendlichen Anzahl an Freiheitsgraden sind.

Stokes fanden eine Formel für die Berechnung von Strömungen. Die Richtigkeit dieser Formel ist bisher noch nicht bewiesen, da bisher nur Näherungswerte für kleine Reynoldszahlen bestimmt werden konnten.
Die *Reynoldszahl* stellt das Verhältnis von Trägheits- und Zähigkeitskraft dar und bestimmt das Strömungsverhalten maßgeblich. Sie wird mit

$$\mathrm{Re} = \frac{\varrho \cdot v \cdot d}{\eta} = \frac{v \cdot d}{\nu}, \qquad \text{mit } \nu = \eta \cdot \varrho$$

beschrieben. Sind bei unterschiedlichen Flüssigkeiten die Reynoldszahlen gleich, so haben sie auch das gleiche Strömungsverhalten. Die sogenannte *kritische Reynoldszahl* gibt den Übergang von laminarer zur turbulenten Strömung an.

Der Vollständigkeit halber sei hier die *Navier-Stokes-Gleichung* für den vektoriellen Fall notiert[9]:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \underbrace{(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u}}_{\hat{=} \sum_{i,j}^{3} u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} = -\frac{1}{\varrho} \operatorname{grad} p + \nu \Delta \vec{u} + \vec{f}. \tag{4.1}$$

Bezogen auf den Ort $\vec{x}$ und die Zeit t entspricht $\vec{u}$ der Geschwindigkeit, p dem Druck, ϱ der Dichte und ν beschreibt die Viskosität der Flüssigkeit. Die Summe aller äußeren Kräfte ist durch $\vec{f}$ gegeben. Reynolds hat mit einem kleinen, aber entscheidenden Schritt dazu beigetragen, etwas Licht in das Dunkel der Gleichung zu bringen. Er teilte sowohl die Geschwindigkeit als auch den Druck in einen Anteil der Mittelwerte $(\overline{\vec{u}},\ \bar{p})$ und einen Anteil der Fluktuation $(\vec{u}',\ p')$ ein. Es wird $\vec{u} = \overline{\vec{u}} + \vec{u}'$ und $p = \bar{p} + p'$ angesetzt. In Verbindung mit Gleichung (4.1) ergibt sich die Gleichung für die Fluktuationen u_i'. Es treten hierbei Terme mit höherer Ordnung der Ableitung von u' auf. Dies führt auf eines der Kernprobleme der Strömungslehre, das *Schließungsproblem*. Es stellt sich heraus, dass die Ableitung der Fluktuation von Ordnung k nur erhalten werden kann, wenn die Ableitung der Ordnung $k+1$ bekannt ist (vgl. [Lüc01, Seite 19 – 20]). Somit gibt es keinen Endpunkt bei der Berechnung von u'.
Die Gleichung (4.1) lässt sich bisher nur numerisch und unter rigiden Annahmen lösen, da (4.1) eine partielle nichtlineare Differentialgleichung ist. Die Lösungen gelten für symmetrische Probleme unter eng abgegrenzten Rahmenbedingungen und sind somit höchst unphysikalisch und realitätsfern (vgl. [DD04, Seite 25]).

4.4.2. Das Experiment

Nachdem die nötigen theoretischen Grundlagen gelegt sind, werden diese an Experimenten angewendet. Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera kann beispielsweise der Mischvorgang zweier Flüssigkeiten aufgenommen und drei grundlegende Schritte qualitativ gedeutet werden. Diese drei Schritte sind:

1. Das Auftreffen einer Flüssigkeit auf eine zweite ruhende Flüssigkeit.

2. Die Bewegung einer Flüssigkeit in einer ruhenden Flüssigkeit (*freejet*).

[9] Der nachfolgende Absatz orientiert sich stark an [Lüc01, Seite 17 – 20].

3. Das Verhalten der bewegten Flüssigkeit beim Auftreffen auf ein großflächiges Hindernis, wie dem Gefäßboden (*Stauströmungen*).

Anhand des Videos „Qual-Ex-Fluessigkeit-vermischen.avi“ ist ersichtlich, dass die Betrachtung der drei Schritte in einem einzelnen Experiment nicht sinnvoll ist. Für die Beobachtung und Beschreibung der einzelnen Erscheinungen wurden eigens Experimente durchgeführt und aufgenommen („Qual-Ex-Eintropfen.avi“, „Qual-Ex-freejet.avi“ und „Qual-Ex-Stauwirbel.avi“), welche sich jeweils nur auf einen einzelnen Schritt beschränken. In allen Versuchen wurde Wasser als Fluid verwendet. Die Rotfärbung entstand durch eine nahezu gesättigte Kalium-Permanganat-Lösung. Der Wasserstrom wurde durch das Entleeren einer in Chemielaboren üblichen Pipette erzeugt. Diese Pipette ist mittels eines Statives befestigt, damit die Düse ortsfest bleibt und die Ergebnisse durch die Düsenbewegung nicht verfälscht werden.

4.4.2.1. Das Eintropfen

Zu Beginn wird das Auftreffen einer bewegten laminaren Strömung auf eine ruhende Flüssigkeit betrachtet. Um das Verhalten der beiden Flüssigkeiten besser erkennen zu können, wurde das Wasser des Jets mit Kaliumpermanganat rot eingefärbt. Der Jet selbst wird, wie gesagt, durch das Entleeren einer Pipette erzeugt. Der anfangs durchgehende Wasserstrahl aus der Pipette reißt mit der Zeit ab. Der Strahl dünnt aus, bis die Oberflächenspannung des Strahls abreißt und sich Tropfen bilden. Diese einzelnen Tropfen treffen dann auf die Wasseroberfläche. Der erste Wassertropfen trifft auf die Wasseroberfläche auf und bildet eine Luftblase aus (vgl. Video „Qual-Ex-Eintropfen.avi“ bzw. Abbildung 4.12 3. Bild).

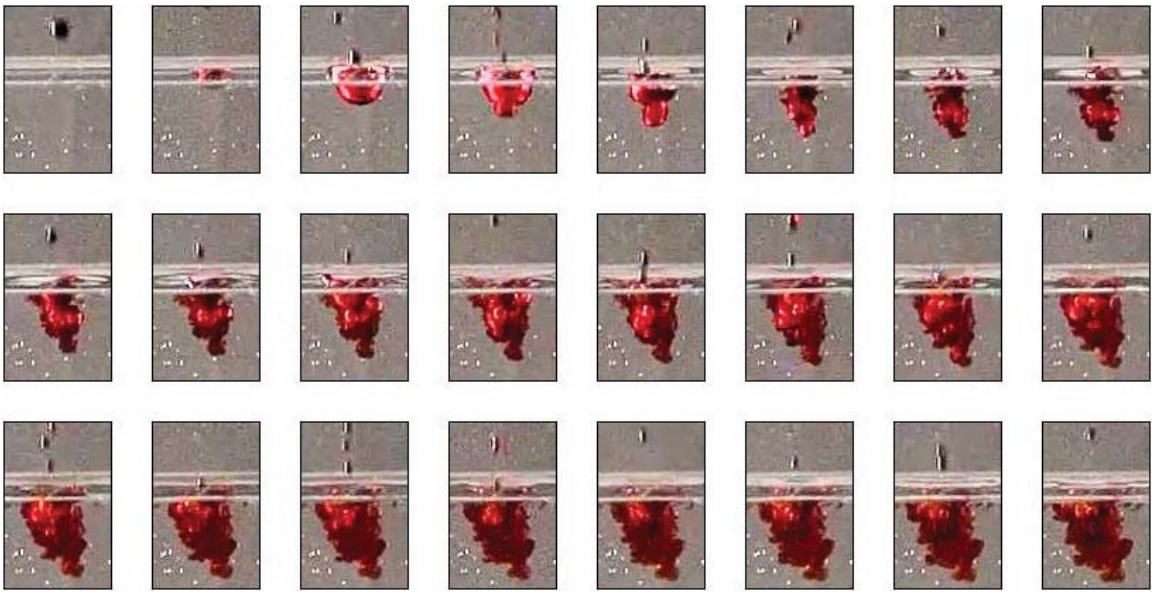


Abbildung 4.12.: Bilderserie: Eintropfen der eingefärbten Flüssigkeit in stehendes Wasser. Auswahl jedes fünften Frames des Videos „Qual-Ex-Eintropfen.avi“.

Das Verhalten eines Wassertropfens beim Auftreffen wird explizit in Kapitel 4.3 auf Seite 71 beschrieben. Dank der roten Farbe ist gut erkennbar, dass die Oberflächenspannung

des Wassers den Tropfen sofort absorbiert. Die Trägheit des Wassers führt dazu, dass sich der Farbstoff nur in einem eng begrenzten Bereich der Wasseroberfläche befindet (vgl. Abb 4.12 Bilder 2 bis 5). Wenn der zweite Wassertropfen auf die (tiefer liegende) Wasseroberfläche in der Blase auftrifft, bildet auch dieser eine Luftblase innerhalb der größeren ersten Luftblase aus (Bild 4 und 5). Schließlich kollabieren beide Luftblasen fast vollständig (Bild 5 bis 8). Da immer wieder Wassertropfen auftreffen, bleibt eine kleine Luftblase an der Wasseroberfläche fast das ganze Experiment hindurch erhalten.
Nach dem Implodieren der Luftblasen beginnt das Vermischen der gefärbten Flüssigkeit mit der ungefärbten. Ursachen für die Vermischung sind einerseits Diffusion durch die Brown'sche Molekularbewegung, andererseits Grenzschichtphänomene zwischen ruhender und bewegter Flüssigkeit. Die Grenzschichtphänomene sind Wirbel, die durch die Instabilität des Jets im Wasser verursacht werden. Die starke Instabilität ihrerseits wird durch die großen Geschwindigkeitsunterschiede und dem geometrischen Verlauf der Strömung, die durch das Kollabieren der Luftblase noch verstärkt werden, hervorgerufen. Da in kurzen Abständen weitere Tropfen genau auf die gleiche Stelle fallen, sind die Effekte unter der Wasseroberfläche vergleichbar mit denen eines durchgehenden Strahles.

4.4.2.2. Der „freejet"

Ein *freejet* ist eine Strömung innerhalb einer ruhenden Flüssigkeit. Diese Strömung kann sich ohne zusätzliches Hindernis ausbreiten. Es treten an der Grenzschicht Verwirbelungen auf. Genau diese Verwirbelungen und ihre Entstehung werden im Folgenden betrachtet. Die Düse wird dazu im Gefäß mit dem ruhenden Wasser montiert.

Abbildung 4.13.: Die drei Bereiche des freejets eines Fluides.

Im Video „Qual-Ex-freejet.avi" und in Abbildung 4.13 ist erkennbar, dass das einströmende Fluid aus der Düse erst laminar verläuft. Das ist ein Kennzeichen für eine kleine Reynoldszahl. Im ersten Bereich des Jets wird die Turbulenz fast ausschließlich durch die Beschaffenheit der Düse beeinflusst. Innerhalb der Düse gilt: Entlang der Oberfläche eines umströmten Materials bildet sich eine Grenzschicht aus. In dieser Grenzschicht wird das

Fluid von 99% der Strömungsgeschwindigkeit auf $0\frac{m}{s}$ ($\hat{=}$ Geschwindigkeit der Oberfläche) abgebremst (vgl. [SS07, Seite 243]). Abhängig von der Geschwindigkeit des Fluids können sich am Düsenende schon Wirbel ablösen. Da dies im durchgeführten Experiment nicht beobachtbar ist, wird in dieser Ausarbeitung nicht genauer darauf eingegangen.
Im mittleren Bereich bricht die laminare Strömung auf und es entstehen durch die *Kelvin-Helmholtz-Instabilität* am äußeren Rand des Streams sich aufrollende Wirbel. Bedingt durch die Wirbel wird die umgebende Flüssigkeit mehr und mehr mitgezogen und vermischt sich mit dem Jet. Im letzten Teil werden die strukturierten Wirbel völlig aufgebrochen und der Jet wird vollständig turbulent. Die Wirbel im turbulenten Teil können verschieden groß werden. Die größten Wirbel in dem letzten Bereich sind allerdings nicht größer als die aus dem strukturierten Teil. Die Wirbel werden (egal ob räumlich oder zeitlich betrachtet) dabei immer kleiner, ein Effekt, der nach Richardson *Kaskadeneffekt* genannt wird. Die Energie des Jets steckt in diesen kleiner werdenden Strukturen (Wirbeln). Die Wirbel zerfallen immer mehr, bis sie die *Kolmogorov-Längen* erreichen. Die Kolmogorov-Länge ist die kleinste mögliche Länge in einer Kaskade. Bei Unterschreitung dieser Länge wird die kinetische Energie E vollständig in Wärme umgewandelt.

4.4.2.3. Der Stauwirbel

In diesem Experiment wird die Düse wesentlich näher am Gefäßboden montiert. Trifft ein Strahl auf ein großes flaches Hindernis, entstehen sogenannte Stauwirbel. Ihre Form erinnert an einen Pilz, wobei der Hut aus großen ringförmig sich aufrollenden Wirbeln besteht (vgl. Abb. 4.14).

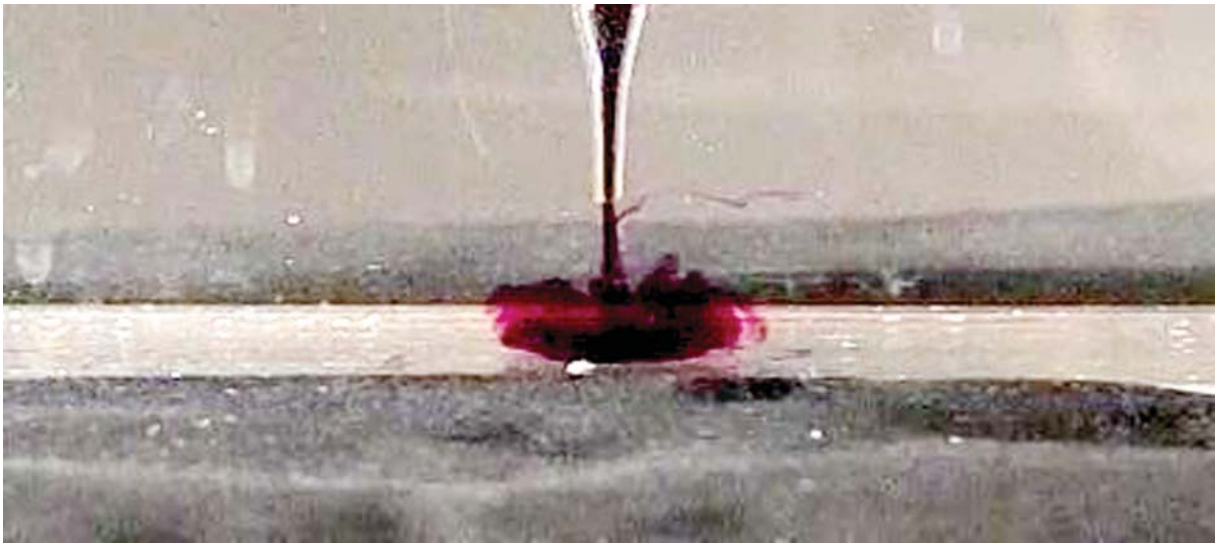


Abbildung 4.14.: Typische Wirbelform eines Stauwirbels im Wasser.

Die Wirbel selbst entstehen aus Instabilitäten der Anfangsbedingungen und aus der Geometrie des Strahls. Kleinste thermische Bewegungen (Instabilitäten / Fluktuationen) oder den Strahlverlauf beeinflussende äußere Einwirkungen werden exponentiell verstärkt. Im vorliegenden Video „Qual-Ex-Stauwirbel.avi“ erklärt sich die starke Verwirbelung durch das Zusammenspiel zweier Effekte:

1. Durch das Aufeinandertreffen eines bewegten Streams auf das ruhende Wasser bilden sich, wie in Kapitel 4.4.2.2 beschrieben, zuerst geordnete Strukturen mit (in sich) laminaren Strömungen. Im weiteren Verlauf wird der Strahl vollständig turbulent.

2. Zusätzlich trifft der Strahl auf ein hartes, unbewegliches Hindernis, den Boden. Dadurch wird der Strahl geknickt. Es findet dabei ein Kraftstoß vom Wasserstrahl auf das Hindernis statt, welche einen Kraftstoß vom Hindernis auf den Wassertrstrahl in entgegengesetzter Richtung zur Folge hat.

Da an der Grenzschicht zwischen bewegter und unbewegter Flüssigkeit immer Wassermoleküle mitgezogen werden, verdünnt sich die Kaliumpermanganat-Lösung mehr und mehr. Versiegt der Jet, endet auch die Zuführung von kinetischer Energie in das System. Der Kaskadeneffekt, welcher Bewegungsenergie in thermische Energie überführt, führt letztendlich dazu, dass sich beide Flüssigkeiten wesentlich langsamer vermischen. Wird das Gefäß zu einem viel späteren Zeitpunkt betrachtet, so ist zu sehen, dass sich beide Flüssigkeiten durch die Brown'sche Molekularbewegung vollständig vermischt haben.

4.4.3. Bedeutung für die Schule

Bisher ist die Strömungslehre ein unterrepräsentiertes Thema in der Schulphysik. Gründe hierfür mögen sein, dass sie schwer verständlich, mit komplizierten Formeln behaftet und nicht vollständig erforscht ist. Die Navier-Stokes-Gleichung (Formel (4.1)) beispielsweise ist bislang nicht bewiesen. Wie in vielen Bereichen der Strömungslehre stützen die experimentellen Ergebnisse die bisherigen Annahmen.
Schülerinnen und Schüler werden häufig mit Strömungen und Turbulenzen konfrontiert. Sie treten im Alltag auf, beispielsweise beim Mischen des morgendlichen Tees mit Milch, bei der Bildung und Formung der Wolken, bei den Satellitenbildern der Wettervorhersage oder auch bei der Entstehung kleiner Windhosen im Hinterhof. Auch in vielen Industriebereichen spielt die Strömungslehre eine sehr wichtige Rolle. Die Automobil-, Luft- und Schifffahrtsindustrie sind nahe liegende Beispiele. Städtebauplaner und Architekten werden auch mit Luftströmungen konfrontiert (vgl. [MS00, Seite 20 – 22]). Schließlich kann man den Schülern vor Augen führen, dass es neben der Atom- und Molekülphysik noch weitere offene Themengebiete gibt.
Viele Ergebnisse in der Turbulenzforschung beruhen im Wesentlichen noch auf Erfahrungen. Daher gilt sie in Deutschland nicht als Wissenschaft, sondern fällt in den Bereich der Ingenieure. Gerade in diesen Bereichen steckt viel Forschungsbedarf für die Zukunft. Beispielsweise bei der Reduzierung von Schadstoffen durch Verringerung des Luftwiderstandes und bessere Vermischung und Verbrennung von Antriebsmitteln bei Kraftfahrzeugen (vgl. [DD04],[MS00] und [SS07]), kann dem aktuell großem Interesse am Umweltschutz gut Rechnung getragen werden.
Die Strömungslehre kann im bayerischen Lehrplan im Profilbereich der 10. Klasse im Bereich „Nichtlineare Dynamik und Strukturbildung“ angesprochen oder im Rahmen eines *wissenschaftspropädeutischen Seminars*[10] ausführlich behandelt werden. Das weite Feld der Strömungslehre bietet für das W-Seminar viele Ansatzmöglichkeiten für Seminararbeiten an.

[10] Bekannt ist es unter der Kurzbezeichnung *W-Seminar*.

Zusammenfassung und Fazit

Nach einer Einführung in die verwendeten Arbeitsmethoden sowie die technischen Hintergründe und Eigenschaften von Hochgeschwindigkeitskameras widmen sich die Kapitel 3 und 4 einer kleinen Auswahl möglicher Experimente und ihrer physikalischen Grundlagen. Die hier aufgeführten Experimente können in den verschiedensten Momenten der Unterrichtseinheiten eingesetzt werden. So können sie als interessanter und motivierender Einstieg in ein Thema dienen. Denkbar wäre es hier den Versuch 4.1.1 auf Seite 63, der sich mit dem Verhalten einer Gühbirne bei 50 Hz Wechselspannung beschäftigt, als Einstieg in die Behandlung des Wechselstromkreises einzusetzen.
Ebenso ist es denkbar die Hochgeschwindigkeitskamera in einem Experiment, welches im Mittelpunkt einer Unterrichtseinheit steht, zu nutzen. Hierfür eignet sich beispielsweise eine Metallkugel, welche auf eine Glasplatte fällt (vgl. Experiment 3.5, Seite 54). Je nach Klassenstufe können die Energien oder die kinetischen Größen betrachtet werden. Die Hochgeschwindigkeitskameras können aber auch im W- oder P-Seminar eingesetzt werden. Vorstellbar ist im Rahmen eines Wissenschaftsseminars zum Thema Weltraumflug ein Experiment mit der Wasserrakete aufzuzeichnen, um die Kraft $\vec{F} = m\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}$ auf die allgemeinere Gleichung $\vec{F} = \frac{\mathrm{d}\vec{p}}{\mathrm{d}t}$ zu erweitern und somit auf eine zeitlich veränderbare Masse zu kommen.
Da mit der Hochgeschwindigkeitskamera auf einem Video auch mehrere (beispielsweis schnellere und langsamere) Bewegungen analysiert werden können, kann sie auch als Abschluss einer (komplexeren) Unterrichtseinheit dienen. Als Beispiel sei hier auf das Experiment in Kapitel 3.4 auf Seite 47 mit dem Maxwell-Rad verwiesen, welches die nahezu ideale Energieumwandlung von potentieller Energie in Bewegungsenergie (ebenso die Umkehrung) veranschaulicht und ohne Hochgeschwindigkeitsvideoanalyse nicht in der Ausführlichkeit behandelt werden könnte.

Fazit

Fast alle Jugendlichen haben bereits Erfahrungen mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gemacht, da sie oft in Kinofilmen oder in der Werbung eingesetzt werden. Auch einige (pseudo-)wissenschaftliche Sendungen werben mit Zeitlupenaufnahmen regelrecht um Einschaltquoten. Das Medium „Hochgeschwindigkeitskamera“ kann auf die Schülerinnen und Schüler einen großen Reiz ausüben, da sie nicht nur bereits mit Slow-Motion-Aufnahmen in Kontakt gekommen sind, sondern jetzt auch im Unterricht mit diesem Medium kontakt haben könnten. Der Physik-Lehrkraft steht nun ein Mittel zur Verfügung, die bisher unbeeinflussbare Zeit (wenn auch eingeschränkt) zu verlangsamen. Unter anderem stehen dem Physikunterricht neue qualitative Experimente zur Verfügung (beispielsweise Kapitel 4.3 oder 4.2). Außerdem werden erheblich mehr Daten für eine Videoanalyse bereitgestellt, wodurch einige Experimente, wie das Maxwellrad (Kapitel 3.4) erst auswertbar werden.

Aufgrund des niedrigen Preises[11] ist es leicht denkbar, dass Schüler selbst Versuche mit Hochgeschwindigkeitskameras durchführen.
Besteht die Möglichkeit bei der Videoanalyse von Bewegungen auch Vektorpfeile einzublenden, sind auch qualitative Betrachtungen von Bewegungsabläufen möglich und sinnvoll. Dies ermöglicht eine zweidimensionale Behandlung auch von schnelleren Objekten. Insgesamt hat die Lehrkraft die Möglichkeit, den Schülerinnen und Schülern das komplexe Zusammenspiel der Physik im Alltag aufzuzeigen. Eventuell bleibt dadurch die Faszination von Schülerinnen und Schülern für das Fach Physik erhalten.

[11] z.T. gibt es Hochgeschwindigkeitskameras für unter hundert Euro im Internet!

Literaturverzeichnis

[BEO09] Böhmer, Erwin, Dietmar Ehrhardt und Wolfgang Oberschelp: *Elemente der angewandten Elektronik: Kompendium für Ausbildung und Beruf.* Vieweg+Teubner, 16. aktualisierte Auflage, 2009.

[CCC09] Casio Computer Co., LTD: *EX F1 Controller*, 2009.

[DD04] Davidson, Peter und P. A. Davidson: *Turbulence: An Introduction for Scientists and Engineers.* Oxford University Press, Mai 2004.

[Dem05] Demtröder, Wolfgang: *Experimentalphysik 1. Mechanik und Wärme: Mechanik Und Warme.* Springer-Verlag GmbH, 4. neubearbeitete und aktualisierte Auflage, September 2005.

[HP-] *Casio EXILIM Highspeed Eingangsseite.* `http://www.casio-europe.com/de/exilim/exilimhighspeed/`; letzter Aufruf: 11. November 2010.

[HTW+08] Hopf, M., V. Tobias, C. Waltner, T. Wilhelm und H. Wiesner: *Einführung in die Mechanik.* Gedrukt in Eigenregie, München, Würzburg, 2008. `www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialie/inhalt_materialien/mechanikkonzept/mechanikbuch.zip` bzw. `www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/veroeffentlichung/Lehrbuch.pdf`.

[KW11] Kandsperger, R. und T. Wilhelm: *Elektromotore im Physikunterricht.* Praxis Schriftenreihe Physik, 2011.

[Lüc01] Lück, Stephan: *Turbulente Nachlaufströmungen. Skalenaufgelöste Experimente und statistische Analysen.* Der Andere Verlag, 1. Auflage, 2001.

[Loc09] Lochner, Tobias: *Wassertropfenbildung.* Naturwissenschaften im Unterricht Physik, 113(20), Mai 2009.

[Mes06] Meschede, Dieter: *Gerthsen Physik.* Springer, Berlin, 23. überarbeitete Auflage, März 2006.

[Mül09] Müller, Rainer: *Klassische Mechanik: Vom Weitsprung zum Marsflug.* Gruyter, 1. Auflage, Juli 2009.

[MS00] Mathieu, Jean und Julian Scott: *An Introduction to Turbulent Flow.* Cambridge University Press, Juni 2000.

[MV] Michael Vollmer, Klaus-Peter Möllmann: *High speed - slow motion: technology of modern high speed cameras.* Physics Education, im Druck.

[PHY] PHYWE Systeme GMBH & Co KG: *TESS expert Handbook Laboratory Experiments Physics – Mechanical conservation of Energy / Maxwell's wheel.* LEP 1.3.18-00.

[Rab67] Rabenau, A.: *Zur Chemie der Glühlampe.* Angewandte Chemie, 79(1):43–49, 1967.

[Sch03] Schubert, E. Fred: *Light-Emitting Diodes.* Cambridge University Press, 2003.

[SS07] Surek, Dominik und Silke Stempin: *Angewandte Strömungsmechanik: für Praxis und Studium.* Vieweg+Teubner, 1. Auflage, Februar 2007.

[Sul10] Suleder, Michael: *Unterrichtshilfen Naturwissenschaften / Physik: Videoanalyse und Physikunterricht, m. CD-ROM.* Aulis Verlag Deubner, 1. Auflage, Oktober 2010.

[TM09] Tipler, Paul A. und Gene Mosca: *Physik: für Wissenschaftler und Ingenieure.* Spektrum Akademischer Verlag, 6. Auflage, August 2009.

[WH02] Wilhelm, Thomas und Dieter Heuer: *Interesse fördern, Fehlvorstellungen abbauen - dynamisch ikonische Repräsentationen in der Dynamik.* Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 51, (8):2–11, 2002.

[WTW+10] Wiesner, H., V. Tobias, C. Waltner, M. Hopf, T. Wilhelm und A. Sen: *Dynamik im Mechanikunterricht.* PhyDid-B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 2010. `www.phydid.de`.

Anhang

A. Anleitungen zur Casio EX F1 und Casio EX FS10

Die nachfolgenden Bedienungsanleitungen sind im Rahmen dieser Ausarbeitung entstanden. Die Zielgruppe der in Kapitel A.3 ausgearbeiteten Anleitung sind Kinder und Jugendliche ab etwa 10 Jahre, die Anleitungen in Kapitel A.1 und A.2 sind als Beilage für die Kameras gedacht. Ziel insbesondere der letzten beiden ist es, einen schnellen, unkomplizierten Einstieg in die Hochgeschwindigkeitsfunktionen der Kamera zu ermöglichen. Diese Kurzanleitungen setzen Grundkenntnisse im Umgang mit digitalen Kompaktkameras und grundlegende Kenntnisse am Computer voraus.

A.1. Schnellstart HS-Aufnahmen mit der Casio EX F1

Abbildung A.1.: Rück- und Oberseite der Casio EX-F1 mit allen für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen relevanten Details.

Einstellungen: Um Hochgeschwindigkeitsaufnahmen machen zu können, muss die Kamera oben etwa mittig zwischen Fotoauslöser und den Einstellrädern eingeschaltet und die weiße Markierung am Hebel rechts unterhalb von der Trageschlaufe auf „HS“ umgestellt werden. Anschließend wählt man im Menü (Knopf direkt über dem Navigationsring) unter dem Menüpunkt „Qualität“, die Einstellung „HS-Bildrate“ aus, indem man mit dem Navigationsring entsprechend nach oben, unten, rechts bzw. links klickt. Mit „SET“ in der Mitte des Navigationsringes bestätigt man die Einstellungen. Mit der Funktionstaste „DISP“ stellt man die angezeigten Informationen auf dem Display ein. Erkennbar ist der tatsächliche Aufnahmebereich durch eine graue Abschattung des nicht aufgenommenen Bereiches.

Bildausschnitt: Durch den Zoomhebel am Foto-Auslöser auf der Kameraoberseite kann der Bildausschnitt gewählt werden. Durch leichtes Drücken dieses Auslösers stellt die Kamera auf den mittleren Bereich scharf. Dieser Bereich ist durch einen Rahmen angedeutet. Ob das Bild dort scharf ist, erkennt man am Aufleuchten des Rahmens. Leuchtet er grün auf, hat er fokussiert, leuchtet er rot auf, hat er nicht scharfstellen können.

Aufnahme starten: Um die Aufnahme zu starten, drückt man den Aufnahmeknopf im HS-, HD-, STD-Einstellhebel. Der Knopf ist durch einen roten Punkt in der Mitte gekennzeichnet. Erstmaliges Drücken startet die Aufnahme, ein zweites Drücken beendet sie.

Schneiden der Aufnahmen in der Kamera: Die Kamera bietet die Möglichkeit, Aufnahmen direkt zu schneiden. Im Wiedergabemodus der Kamera (linker Knopf rechts neben dem Sucher, direkt über dem Display) wird mit „SET“ das entsprechende Video ausgewählt und mit „SET“ die Wiedergabe gestartet bzw. pausiert. Lässt man sich mittels „DISP“ die Zeitleiste des Videos anzeigen, hat man während der Pause auch die Möglichkeit, Schnittzeitpunkte festzulegen. Die Kamera bietet die Möglichkeit, das Video am Anfang, am Ende oder auch zwischendrin zu kürzen. Um

eine der Schnittoptionen zu wählen, muss man beim Navigationsring nach unten drücken (erkennbar am Symbol unter der Schere, welche rechts neben der Zeitleiste erscheint).

Übertragen der Aufnahmen: Die Kamera ist mit einer handelsüblichen SD Speicherkarte ausgestattet. Viele Laptops und Computer haben ein SD-Speicherkartenslot. Falls nicht, kann man Computer und Kamera auch durch das mitgelieferte USB-Kabel miteinander verbinden und die Daten übertragen.

Bearbeiten der Aufnahmen: Wenn die Videos für eine Analyse mit dem Programm measure dynamics bearbeitet werden sollen, empfiehlt es sich aus Kompatibilitätsgründen, den Codec und das Kontainerformat zu ändern. Es bietet sich hierbei das kostenlose Programm „MPEG-Streamclip“ an.

A.2. Schnellstart HS-Aufnahmen mit der Casio EX FS10

Diese Kurzanleitungen setzen Grundkenntnisse im Umgang mit digitalen Kompaktkameras und grundlegende Kenntnisse am Computer voraus. Unerfahrenen sei die ausführlichere Anleitung „Immer langsam“ - Aufnehmen und Auswerten von Hochgeschwindigkeitsvideos“ der Firma Phywe (auch zu finden im Kapitel A.3) empfohlen.

Abbildung A.2.: Die Rückseite der Casio EX FS 10 mit allen für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen relevanten Details.

Einstellungen: Um Hochgeschwindigkeitsaufnahmen machen zu können, muss die Kamera oben mittig (links neben der Serienbildfunktion) eingeschaltet und der Hebel rechts oberhalb von der Trageschlaufe vom normalen Kamerasymbol nach oben auf das HS-Kamerasymbol umgestellt werden. Anschließend wählt man im Menü (Knopf links unterhalb des Navigationsringes) unter dem Menüpunkt „Qualität“ „HS-Bildrate“ aus, in dem man mit dem Navigationsring entsprechend nach oben, unten, rechts bzw. links klickt. Mit „SET“ in der Mitte des Navigationsringes bestätigt man die Einstellungen. Mit der Funktionstaste „DISP“ stellt man die angezeigten Informationen auf dem Display ein. Erkennbar ist der tatsächliche Aufnahmebereich durch eine graue Abschattung des nicht aufgenommenen Bereiches.

Bildausschnitt: Durch den Zoomhebel am Foto-Auslöser auf der Kameraoberseite kann der Bildausschnitt gewählt werden. Durch leichtes Drücken dieses Auslösers stellt die Kamera auf den mittleren Bereich scharf. Dieser Bereich ist durch einen Rahmen angedeutet. Ob das Bild dort scharf ist, erkennt man am Aufleuchten des Rahmens. Leuchtet er grün auf, hat er fokussieren können, leuchtet er rot auf, hat er nicht scharfstellen können.

Aufnahme starten: Um die Aufnahme zu starten, drückt man den Aufnahmeknopf links oberhalb des Einstellhebels für die Hochgeschwindigkeits- bzw. Normalaufnahmen. Der Knopf ist durch einen roten Punkt in der Mitte gekennzeichnet. Erstmaliges Drücken startet die Aufnahme, ein zweites Drücken beendet sie.

Schneiden der Aufnahmen in der Kamera: Die Kamera bietet die Möglichkeit, Aufnahmen direkt zu schneiden. Im Wiedergabemodus der Kamera (Knopf links oberhalb des Navigationsringes) wird mit „SET“ das entsprechende Video ausgewählt und mit „SET“ die Wiedergabe gestartet bzw. pausiert. Lässt man sich mittels „DISP“ die Zeitleiste des Videos anzeigen, hat man während der Pause auch die Möglichkeit, Schnittzeitpunkte festzulegen. Die Kamera bietet die Möglichkeit, das Video am Anfang, am Ende oder auch zwischendurch zu kürzen. Um eine der Schnittoptionen zu wählen, muss man beim Navigationsring nach unten drücken (erkennbar am Symbol unter der Schere, welche rechts neben der Zeitleiste erscheint).

Übertragen der Aufnahmen: Die Kamera ist mit einer handelsüblichen SD Speicherkarte ausgestattet. Viele Laptops und Computer haben ein SD-Speicherkartenslot. Falls nicht, kann man Computer und Kamera auch durch das mitgelieferte USB-Kabel miteinander verbinden und die Daten übertragen.

A.3. Bedienungsanleitung Casio EX FS 10 und md für Phywe

Der Autor dieser Staatsexamensarbeit erstellte auf Wunsch des Lehrmittelherstellers Phywe die nachfolgende, ausführlichere Bedienungsanleitung, welche auch auf Englisch erhältlich sein wird. Das Ziel dieser Anleitung ist es, dass Schülerinnen und Schüler ab der 4. Jahrgangsstufe selbstständig ein Video aufnehmen und dieses Video rudimentär mit measure dynamics analysieren können. Diese Bedienungsanleitung wird nur von Phywe zusammen mit der Videoanalysesoftware measure dynamics (Version 1.4 f, build 390 oder neuer) und der Kamera „Casio EXILIM EX FS10“ ausgeliefert.
Zusätzlich fand vom 22.11.2010 bis 26.11.2010 in der Woiwodschaft[1] Niederschlesien eine Schulung 120 polnischer Lehrkräfte zur Arbeit mit measure dynamics und dieser Kamera statt. Der Lehrmittelhersteller ist Inhaber aller Copyrights an dieser Anleitung. Der Abdruck in dieser Staatsexamensarbeit ist mit freundlicher Genehmigung der PHYWE Systeme GmbH & Co. KG gestattet.
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des auszugsweisen Nachdrucks und der fotomechanischen Wiedergabe der Anleitung vorbehalten. Irrtum und Änderungen vorbehalten.
©PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, 37079 Göttingen/Germany

[1] Woiwodschaften sind polnische Verwaltungsbezirke, vergleichbar mit den Bundesländern in Deutschland.

PHYWE

„Immer langsam“ - Aufnehmen und Auswerten von Hochgeschwindigkeits-videos

Eine Kurzanleitung für Schüler

Maximilian Michel
06.12.2010

Inhaltsverzeichnis

Die Kamera Casio EX FS10 ... 3
Kamera vorbereiten ... 3
Akku herausnehmen und laden ... 3
Akku wieder einsetzen ... 4
Speicherkarte einlegen und herausnehmen ... 4
Einstellungen an der Kamera ... 4
Einstellung für normale Videos ... 5
Einstellung für Hochgeschwindigkeitsvideos ... 5
Aufnehmen der Videos ... 6
Betrachten des Videos ... 6
Kameramenü schließen ... 6
Die fallende Metallkugel als Beispiel für eine Hochgeschwindigkeitsaufnahme ... 6
Aufbau des Versuches ... 6
Aufnahmen am Computer bearbeiten ... 7
Video an den Computer übertragen ... 7
Video in measure dynamics öffnen ... 9
Video in measure dynamics betrachten ... 9
Video schneiden ... 9
Video automatisch analysieren ... 10
Video skalieren ... 10
Bildrate mit measure dynamics festlegen ... 11
Analyse des Videos ... 11
Projekt speichern ... 12
Projekt öffnen ... 12
Arbeiten mit den Ergebnissen der Analyse ... 13
Orts- bzw. x-y-Diagramm ... 13
Andere Diagramme ... 14
Richtungspfeile der Bewegung am Objekt ... 14
Stroboskopbild ... 14
Index ... 15

www.phywe.com, © All rights reserved

Die Kamera Casio EX FS10

Diese Kamera ist ein empfindliches Messgerät. Euch werden im Laufe der Schulzeit noch viele verschiedene Messgeräte für die unterschiedlichsten Aufgaben begegnen. Geht bitte sorgsam mit diesen sensiblen Geräten um.

Falls schon eine Speicherkarte mit genügend Speicherplatz und ein voll geladener Akku in der Kamera sind, könnt ihr gleich mit Kapitel „**Einstellungen an der Kamera**“ auf Seite 4 weitermachen.

Kamera vorbereiten

Bevor ihr richtig anfangen könnt, müsst ihr die Kamera auf die kommenden Aufgaben vorbereiten. Die Kamera braucht Strom, also solltet ihr den Akku laden, damit der Kamera nicht „die Puste ausgeht“ während ihr die Aufnahmen macht.

Akku herausnehmen und laden

Bild 1: Öffnen des Kamerabodens und Herausnehmen des Akkus.

Haltet die Kamera so, wie in Bild 1. Rechts seht ihr eine Plastik-Abdeckung mit einem kleinen, schwarzen Riegel (Bild 1). Dieser steht auf der Position „LOCK“, also geschlossen. Zum Öffnen schiebt ihr den Riegel nach links auf die Position „open“ (offen) – schon geht die Klappe auf. Man kann nun zwei Fächer erkennen. Im oberen Fach ist der Akku. Dieser ist rechts durch eine kleine Raste gesichert. Im kleineren Fach darunter steckt die Speicherkarte. Um den Akku herauszunehmen, schiebt ihr die Raste nach unten und der Akku springt heraus (Bild 2). Schließlich legt ihr den Akku in das mitgelieferte Ladegerät.

Bild 2: Einlegen des Akkus in das mitgelieferte Ladegerät.

Wichtig: Lasst die Klappe der Kamera nicht offen, da sie sonst abbrechen kann. Die Klappe verschließt ihr, indem ihr den Riegel auf der Klappe von „open“ auf die Position „lock“ stellt (Bild 3).

Wichtig: Während der Akku lädt, leuchtet am Ladegerät ein rotes Licht. Wenn der Akku voll ist, geht das rote Licht aus. Nach etwa 90 Minuten ist der Akku vollständig geladen.

www.phywe.com, © All rights reserved

Akku wieder einsetzen

Nachdem der Akku geladen ist, legt ihr ihn wieder in die Kamera ein (Bild 3). Haltet die Kamera wie beim Herausnehmen und dreht den Akku so, dass die Schrift „Casio“ und „Exilim“ lesbar sind. Auf dem Akku sind auch Pfeile aufgezeichnet, die euch die Einschieberichtung zeigen.

Bild 3: Richtiges Einlegen des Kamera-Akkus, Schließen der Kameraklappe.

Wichtig: Die Kamera ist ein hochempfindliches Gerät. Das Einsetzen vom Akku oder Speicherkarte in die Kamera oder in das Ladegerät muss leicht und ohne Kraftaufwand funktionieren. Falls es nicht auf anhieb klappt, probiert die Schritte nacheinander nochmal durch.

Speicherkarte einlegen und herausnehmen

Diese Kamera speichert die Bilder und Videos auf **SD-Speicherkarten**. Der Steckplatz für die Karte befindet sich in der Kamera direkt unter dem Akku-Steckplatz. Um die Speicherkarte einzulegen, öffnet ihr die Klappe am Kameraboden genau so, als ob ihr den Akku einlegen wolltet (Bild 1). Ihr seht, dass unter dem Akku ein schmaler Spalt ist. Haltet eure Speicherkarte so, dass ihr die Schrift auf der Karte lesen könnt. Die goldenen Kontakte zeigen dann nach unten und die „abgeschnittene“ Ecke zeigt nach vorne. So könnt ihr die Karte in die Kamera schieben. Zum Herausnehmen drückt ihr leicht auf die Karte, dann kommt sie euch ein Stück entgegen, sodass ihr sie besser herausnehmen könnt.

Bild 4: Einsetzen der Speicherkarte.

Wichtig: Achtet darauf, dass ihr genügend freien Speicherplatz auf der Karte habt. 300 MB sollten es schon sein.

Wichtig: Erscheint nach dem Einschalten[1] auf dem Display der Kamera „Karte verriegelt“, so müsst ihr die Karte herausnehmen und den Schieber links an der Karte nach vorn schieben und wieder einsetzen. Jetzt kann die Kamera Videos auf der Karte speichern.

Einstellungen an der Kamera

Nachdem der Akku geladen und die Speicherkarte eingelegt ist, könnt ihr die Kamera einschalten. Der Knopf zum Einschalten („ON/OFF“) befindet sich auf der Oberseite der Kamera in einer kleinen Vertiefung.

[1] Wie ihr die Kamera einschaltet, könnt ihr auf der nächsten Seite erfahren.

www.phywe.com, © All rights reserved

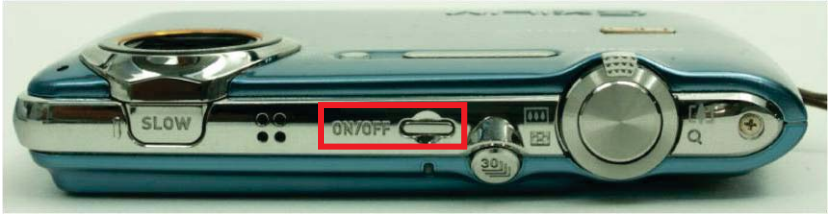


Bild 5: Kamera von oben. In der Mitte befindet sich der Einschaltknopf.

Drückt ihr den Knopf „Menü“ (Position), dann seht ihr auf dem Display in der obersten Zeile die Begriffe „Aufnahme“, „Qualität“ und „Einstellungen“ (einer der Begriffe ist rot unterlegt). Darunter steht eine Liste mit den jeweiligen Einstellungsmöglichkeiten. Durch das Drücken der Steuertasten (Steuerring) nach links oder rechts könnt ihr den rot unterlegten Begriff und die zugehörigen Einstellungsmöglichkeiten ändern. Wählt den Begriff „Qualität“ aus. Dann seht ihr in der Liste verschiedene Symbole und daneben steht „Qualität“. Das zweite Symbol stellt eine Videokamera dar. Hier kann man die Qualität des Videos einstellen. Wenn ihr normale Videos aufnehmen sollt, stellt hier die Qualität „STD“ (Abkürzung für Standard) ein. Falls ihr Hochgeschwindigkeitsaufnahmen machen wollt, betrachtet die dritte Zeile. Hier steht vor der Videokamera „HS“, das ist die Abkürzung für „High-Speed“ (engl. für Hochgeschwindigkeit). Wählt die Bildrate „210 fps“ aus und drückt auf „SET“ (im Steuerring). Dadurch schließt ihr auch das Menü und ihr habt wieder das Live-Bild der Kamera im Display.

Einstellung für normale Videos

Damit ihr normale Videos mit der Kamera aufnehmen könnt, schiebt den Hebel ganz rechts auf der Rückseite der Kamera nach unten auf das Kamerasymbol. Wählt anschließend die unter dem Menüpunkt „Qualität“ die Filmqualität „normal“ aus.

Wichtig: Auch wenn es verlockend ist, die Einstellung „HD“ (High-Definition, also hohe Bildqualität) ist für die Videoanalyse sogar hinderlich. Der Grund ist, dass die Kamera bei normalen Videos 30 Bilder pro Sekunde macht. Bei High-Definition hingegen werden 30 „Halbbilder“[2] aufgenommen.

Einstellung für Hochgeschwindigkeitsvideos[3]

Um mit der Kamera Hochgeschwindigkeitsaufnahmen machen zu können, müsst ihr den Hebel ganz rechts auf der Kamerarückseite nach oben schieben. Anschließend wählt ihr im Menü im Punkt „Qualität“ die „HS“-Bildrate „210 fps“ aus.

Wichtig: Für alle Hochgeschwindigkeitsaufnahmen reichen 210 fps völlig aus. Wählt ihr eine höhere Bildrate (420 fps oder 1 000 fps), wird der Aufnahmebereich kleiner, das Bild grobkörniger und die Aufnahme dunkler oder ganz schwarz!

Wichtig: Achtet bei den Aufnahmen auf genügend Licht. Sonnenlicht oder (herkömmliche) Glühlampen sind am besten für die Beleuchtung des Experimentes geeignet. Energiesparlampen, LED’s oder Leuchtstoffröhren sind nicht so gut geeignet.

[2] Halbbilder sind Bilder, bei denen nur jede zweite Zeile gespeichert wird. Die fehlende Zeile wird nachträglich berechnet. Grund für diese Aufnahmeweise ist, dass die Anzahl der Bildpunkte (Pixel) und damit die Datenmenge viel höher ist.

[3] Nimmt man mehr als 30 Bilder in der Sekunde auf, spricht man von **Hochgeschwindigkeitsaufnahmen**. Werden beispielsweise 300 **fps** (Frames per Second, engl. für „Bilder pro Sekunde“) aufgenommen und mit 30 fps abgespielt, seht ihr das Video in zehnfacher Zeitlupe.

www.phywe.com, © All rights reserved

Aufnehmen der Videos

Auf der Rückseite der Kamera befindet sich oben rechts ein Knopf mit einem roten Punkt. Wenn ihr auf diesen Knopf drückt, startet die Aufnahme, nochmaliges Drücken beendet sie.

Betrachten des Videos

Oberhalb des Navigationsringes befinden sich zwei Knöpfe. Auf dem Linken ist eine Play-Taste, damit könnt ihr die aufgenommenen Fotos und Videos betrachten. Um ein Video ablaufen zu lassen, drückt den „SET“-Knopf innerhalb des Navigationsringes.

Kameramenü schließen

Auf der Rückseite der Kamera ist ein Knopf mit einem Fotoapparat abgebildet. Wenn ihr auf diesen Knopf drückt, wird das jeweilige Menü geschlossen und ihr kommt zurück zum Live-Bild der Kamera.

Die fallende Metallkugel als Beispiel für eine Hochgeschwindigkeits-aufnahme

Aufbau des Versuches

Nachdem ihr euch mit der Kamera ein wenig vertraut gemacht habt, baut ihr den Versuch auf. Ihr benötigt dafür:

- Eine kleine dunkle Metallkugel
- Einen großen, harten Untergrund (Schultisch)
- Einen Maßstab mit Halterung

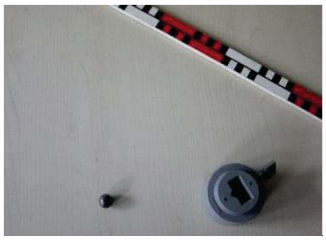


Bild 6: Benötigte Materialien für den Versuch.

Steckt den Maßstab senkrecht in die Halterung (Bild 7). Legt die Kugel in die Handfläche eurer rechten Hand und hebt die Hand 50 cm über den Untergrund. Mit der linken Hand gebt ihr der Kugel einen Stoß, damit sie von der Handfläche herunter rollt. Achtet darauf, dass die Kugel gut sichtbar fällt (nicht vor dem Maßstab). Ihr seht, dass die Kugel auf den Boden fällt und wieder nach oben springt. Schafft es die Kugel nach dem ersten Auftreffen wieder 50 cm hoch zu springen? Wie weit springt die Kugel? Springt sie nach jedem Auftreffen gleich weit? Verändert die Kugel ihre Form beim Auftreffen?

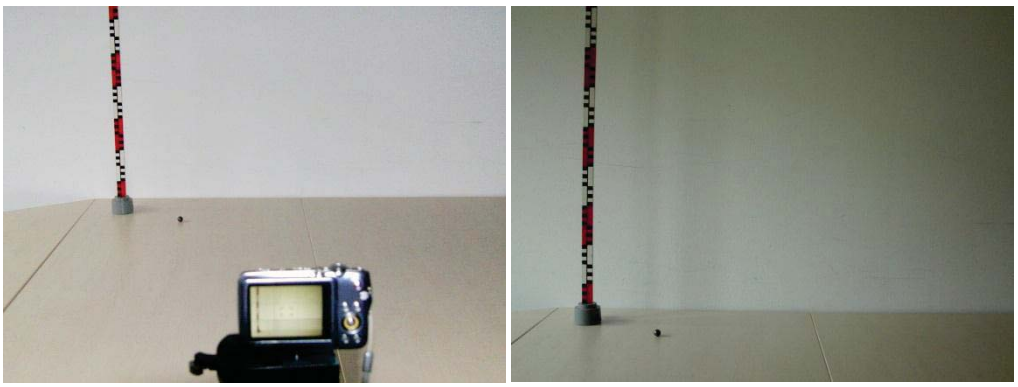


Bild 7: Versuchsaufbau und Kameraansicht.

Wenn ihr das Experiment selbst durchführt, könnt ihr das kaum sehen. Selbst wenn deine Klassenkameradin / dein Klassenkamerad zusieht, kann sie / er es kaum erkennen. Das Experiment läuft zu

www.phywe.com, © All rights reserved

schnell ab. Jetzt kommt die Hochgeschwindigkeitskamera ins Spiel. Damit ihr aber mit dem Video auch etwas anfangen könnt, gibt es ein paar Dinge zu beachten:

1. **Hintergrund:** Achtet auf einen möglichst gleichmäßigen, einfarbigen (am besten hellgrauen) Hintergrund ohne Strukturen. Der Gegenstand, den ihr filmen wollt, sollte sich farblich gut vom Hintergrund abheben. **Geeignete Hintergründe** sind
   - Glatte Tapeten / Wände
   - Gewischte Schultafeln
   - Gebügelte einfarbige Stoffe (z.B.: Gardinen)

   Ungeeignete Hintergründe sind beispielsweise:

   - Raufasertapeten, strukturierte oder bunte Tapeten
   - Schlecht gewischte oder beschriebene Tafeln
   - Farbenfrohe oder nicht gebügelte Stoffe
2. **Versuchsaufbau:** Baut den Versuch nahe an diesem Hintergrund auf. Der Maßstab steht bei den Fotos von Bild 7 etwa 15 cm von der Wand weg.
3. **Kameraposition:** Stellt die Kamera in etwa 2 Meter Entfernung zur Wand gerade und stabil hin. Am Besten eignet sich hierfür ein Fotostativ. Am Kameraboden befindet sich ein Schraubgewinde links neben der Klappe für Speicherkarte und Akku. Dort könnt ihr die Stativschraube befestigen. Im Beispiel steht die Kamera 2 Meter vom Versuchshintergrund auf einem Stativ.
4. **Kameraausrichtung:** Richtet die Kamera so aus, dass sie das ganze Experiment im Blick hat. Verändert die Höhe der Kamera so, dass sie etwa Mittig auf das ganze Experiment ausgerichtet ist. Oben auf der Kamera ist ein Zoomknopf. Verändert damit den Bildausschnitt und kontrolliert, ob auf dem Display alles Notwendige zu sehen ist. Beachtet, dass der Bildausschnitt kleiner wird! Macht eine Probeaufnahme und kontrolliert den Bildausschnitt auf dem Kameradisplay. Der Maßstab sollte im Video gut erkennbar sein (Bild 7)!
5. **Licht und Schatten:** Nutzt, wenn möglich, das indirekte Tageslicht für eure Aufnahmen. Achtet darauf, dass ihr selbst keinen Schatten auf das Experiment werft. Sollte es zu dunkel sein, könnt ihr auch den Overheadprojektor, eine Schreibtischlampe oder einen Bauscheinwerfer für die Beleuchtung verwenden. Wenn ihr von **rechts und** von **links** euren Versuchsaufbau beleuchtet, wirft die Metallkugel **keinen Schatten**. Das macht die Analyse später leichter. Vorsicht: Die Lampen werden sehr heiß!
6. **Experiment aufnehmen:** Arbeitet beim Aufnehmen am besten zu zweit. Einer von euch beiden bedient die Kamera, der andere rollt die Kugel von seiner Handfläche. Startet die Aufnahme kurz bevor ihr die Kugel losrollen lasst. Die Kamera braucht einen kurzen Moment, bis sie die Aufnahme startet. Beendet die Aufnahme durch Drücken auf den Aufnahmeknopf, wenn die Kugel nicht mehr im Kameradisplay zu sehen ist oder liegen bleibt.

Aufnahmen am Computer bearbeiten

Video an den Computer übertragen

Nachdem ihr nun das Experiment durchgeführt habt, müsst ihr die Daten auf einen Computer übertragen. Schaltet dazu zuerst den Computer ein. Legt einen neuen Ordner auf dem Desktop an. Nehmt am besten euren Vor- und Nachnamen, sowie eure Klasse als Namen (Beispiel: „SabineMayerKlasse5c“).

 www.phywe.com, © All rights reserved

Jetzt übertragt ihr noch die Daten von der Kamera auf den Computer. Dies könnt ihr auf zweierlei Arten tun:

1. Schließt die Kamera mit dem mitgelieferten USB-Kabel an den Computer an. In Bild 8 könnt ihr erkennen, wie die Kabel anzuschließen sind. Die Zeichen ▶ an der Kamera und ◀ am Stecker des USB-Kabels müssen aufeinander zeigen, dann passt der Stecker. Verbindet die Kamera und den Computer mit dem Kabel. Nachdem ihr die Kamera angeschlossen habt, schaltet ihr sie ein.

Bild 8: Anschließen der Kamera an den PC mit dem mitgelieferten USB-Kabel.

2. Ihr könnt auch die Speicherkarte herausnehmen und in den SD-Speicherkartenplatz im Computer stecken, falls der Computer einen SD-Speicherkarten-Steckplatz hat.

Nachdem ihr die Kamera und den PC miteinander verbunden (bzw. die Speicherkarte in den PC gesteckt) habt, öffnet sich automatisch ein Fenster. Wählt „Ordner öffnen, um Daten anzuzeigen“. Dann öffnet sich ein weiteres Fenster mit dem Ordner „DCIM“, diesen Ordner müsst ihr öffnen.

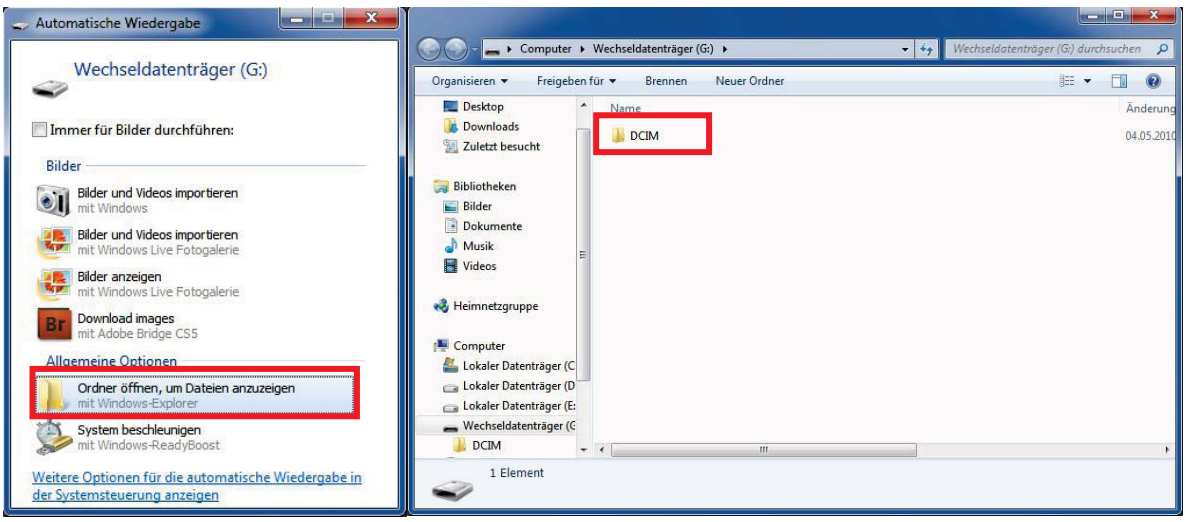


Bild 9: Fenster, die sich bei der Datenübertragung öffnen.

Anschließend erscheint dann ein weiterer Ordner „100CASIO“. Wenn ihr ihn geöffnet habt, könnt ihr auf die Daten zugreifen. Wählt das neueste Video aus und kopiert es **sofort** in den Ordner auf den Computer. Je nach Länge der Aufnahme kann das ein paar Minuten dauern.

www.phywe.com, © All rights reserved

Video in measure dynamics öffnen

Wenn das Video von der Kamera auf den Computer überspielt worden ist, könnt ihr es mit dem Programm „measure dynamics“ öffnen und bearbeiten. Wenn ihr „measure dynamics“ gestartet habt, klickt ihr auf „Video laden …“, anschließend klickt ihr auf „Suchen in:“ und wählt „Desktop“ aus. Dann scrollt ihr so lange, bis ihr euren Ordner gefunden habt. Öffnet den Ordner und wählt das Video aus. Ihr seht, dass im rechten Fenster das Videobild erscheint.

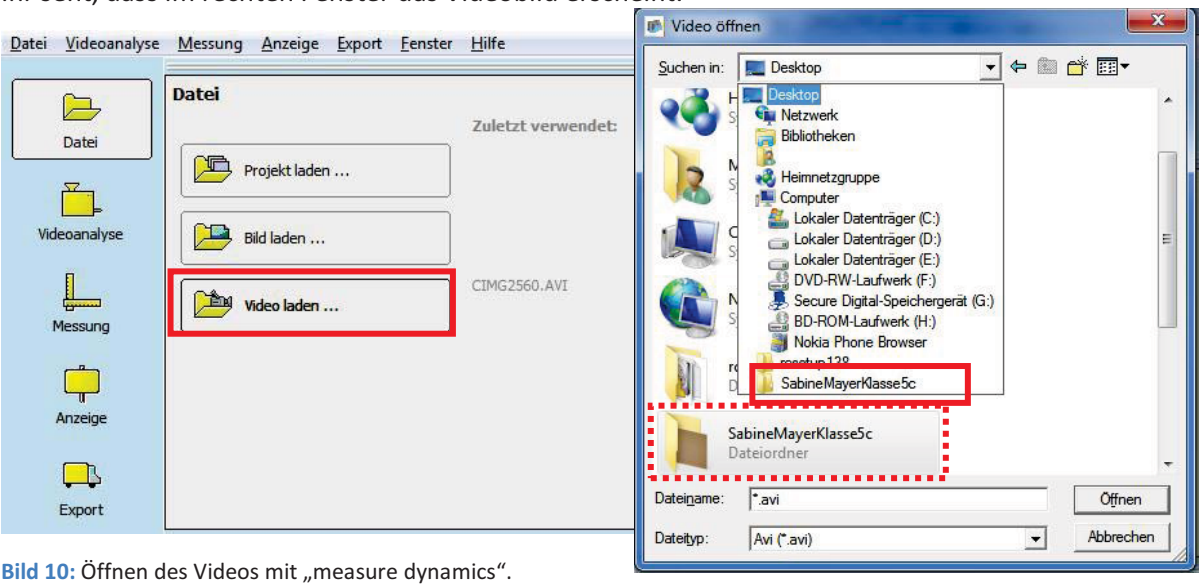


Bild 10: Öffnen des Videos mit „measure dynamics“.

Video in measure dynamics betrachten

Jetzt könnt ihr euch einmal das Video anschauen. In Bild 11 ist das Bedienfeld für das Video dargestellt. Der Knopf startet das Video. Um das Video wieder zu stoppen, klickt ihr auf die gleiche Stelle. Mit könnt ihr zum Anfang bzw. zum Ende des Videos springen. Nutzt , um nur ein Bild (Frame) vor oder zurück zu gehen. Mit könnt ihr einen neuen Start bzw. Endpunkt festlegen. Um das Video rückwärts ablaufen zu lassen, klickt auf . Die Größe des Videobildes könnt ihr verändern, wenn ihr 100% anklickt. Mit 1 x könnt ihr das Video schneller oder auch langsamer ablaufen lassen. Falls ihr bei der Auswertung nicht jedes Bild (Frame) des Videos berücksichtigen wollt, könnt ihr mit Schrittweite: 1 die **Schrittweite** des Videos verändern.

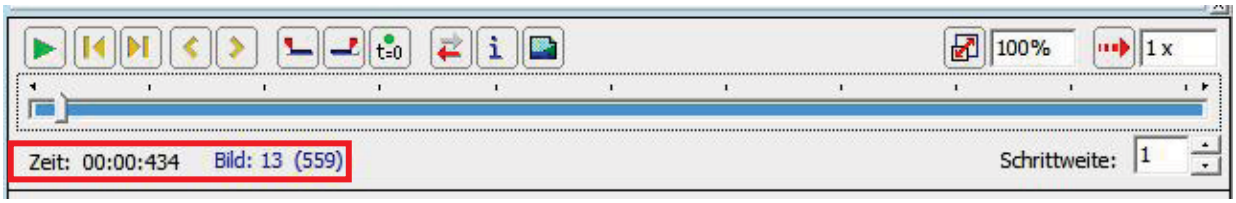


Bild 11: **Video-Bedienfeld** in measure dynamics mit Menüfeld und Zeit- sowie Bildangabe.

Video schneiden

In eurem Video vergeht eine gewisse Zeit, bis die Kugel angestoßen wird und im Film richtig zu sehen ist. Lange bevor das Video zu Ende ist, verschwindet die Kugel auch aus dem Bild. Diese Teile des Filmes solltet ihr mit measure dynamics einfach ausblenden, in dem ihr mit euren Start- bzw. Endpunkt des Videos festlegt.

www.phywe.com, © All rights reserved

Video automatisch analysieren

Video skalieren

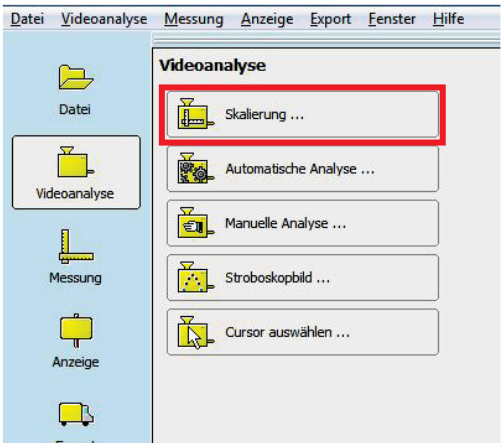


Bild 12: Menüansicht „Videoanalyse“.

Nachdem ihr die Bildrate und den Anfangs- und Endpunkt des Videos festgelegt habt, könnt ihr mit der richtigen Videoanalyse beginnen. Wählt zuerst den Menüpunkt „Videoanalyse“, anschließend klickt ihr auf „Skalierung“ (siehe Bild 12).

Wichtig: Normalerweise öffnet sich auch ein Hinweisfenster, in dem die einzelnen Schritte erläutert werden.

Im Menüpunkt „**Skalierung** ...“ könnt ihr entweder „Bildrate ändern“, „Ursprung und Richtung“ oder „**Maßstab**“ auswählen. Wählt den Menüpunkt „Maßstab“. Ihr seht ein Bild wie Bild 13. Im Videobild erscheinen in der linken oberen Ecke zwei grüne Punkte mit einer Verbindung (rechter roter Kasten in Bild 13). Ziehe die Punkte auf das Lineal so, dass ihr den Abstand zwischen den beiden Punkten ablesen könnt. Den Abstand tragt ihr neben „Geben Sie Länge und Einheit der markierten Strecke ein“. Durch Klicken auf das grüne Häckchen wird die Skalierung gespeichert. Klickt anschließend auf den Button „Schließen“ (im Bild 13 links unten). So einfach ist euer Video skaliert.

Im Beispiel wird ein Schullineal verwendet. Die weißen und die roten Abschnitte sind jeweils 10 cm (also 0,1 m) lang. Wählt ihr die Punkte und den Abstand wie in Bild 14 (Seite 11), müsst ihr als Strecke 0,5 m eingeben.

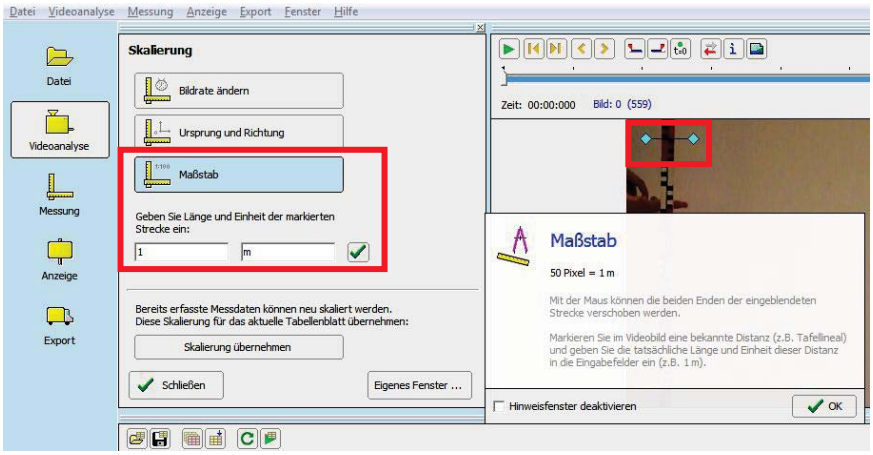


Bild 13: Einstellen der Länge (skalieren). Im Hinweisfenster stehen die Arbeitsanweisungen.

www.phywe.com, © All rights reserved

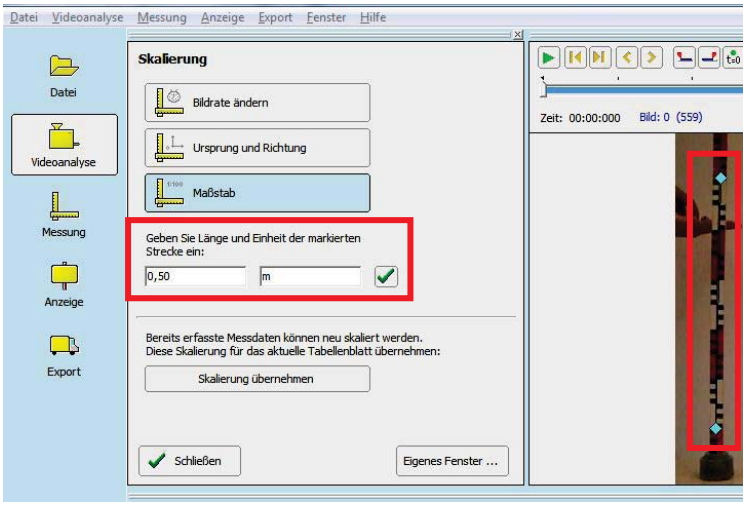


Bild 14: Beispiel für die Skalierung: 5 rot-weiße Abschnitte =50 cm = 0,5 m.

Bildrate mit measure dynamics festlegen

Die Hochgeschwindigkeitsvideos werden in **Zeitlupe**, also langsamer als in Wirklichkeit abgespielt. Das hat den Vorteil, dass ihr das Experiment verlangsamt sehen könnt. Leider stimmt der Zeitabstand zwischen den Bildern des Videos nicht mehr und die Berechnungen werden fehlerhaft. Im Menüpunkt „Skalieren“ könnt ihr aber die **Bildrate** (**Framerate**) **ändern**. Klickt dazu auf „Skalieren ...“, anschließend auf den Button „Bildrate ändern“. Ihr seht dann Bild 15. Setzt im Kästchen vor „Bildrate ändern“ ein Häckchen und tragt in das untere Feld“ 210“ ein. Das ist die Bildrate, mit der ihr das Experiment aufgenommen habt. Klickt auf den grünen Hacken, um diese Veränderung zu speichern!

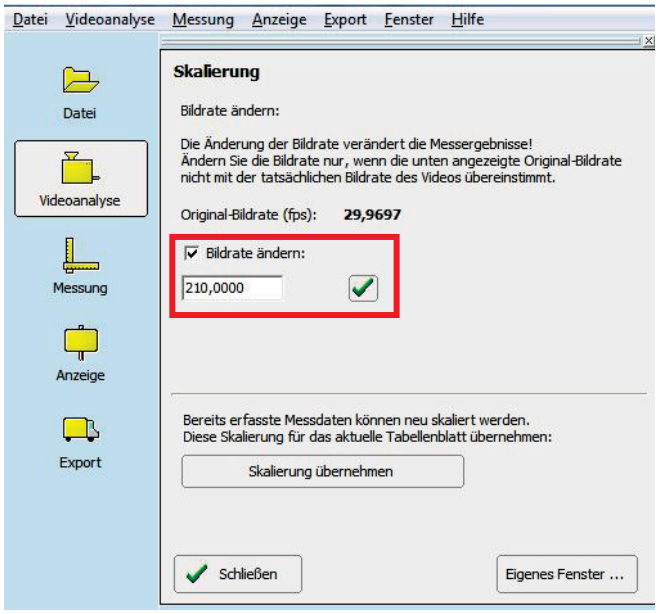


Bild 15: Bildrate verändern mit measure dynamics.

Analyse des Videos

Nachdem ihr das Video skaliert und auf „Schließen“ geklickt habt, kommt ihr automatisch wieder in das Menü „Videoanalyse“. Diesmal wählt ihr den Punkt „**Automatische Analyse** ...“, direkt unter dem Menüpunkt „Skalieren“. Ihr seht dann etwa Bild 16. Sucht zuerst einen **Frame** (**Videobild**) aus, in dem euer Objekt (hier die Metallkugel) gut zu sehen ist. Anschließend klickt ihr mit dem Cursor[4] mittig auf das Objekt. Wenn jetzt ein grüner Kasten zu sehen ist, hat der Computer das Objekt eindeutig erkannt. Zusätzlich geht ein Hinweisfenster „Objekt gefunden“ , wie in Bild 16, auf. Klickt im Hinweisfenster auf „OK“ und anschließend auf „ Start“, damit die Analyse beginnt.

Ist der Kasten gelb, hat er es nicht so gut erkannt. Oft funktioniert die Analyse trotzdem. Falls der Kasten rot ist oder die Analyse doch nicht so gut klappt, sucht eine andere Stelle im Video aus, markiert dort euer Objekt und startet die Analyse erneut.

[4] Der **Cursor** ist der Zeiger der Maus.

www.phywe.com, © All rights reserved

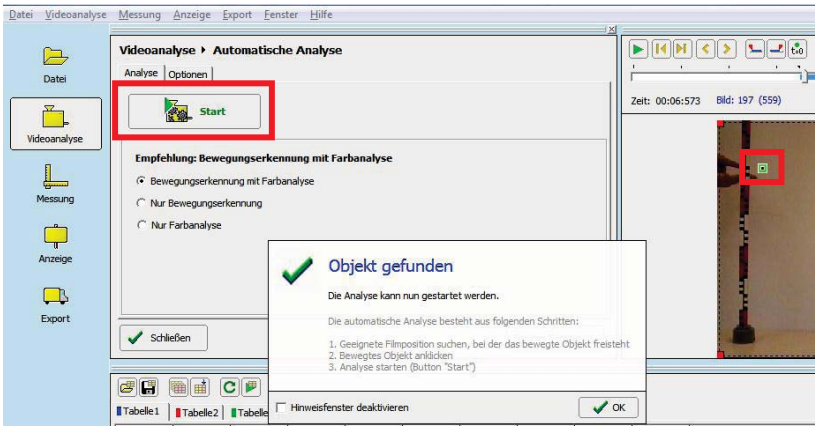


Bild 16: Menü „Videoanalyse“, Auswahl „Automatische Analyse“. Mit dem Cursor auf das Objekt klicken und anschließend die Analyse starten.

Bild 17 ist eine Momentaufnahme einer Videoanalyse. Das violette Kästchen sollte immer auf dem Objekt sein.

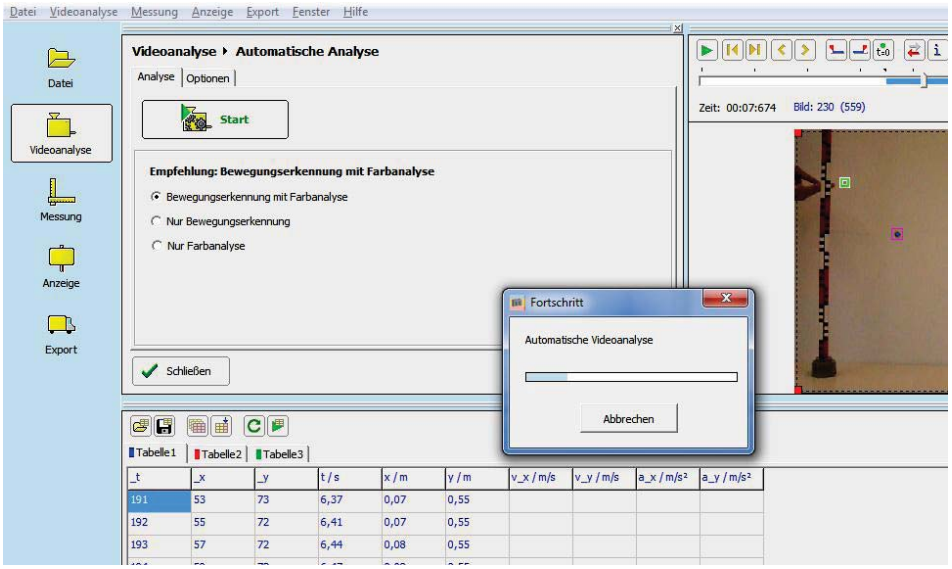
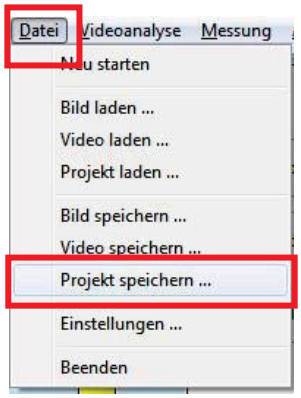


Bild 17: Momentaufnahme einer laufenden Videoanalyse.

Projekt speichern



Jetzt hat der Computer euer Video bereits ausgewertet. Bevor ihr weitermacht, solltet ihr euer **Projekt speichern** . Dazu wählt ihr ganz links oben „Datei“, anschließend „Projekt speichern ...“ aus. Euer Projekt hat noch keinen Namen. Wählt einen Namen, welcher die wichtigsten Informationen enthält. Zum Beispiel: „ProjektSabineMayer5cMetallkugel“.

Projekt öffnen

Wenn ihr zu einem späteren Zeitpunkt an diesem Projekt weiterarbeiten wollt, öffnet euren Ordner auf dem Desktop und klickt auf die Datei mit der Endung „.prj“. In diesem Beispiel wäre das der Ordner „SabineMayerKlasse5c“ auf dem Desktop. In diesem Ordner befindet sich die Datei „ProjektSabineMayer5cMetallkugel.prj“. Wenn ihr diese Datei öffnet, dann startet automatisch measure dynamics. Falls nicht, klickt mit der

www.phywe.com, © All rights reserved

rechten Maustaste auf die Datei und wählt in der Liste „Öffnen mit“ das Programm measure dynamics aus.

Arbeiten mit den Ergebnissen der Analyse

Orts- bzw. x-y-Diagramm

Wenn ihr euch anschauen wollt, wie die Kugel durch das Bild gesprungen ist, könnt ihr euch ein Ortsdiagramm (oder auch x-y-Diagramm) anschauen. Klickt dazu in der linken Menüleiste auf „Anzeige“ und wählt dann „**Diagramm** …“. Unter „**Extra Diagramm** …“ öffnet sich das Diagramm in einem eigenen Fenster und ihr könnt mehrere Diagramme nebeneinander betrachten.

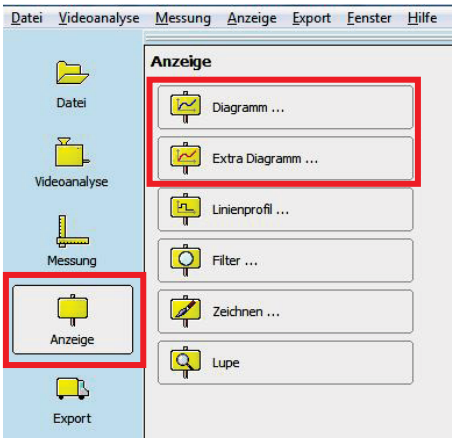


Bild 18: Diagramm öffnen.

Öffnet ein Diagramm und klickt zweimal mit der linken Maustaste auf das Diagramm. Jetzt öffnet sich ein Fenster, darin könnt ihr die Darstellungen im **Diagramm verändern**. Wählt zuerst für die „waagerechte Achse“ „x / m“ statt „t / s“ aus, klickt dann auf ALL, anschließend auf +, damit die waagerechte Achse die „x / m“-Werte anzeigt. Klickt auf „OK“, um die Veränderungen zu übernehmen.

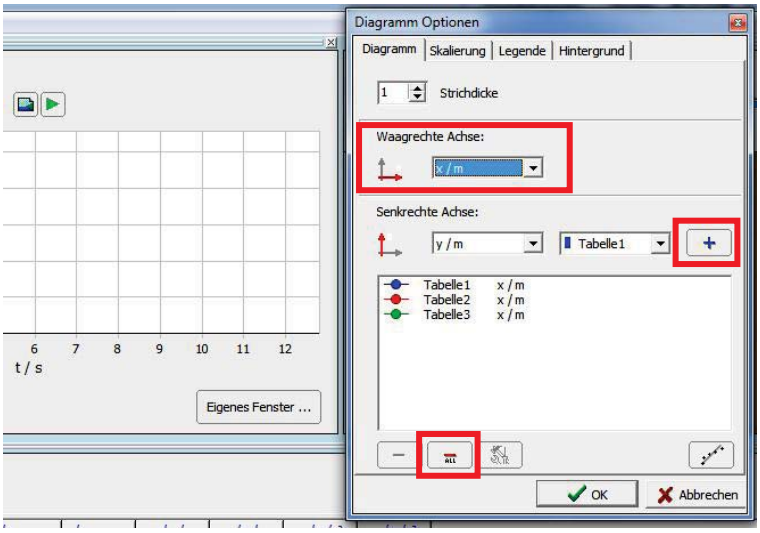
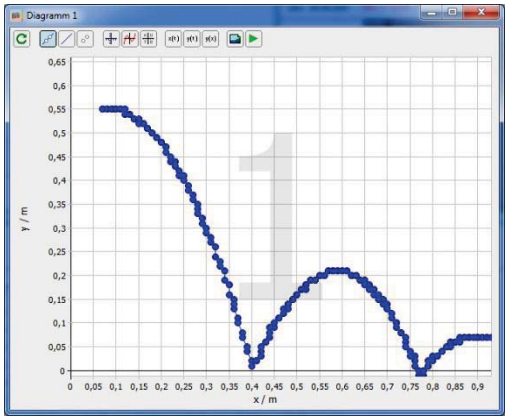


Bild 19: Diagramm ändern.

Wenn ihr alles richtig gemacht habt, solltet ihr ein Diagramm erhalten, wie dieses hier:



Es ist ein sogenanntes „x-y-Diagramm“ oder „Ortsdiagramm“. Oben im Diagramm seht ihr verschiedene Buttons. Der Button ganz rechts sieht aus, wie der Play-Button im Videofenster. Probiert mal aus, was passiert, wenn ihr darauf klickt! Ist euch aufgefallen, dass das Diagramm den Weg der Kugel darstellt?

www.phywe.com, © All rights reserved

Andere Diagramme

Ihr könnt verschiedene Arten von Diagrammen erstellen, wenn ihr in Bild 19 für die waagerechte oder senkrechte Achse andere Einstellungen vornehmt. Wenn ihr wissen wollt, wie schnell sich die Kugel nach rechts bewegt, wählt für die waagerechte Achse „t / s“ und für die senkrechte Achse „v_x / m“. Wie verhält sich die vertikale Geschwindigkeit im laufe der Zeit, also die Geschwindigkeit in y-Richtung (waagerechte Achse: „s / t“; senkrechte Achse: „v_y / m“)? Seht ihr, wie sich die Geschwindigkeit ändert?

Richtungspfeile der Bewegung am Objekt

Ihr könnt euch im Video anzeigen lassen, wie schnell und in welche Richtung sich das Objekt im Moment, also im jeweiligen Videobild bewegt. Der Pfeil ist ein sogenannter **Filter**. Ihr findet die Filter unter „Anzeige“ (Bild 20 links). Zwei Filter stehen bereits in der Liste, wobei Filter 2 sichtbar ist. Das erkennt ihr daran, dass im Kästchen links neben „Filter 2“ ein Häckchen gesetzt ist. Ist das Kästchen leer, ist der jeweilige Filter ausgeschaltet.

Um nun den **Geschwindigkeitspfeil** im Video anzeigen zu lassen, klickt ihr auf „Neu“. Es öffnet sich das Fenster „Auswahl“, dort wählt ihr durch Anklicken[5] „Geschwindigkeitspfeil“ aus und schließt das Fenster mit „OK“.

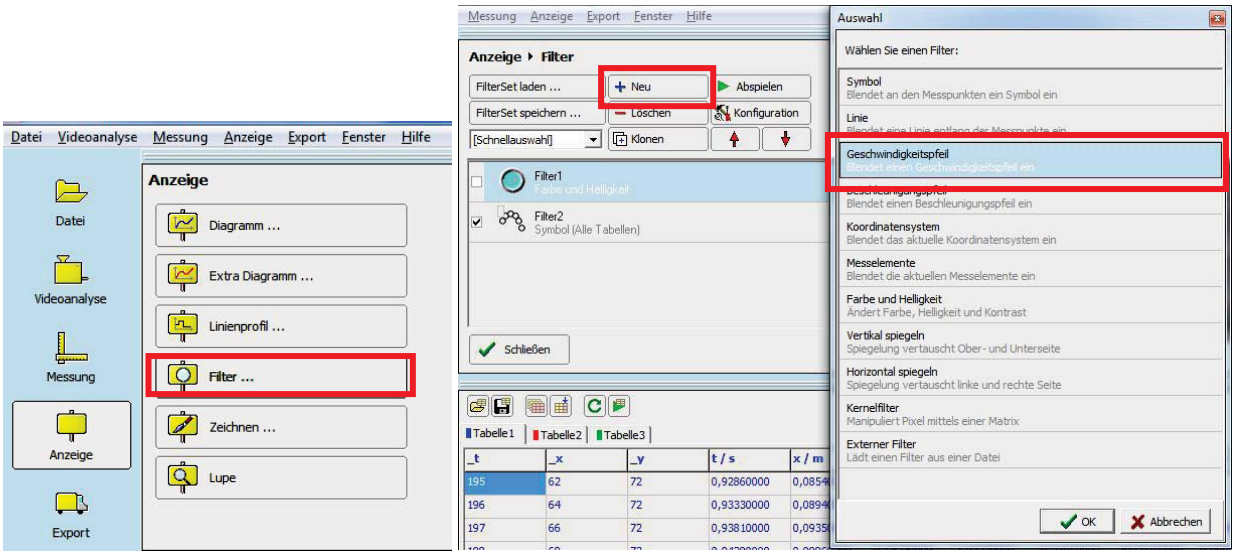


Bild 20: Geschwindigkeitspfeile anzeigen lassen: Im Untermenü „Filter“ auf „Neu“ klicken (roter Kasten) und im Fenster „Auswahl“ den „Geschwindigkeitspfeil“ (roter Kasten) wählen, anschließend auf „OK“ klicken.

Mit dem Button „Abspielen“ rechts neben dem Button „Neu“ könnt ihr überprüfen, ob der Geschwindigkeitspfeil angezeigt wird. Fällt euch etwas auf, wenn ihr den Geschwindigkeitspfeil betrachtet?

Stroboskopbild

Neben dem x-y-Diagramm und den Pfeilen gibt es noch eine weitere Möglichkeit die Bewegung der Kugel in einem Bild festzuhalten: das **Stroboskopbild**. Wählt dazu wieder im Menü „Videoanalyse“ und den Unterpunkt „Stroboskopbild …“. Klickt auf „Start“ und ihr erhaltet nach ein paar Sekunden ein Stroboskopbild des Experimentes. Klickt auf „Dieses Bild behalten …“, um das Bild zu sichern. Es öffnet sich ein neues Fenster mit dem Bild. Klickt dann auf 💾, um das Bild zu speichern. Wählt wieder einen eindeutigen Namen, beispielsweise „StroboSabineMayerKlasse5c“.

[5] Klickt doppelt auf „Geschwindigkeitspfeil“, dann ist der Filter ausgewählt und das Fenster schließt sich.

www.phywe.com, © All rights reserved

Index

Akku
- einsetzen ... 4
- herausnehmen ... 3
- laden ... 3

Anzeige ... 13
Automatische Analyse ... 11
Bildrate festlegen ... 11
Bildrate korrigieren ... 11
Cursor ... 11
Diagramm ... 13
Diagramm verändern ... 13
Experiment aufnehmen ... 7
Extra Diagramm ... 13
Filter ... 14
fps ... 5
Frame ... 11
Framerate ... 11
Geschwindigkeitspfeil ... 14
Halbbilder ... 5
Hintergrund ... 7
- geeignet ... 7
- ungeeignet ... 7

Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ... 5
Kameraausrichtung ... 7
Kameraeinstellung
- Hochgeschwindigkeitsvideos ... 5
- normale Videos ... 5

Kameraeinstellungen ... 4
Kameraposition ... 7
Licht und Schatten ... 7
Maßstab ... 10
Ortsdiagramm ... 13
Projekt
- öffnen ... 12
- speichern ... 12

Projekt speichern ... 12
Richtungspfeil ... 14
Schrittweite ... 9
SD-Speicherkarten ... 4
Skalieren ... 10
Skalierung ... 10
Speicherkarte
- einlegen ... 4
- herausnehmen ... 4

Stroboskopbild ... 14
Versuchsaufbau ... 7
Video
- analysieren ... 11
- bearbeiten ... 7
- beschneiden ... 9
- betrachten ... 9
- Bildrate festlegen ... 11
- öffnen ... 9
- skalieren ... 10

Video übertragen
- via SD Karte ... 8
- via USB ... 8

Video-Bedienfeld ... 9
Videobild ... 11
x-y-Diagramm ... 13
Zeitlupe ... 11

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des auszugsweisen Nachdrucks und der fotomechanischen Wiedergabe, vorbehalten. Irrtum und Änderungen vorbehalten.

© PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, 37079 Göttingen/Germany

B. Inhalt der DVD

Auf der beigefügten DVD befinden sich in den nachfolgend benannten Ordnern und Unterordnern die Videos und Experimente nach Kapiteln und ggf. Unterkapiteln sortiert. Bei den nicht in der Ausarbeitung besprochenen Versuchen sind in den Ordnern zusätzlich txt-Dateien mit den notwendigen Informationen, sofern diese nicht bereits in einem Projekt enthalten sind.

Kapitel 1

„Kameratest_1.avi“ und

„Kameratest_2.avi“

Kapitel 2

Casio EX F1

„Zeitzaehler-2s-300fps.mov“

„Zeitzaehler-2s-600fps.mov“

„Zeitzaehler-2s-300fps.mov“

Casio EX FS10

„Zeitzaehler-1s-210fps.avi“

„Zeitzaehler-1s-420fps.avi“

„Zeitzaehler-1s-1000fps.avi“

Kapitel 3

3.2 Stöße zwischen Luftkissengleitern

3.2.1 Die harte Feder „F3-mm-stehend-bewegt.prj“

3.2.2 Die weiche Feder „F1-mm-stehend-bewegt.prj“

3.3 Looping

3.3.2 Rollendes Darda-Auto „Quant-Ex-Darda-Looping-h=100cm.prj“

3.3.3 angetriebenes Darda-Auto „Quant-Ex-Darda-Looping.prj“

3.3.4 Looping mit Carrera-Auto

„Quant-Ex-Looping-Carrera_300fps-viper-62g.prj“

3.4.4.2 weitere Videos zum Carrera-Bahn-Looping

„Quant-Ex-Looping-Carrera-300fps-Viper.avi“,

„Quant-Ex-Looping-Carrera-300fps-Viper-2.avi“ und

„Quant-Ex-Looping-Carrera-300fps-Viper-fail.avi“

3.4 Maxwell-Rad

„Quant-Ex-Maxwellrad-Phywe.prj“ und

„Quant-Ex-Maxwellrad-PhyWe-Regressionsgerade.xlsx“

3.5 Metallkugel auf Glasplatte

„Quant-Ex-Metallkugel-300fps.prj“ und

„Quant-Ex-Metallkugel-300fps-Excel.xlsx“

Kapitel 4

4.1. Lichtquellen bei 50 Hz

4.1.1 Die Glühbirne

„Qual-Ex-Gluehbirne_ausschalten.avi“,

„Qual-Ex-Gluehbirne_einschalten.avi“,

„Qual-Ex-Gluehbirne-I-gross-1200fps.avi“, sowie

„Qual-Ex-Gluehbirne-I-klein-1200fps.avi“

4.1.2 Die Leuchtstoffröhre

„Qual-Ex-Leuchtsoffroehre-einschalten.avi“ und

„Qual-Ex-Leuchtstoffroehre-betrieb.avi“

4.1.3 Die LED „Qual-Ex-Graetz-Schaltung_4_1200fps.avi“

4.2 Der platzende Luftballon

„Qual-Ex-Luftballon_mit_Rauch_platzt-1200fps.avi“,

„Qual-Ex-Wasserballon_600fps.avi“ und

„Qual-Ex-Wasserballon_1200fps.avi“

4.3. Der Tropfen auf die Wasseroberfläche

„Qual-Ex-Wassertropfen-1200fps.avi“,

„Qual-Ex-Wassertropfen-petrischale_1_trocken-nass!.avi“ und

„Quant-Ex-2Wassertropfen-Wasser.avi“

4.4. Vermsichen v. Flüssigkeiten

„Qual-Ex-Eintropfen.avi“,

„Qual-Ex-Fluessigkeit-vermischen.avi“,

„Qual-Ex-freejet.avi“ und

„Qual-Ex-Stauwirbel.avi“

Video-Anhang „Allgemeiner Hinweis.txt“

Affen- bzw. Hasenschuss

„Affenschuss-10x Zeitlupe.avi“

„Affenschuss-10xZeitlupe-Analysefertig.avi“

„Affenschuss-20x Zeitlupe.avi“

„Affenschuss-20xZeitlupe.avi“

„Hasenschuss.avi“

Fallturm

„Fallturm evakuiert.avi“

„Fallturm nicht evakuiert.avi“

„Fallturm_normal_300fps.avi“

„Fallturm_vakuum_300fps.avi“

Flummis auf Glasplatte

„Quant-Ex-Ballturm_300fps.avi“

„Quant-Ex-blauer-Flummi_300fps.avi“

„Quant-Ex-ungleiche-Baelle_300fps.avi“

„Quant-Ex-vorgespannter-Gummi_300fps.avi“

Impulserhaltung am Luftkissentisch

„Quant-Ex-LKT-grosse-Puks_dezentral_1.avi“

„Quant-Ex-LKT-kleine-Puks.avi“

„Quant-Ex-LKT-kleine-Puks_dezentral_1.avi“

Kondensator platzt „Qual-Ex-Kondensator-1200fps(40x-Zeitlupe)-groß.avi“

Kurvenfahrten mit Carrerabahn

„Quant-Ex-Kurvenfahrt_ok.avi“,

„Quant-Ex-Kurvenfahrt_powerslide.avi“,

„Quant-Ex-Kurvenfahrt-fail.avi“

Makroskopische Paulfalle „Paulfalle-avi.avi“

Matchbox-Unfall

„Quant-Ex-Auto-silber-rot-300fps.prj“, sowie

„Quant-Ex-Auto-silber-rot-600fps.prj“

Projekt-Stimmgabel-Einschwingen „Quant-Ex-Schwingung-lang.prj“

Raketenstart

„Quant-Ex-Rakete_300fps.avi“ und

„Quant-Ex-Rakete_600fps.avi“

Schräger Wurf mit Darda-Auto „Quant-Ex-Darda-Bahn-schraeger-wurf_gut.prj“

Stehaufkreisel „Qual-Ex-Stehaufkreisel.avi“

Danksagung

Mein Dank gilt allen, die mir in den vergangenen Monaten hilfreich zur Seite standen, allen voran aber Herrn Dr. Thomas Wilhelm. Jederzeit stand er mir mit einem offenen Ohr für Fragen, sowie hilfreichen Anregungen zur Seite. Außerdem ermöglichte er es mir, mit ihm zusammen zwei Artikel noch während der Erstellungsphase zu veröffentlichen. Mit viel Geduld, jeder Menge hilfreicher Tipps und seinen Erfahrungen (nicht nur mit der Videoanalyse) hat er eine eine gute Arbeitsathmosphäre geschaffen, in der ich frei experimentieren und auszuprobieren konnte. Ganz herzlichen Dank dafür!
Mein Dank gilt auch in besonderer Weise Frau Sara Wilhelm für die uneigennützige Bereitstellung der Carrerabahn und Herrn Daniel Wilhelm für die unschätzbare Hilfe beim Testen der Bedienungsanleitung!
Viel Zeit und wahrscheinlich auch viele Nerven haben die Mitarbeiter der „großen Sammlung“, Herr Roland Wenisch, Herr Peter Freibott und Herr Florian Stimmler in die Aufnahme einiger Experimente investiert. Die meisten Videos (Affenschuss, Fallturm, etc.) befinden sich auf der beliegenden DVD und werden in der Vorlesung „Einführung in die Physik“ eingesetzt. Vielen Dank, dass ihr die ein oder andere Überstunde in Kauf genommen habt!
Ich möchte mich auch bei den Mitarbeitern der Chemie-Nebenfach-Vorlesungsvorbereitung, insbesondere bei Herrn Ingo Ehrensberger für den Versuch bedanken, druckstabilen Rauch zu erzeugen. Leider hat das nicht so geklappt, wie wir es uns gewünscht hatten. So blieben einige Versuche ungefilmt.
Auch Herrn Dr. Stephan Lück gilt mein Dank. In anregenden Diskussionen half er mir unter anderem tiefergehende Einblicke in die Hintergründe turbulenter Systeme zu erhalten. Ein besonderer Dank geht an Katrin Löffler und Marina Nahm, welche beide durch ihr technisches Geschick und Kreativität Lösungen für den Aufbau einiger Experimente geschaffen haben. Außerdem standen sie mir immer hilfreich zur Seite, wenn ich in der „kleinen Sammlung“ etwas gesucht habe (und sei es nur die Zerstreuung gewesen). Liebe Katrin, du hast dir so sehr gewünscht, dass es in der Zulassungsarbeit steht. „Ich sach ma“ den Wunsch möchte ich dir Erfüllen.
Nicht zuletzt gilt auch mein Dank Herrn Suleder, dem Programmierer der verwendeten Videoanalysesoftware measure dynamics. Er half von Anfang an, Schwierigkeiten, welche sich durch die Hochgeschwindigkeitskamera ergaben, schnell in den Griff zu bekommen. Es war äußerst hilfreich, dass sich auch das Programm ein bisschen an die neuen Notwendigkeiten der Kamera angepasst hat. Damit trug er in einem nicht unerheblichen Maße zum Gelingen dieser Arbeit bei.
Mein Dank gilt auch dem Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, insbesondere dem Lehrstuhlinhaber Prof. Dr. Thomas Trefzger. Die Bereitstellung des Büros, die Anschaffung der Kamera und die Erfüllung der ein oder anderen Wünschen legte die Grundlage für diese Arbeit.
Ein besonderes Wort des Dankes geht an Herrn Dr. Oliver Geissler vom Lehrstuhl

Zoologie II an der Biologischen Fakultät der Universität Würzburg. Dank seiner Hilfe konnte ich die Casio EX F1 mit einer „herkömmlichen“ Hochgeschwindigkeitskamera direkt vergleichen. Herzlichen Dank für die Zeit, die sie freiwillig zum Gelingen dieser Arbeit investiert haben!
Danken möchte ich auch meinen Mäzenen und Förderern; meinen Eltern, die mich geduldig, manchmal kritisch hinterfragend bei meinen Plänen unterstützen. Insbesonder danke ich Martina Hartwig, die sich trotz kleinem Kind und Promotion die Zeit genommen hat, diese Staatsexamensarbeit Korrektur zu lesen
Schließlich geht mein besonderer Dank an meine Freundin, Linda Kemmer, welche sich die Zeit für das Korrekturlesen genommen hat. Außerdem hat sie dafür gesorgt, dass weder diese Ausarbeitung noch die Vorlesungen und Übungen zu kurz kommen. Vielen Dank dafür!

Diese Staatsexamensarbeit wäre ohne die Hilfe dieser vielen Leute wohl so nicht möglich gewesen!

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit in allen Teilen selbstständig gefertigt und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Abbildungen habe ich, soweit nicht anders angegeben, selbst erstellt.

Würzburg, den _____

_____

Maximilian Michel