

**Bayerische
Julius–Maximilians–Universität
Würzburg**

Erste Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien
Herbst 2008

Digitale Videoanalyse von Bewegungen –
Neue Möglichkeiten mit der Software „*measure Dynamics*“

Michael Benz

2008

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Grundlagen zur Videoanalyse	7
1.1 Gründe für den Einsatz im Physikunterricht	7
1.2 Allgemeine Hinweise zum Videodreh	8
2 Technische Grundlagen	11
2.1 Die digitale Videoaufnahme	11
2.1.1 Frame-Rate und Auflösung	11
2.1.2 Übertragung auf den PC und Komprimierung	12
2.1.3 Bearbeitung des Videos am PC	15
2.2 Kameratypen	17
2.2.1 Der professionelle Camcorder	17
2.2.2 Der digitale Fotoapparat	19
3 Neue Möglichkeiten mit <i>measure Dynamics</i>	23
3.1 Allgemeine Erläuterungen	23
3.2 Diagramme – in Echtzeit gezeichnet	25
3.3 Dynamisch ikonische Repräsentationen – Vektoren	27
3.4 Gleichzeitige Erkennung mehrerer Objekte	30
3.5 Serienbilder	33
3.6 Variables Koordinatensystem	36
3.7 Stroboskopbilder	43
4 Anwendungsbeispiele	49
4.1 Die Einführung von Diagrammen	49
4.1.1 t - x -Diagramme am Beispiel „Rollenfahrbahn“	49
4.1.2 t - v -Diagramme am Beispiel „Federpendel“	53
4.2 Quantitative Betrachtung der Fallkegel	54
4.3 Die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung	60
Zusammenfassung und Schlussgedanke	67

Literaturverzeichnis	69
Abbildungsverzeichnis	71
Inhaltsübersicht der CD	75
Danksagung	77
Selbständigkeitserklärung	79

Vorwort

Während des Studiums der Physik für das Lehramt an Gymnasien kommt man an der Universität Würzburg im Rahmen des Fortgeschrittenpraktikums Teil 3 mit der computergestützten Messwerterfassung in Kontakt. Als eines dieser Messwerterfassungssysteme wurde im August 2006 die digitale Videoanalyse mit dem Programm Viana durchgeführt. Das Prinzip der digitalen Videoanalyse, das Erkennen und Verfolgen eines Objektes in einem Video, eröffnete dabei theoretisch sehr viele Möglichkeiten, die leider in ihrer praktischen Umsetzung an der Qualität und Ausstattung der Software scheiterten. Auch ein Vergleich mit weiteren deutschen Videoanalyseprogrammen zeigte wenig zufriedenstellende Ergebnisse.

Mit *measure Dynamics* hat die Lehrmittelfirma Phywe ein Programm zur digitalen Videoanalyse auf den Markt gebracht, das neue Möglichkeiten bietet, die über die der bisherigen deutschen Videoanalyseprogramme hinausgehen. Die neuen Optionen dieser Software und die daraus resultierenden Einsatzmöglichkeiten der Videoanalyse im Physikunterricht, speziell mit *measure Dynamics*, sind Gegenstand dieser Staatsexamensarbeit.

Im ersten Kapitel dieser Arbeit werden Gründe für den Einsatz der digitalen Videoanalyse aus didaktischer Sicht erläutert. Weiterhin werden allgemeine Tipps zur Erstellung von Videos gegeben, die man in Hinblick auf die anschließende Analyse beachten sollte. In Kapitel 2 werden technische Grundlagen angesprochen. Auf die Übertragung der Videos auf den Computer und die eventuell nötige Nachbearbeitung wird eingegangen. Zwei grundlegend verschiedene Kamertypen, ein professioneller Camcorder und eine digitale Kompaktkamera, werden vorgestellt und ihre Tauglichkeit zur Erstellung von Analyse-Videos geprüft. Diese beiden Kapitel sollen dem Leser das notwendige Grundwissen und einige nützliche Tipps liefern, um selbst Videos aufnehmen, bearbeiten und auswerten zu können.

Für die Kapitel 3 und 4 wurden Videos von verschiedenen Versuchen gedreht und mit *measure Dynamics* ausgewertet. In Kapitel 3 werden die neuen Features von *measure Dynamics* an Hand von Beispielen vorgestellt. Im vierten Kapitel werden Beispiele für die Anwendung der digitalen Videoanalyse im Physikunterricht gegeben.

Alle Abbildungen, für die im Abbildungsverzeichnis keine Quelle angegeben ist, wurden im Rahmen dieser Arbeit selbst erstellt. Dieser Arbeit ist eine CD mit allen erwähnten Videos und Projekte beigelegt. Eine Inhaltsübersicht der CD befindet sich auf Seite 75.

Kapitel 1

Grundlagen zur Videoanalyse

1.1 Gründe für den Einsatz im Physikunterricht

Im Physikunterricht eröffnet die moderne Videotechnik völlig neue Lehr- und Lernmethoden.¹ Vorteile des Videoeinsatzes sind u.a. die Aufnahme von Versuchen, die im Klassenzimmer nicht durchgeführt werden können, oder auch die Möglichkeit, die Betrachtung beliebig oft zu wiederholen.²

Im Rahmen dieser neuen Methoden ist die Videoanalyse ein optisches Messverfahren zur Bestimmung einer zweidimensionalen Ortskurve. Die Ortskurve wird im Videoanalyseprogramm nach einer Strecken- und Zeitkalibrierung durch Maßstab bzw. Bildfrequenz errechnet.³

Gerade im Kinematikunterricht bietet sich die Videoanalyse als Messverfahren an. Nach WILHELM (2002) lassen sich Fehlvorstellungen der Schüler in der Kinematik vermeiden, wenn direkt mit der zweidimensionalen Bewegung begonnen wird.⁴ Zur vektoriellen Beschreibung zweidimensionaler Bewegungen eignet sich die Videoanalyse. Als universelles Messverfahren kann sie durchgehend in der Kinematik eingesetzt werden.³

Die mögliche Untersuchung realer Alltagsbewegungen erweist sich als weiterer Vorteil der Videoanalyse. *„Will man nicht nur bei einer theoretischen und rechnerischen Behandlung stehen bleiben, sondern reale Bewegungen betrachten, bietet sich heute [...] vorrangig die Videoanalyse an.“* (Wilhelm u. a. 2003, S.23)

Zudem bietet sich die Videoanalyse zum Einsatz im Gruppenunterricht an. So können Schülergruppen im Computerraum selbst Videos auswerten. Auch das selbständige Erstellen von Videos durch die Schüler ist vorstellbar.³

Mittlerweile ist die Videoanalyse auch in einige Lehrpläne als fester Unterrichtsbestandteil

¹(Hilscher 2000, S.193)

²(Koch 2005, S.38)

³(Gröber u. a. 2005, S.41)

⁴(Wilhelm und Heuer 2002)

aufgenommen. Im bayerischen Lehrplan für das G8 ist die Videoanalyse in der 9. Jahrgangsstufe im Rahmen der Kinematik und Dynamik geradliniger Bewegungen als Vertiefungsmöglichkeit genannt.⁵ Die videounterstützte Analyse von Bewegungen als Informations- und kommunikationstechnische Grundbildung und Medienerziehung steht im hessischen G8-Lehrplan für den Mechanikunterricht in der 8. Jahrgangsstufe.⁶ In neueren Schulbüchern für den Physikunterricht ist die Videoanalyse als Methode zur Messwerterfassung angegeben.⁷

1.2 Allgemeine Hinweise zum Videodreh

Es gibt einige grundlegende Hinweise, die bei dem Erstellen von Videos zur digitalen Analyse berücksichtigt werden sollten. Dazu sollte man sich zunächst klar machen, wie das Videoanalyseprogramm das zu untersuchende Objekt erkennt und verfolgt. Das in dieser Arbeit benutzte Programm *measure Dynamics* bietet die Möglichkeit der Farbanalyse, der Bewegungserkennung und die gleichzeitige Verwendung beider Analysearten. Dabei werden die geometrische Form und die Größe des Objekts erkannt. Zur Hervorhebung des sich bewegenden Objekts bieten sich daher nach Möglichkeit rotationssymmetrische Markierungen an, damit sich die Form und die Größe des Objekts beziehungsweise der Markierung während der Bewegung nicht ändern. Kreise in kräftigen, hellen Farben, die aus festem Papier ausgeschnitten werden, haben sich bewährt. Sollte die automatische Analyse trotzdem Fehler aufweisen, kann auf die manuelle Analyse zurückgegriffen werden.

Als Grundvoraussetzung für ein gutes Video kann wohl durchaus die ruhige Kameraführung genannt werden. Da für eine anschließende, sinnvolle Analyse des Videos Kameraschwenks sowieso unerwünscht sind, ist die Verwendung eines Statives dringend zu empfehlen. Ein Stativ garantiert eine Aufnahme ohne störende Verwacklungen.

Weiterhin sollte grundsätzlich eine manuelle Fokussierung vorgenommen werden. So kann verhindert werden, dass der Autofokus zwischen dem Hintergrund und dem nur kurzzeitig im Fokusbereich liegenden Objekt wechselt.

Ein weiterer Punkt ist die Beleuchtung. Eine gute, helle Ausleuchtung erlaubt kürzere Belichtungszeiten, was besonders bei der Aufnahme schneller Bewegungen wichtig ist. Durch eine großen Blendenöffnung, also eine kleine Blendenzahl, erreicht man eine kurze Belichtungszeit. Dies hat zwar auch eine geringe Schärfentiefe zur Folge, was aber keine Probleme verursacht, da sich das Objekt nur in einer Ebene bewegt. Diese Bewegungsebene sollte nach Möglichkeit senkrecht zur optischen Achse stehen. Die Mitte des Videos sollte der „Mitte“ der Bahnkurve, also der Mitte der bei der Bewegung überstrichenen Fläche ent-

⁵<http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1/g8.de/index.php?StoryID=26438>, zuletzt aufgerufen am 23.11.2007

⁶(Hes 2005, S.12)

⁷z.B. (Bredthauer u. a. 2007, S.21)

sprechen. Somit lassen sich Verzerrungen im Video vermeiden. Bei der Ausleuchtung ist zudem die Schattenbildung zu berücksichtigen. Besonders der Schattenwurf des sich bewegenden Objekts ist zu vermeiden, da sich dieser logischerweise stets mitbewegt und im Video irritierend wirkt.

Außerdem sollte ein möglichst ruhiger, einheitlicher Hintergrund gewählt werden. Dieser sollte gegenüber dem zu analysierenden Objekt einen guten Kontrast haben. Um Spiegelungen zu vermeiden sollte ein matter Hintergrund gewählt werden. In der Schule bietet sich die saubere Tafel als Hintergrund an, falls die Farbe des Objekts beziehungsweise der Markierung passend ist. Auch in dieser Arbeit wurden viele Videos vor der Tafel gedreht. Abbildung 1.1 zeigt in einem Screenshot aus *measure Dynamics* ein Standbild aus einem Video zum Fadenpendel. Vor dem einheitlich grünen Hintergrund bietet die rote Kugel des Pendels einen guten Kontrast. Eine zusätzliche Markierung der Kugel ist hier nicht erforderlich.

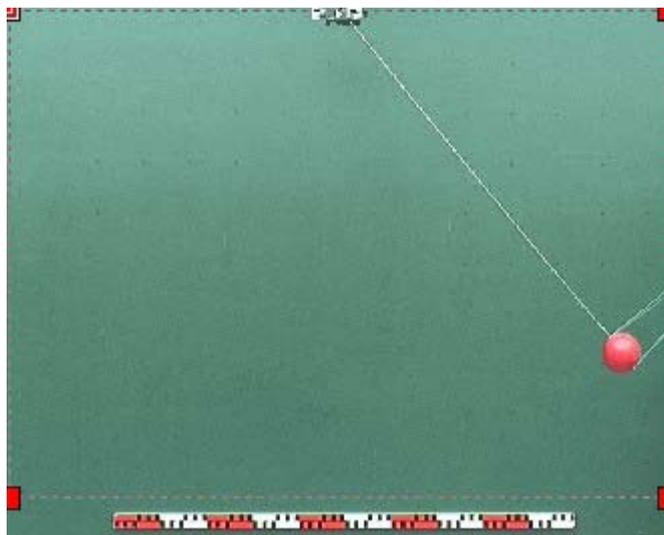


Abbildung 1.1: Videoausschnitt

In dieser Abbildung kann man zwei weitere Punkte sehen, die es zu beachten gilt. Um eine sinnvolle Auswertung durchführen zu können, sollte immer ein Maßstab im Bild zu sehen sein. Da die Ortskoordinaten in Pixeln registriert werden, ist zur Auswertung in realen Einheiten die Angabe einer Referenzlänge nötig. Theoretisch kann zwar der Durchmesser der roten Kugel gemessen und als Maßstab verwendet werden, eine präzisere und schönere Lösung ist aber eine an der Tafel befestigte Messlatte. Weiterhin erkennt man rechts im Bild einen weißen Faden, der von der Kugel weg aus dem Bild führt. Diese „Startvorrichtung“ wurde bewusst eingesetzt. Es zeigte sich bei der Analyse einiger Videos, dass eine Hand, die ein Objekt losläßt und dann aus dem Bild gezogen wird, in manchen Fällen bei der automatischen Analyse fälschlicherweise als Objekt erkannt wird. Um diese Fehlanalyse von Beginn an auszuschließen, wurde der Trick mit dem Faden benutzt. Außerdem wird so verhindert, dass das Objekt durch die Hand verdeckt wird. Bei *measure Dynamics* besteht zusätzlich die Möglichkeit den Analysebereich einzuschränken (vgl. Abb. 1.1). So kann die Messlatte

bei geschickter Platzierung, wie hier am unteren Bildrand, von der Analyse ausgeschlossen werden.

Kapitel 2

Technische Grundlagen

In diesem Kapitel werden technischen Grundlagen behandelt, um dem Leser einen Einblick in die Voraussetzungen und Möglichkeiten der Videoaufnahme und anschließenden Bearbeitung am PC zu geben. Dabei soll das Thema dieser Arbeit, das Erstellen von Videos und die Analyse mit *measure Dynamics*, nicht aus den Augen verloren werden. Es werden einfache Grundlagen der digitalen Videotechnik angesprochen. Ein Vergleich zweier sehr verschiedener Kameratypen soll dem Leser und Anwender einen Überblick über die Tauglichkeit bei der Verwendung zur digitalen Videoanalyse verschaffen.

2.1 Die digitale Videoaufnahme

Um Videos am Computer bearbeiten zu können, müssen diese natürlich in digitaler Form vorliegen. Dabei spielt es zunächst keine Rolle, ob ein analog aufgenommenes Video digitalisiert wird, oder ob die Aufnahme direkt mit einer digitalen Videokamera erfolgt. In den letzten Jahren hat die digitale Videotechnik allerdings enorme Fortschritte gemacht, so dass das „manuelle“ Digitalisieren analoger Aufnahmen, zumindest für die hier angesprochene Verwendung im Rahmen der Videoanalyse, kaum nötig sein dürfte.

2.1.1 Frame-Rate und Auflösung

Gerade im Hinblick auf die digitalen Videoanalyse ist es wichtig sich mit der Frame-Rate einer Aufnahme zu befassen. Als Frame-Rate bezeichnet man die Anzahl der pro Sekunde aufgenommenen beziehungsweise gezeigten Einzelbilder oder Frames. Um eine fließende Bewegung wahrnehmen zu können, müssen etwa zehn Frames pro Sekunde gezeigt werden. Eine höhere Frame-Rate führt zu einer flüssigeren Wiedergabe. Bei Kinofilmen werden 24 Bilder pro Sekunde gezeigt, Fernseher arbeiten, abhängig von den international verschiedene

Videostandards, mit ca. 30 Frames pro Sekunde.¹ In Deutschland liegt der Videostandard bei 25 Frames pro Sekunde. Bei einem Halbzeilensprungverfahren mit 25 Hz ergibt sich im Fernseher eine Bildwiederholrate von 50 Hz.

Bei der digitalen Videoanalyse ist die Frame-Rate von besonderer Bedeutung. Aus ihr ergibt sich der Zeitabstand Δt zwischen zwei Einzelbildern. Mit diesem Zeitabstand werden aus dem bekannten Ort die Geschwindigkeit und die Beschleunigung bestimmt. Das Programm *measure Dynamics* erkennt die Frame-Rate des geladenen Videos selbständig und errechnet daraus die jeweiligen Zeitabstände.

Besonders bei günstigen Kameras, wie z.B. Webcams, kann es dennoch nötig sein, die Frame-Rate selbst zu bestimmen. Anregungen dazu finden sich u.a. bei LIPPKY.² Einige Webcams verfügen aber auch über eine dynamische Frame-Rate. Eine Analyse solcher Videos ist zwar möglich, eine rechnerische Auswertung mit den gewonnen Daten ist aber wegen der unregelmäßigen Zeitabstände schwierig.

Die Auflösung bezeichnet die Menge an Information in einem Frame. Sie wird durch die Anzahl der Pixel, also der einzelnen Bildpunkte dargestellt. Üblicherweise erfolgt die Angabe als „Anzahl der horizontalen Pixel mal Anzahl der vertikalen Pixel“ also z.B. 1024x768. Bleiben alle anderen Faktoren unverändert, so führt eine höhere Auflösung zu einer besseren Bildqualität.¹ Die Auflösung, also die Qualität der Bilder, hat natürlich direkten Einfluss auf die Datenmenge. Bei höherer Auflösung besteht größerer Speicherbedarf. Es gilt daher, eine Kompromiss zwischen Bild- bzw. Videoqualität und dem dafür nötigen Speicherplatz zu finden. Videos stellen meist eine sehr große Datenmenge dar. Aufnahmen, die zur Bearbeitung mit einem Videoanalyseprogramm erstellt wurden, sind zwar in der Regel nur einige Sekunden lang, aber auch diese Videos können viele MB Speicher benötigen. Dies führt zur Notwendigkeit der Komprimierung.

2.1.2 Übertragung auf den PC und Komprimierung

Wie bereits zu Beginn dieses Abschnitts erwähnt, sind digitale Videokameras weit verbreitet. Soll dennoch eine Aufnahme im analogen Format auf einen Computer übertragen werden, so ist ein Videoaufnahmegerät nötig. Dies ist in der Regel eine Videoaufnahmekarte, die in den PC eingebaut wird.

Digitale Videokameras wandeln die aufgezeichneten Informationen direkt in ein digitales Signal um. Die Daten können also ohne weitere Bearbeitung zum Computer übertragen, bzw. vom Computer ausgelesen werden. Die Verbindung zwischen Kamera und Computer erfolgt meist über eine Schnittstelle nach dem IEEE-1394 Standard, der auch als *FireWire* oder *i.Link* bekannt ist. Firewire-Schnittstellen erlauben Übertragungsraten bis zu 400

¹(Ado 2000, S.4)

²(Lippky 2003, S.31)

Mbit/s. Seit 2002 existiert der IEEE-1394b Standard mit 800 Mbit/s Übertragungsrate.³ Über die FireWire-Verbindung (vgl. Abb.2.1) werden alle Daten (Audio, Video, Timecodes) übertragen und je nach Software ermöglicht sie zusätzlich die Steuerung der Kamera über den Rechner. Dabei werden vier Adern zur Datenübertragung verwendet. Optional können zwei zusätzliche Adern zur Stromversorgung dienen, was bei dem Datentransfer von einer Videokamera in der Regel aber nicht nötig ist. In Laptops befindet sich aus Platzgründen meist ein Anschluss für einen 4-Pol-Stecker.



Abbildung 2.1: 6pol.(oben) bzw. 4pol. FireWire Stecker

Eine weitere Möglichkeit zur Datenübertragung stellt die USB-Schnittstelle dar. USB-Verbindungen eignen sich für nahezu alle externen Geräte wie Tastatur, Maus, Massenspeicher und Drucker. Wegen der im Vergleich zu FireWire geringeren Datenübertragungsrate von etwa 320 Mbit/s bei Geräten nach den neuesten Standards, sind bei digitalen Videokameras jedoch überwiegend FireWire-Anschlüsse zu finden.⁴

Um die aufgenommenen Videos auf den PC zu übertragen wird eine Software benötigt. Microsoft stellt unter Windows XP mit dem *Movie Maker* ein geeignetes Programm zur Verfügung. Alternativ gibt es natürlich zahlreiche andere Programme auf dem Markt. Als Freeware ist *Virtual Dub* weit verbreitet. Alle Videos in dieser Arbeit wurden mit Virtual Dub 1.7.6 auf den PC übertragen und bearbeitet. Im sogenannten „capture mode“ wird der aufgenommene Film von der an den Computer angeschlossenen Kamera übertragen und als AVI-Datei abgespeichert. Dieses „Original“ ist zunächst sehr groß (etwa 200 MB pro Minute ohne Übertragung der Audiodaten). Falls im Anschluss keine Bearbeitung des Videos mehr vorgesehen ist, sollte man daher auf jeden Fall vor der Übertragung eine Komprimierung des Videos einstellen. Wird das Video nach der Übertragung noch weiter bearbeitet (z.B. durch räumliche und zeitliche Begrenzungen), kann die Komprimierung auch später erfolgen. Grundsätzlich ist zu erwähnen, dass Videos natürlich bereits bei der Digitalisierung in der Kamera komprimiert werden. Ansonsten würde sich bei einer Auflösung von 720x486 Pixeln und einer Frame-Rate von 30 Bildern pro Sekunde ein Speicherbedarf von ca. 1,5 GB pro Minute ergeben. Bei DV-Formaten beträgt diese innere Komprimierung 5:1.⁵

Zur Einstellung der Komprimierung, egal ob vor der Übertragung oder bei einer anschließenden

³Daten von http://de.wikipedia.org/wiki/IEEE_1394 am 13.12.2007 entnommen.

⁴Daten von <http://de.wikipedia.org/wiki/Usb> am 13.12.2007 entnommen.

⁵(Ado 2000, S.7)

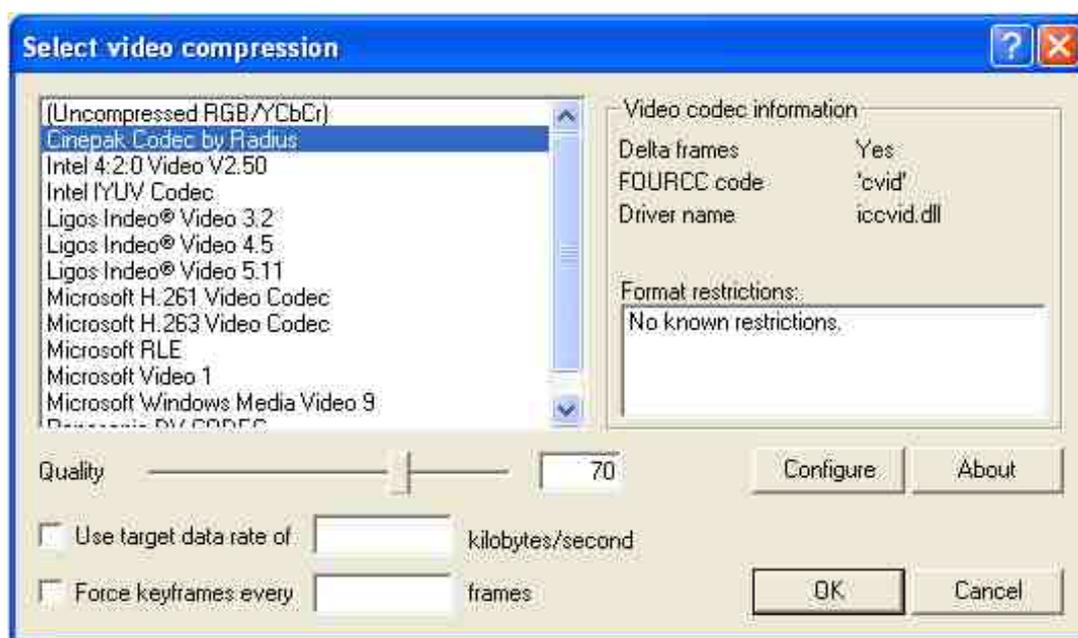


Abbildung 2.2: Codec-Auswahl bei Virtual Dub

den Bearbeitung, findet sich bei Virtual Dub unter dem Oberpunkt „Video“ der Menüpunkt „Compression“ (vgl. Abb.2.2). Dort kann man einen der Codecs auswählen, die auf dem PC installiert sind. Die Bezeichnung Codec setzt sich aus den englischen Begriffen „coder“ und „decoder“ zusammen. Bei einem Codec handelt es sich also um ein Verfahren, das zur Codierung und Decodierung von Daten dient. Dabei erfolgt die Komprimierung der Daten. Es gibt verschiedenste Codecs, die mit unterschiedlichen Komprimierungsverfahren arbeiten. Grob kann man zwischen *Intraframe*- und *Interframe*- Komprimierung unterscheiden. Bei *Intraframe*-Verfahren wird jeder Frame separat komprimiert. Allerdings besteht zwischen benachbarten Frames meist eine sehr hohe Ähnlichkeit. Diese Tatsache wird beim *Interframe*-Verfahren genutzt. Hierbei werden nur die geringen Unterschiede zwischen den einzelnen Frames gespeichert.⁶

Um ein Video auf einem beliebigen Computer abspielen zu können, muss auf diesem Rechner der Codec installiert sein, mit dem das Video komprimiert wurde. Daher ist es bei der Wahl des Codecs, wie in Abbildung 2.2 gezeigt, empfehlenswert, einen gängigen Codec zu verwenden. Obwohl es wesentlich neuere, durchaus bessere Codecs gibt, bietet sich der *Cinepak Codec* an, da dieser bei allen Windowsversionen installiert ist. Somit können die bearbeiteten Videos auf allen Windows-Rechnern benutzt werden, was besonders beim Einsatz auf verschiedenen Computern, zum Beispiel im Gruppenunterricht, wichtig ist. Eine etwas neuere Alternative ist der *Indeo Video Codec*, der allerdings bei Windows XP SP1 nicht vorinstalliert ist.⁷

Bei allen Videos in dieser Arbeit wurde der *Cinepak Codec* verwendet.

⁶(Ado 2000, S.8)

⁷<http://de.wikipedia.org/wiki/Indeo>, zuletzt aufgerufen am 14.12.2007

2.1.3 Bearbeitung des Videos am PC

In diesem Abschnitt wird die Bearbeitung eines Videos kurz erläutert. Da alle Videos in dieser Arbeit in Virtual Dub geschnitten wurden, wird an dieser Stelle nur auf dieses Programm eingegangen. Es ist als Freeware im Internet erhältlich.⁸ Bei dieser Arbeit wurde ausschließlich die englischsprachige Version 1.7.6 verwendet. Die in Windows üblichen Menüs und Befehle werden hier nicht erklärt, vielmehr liegt der Schwerpunkt auf den notwendigen Einstellungen und den empfehlenswerten Bearbeitungsmöglichkeiten. Eine gewisse Erfahrung bei der Arbeit an Windows-PCs wird vorausgesetzt.

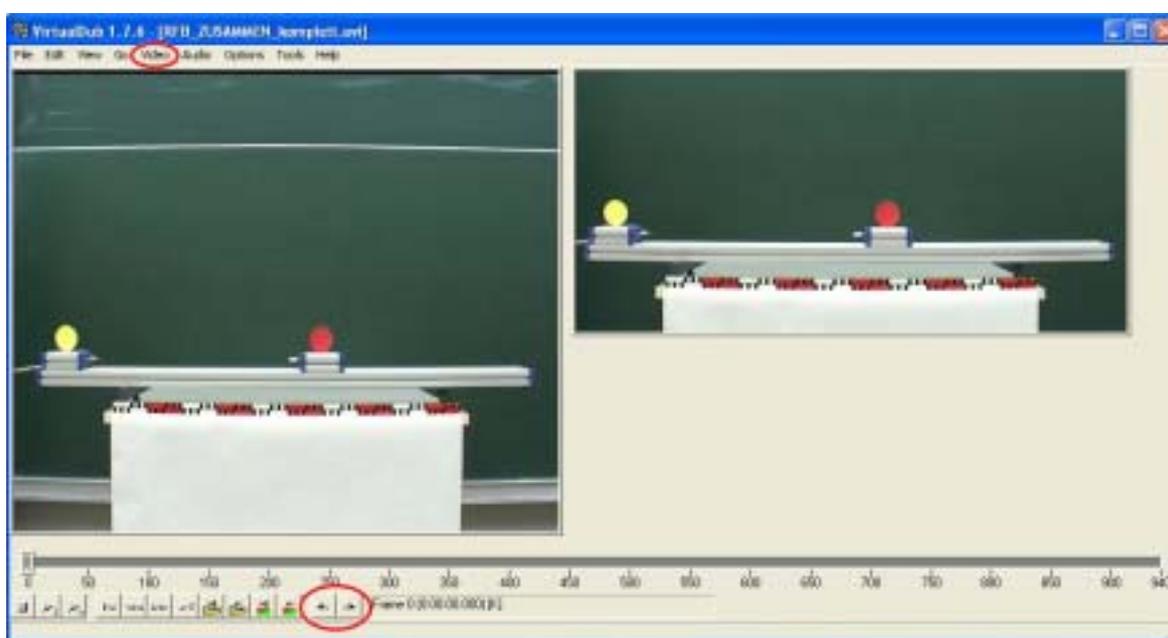


Abbildung 2.3: Virtual Dub Benutzeroberfläche

Der Screenshot in Abbildung 2.3 zeigt die Benutzeroberfläche von Virtual Dub mit einem bereits bearbeiteten Video. Der linke Bildausschnitt zeigt dabei stets das unveränderte Originalvideo. Im rechten Videofenster sieht man das bearbeitete Video mit allen vorgenommenen Veränderungen und Einstellungen. In Abbildung 2.3 wurde lediglich das Video räumlich geschnitten, um die Rollenfahrbahn mit den beiden zu analysierenden Objekten in die Mitte des Videos zu setzen.

Die Leiste unterhalb der beiden Videoausschnitte ist die Frame-Leiste. Hier kann jeder Frame des Videos einzeln angesteuert werden. Das gerade geladene Video hat 940 Einzelbilder. Die Steuerleiste darunter hat die von DVD- oder CD-Spielern bekannten Elemente, wobei zwei Wiedergabetasten vorhanden sind. Die linke Taste startet nur das Originalvideo, die rechte spielt zusätzlich auch das bearbeitete Video ab. Wichtig sind besonders die beiden Tasten ganz rechts in dieser Leiste (rote Markierung in Abbildung 2.3). Mit ihnen wird das Video zeitlich geschnitten, es werden also Start- und Endpunkt auf der Frame-Leiste

⁸<http://www.virtualdub.org>

festgelegt. Das fertig bearbeitete Video wird dann also kürzer sein als das Original. Alle weiteren Einstellungen werden in dem Menüpunkt „Video“ (ebenfalls rot markiert) vorgenommen. Falls die Tonwiedergabe unerwünscht ist, muss lediglich diese unter dem Punkt „Audio“ mit der Wahl von „No audio“ ausgeschaltet werden. Die Menüleiste „Video“ ist in Abbildung 2.4 zu sehen. Auch in der Abbildung 2.4 wurden die wichtigsten Bedienelemente



Abbildung 2.4: Virtual Dub Menüpunkt „Video“

rot markiert. Der restliche Teil des Menüs „Video“ wurde bewusst weggeschnitten, da er keine relevanten Optionen enthält. Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 erklärt, wird unter „Compression“ der Codec gewählt und der Grad der Komprimierung eingestellt (siehe Abbildung 2.2 auf Seite 14).

Der Punkt „Frame Rate“ ist besonders in dem auf Seite 19 beschriebenen Fall, in dem immer zwei aufeinanderfolgende Frames identisch sind, wichtig. Um eine doppelte und damit schlecht auswertbare Analyse zu vermeiden muss deshalb die Option „Process every other frame (decimate by 2)“ angewählt werden. Wird dieser Schritt vergessen, kann im Bedarfsfall alternativ in *measure Dynamics* vor der Analyse Schrittweite „2“ gewählt werden.

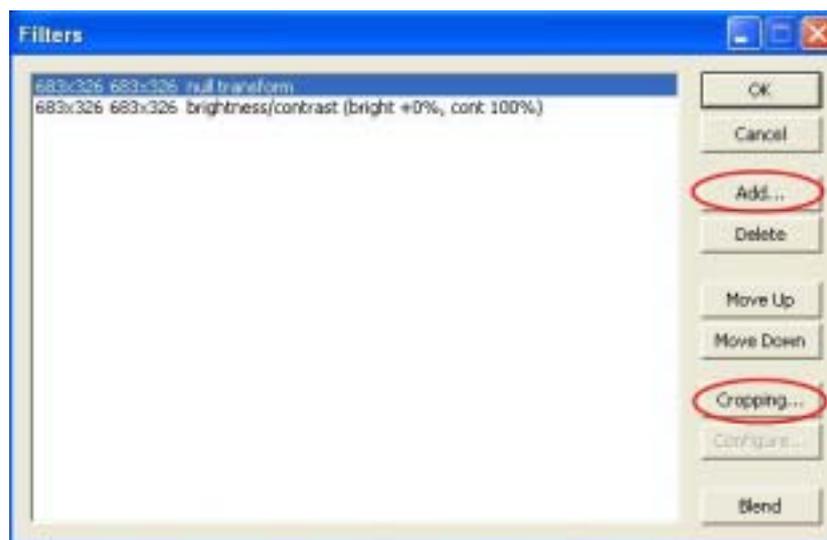


Abbildung 2.5: Virtual Dub Menüpunkt „Filter“

Unter „Filters“ werden alle weiteren Einstellungen wie räumliche Schnitte, Helligkeit oder Kontrast vorgenommen. Abbildung 2.5 zeigt das entsprechende Menüfenster. Über die Schaltfläche „Add“ werden neue Filter hinzugefügt. Besonders interessant ist dabei der Filter

„null transform“, der zum räumlichen Schneiden eines Videos dient. Zunächst wird ein Filter ausgewählt, wie zum Beispiel der „null transform“-Filter in Abbildung 2.5. Mit „Cropping“ öffnet man ein weiteres Fenster in dem man den Wirkungsbereich des Filters einstellen kann. Bei dem Filter „null transform“ wird damit das Videobild auf die gewünschte Größe geschnitten.

Unter der Schaltfläche „Cropping“ findet sich „Configure“. Damit werden die Werte einiger Filter, zum Beispiel der Helligkeit, festgelegt.

Ein weiterer nützlicher Filter ist „rotate“, mit dem das gesamte Video um 90° oder 180° gedreht werden kann. Dieser Filter wurde bei den Videos zu den Fallkegeln verwendet.⁹ Zum Abschluss wird das bearbeitete Video unter „File“ mit „Save as AVI“ gespeichert.

2.2 Kameratypen

Längst ist in vielen Schulen die Videokamera ein Standardgerät. Gerade in den naturwissenschaftlichen Fächern sind oft Kameras vorhanden, die in Verbindung mit einem Videobeamer zur besseren Präsentation von Versuchen oder zur vergrößerten Darstellung kleiner Objekte dienen. Zeitaufwändige Experimente können vor dem Unterricht durchgeführt und gefilmt werden, um anschließend abgespielt zu werden. Ein weiterer Verwendungszweck einer Videokamera in der Schule ist die Analyse von Unterricht und Unterrichtssequenzen in der Lehrerausbildung und in der Unterrichtsforschung.¹⁰

Je nach vorgesehener Anwendung gibt es verschiedenste Kameratypen. Von teuren Videokameras, die auch im professionellen Bereich eingesetzt werden, über die im privaten Bereich üblichen Camcorder und videofähigen Digitalkameras bis zu low-cost-Kameras, zu denen hier auch Webcams gezählt werden. Mittlerweile liefern auch die in zahlreichen Handys integrierten Digitalkameras Videos von so guter Qualität, dass die Analyse dieser Videos aus technischer Sicht durchaus möglich ist.

Im Folgenden wird die Kamera beschrieben, mit der für diese Staatsexamensarbeit Videos erstellt wurden. Um eine mögliche Alternative aufzuzeigen wird eine kompakte digitale Fotokamera vorgestellt.

2.2.1 Der professionelle Camcorder

Der Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik der Universität Würzburg verfügt über einen professionellen digitalen Camcorder (Abb. 2.6). Diese Mini-DV-Kamera von Sony arbeitet mit drei 1/3 " Bildwandlern (3CCD).¹¹ CCD-Chips (Charge Coupled Device: ladungsge-

⁹siehe 3.5 und 4.2

¹⁰(Hilscher 2000, S.194)

¹¹(Son 2000, S.242)



Abbildung 2.6: Sony Mini-DV Kamera DCR-VX2000E

koppeltes Bauelement) sind Halbleiterbauelemente, die mittlerweile die Röhre als Bildwandler abgelöst haben. Man bezeichnet sie auch als Eimerkettenspeicher, weil sie elektrische Ladung wie Wasser in einer Eimerkette von einer Speicherzelle zur nächsten transportieren.¹² Bei der Verwendung von drei CCD-Chips wird das Licht bezüglich der drei Farbwertanteile Rot, Grün und Blau aufgeteilt und diese Spektralanteile werden je einem Wandler zugeführt. In modernen Kameras erfolgt diese Spektralzerlegung fast ausschließlich über einen fest verbundenen Prismensatz, wie in Abbildung 2.7 dargestellt. Dabei sind die Einzelpris-

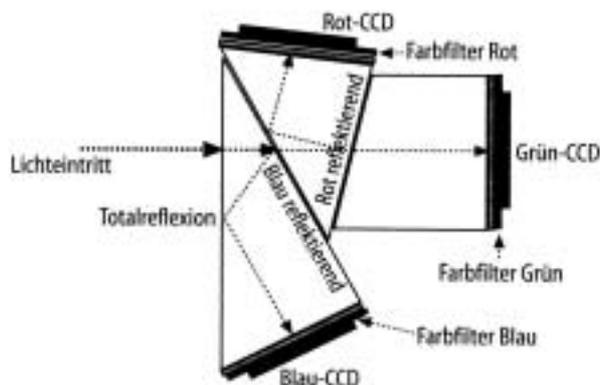


Abbildung 2.7: Strahlteilerprisma (Schmidt 2000, S.226)

men zur Erzielung des Filtereffekts mit dichroitischen Schichten versehen. Der Einsatz von drei separaten Bildwandlern führt zu einer höheren Farbauflösung. Kameras mit nur einem Bildwandler werden daher meist im Amateurbereich verwendet. Die Aufteilung der Farbwerte erfolgt dabei in der Regel über einen Mosaikfilter, bei dem jedem Sensorpixel ein Mosaikpixel als Filter für die Transmission der RGB-Farbanteile zugeordnet ist.¹³ Dieser

¹²(Schmidt 2000, S.214)

¹³(Schmidt 2000, S.225ff)

Camcorder liefert, bedingt durch die für den professionellen Bereich ausgelegte Technik, Bilder und Videos in bester Qualität. Die Datenübertragung auf den PC erfolgt wie bei Camcordern üblich über eine FireWire-Schnittstelle. Der Hauptvorteil bei der Verwendung einer solchen professionellen Kamera zum Erstellen von Videoanalyse-Filmen liegt aber in den vielfältigen Einstellungsmöglichkeiten bezüglich der Aufnahmetechnik.

Es ist, wie bereits erwähnt, grundsätzlich bei allen Aufnahmen zur Videoanalyse zu empfehlen den Autofokus der Kamera zu deaktivieren und die Fokussierung manuell einzustellen. Diese Möglichkeit ist bei der hier vorgestellten Kamera gegeben.

Normalerweise arbeitet diese Videokamera, wie die meisten Camcorder, mit dem Zeilensprungverfahren (engl.: Interlace). Das heißt es werden in jeder Sekunde 50 Halbbilder aufgenommen, die dann zu 25 Vollbildern pro Sekunde zusammengesetzt werden. Gerade bei der Aufnahme von schnellen Bewegungen kann dies zu dem sogenannten Kammeffekt führen. Das aufgenommene Objekt bewegt sich dabei in der Zeit zwischen zwei Halbbildern (bei dieser Kamera 0,02 s) merklich weiter, was zu einer unscharfen Darstellung im Vollbild führt. Der verwendete Sony-Camcorder verfügt daher über einen Progressiv- oder auch Vollbildmodus. Bei dieser Einstellung werden nicht 50 Halbbilder sondern 25 echte Vollbilder pro Sekunde aufgenommen. Allerdings sind in diesem Modus stets zwei aufeinanderfolgende Bilder identisch.¹⁴ Dies muss bei der Bearbeitung und der anschließenden Analyse des Videos berücksichtigt werden. Es gibt mittlerweile auch Videokameras, die 25 verschiedene Vollbilder pro Sekunde aufnehmen.

Bei dem Erstellen von Videos zur digitalen Videoanalyse ist die automatische Regelung der Belichtungszeit durch die Kamera manchmal unpassend. Um unscharfe Bilder, besonders bei schnellen Bewegungen, zu vermeiden, ist es daher sinnvoll und sehr angenehm, dass die Belichtungszeit manuell zu regeln ist. Bei ausreichender Beleuchtung führen kürzere Belichtungszeiten bei sonst gleichbleibender Qualität zu schärferen Aufnahmen.

2.2.2 Der digitale Fotoapparat

Es gibt mittlerweile viele Möglichkeiten digitale Videos aufzunehmen. Eine im Privatbereich häufig genutzte Form ist die digitale Kompaktkamera. Nahezu alle Modelle besitzen einen Videomodus, mit dem neben der eigentlichen Anwendung als Fotoapparat, auch die Aufnahme kurzer Videos möglich ist. Dabei sind hier keine digitalen Spiegelreflexkameras gemeint. Diese haben keine Möglichkeit zur Aufnahme von Videos. Die weite Verbreitung dieser Kompaktgeräte wird hier zum Anlass genommen, die Tauglichkeit für die digitale Videoanalyse zu prüfen.

Es wurde eine Kamera vom Typ EXILIM EX-Z5 von Casio verwendet (siehe Abb. 2.8) Es handelt sich um eine 5-Megapixel-Kamera mit einem 1/2,5 " CCD-Chip. Bilder wer-

¹⁴(Wilhelm u. a. 2003, S.23)



Abbildung 2.8: Digitalkamera Casio EX-Z5

den als JPEG-Dateien abgespeichert, die Videospeicherung erfolgt als Motion-JPEG im AVI-Format.¹⁵

Wie in Abschnitt 1.2 bemerkt ist die Verwendung eines Statives auf jeden Fall ratsam. Mit dem vorhandenen Stativgewinde erfüllt die Digitalkamera diese wichtige Voraussetzung. In neueren Mobiltelefonen befinden sich zwar auch Kameras im Megapixelbereich, allerdings fehlt hier die Möglichkeit ein Stativ zu montieren, was sie zur Aufnahme von Versuchen zur Videoanalyse eher ungeeignet macht.

Die hier vorgestellte Casio-Kamera verfügt zwar über eine Option zur manuellen Fokussierung, allerdings ist die Einstellung sehr unpräzise. Daher wurde für die Aufnahmen in dieser Arbeit entgegen der Empfehlung in Abschnitt 1.2 der Autofokus verwendet. Die Belichtungszeit lässt sich nur für die Fotofunktion der Kamera einstellen, im Videomodus besteht dafür leider keine Möglichkeit. Die Übertragung der Daten auf den Computer erfolgt entweder über einen USB-Anschluss oder über ein direktes Kopieren von der SD-Karte mittels eines Multi-Card-Readers.

Die Frame-Rate der Videos wird in Virtual Dub mit 29,97 Frames pro Sekunde angegeben. In *measure Dynamics* ergeben sich dementsprechend Zeitabstände von 0,03 und manchmal auch 0,04 Sekunden zwischen zwei Einzelbildern.

Die Qualität der Videoaufnahmen liegt deutlich unter der Videoqualität der Sony-Kamera aus Abschnitt 2.2.1. In Abbildung 2.9 sind zwei Aufnahmen eines Versuchs mit Fallkegeln zu sehen. Bild (a) zeigt einen Schnappschuss aus einem Video, das mit dem Sony Camcorder aufgenommen wurde. Dieses und andere Videos zu Fallkegeln werden in einem späteren Teil dieser Arbeit noch verwendet.¹⁶ Um einen Vergleich zu zeigen, wurde bei dem ansonst unveränderten Aufbau ein Video mit der Fotokamera von Casio gedreht (Abbildung 2.9(b)). Der Bildausschnitt der Sony-Kamera war deutlich größer als der Ausschnitt der Digitalkamera, das Video wurde jedoch vor der Analyse mit *measure Dynamics* in Virtual Dub

¹⁵Daten von <http://www.exilim.de/de/exilimzoom/exz5/specifications/> am 18.12.2007 entnommen.

¹⁶siehe 3.5 und 4.2

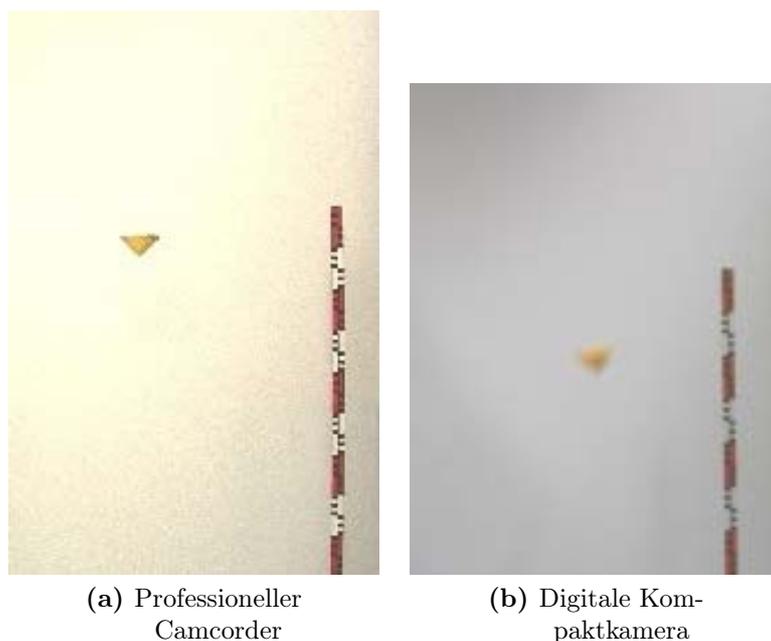


Abbildung 2.9: Unterschiedliche Aufnahmen des gleichen Experimentes

beschnitten. Bei der Darstellung in Abbildung 2.9 wurde darauf geachtet, dass in beiden Bildern der Maßstab in gleicher Größe abgebildet ist. Dadurch ist der Größenunterschied der beiden Bilder (a) und (b) zu erklären. Sehr deutlich wird der Unterschied auch in der Helligkeit der beiden Bilder, wobei beide Videos in Virtual Dub leicht und in gleichem Maße aufgehellt wurden. Ob die gelbe Farbe für den Fallkegel geeignet ist oder nicht, kann sicher diskutiert werden. In den weiteren Aufnahmen wurden auch andere Farben verwendet. Weiter fällt die Schärfe des Bildes, besonders des Fallkegels, auf. In Bild 2.9(b) ist der Fallkegel nur sehr verschwommen und unscharf zu erkennen. Bild (a) zeigt das Objekt dagegen sehr deutlich. Die Aufnahme erfolgte im Progressivmodus der Kamera bei einer Verschlusszeit von $1/1000$.

Trotz der anschaulich schlechteren Videoqualität ist eine Analyse durchaus möglich. Das Video konnte ohne Probleme in *measure Dynamics* automatisch analysiert werden. Abbildung 2.10 zeigt eine Schnappschuss aus *measure Dynamics* mit den eingezeichneten Ortspunkten. Die Analyse erfolgte fehlerfrei. Lediglich die durch die Frame-Rate etwas unpräzise Zeiteinteilung könnte bei der Auswertung der Daten Schwierigkeiten bereiten.

Als weitere Alternative steht der handelsübliche Camcorder für den privaten Bereich zur Verfügung. Diese Geräte liegen sowohl von ihrer Ausstattung als auch von der Videoqualität wesentlich näher an der beschriebene Sony-Kamera als an der digitalen Fotokamera.

Zum Abschluss dieses Kapitels soll nochmals auf die Tatsache hingewiesen werden, dass bei der Erstellung „guter“ Videos für die digitale Analyse vor allem die in Abschnitt 1.2 genannten Kriterien zu beachten sind. Ob die Videos auch „schön“ sind, hängt sicherlich von der Wahl der Kamera ab, spielt für die Videoanalyse an sich aber eine eher unterge-



Abbildung 2.10: Ortspunkte der Analyse

ordnete Rolle. Besonders wenn die Videos für die häufigere Verwendung vorgesehen sind, wird man versuchen ebenso schöne wie gute Videos zu erstellen, falls man die technischen Möglichkeiten zur Verfügung hat. Aber gerade beim Einsatz im Gruppenunterricht, in dem die Schüler eventuell sogar selbst die Videos erstellen sollen, können die videotechnischen Ansprüche ohne größere Probleme reduziert werden.

Kapitel 3

Neue Möglichkeiten mit *measure Dynamics*

Das Programm *measure Dynamics* von Michael Suleder, welches von der Lehrmittelfirma Phywe vertrieben wird, bietet im Rahmen der digitalen Videoanalyse eine Vielzahl von Möglichkeiten zum sinnvollen, unkomplizierten Einsatz im Unterricht. In den folgenden Abschnitten werden anhand von unterschiedlichen Versuchen diese Features vorgestellt und ihr Einsatz im Unterricht erläutert.

Alle Videos in diesem Kapitel wurden mit der in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Sony-Kamera aufgenommen. Der Bearbeitung mit Virtual Dub folgte dann die Analyse mit *measure Dynamics*-Version 1.3f build 280.

3.1 Allgemeine Erläuterungen

Neben den in den einzelnen folgenden Abschnitten beschriebenen Features werden in diesem Teil der Arbeit allgemeine Eigenschaften von *measure Dynamics* vorgestellt.

Zunächst ist hier die gute automatische Analyse der Videos zu nennen. Bei den derzeit erhältlichen deutschen Videoanalyseprogrammen für den Physikunterricht bieten außer *measure Dynamics* nur AVA und Viana eine automatische Analyse. Viana arbeitet dabei mit einer reinen Farbanalyse, was oft zu schlechten Ergebnissen führt oder gar nicht funktioniert. Bei AVA dürfen die Objekte nicht rotieren, was ebenfalls ein Nachteil ist. Zudem sind die Darstellungsmöglichkeiten sehr beschränkt. Wurden bei der Erstellung des Videos die in Abschnitt 1.2 genannten Punkte weitestgehend beachtet, hat *measure Dynamics* dagegen keine Probleme das Objekt zu erkennen und automatisch zu verfolgen. Es besteht aber auch die Möglichkeit der manuellen Analyse, bei der das Objekt in jedem Einzelbild mit dem Mauszeiger markiert wird. Diese Variante bietet sich bei der Einführung der digitalen

Videoanalyse im Unterricht an, da hierdurch das Prinzip des Analyseprogrammes leichter zu erklären und zu verstehen ist. Wenn dieses Prinzip von den Schülern verstanden wurde, bietet die automatische Analyse wesentliche Vorteile. Gerade bei der Analyse langer Videos ist die Zeitersparnis besonders angenehm. Bei der Arbeit zu Abschnitt 4.3 wurde ein Video mit über 2000 Frames analysiert. Für die fehlerfreie Analyse des knapp drei Minuten dauernden Videos mit *measure Dynamics* wurden lediglich 3:30 Minuten benötigt. Bei einem Einsatz im Unterricht könnte diese Zeit, im Gegensatz zur manuellen Analyse, sinnvoll genutzt werden. Gerade beim häufigen Einsatz der Videoanalyse als Messwerterfassungssystem ist diese Zeitersparnis wichtig. Zudem liefert die automatische Analyse meist ein genaueres Ergebnis als die Auswertung per Hand.

Wurde ein Video in *measure Dynamics* geladen und bearbeitet, lassen sich alle Einstellungen und vorgenommene Veränderungen sowie die Analysedaten als sogenanntes „Projekt“ abspeichern. Dabei sollte man für jedes Projekt einen neuen Ordner anlegen, da es sich bei einem Projekt stets um mehrere Dateien verschiedenen Typs handelt. Diese Dateisammlung kann dann über die entsprechende Datei mit der Endung .prj wieder aufgerufen werden. So können analysierte und bearbeitete Videos schnell und einfach wieder verwendet werden. Zusätzlich können von allen Diagrammen und Einzelbildern des Videos Schnappschüsse erstellt werden. Diese können direkt gedruckt, in die Zwischenablage kopiert oder als Bitmap- bzw. JPG-Grafik gespeichert werden. Weiterhin kann unter dem Menüpunkt „Export“ das komplette, in *measure Dynamics* bearbeitete Video exportiert werden. Somit hat man die Möglichkeit einzelne Bilder oder aber das gesamte Video problemlos auf weiteren Rechner abspielen zu können, ohne auf *measure Dynamics* zurückgreifen zu müssen.

Die Daten aus der Tabelle können zudem als .csv-Datei exportiert und mit Excel geöffnet werden. Die Tabelle hat maximal zwölf Tabellenblättern. Jedes Tabellenblatt besteht grundsätzlich aus zehn Spalten mit verschiedenen physikalischen Größen (siehe Abbildung 3.1). Die ersten drei Spalten enthalten die Größen $_t$, $_x$ und $_y$. Diese Größen mit Unterstrich sind die Grundgrößen für die Berechnung aller weiterer Daten.

Die Größe $_t$ gibt die Framezahl wieder, sie durchläuft mit 0 beginnend die natürlichen Zahlen. Über die Frame-Rate des Videos werden dann die Werte der Spalte $t[s]$ errechnet. Im Beispiel in Abbildung 3.1 beträgt die Zeitdifferenz zwischen zwei Frames 0,08 Sekunden, dies entspricht einer Frame-Rate von 12,5 Einzelbilder pro Sekunde. Diese Rate entsteht durch den auf Seite 19 beschriebenen Progressivmodus.

Die Größen $_x$ und $_y$ werden in Pixeln angegeben. Die obere linke Ecke des Videobildes hat dabei für beide Größen den Wert 0. Alle anderen Größen in der Tabelle werden mittels der Skalierung auf die gängigen SI-Einheiten umgerechnet. Der Nullpunkt bezüglich dieser Größen wird ebenfalls über den Menüpunkt „Skalierung“ mit dem Unterpunkt „Ursprung/Richtung“ festgesetzt. Die Berechnung geschieht gleichzeitig mit der Analyse. Daher muss die Skalierung vor der Analyse durchgeführt werden.

Zusätzlich können zu den vorhandenen Größen weitere Spalten angefügt werden. Über ein



t	x	y	t [s]	x [m]	y [m]	v_x [m/s]	v_y [m/s]	a_x [m/s²]	a_y [m/s²]
0	155	180	0,00	0,00	0,00				
1	155	153	0,08	0,00	0,07	0,00	0,75		
2	155	134	0,16	0,00	0,12	-0,06	0,44	-0,39	-4,69
3	154	127	0,24	-0,01	0,14	-0,06	0,00	0,39	-5,47
4	154	134	0,32	-0,01	0,12	0,00	-0,44	0,39	-4,69
5	154	154	0,40	-0,01	0,07	0,00	-0,75	0,00	-2,73
6	154	180	0,48	-0,01	0,00	0,00	-0,88	0,39	0,00
7	154	206	0,56	-0,01	-0,07	0,06	-0,75	0,39	2,73
8	155	226	0,64	0,00	-0,12	0,06	-0,44	-0,39	4,69
9	155	233	0,72	0,00	-0,14	0,00	0,00	-0,39	5,47
10	155	226	0,80	0,00	-0,12	0,00	0,44	0,00	4,69
11	155	207	0,88	0,00	-0,07	0,00	0,75	0,00	2,73

Abbildung 3.1: Tabelle in *measure Dynamics*

Kontextmenü kann eine Gleichung eingegeben werden, um eine beliebige Größe zu berechnen.

3.2 Diagramme – in Echtzeit gezeichnet

Eine große Stärke der Software *measure Dynamics* liegt in der Erstellung von Diagrammen in Echtzeit. Das heißt, dass Diagramme in dem Programm synchron mit dem ablaufenden Video erzeugt werden. Diese schrittweise Erzeugung des Diagrammes ist hilfreich, denn „dann ist es einfacher zu erkennen, welche Phase im Video welchem Grafenteilstück entspricht und somit ist die Kluft zwischen der konkreten visuellen Darstellung des Bewegungsablaufes und seiner abstrakten grafischen Darstellung für den Lernenden leichter zu überbrücken.“ (Wilhelm u. a. 2003, S.24)

Ein Beispiel für den Einsatz von Echtzeit-Diagrammen ist die Betrachtung von Pendelschwingungen. Die Abbildung 3.2 zeigt einen Schnappschuss eines Zeit-Ort-Diagrammes aus dem Projekt „FP_Echtzeitdiagramme.prj“. Dieses Projekt wurde aus einem Video erstellt, das einige Schwingungsperioden eines Federpendels zeigt. Ein Bildausschnitt aus diesem Video findet sich in Abbildung 3.3. Als Pendelkörper wurde ein Tennisball mit einem eingeschraubten Haken verwendet. Dieser ist für eine Spiralfeder der Federhärte von ca. 3,6 N/m weder zu leicht noch zu schwer und bietet mit der kräftigen gelben Farbe einen guten Kontrast zur Tafel. Außerdem hat er eine für die Videoanalyse gut geeignete Größe. Beim Schneiden des Videos in Virtual Dub wurde extra beachtet, dass die Videosequenz in der Aufwärtsbewegung des Pendels im Nulldurchgang beginnt. So konnte bei der Analyse eine Darstellung des Zeit-Ort-Diagramms als eine für den Schüler gewohnte Sinuskurve leicht

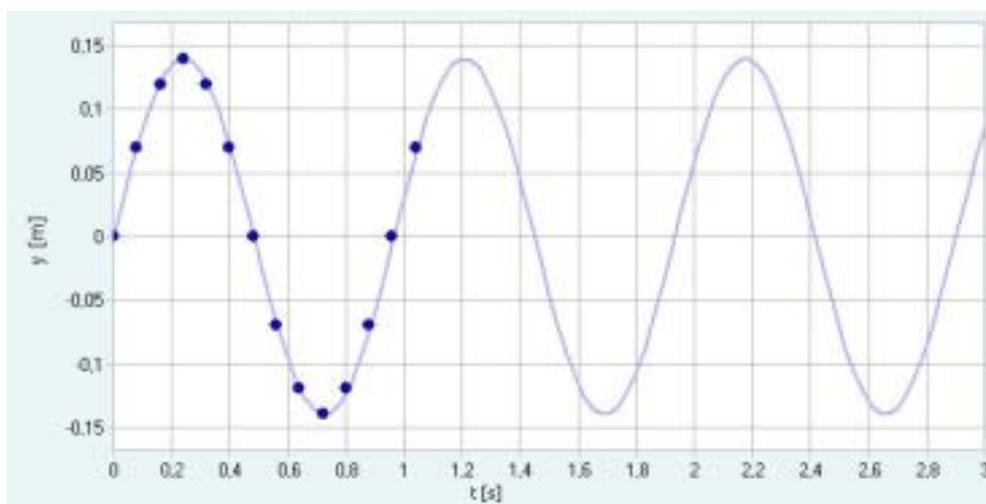


Abbildung 3.2: Erzeugung des Zeit–Ort–Diagrammes in Echtzeit

erreicht werden. Die hellblaue Sinuskurve, die über die gesamte Breite des Diagrammes zu sehen ist, ist eine Fitkurve, die zusätzlich zur Verdeutlichung des eigentlichen Kurvenverlaufs eingefügt wurde. Diese Kurve kann durch wenige Mausklicks wieder ausgeblendet werden, falls der zu erwartenden Kurvenverlauf für die Schüler zunächst nicht sichtbar sein soll. Die dunkelblauen Punkte zeigen die y -Koordinate des Pendelkörpers zur Zeit t . Der Nullpunkt des Koordinatensystems wurde dabei auf den Nulldurchgang des Pendels gelegt. Entscheidend ist hierbei, dass die Koordinatenpunkte des Pendelkörpers in Echtzeit synchron mit der Bewegung des Pendels im Video entstehen. Zum Zeitpunkt des Schnappschusses aus Abbildung 3.2 lief das Video seit einer guten Sekunde, wie man auf der t -Achse ablesen kann.

Weiterführend können Diagramme für Geschwindigkeit und Beschleunigung eingerichtet werden, die ebenfalls in Echtzeit erzeugt werden. In Abbildung 3.3 ist ein Screenshot aus *measure Dynamics* mit den drei Diagrammen für Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung zu sehen. Durch die schrittweise Entstehung der einzelnen Punkte in den drei Graphen können zum Beispiel die Maximal- oder Minimalwerte der Geschwindigkeit oder Beschleunigung sehr deutlich der entsprechenden Position des Pendels im parallel ablaufenden Video zugeordnet werden. Die räumliche Kontiguität von Diagrammen und Video erleichtert dabei diese Zuordnung. Möchte man zum Beispiel wissen, wann die Beschleunigung maximal negativ ist, muss man nicht durch einen Vergleich mit den anderen Diagrammen herausfinden, dass dies im oberen Umkehrpunkt bei Geschwindigkeit Null der Fall ist, sondern kann bei der Betrachtung des Zeit–Beschleunigung–Diagrammes das Video schrittweise bis an die gesuchte Stelle laufen lassen und dort anhalten.

Auch der Zusammenhang der Größen als jeweilige Ableitung wird hier sichtbar. So kann das Projekt „FP_Echtzeitdiagramme.prj“ auch in höheren Jahrgangsstufen verwendet werden. Aus der Sinusfunktion wird durch Ableitung des Ortes nach der Zeit die Kosinusfunktion der Geschwindigkeit und daraus durch erneutes Differenzieren der negative Sinus der

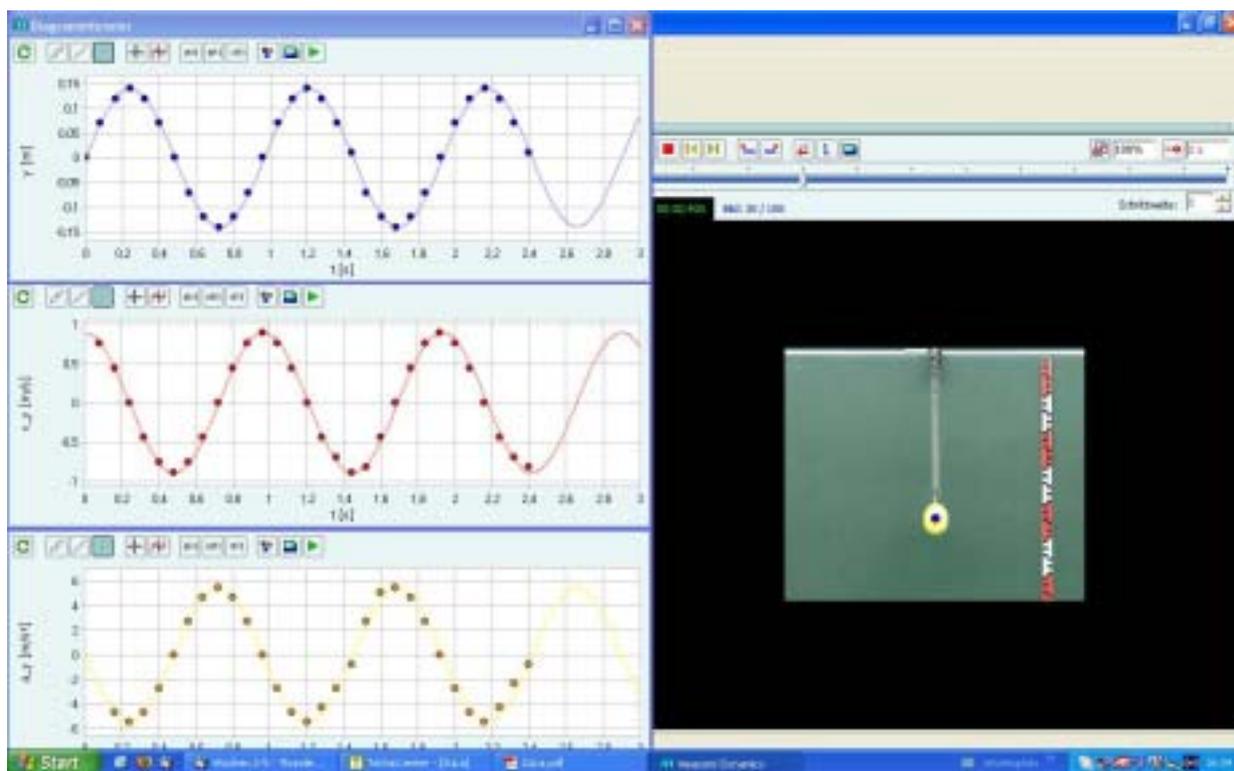


Abbildung 3.3: Screenshot mit Diagrammen für Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung (von oben nach unten)

Beschleunigung.

3.3 Dynamisch ikonische Repräsentationen – Vektoren

Ikonische Bildelemente wie Zeiger, Vektoren, Strecken oder Flächen dienen dazu, physikalische Größen zu symbolisieren. Bei dynamischen Repräsentationen verändern sich diese ikonischen Bildelemente entsprechend der physikalischen Größe in ihrem zeitlichen Verlauf. So kann ein anschaulicher Einblick in den momentan ablaufenden physikalischen Vorgang gegeben werden.¹ Das Programm *measure Dynamics* bietet unter dem Punkt „Anzeige/Filter“ eine einfache Möglichkeit zur Umsetzung der dynamisch ikonischen Repräsentation.

Eine Anwendung der dynamischen Repräsentation findet sich bei der Einführung der zweidimensionalen Kinematik. Dort werden Vektorpfeile, zum Beispiel für Geschwindigkeit und Beschleunigung, an das sich bewegende Objekte „geheftet“, um die Richtung und den Betrag dieser Größen zu zeigen.² Die Vektorpfeile bewegen sich also mit dem Objekt mit, was einen Vergleich der verschiedenen Größen schwer macht. Ein Beispiel einer solchen Darstellung mit „angehefteten“ Vektoren zeigt Abbildung 3.4.

Eine geeignetere Darstellung für einen Vergleich besteht darin, die Vektoren ortsfest zu ma-

¹(Heuer 1996, S.12)

²siehe z.B. (Michel 2007)



Abbildung 3.4: Federpendel mit „angehefteten“ Vektoren

chen.³ Abbildung 3.5 zeigt eine Abfolge von vier Screenshots aus dem Projekt „FP_DynIkonRepräsentation.prj“. Neben dem Pendel wurde ein Filter „Einblendung (Vektor)“ gesetzt, dessen Pfeilfuß fest auf Höhe des Nulldurchgangs des Pendels gelegt wurde. Die x- und y-Koordinaten (x,y) werden dabei in Bezug auf die Pixel angegeben, wobei die obere linke Ecke des Bildes die Koordinaten (0,0) besitzt. Der Pfeilfuß in Abbildung 3.5 hat die Koordinaten (70,181). Als Datenquelle für die y-Koordinate der Pfeilspitze wurde bei der Konfiguration des Filters ein Skript verwendet. Mit der Einstellung $181 - 60 * v_y$ erreicht man die gewünschte Darstellung. Wie man der Tabelle in dem Projekt „FP_DynIkonRepräsentation.prj“ entnehmen kann, liegt der Maximalwert des Betrages der Geschwindigkeit in y-Richtung bei 0,88 m/s. Da sich die Koordinatenabgaben bei der Konfiguration der Filter aber auf Pixel beziehen, wurde der Wert v_y mit 60 multipliziert. Somit erhält man einen gut sichtbaren Vektor. Die Subtraktion von dem Pixelwert 181 setzt die Pfeilspitze in das korrekte Verhältnis zu dem Pfeilfuß. Die x-Koordinate wurde fest auf den Wert 70 gesetzt. Dadurch entsteht eine dynamische Repräsentation der physikalischen Größe „Geschwindigkeit“. Dabei liegt ein großer Vorteil in der schrittweisen Betrachtung der Einzelbilder des Videos. Der sich ständig verändernde Vektor kann so besonders gut beobachtet werden. Der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit des Objekts und dem entsprechenden Vektor wird so deutlich.

Wurde anhand eines Vektors das Prinzip der dynamischen Repräsentation erklärt, können weitere Vektoren schrittweise hinzugefügt werden. In Abbildung 3.6 ist eine weitere Schnappschussfolge aus dem Projekt „Federpendel.prj“ zu sehen. Zusätzlich zu dem Geschwindigkeitsvektor \vec{v}_y wurden hier die Vektoren \vec{y} für den Ort und \vec{a}_y für die Beschleunigung eingezeichnet. Gerade bei der Betrachtung der aufeinanderfolgenden Einzelbilder können diese drei physikalischen Größen durch die Darstellung als ortsfeste Vektoren anschaulich erklärt werden. Die Beziehung zwischen diesen drei Größen untereinander und dem

³(Wilhelm 2005, S.44)

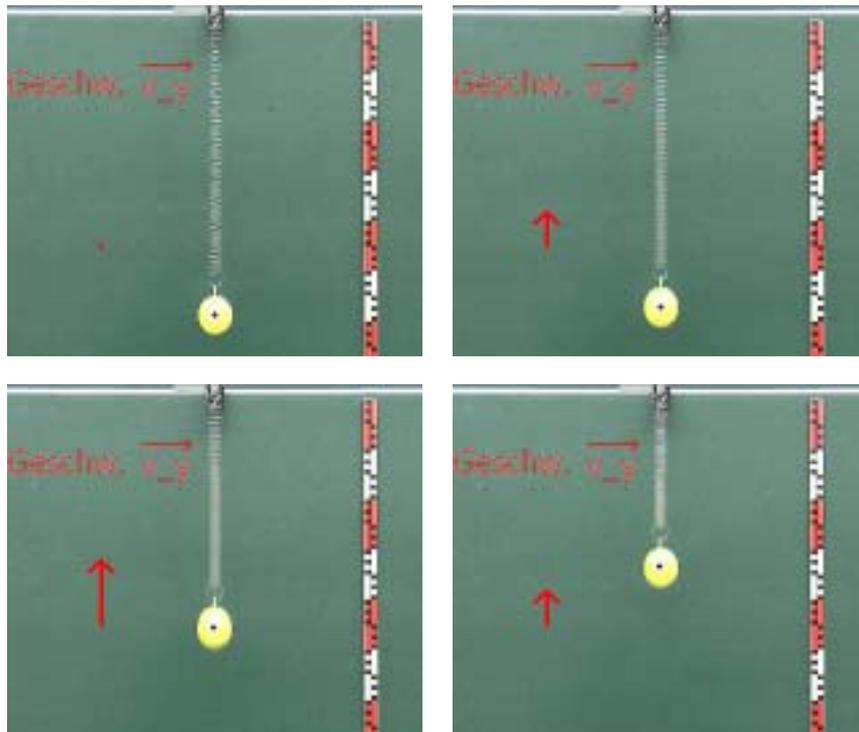


Abbildung 3.5: Dynamisch ikonische Repräsentation mit Vektorpfeil

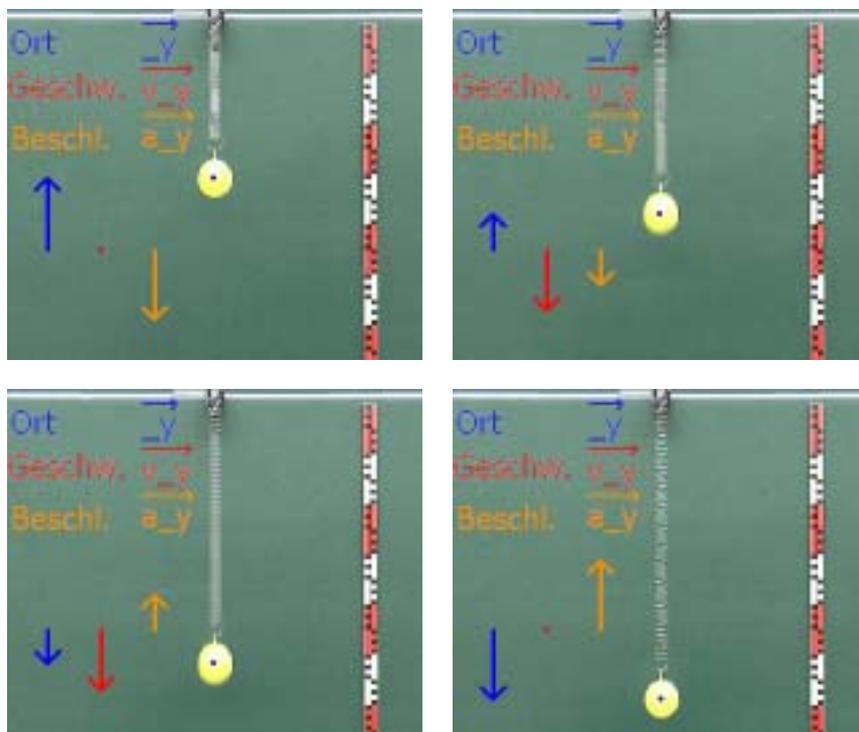


Abbildung 3.6: Einblendung mehrerer ortsfester Vektoren

Ort im Video wird deutlich. Hier bietet sich eine gleichzeitige Verwendung der dynamisch ikonischen Repräsentation und der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Echtzeit-Diagramme an. Eine Kombination aus diesen beiden Darstellungen findet sich in dem Projekt „Feder-

pendel.prj“, das alle Einstellungen und Filter aus den beiden Projekten „FP_Echtzeitdiagramme.prj“ und „FP_DynIkonRepräsentation.prj“ sowie die Filter für die angehefteten Vektoren enthält.

3.4 Gleichzeitige Erkennung mehrerer Objekte

Eine sehr sinnvolle Neuerung bei *measure Dynamics* ist Fähigkeit, mehrere Objekte gleichzeitig zu erkennen. Die eigentliche Analyse muss zwar für jedes Objekt einzeln vorgenommen werden, ist sie aber abgeschlossen, können zu allen Objekten die zugehörigen Diagramme und Einblendungen gleichzeitig erzeugt werden. Diese gleichzeitige Beobachtung mehrerer Objekte bietet gute Möglichkeiten, den Zusammenhang in den Bewegungen der Objekte zu erkennen.

Auf einer Demo-Rollenfahrbahn, die über eine sehr geringe Reibung verfügt, wurde ein Wagen am linken Ende der Bahn mit einer Stativstange angestoßen. In die Mitte der Bahn wurde ein zweiter Wagen gleicher Masse platziert. An diesem zweiten Wagen wurde der in Abbildung 4.1 auf Seite 50 gezeigte Reflektor montiert. So konnte ein elastischer Stoß der beiden Wagen erreicht werden. Beide Wagen wurden mit Markierungen in unterschiedlicher Farbe versehen. Für einen leicht verständlichen Vergleich von Video und Diagramm wäre die gleiche Farbe bei Markierung und Tabellenblatt wünschenswert. In *measure Dynamics* ist die Farbe Gelb aber leider sowohl als Tabellenfarbe als auch in Diagrammen eher schlecht zu erkennen. Daher wurde bei der Darstellung in der Software auf die Farbe Blau ausgewichen (siehe Abbildung 3.7).

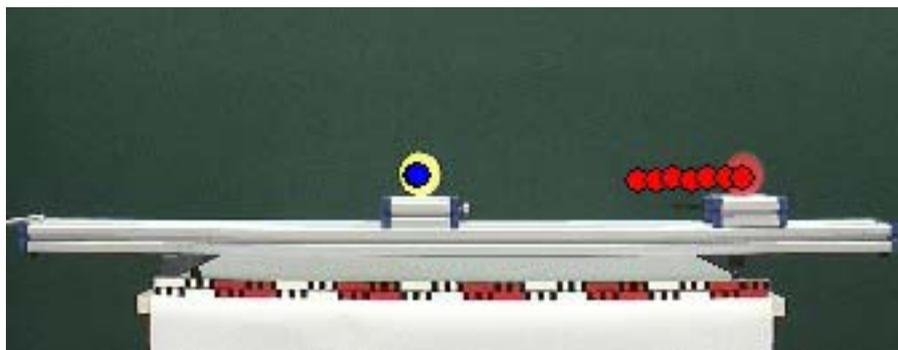


Abbildung 3.7: Screenshot aus dem Video „RFB_Stoß_Ort“ nach dem Stoß

Das Stempeln der roten Ortsmarkierung in Abbildung 3.7 läßt sich über die Spurlänge bei der Konfiguration des Filters „Ort“ einstellen. Bei der Spurlänge „1“ wird nur der aktuelle Ort der Markierung angezeigt. Hier wurde Spurlänge „7“ gewählt, das heißt die Ortsmarkierung der letzten sieben Frames wird angezeigt.

Eine mögliche Auswertung dieses Videos wurde in dem Projekt „RFB_Zwei_Objekte_Ort.prj“ erstellt. Mittels eines t-x-Diagramms wird hier der Stoßprozess betrachtet. Abbildung

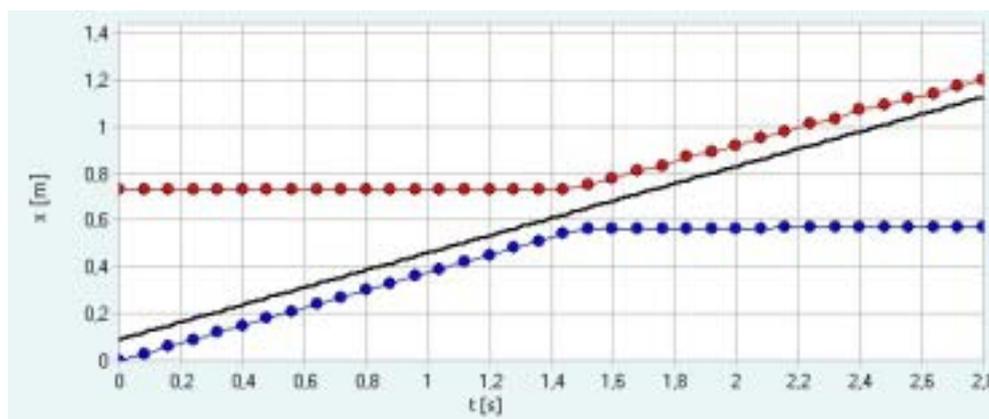


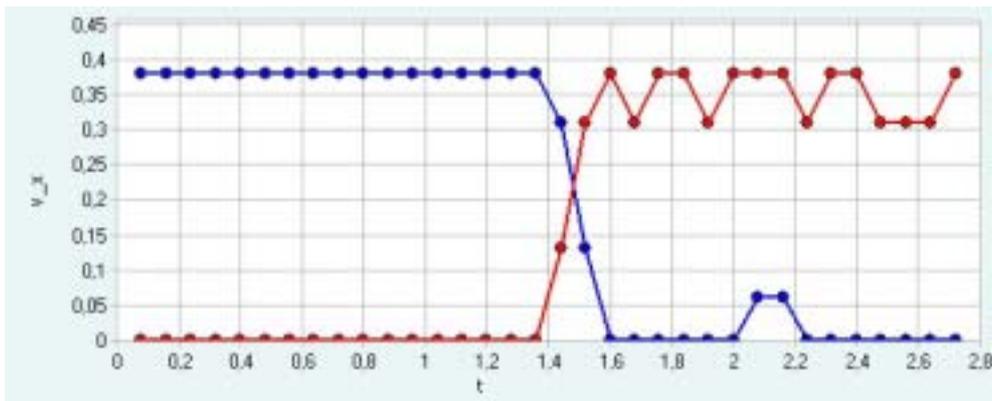
Abbildung 3.8: t - x -Diagramm der beiden Wagen auf der Rollenfahrbahn mit zusätzlicher Hilfsgerade (schwarz)

3.8 zeigt eine Schnappschuss dieses Diagrammes. Bis zum Zeitpunkt des Stoßes bei gut 1,4 Sekunden bleibt der x -Wert des zweiten, roten Wagens unverändert. Der x -Wert des ersten Wagens dagegen nimmt analog zu dem in Abbildung 4.4 auf Seite 51 gezeigten Diagramm zu. Aus der Steigung dieser Geraden kann die Geschwindigkeit des ersten Wagens abgelesen werden. Die quantitative Bestimmung mit Hilfe eines Steigungsdreiecks muss nicht durchgeführt werden, der Wert der Geschwindigkeit v_x des ersten Wagens kann einfach aus der Tabelle in *measure Dynamics* abgelesen werden. Er beträgt in diesem Fall 0,38 m/s. Den Schülern sollte dennoch der Zusammenhang zwischen der Steigung im t - x -Diagramm und der Geschwindigkeit des Objektes bekannt sein. Wegen der Energieerhaltung muss die kinetische Energie vor dem elastischen Stoß gleich der kinetischen Energie nach dem Stoß sein. Mit der Impulserhaltung folgt bei gleicher Masse der beiden Wagen, dass die Geschwindigkeit des ersten Wagens vor dem Stoß gleich der Geschwindigkeit des zweiten Wagens nach dem Stoß entsprechen muss. Durch das Einzeichnen der Hilfsgerade in das Diagramm wird dieser Zusammenhang verdeutlicht. Die Steigung des Graphen für den zweiten Wagen entspricht der des ersten Wagens. Der leichte Abfall der Steigung zum Ende des Diagramms ist durch Reibungsverluste zu erklären.

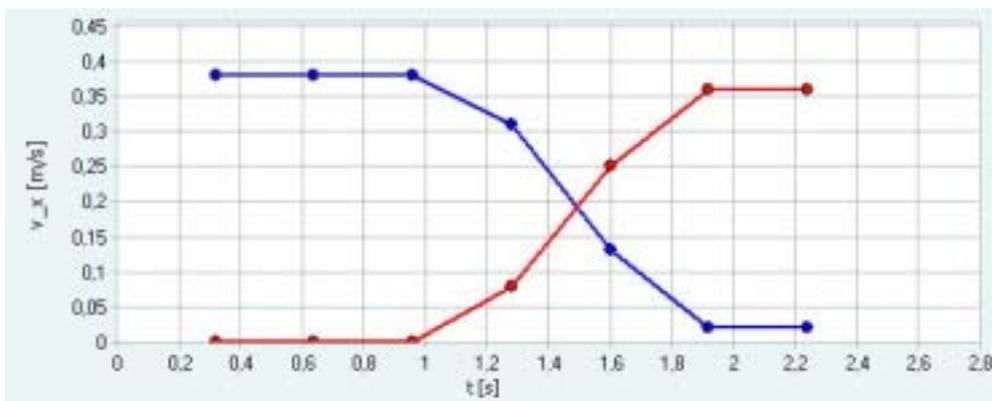
Leider ist auf dem Diagramm der Stoß nicht durch ein tatsächliches Berühren der beiden Graphen zu sehen. Um dies zu erreichen hätten sich die beiden Markierungen beim Stoß der Wagen überdecken müssen. Dazu hätte eine Art Rahmen konstruiert werden müssen, der es erlaubt die Markierung rechts vor dem ersten beziehungsweise links hinter dem zweiten Wagen zu montieren. Da dadurch die Entstehung neuer Probleme, wie etwa Gewichtsunterschiede oder instabile Fahreigenschaften zu befürchten war, wurde auf eine solche Erweiterung des Versuchsaufbaues verzichtet.

Alternativ zu der eben gezeigten Darstellung als t - x -Diagramm mit der Betrachtung der Steigung kann auch direkt die Geschwindigkeit über die Zeit aufgetragen werden. Abbildung 3.9(a) zeigt ein solches t - v -Diagramm aus dem Projekt „RFB_Zwei_Objekte_Geschw.prj“. Dabei fallen sofort die Sprünge in den Geschwindigkeitsgraphen in den Abschnitten der ei-

gentlich konstanten Geschwindigkeiten nach dem Stoß auf. Bei dem Kurvenverlauf des blau markierten Wagens gibt es nur zwei „Ausbrecher“. Diese liegen im Bereich der Messungengenauigkeit, der Wagen steht in dem Video offensichtlich still. Aus der Tabelle in *measure Dynamics* läßt sich ablesen, dass der Wert v_x der Geschwindigkeit in x-Richtung für den rot markierten Wagen zwischen 0,31 m/s und 0,38 m/s wechseln. Die Abweichung von 0,035 m/s um den Mittelwert entspricht einem relativen Fehler von etwa neun Prozent. Möchte



(a) Schrittweite „1“



(b) Schrittweite „4“

Abbildung 3.9: t–v–Diagramm der beiden Wagen mit unterschiedliche Schrittweite bei der Analyse

man solche Sprünge im Diagramm vermeiden, kann man versuchen den Kurvenverlauf zu glätten. Durch eine Erhöhung der Schrittweite und einer anschließenden erneuten Analyse kann man erreichen, dass nicht jeder Frame analysiert wird. Für eine vollständige Glättung der Bereiche nach den Stoß musste in dem Projekt „RFB_Zwei_Objekte_Geschw.prj“ die Schrittweite auf den Wert „4“ erhöht werden. Das entsprechende Diagramm ist in Abbildung 3.9(b) zu sehen. Man kann leicht abzählen, dass nur jeder vierte Frame analysiert wurde. Geschwindigkeit und auch Beschleunigung werden dadurch aus viermal so langen Intervallen bestimmt, sind also Mittelwerte dieser Intervalle. Man erkennt die Veränderung im Kurvenverlauf. Bedingt durch die geringere Anzahl an Messpunkten entsteht fälschlicherweise der Eindruck, der Stoß hätte fast eine Sekunde gedauert.

Noch ungünstiger wird das Diagramm, wenn man die Messpunkte ausblendet. Bei der

Darstellung der Diagramme in *measure Dynamics* kann man zwischen drei Einstellungen wählen. Die Standardeinstellung ist die Darstellung des Diagrammes mit Messwerten und Verbindungslinie, wie zum Beispiel in Abbildung 3.8. Alternativ können nur die Messpunkte oder, wie in Abbildung 3.10, nur die Linie angezeigt werden. Dadurch geht die Kenntnis über die geringe Anzahl der Messwerte verloren. Eine richtige Interpretation des Diagramms wird erschwert. Zusätzlich zu dem vermeintlich langen Stoßprozess scheint sich der erste Wagen auch nach dem Stoß noch mit geringer Geschwindigkeit fortzubewegen, obwohl er im Video still steht. Daher kann auch nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem ersten und dem zweiten Wagen nach dem Stoß durch Reibung verursacht wurde, oder ob ebenfalls eine ungenaue Darstellung die Ursache ist. Im Unterricht könnte die Betrachtung und Besprechung solcher ungünstigen Diagramme durchgeführt werden, um zukünftige Fehler zu vermeiden. Die Glättung der Kurve führt hier zu negativen Nebeneffekten. Daher ist eine Verwendung des ungeglätteten Diagrammes in Abbildung 3.9(a) mit einer Diskussion der möglichen Ursachen für den Kurvenverlauf der Verwendung des Diagrammes in Abbildung 3.10 vorzuziehen. Die beiden oben genannten Projekte sind mit allen Einstellungen und Diagrammen in dem Projekt „RFB_Zwei_Objekte.prj“ zusammengefasst.

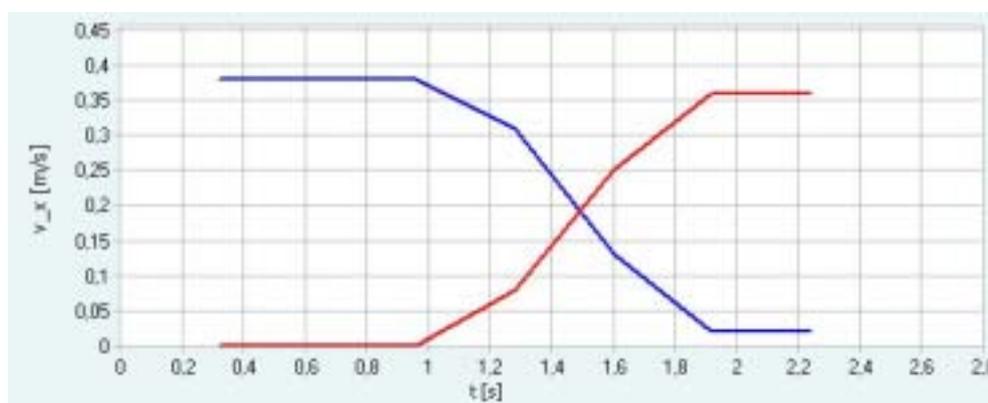


Abbildung 3.10: Ungünstiges t–v–Diagramm

3.5 Serienbilder

Die Software *measure Dynamics* bietet unter dem Menüpunkt „Export“ die Möglichkeit Serienbilder zu erstellen. Dabei wird jeder Frame des Videos einzeln zwischengespeichert und diese Einzelbilder werden direkt aufeinanderfolgend zu einem Bild nebeneinander zusammengesetzt. Für diese Serienbilder gibt es eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten. Zunächst können Serienbilder dazu verwendet werden, einen groben Überblick über den zeitlichen Verlauf einer Bewegung zu geben. Dabei kann das gesamte Videobild zur Erstellung des Serienbildes verwendet werden. Um das in Abbildung 3.11 gezeigte Bild aus dem Video

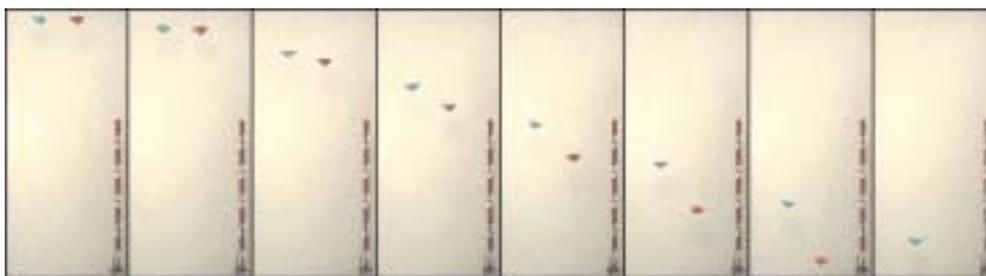


Abbildung 3.11: Serienbild aus dem Video „FK_2Kegel.avi“

„FK_2Kegel.avi“ zu erstellen, wurde zunächst in *measure Dynamics* die Schrittweite auf „2“ erhöht. Dadurch halbiert sich die Anzahl der Teilbilder des Serienbildes, was zu einer angenehmeren Größe des Bildes führt. Durch den konstanten Zeitabstand zwischen den Frames ergibt sich eine Darstellung in Abhängigkeit der Zeit. Dieses qualitative Zeit–Ort–Diagramm kann noch besser für die Betrachtung eines einzelnen Fallkegels verwendet werden. Dazu bietet *measure Dynamics* die Möglichkeit, den Bildausschnitt einzuschränken, der für das Serienbild verwendet wird. Mit einem frei veränderlichen Rahmen kann das Bild sowohl vertikal als auch horizontal geschnitten werden. Abbildung 3.12 zeigt ein

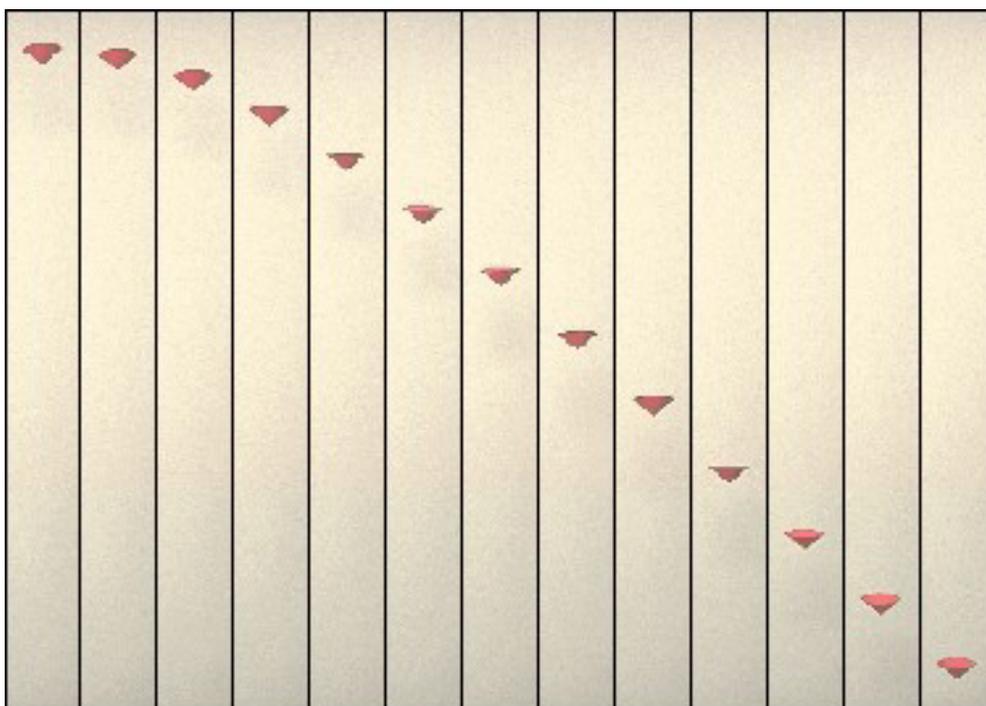


Abbildung 3.12: Serienbild eines Kegels aus dem Video „FK_2Kegel.avi“

Serienbild aus dem Video „FK_2Kegel.avi“, bei dem mittels des Rahmens der rote Kegel für die Serienbilddarstellung ausgewählt wurde. Wegen der im Vergleich zu Abbildung 3.11 schmalen Einzelbilder, wurde die Schrittweite auf Eins gesetzt. Frames, in denen der rote Kegel bereits nicht mehr zu sehen ist, wurden mittels der Steuerungs–Leiste über dem Videoausschnitt von der Erstellung des Serienbildes ausgeschlossen. Man erhält so ein qualitatives Zeit–Ort–Diagramm der Bewegung des Fallkegels. In Abschnitt 4.2 auf Seite 54

werden weitere Versuche mit Fallkegeln genauer besprochen.

Die Serienbild-Option in *measure Dynamics* bietet sich hauptsächlich bei vertikalen Bewegungen an. Schräge Bewegungen, wie zum Beispiel beim Fadenpendel, sind wegen des großen Platzbedarfs der Einzelbilder eher ungeeignet. Besonders bei der Verwendung als qualitatives Diagramm sind Zusammenhänge nur schwer erkennbar. Bei den Einstellungen zur Erstellung eines Serienbildes in *measure Dynamics* kann die Anzahl der Spalten festgelegt werden. So kann man das Serienbild bei Bedarf über mehrere Zeilen aufteilen. Wählt man dabei nur eine Spalte für das Serienbild, so erhält man die Möglichkeit auch horizontale Bewegungen in ein aussagekräftiges Serienbild umzusetzen. Für das in Abbil-

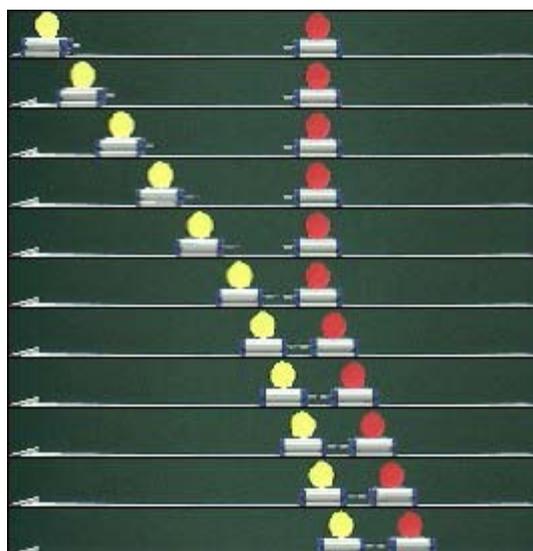


Abbildung 3.13: Serienbild einer horizontalen Bewegung bei einem inelastischen Stoß

Abbildung 3.13 gezeigte Serienbild wurde aus dem Video „RFB_Inelastisch.avi“ mit Hilfe des Schnittrahmens der passende Ausschnitt gewählt. In diesem Video wird ein Wagen auf der Rollenfahrbahn angestoßen, während sich ein zweiter Wagen in der Mitte der Fahrbahn in Ruhe befindet. Der erste der beiden Wagen besitzt vorne eine Aufsatz mit einer Nadel. Der zweite Wagen verfügt über einen Aufsatz mit Knetmasse. Bei diesem dadurch inelastischen Stoß verbinden sich die beiden Wagen gleicher Masse. Es entsteht ein Wagen mit der doppelten Masse des ursprünglich angestoßenen Wagens, der sich nach dem Stoß mit der halben Anfangsgeschwindigkeit des ersten Wagens fortbewegt. Hier ist zu beachten, dass es sich um ein Ort-Zeit-Diagramm handelt. Die Zeitskala beginnt im ersten Einzelbild des Serienbildes, die Zeit ist also auf der y-Achse von oben nach unten aufgetragen. Der Ort ist auf der x-Achse wie üblich von links nach rechts aufgetragen.

3.6 Variables Koordinatensystem

Häufig werden im Physikunterricht Bewegungen betrachtet, die nicht genau horizontal oder vertikal verlaufen. Ein Beispiel ist die beschleunigte Bewegung eines Objektes auf einer schiefen Ebene. Um solche Bewegungen leicht auswerten zu können, bietet *measure Dynamics* die Möglichkeit, das Koordinatensystem um beliebige Winkel zu drehen. So kann die x -Achse parallel zur Bewegungsrichtung gelegt werden. Wie in Abbildung 3.14 gezeigt, kann durch Drücken der rechten Maustaste das Koordinatensystem um den Nullpunkt gedreht werden. Mit der linken Maustaste läßt sich der Nullpunkt an jede Stelle des Videoausschnittes setzen. Der Screenshot stammt aus dem Projekt „SE_Steil.prj“. Für dieses Projekt wurde die Fahrt des Wagens auf der schiefen Ebene gefilmt. Durch den Reflektor am unteren Ende der Fahrbahn wird der Wagen in die Gegenrichtung beschleunigt und fährt die Bahn wieder hinauf. In *measure Dynamics* konnte nach der Skalierung gemessen

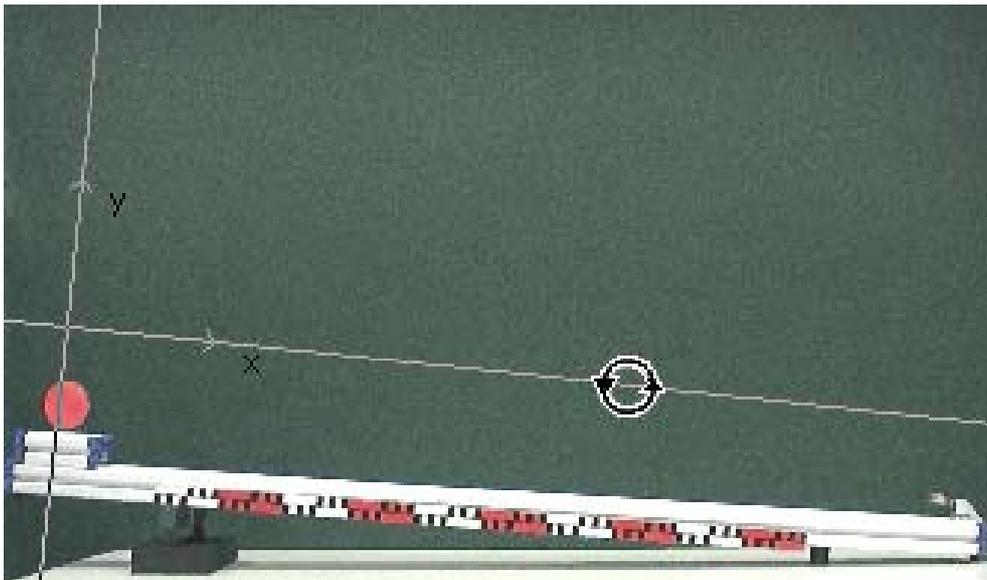


Abbildung 3.14: Screenshot mit gedrehtem Koordinatensystem

werden, dass der Höhenunterschied zwischen der Starthöhe des Wagens und seiner Höhe am rechten Ende der Fahrbahn nur etwa 9 cm beziehungsweise 17 Pixel beträgt. Daher ist bei der Betrachtung der t - x -Diagramme der Bewegung des Wagens kaum ein Unterschied zwischen gedrehtem und nicht gedrehtem Koordinatensystem festzustellen. Um dies zu zeigen, wurde das Video „SE_Steil.avi“ auch mit nicht gedrehtem Koordinatensystem in *measure Dynamics* analysiert und einige Diagramme als Schnappschüsse exportiert. In Abbildung 3.15 sind die t - x -Diagramme dieser beiden verschiedenen Analysen zu sehen. Bei der Betrachtung der t - y -Diagramme ist dagegen ein deutlicher Unterschied sichtbar. Diese beiden Diagramme sind in Abbildung 3.16 gezeigt. Bei dem Diagramm in Abbildung 3.16(a) ist bis auf einige geringfügige Abweichungen der Höhenunterschied während der gesamten Bewegung gleich Null. In dem Diagramm in Abbildung 3.16(b), das nach einer Analyse



(a) Koordinatensystem gedreht



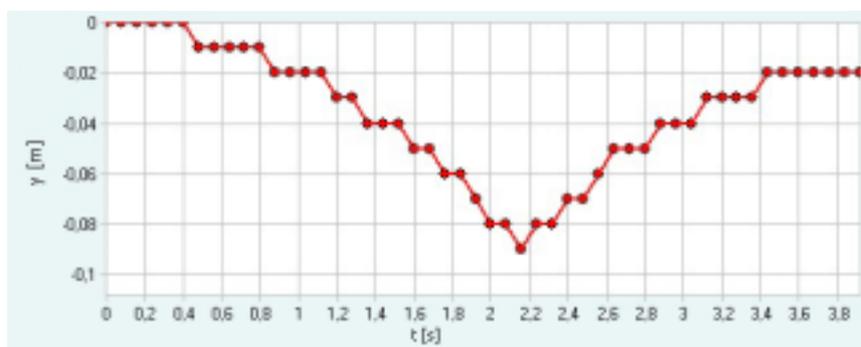
(b) Koordinatensystem nicht gedreht

Abbildung 3.15: t–x–Diagramme des Wagens auf der schiefen Ebene

mit nicht gedrehtem Koordinatensystem erstellt wurde, ist der Höhenunterschied von 9 cm deutlich ablesbar. Bei den Geschwindigkeitsdiagrammen erhält man analoge Ergebnisse. Die Diagramme der Geschwindigkeit v_x in x -Richtung sind sich sehr ähnlich. Daher ist in Abbildung 3.17 nur das t – v_x -Diagramm der Analyse mit gedrehtem Koordinatensystem gezeigt. In dem Diagramm der Geschwindigkeit in x -Richtung ist der Stoßprozess klar zu erkennen. Man sieht, dass der Betrag der Geschwindigkeit vor und nach dem Stoß gleich ist. Die Geschwindigkeitsdiagramme in y -Richtung unterscheiden sich dagegen deutlich (siehe Abbildung 3.18). Durch das Differenzieren bei der Berechnung der Geschwindigkeit führen die Abweichungen im t – y -Diagramm zu größeren Abweichungen im t – v_y -Diagramm. Trotzdem ist in Abbildung 3.18(a) zu erkennen, dass die Geschwindigkeit in y -Richtung bei gedrehtem Koordinatensystem gleich Null ist.

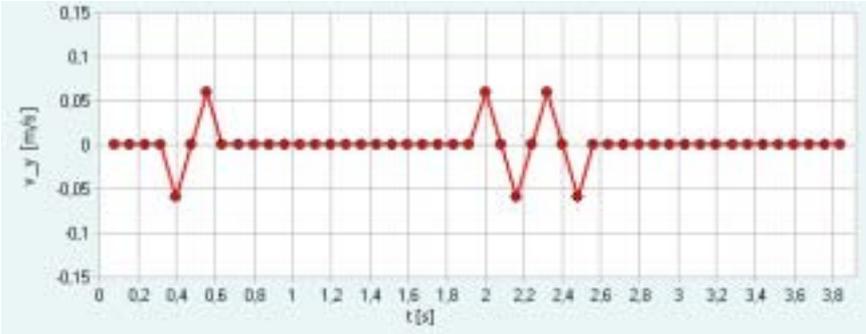


(a) Koordinatensystem gedreht



(b) Koordinatensystem nicht gedreht

Abbildung 3.16: t - y -Diagramme des Wagens auf der schiefen EbeneAbbildung 3.17: t - v_x -Diagramm des Wagens auf der schiefen Ebene (gedrehtes Koordinatensystem)



(a) Koordinatensystem gedreht



(b) Koordinatensystem nicht gedreht

Abbildung 3.18: t-v_y-Diagramme des Wagens auf der schiefen Ebene

Bei der Arbeit an dem Projekt „SE_Steil.prj“ wurde versucht einen Vektor für die Geschwindigkeit in x -Richtung an den sich bewegenden Wagen anzuheften. Dieser Vektor sollte idealerweise parallel zu der Rollenfahrbahn verlaufen. Hier zeigte sich ein Problem bei der Drehung des Koordinatensystems in *measure Dynamics*. Die Drehung hat nur Auswirkungen auf die von der Software berechneten Werte $x[m]$ und $y[m]$ für den Ort, sowie die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in beide Richtungen. Die Größen, die in Pixeln bestimmt werden, also die Werte $_x$ und $_y$ bleiben von der Veränderung des Koordinatensystems unberührt. Die Vektoreinblendungen, die über die Option „Filter“ definiert werden, beziehen sich aber gerade auf diese Größen $_x$ und $_y$. Daher ist es mit einfachen Mitteln nicht möglich, einen Vektor parallel zu der schiefen Ebene zu erzeugen. Abbildung 3.19 zeigt einen Schnappschuss aus dem oben genannten Projekt. Der eingeblendete Geschwindigkeitsvektor verläuft waagrecht und nicht, wie gewünscht, in Bewegungsrichtung. Zwar wäre eine Definition des Vektors über die Werte $_x$, $_y$ und eine Winkelfunktion

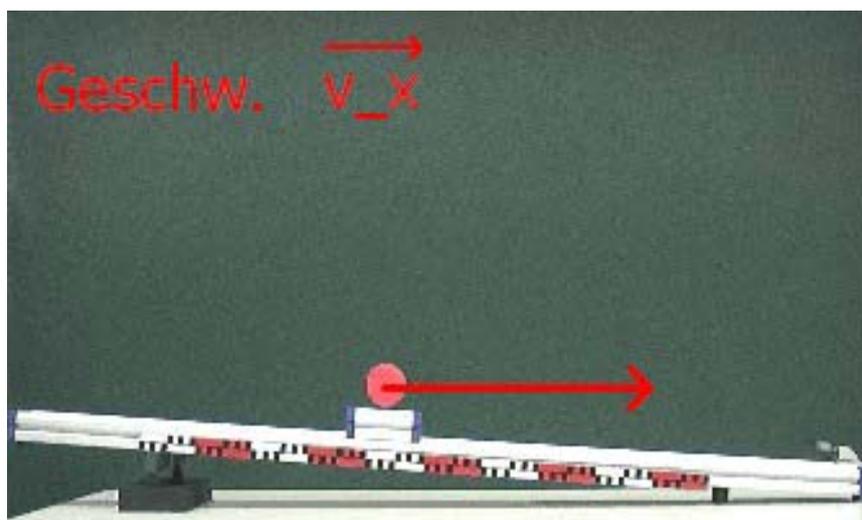


Abbildung 3.19: Einblendung eines waagrechten Vektors

denkbar, der Aufwand hierfür steht aber in keinem Verhältnis zu den Resultaten. Als Alternative zu angehefteten Vektoren können ohne Probleme ortsfeste Vektoren eingesetzt werden.

Bei der Untersuchung einer Bewegung auf der schiefen Ebene ist besonders die Bewegung parallel zu der Ebene interessant. Daher sind die physikalischen Vorgänge für den Schüler leichter zu verstehen, wenn auch die x -Achse des Koordinatensystems parallel zur Bewegungsrichtung verläuft. Somit wird die Bewegung auf diese eine Achse reduziert. Insgesamt ist daher festzuhalten, dass eine Betrachtung der Bewegung mit gedrehtem Koordinatensystem in vielen Fällen anschaulicher ist. Für einen signifikanten Unterschied in x -Richtung müssen aber Bewegungen mit wesentlich größerer Steigung betrachtet werden. Dies wird im Folgenden am Beispiel eines Freihandversuches gezeigt. In dem Projekt „Luftblase.prj“ wurde ein Freihandversuch zur Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit gefilmt. Ein Glas-

röhrchen wird bis auf eine kleine Luftblase mit Wasser gefüllt. Dreht man das Röhrchen um, so steigt die Luftblase bis auf eine vernachlässigbar kurze Beschleunigungsphase mit konstanter Geschwindigkeit nach oben. Um diesen Effekt besser sichtbar zu machen, wurde das Wasser mit Eosin eingefärbt. Der Versuch wurde vor der Tafel gefilmt. Als Skalierung dienten die Markierungen auf der Tafel, die bei einer Vergrößerung auf 200% in dem Video gut zu erkennen sind. Abbildung 3.20 zeigt einen Schnappschuss aus dem Projekt „Luftblase.prj“. Eine Winkelmessung in *measure Dynamics*, wie sie in Abbildung 3.20 zu

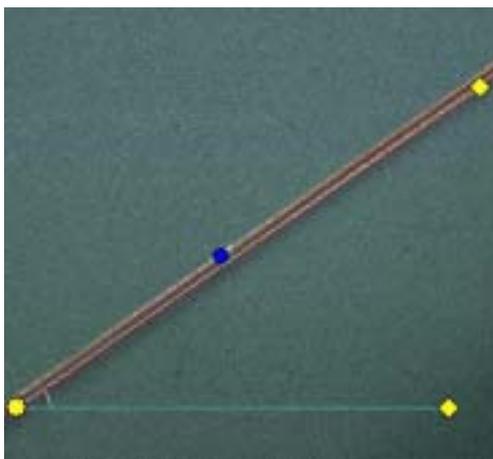
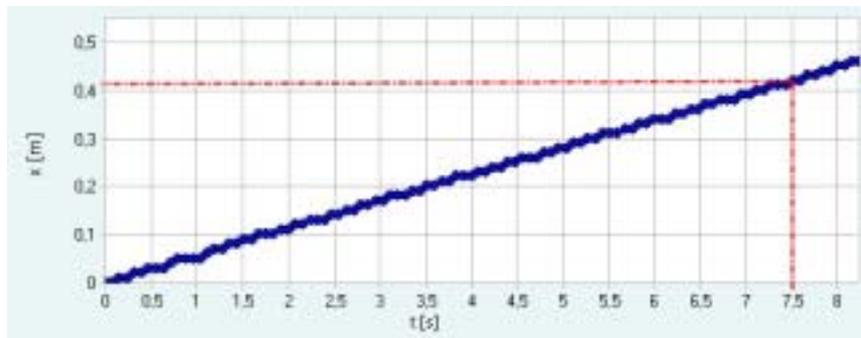
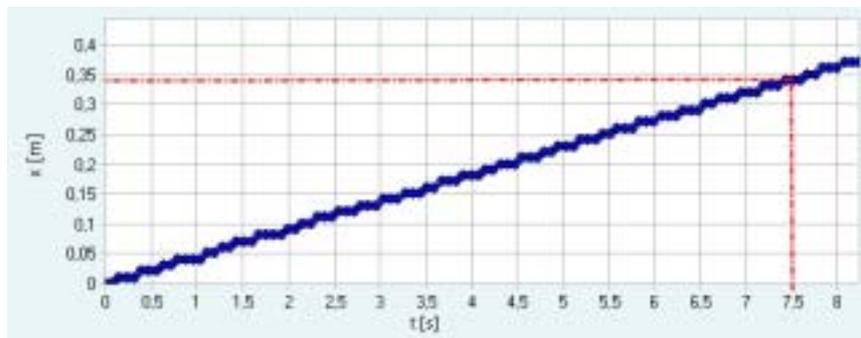


Abbildung 3.20: Schnappschuss mit Winkelmessung

sehen ist, ergab einen Steigungswinkel von 35° . In dem Projekt „Luftblase.prj“ wurde vor der Analyse das Koordinatensystem gedreht. Ein im Anschluss erstelltes t - x -Diagramm zeigt Abbildung 3.21(a). Um den Unterschied zwischen gedrehtem und nicht gedrehtem Koordinatensystem aufzuzeigen, ist in Abbildung 3.21(b) ein t - x -Diagramm mit nicht gedrehtem Koordinatensystem dargestellt. Zur Verdeutlichung der Unterschiede wurden mit einem Zeichenprogramm nachträglich Verbindungslinien bei der Zeit $t = 7,5\text{s}$ eingefügt. Während die Luftblase nach dem Diagramm aus dem Projekt „Luftblase.prj“ in $7,5\text{s}$ eine Strecke von 41 cm zurückgelegt hat, ergibt sich aus dem Diagramm mit nicht gedrehtem Koordinatensystem nur eine zurückgelegte Strecke von etwa 34 cm . Dies entspricht einer Abweichung von 17% . Bei größeren Steigungen ist eine Anpassung des Koordinatensystems daher unbedingt zu empfehlen.



(a) Koordinatensystem gedreht



(b) Koordinatensystem nicht gedreht

Abbildung 3.21: t - x -Diagramme der aufsteigenden Luftblase

3.7 Stroboskopbilder

Stroboskopbilder sind in zahlreichen Schulbüchern zu finden. Sie dienen zum Beispiel zur Veranschaulichung eines Bewegungsablaufes. Ein solches Stroboskopbild aus einem Schulbuch für die siebte Jahrgangsstufe am G8 in Bayern ist in Abbildung 3.22 zu sehen.⁴ Das



Abbildung 3.22: Bewegungsablauf beim Trampolinspringen (Fösel u. a. 2005, S.123)

Programm *measure Dynamics* verfügt über eine Option zur einfachen Erstellung von Stroboskopbildern aus einem Video. Als Beispiel für diese Möglichkeit wurde aus dem Video „Tennisball.avi“ ein Stroboskopbild erstellt. In diesem Video wurde ein Tennisball auf einen vor der Tafel stehenden Tisch geworfen und die Flugbahn des wieder hochspringenden Balles aufgenommen. Bei der Erzeugung eines Stroboskopbildes aus diesem Video, wird das Bild des Tennisballes an der jeweiligen Position in den einzelnen Frames in ein einziges Bild gestempelt. Abbildung 3.23 zeigt das entsprechende Stroboskopbild. Um den Bewegungsablauf noch deutlicher zu machen, kann in *measure Dynamics* bei der Erstellung von Stroboskopbildern ein einfarbiger Hintergrund in einer beliebigen Farbe gewählt werden. Durch diese Option können störenden Veränderungen im Hintergrund, wie etwa der Wechsel zwischen Tafel und Tisch in Abbildung 3.23, ausgeblendet werden. Um einen guten Kontrast zu erreichen, wurde bei dem Stroboskopbild in Abbildung 3.24(a) ein blauer Hintergrund gewählt. In einem so abgeänderten Bild ist die Flugbahn des Tennisballes gut zu erkennen. Die Entstehung der Flugbahn durch das Hochspringen des Balles nach dem Aufprall auf der Tischplatte ist in dieser Darstellung allerdings nicht mehr erkennbar. Sie sollte daher bei einer Verwendung im Unterricht erläutert werden, falls nicht ein ähnlicher Versuch vorgeführt oder das Video gezeigt wird. Mit der Einstellung „Farbige Blitzlichter“ kann in *measure Dynamics* zusätzlich jedem Einzelbild des Balles eine andere Farbe zugeordnet werden. So ist die Entstehung des Stroboskopbildes aus den einzelnen Frames eines Videos

⁴(Fösel u. a. 2005)

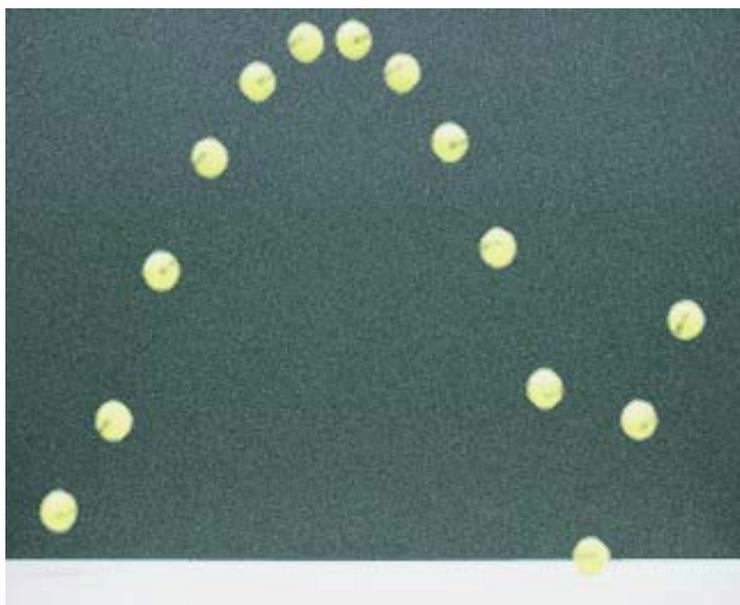


Abbildung 3.23: Stroboskopbild aus dem Video „Tennisball.avi“

leichter zu verstehen. Dabei können bis zu 64 verschiedene Farben verwendet werden. Ein so bearbeitetes Bild zeigt Abbildung 3.24(b). Als Hintergrundfarbe wurde hier Weiß gewählt, um zu allen verwendeten Farben einen guten Kontrast zu erzeugen. Die unterschiedliche Färbung des Balles ist auch mit dem realen Hintergrund des Videos möglich.

Eine weitere Verwendung von Stroboskopbildern in Schulbüchern ist die Veranschaulichung von Beschleunigungen. Dabei kann ein Stroboskopbild sowohl qualitativ als auch quantitativ ausgewertet werden. Abbildung 3.25 zeigt zwei Stroboskopbilder aus einem weiteren Schulbuch.⁵ Die Bilder wurden mit einem konstanten Zeitabstand zwischen den Einzelaufnahmen erzeugt. Man erkennt die Beschleunigung der fallenden Körper daran, dass in der gleichen Zeitspanne unterschiedliche Weglängen zurückgelegt werden, was unterschiedliche Geschwindigkeiten bedeutet. Steht in dem Stroboskopbild ein geeigneter Maßstab zur Verfügung, kann eine quantitative Auswertung vorgenommen werden. Möchte man eine horizontale Bewegung betrachten, ist ein beschleunigter Wagen auf einer Rollen- oder Luftkissenfahrbahn ein häufiger Schulversuch. Dabei wird die Beschleunigung üblicherweise mit einem über eine Umlenkrolle mit dem Wagen verbundenen Gewichtsstück erzeugt. Lässt man dieses Gewicht fallen, wird der Wagen beschleunigt. Alternativ lässt sich mit einem einfachen Trick ein Video mit einer horizontalen, beschleunigten Bewegung erzeugen. Dazu eignen sich die in Abschnitt 3.6 verwendeten Versuche zur schiefen Ebene mit der Rollenfahrbahn. Die Kamera wird auf einem geeigneten Stativ mit beweglichem Stativkopf montiert und eine Neigung entsprechend der schiefen Ebene eingestellt. Abbildung 3.26 zeigt einen Ausschnitt aus einem ungeschnittenen Video, bei dem diese Technik angewendet wurde. So können aus einem Versuch mit einer schiefen Ebene schnell und einfach Videos einer horizontalen, beschleunigten Bewegung erstellt werden. Die folgenden Stroboskopbil-

⁵(Bredthauer u. a. 2007)

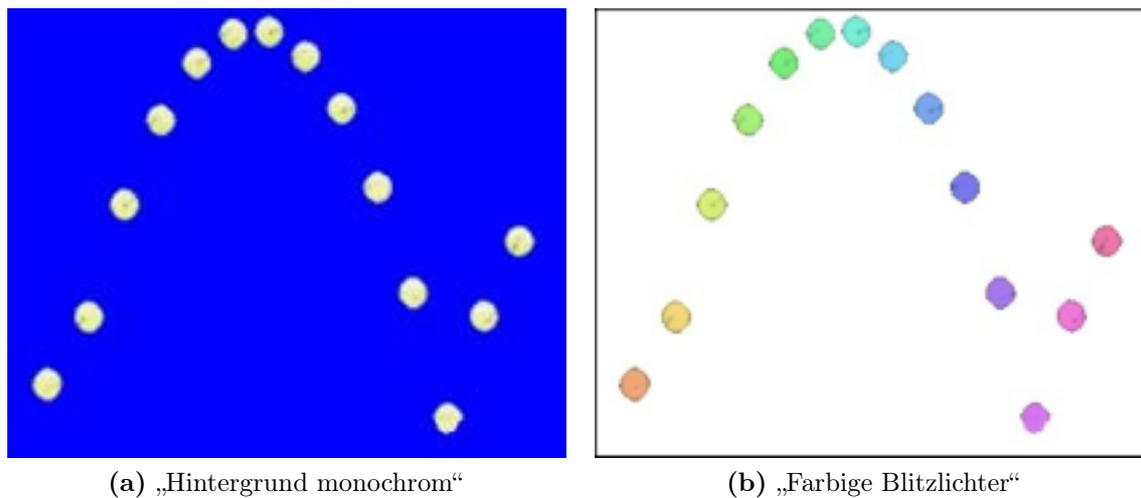


Abbildung 3.24: Verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten mit *measure Dynamics*

der wurden aus dem Video „SE_Geneigt.avi“ erzeugt. Für das Stroboskopbild in Abbildung 3.27 wurde in *measure Dynamics* die Option „Einzelbilder durchscheinend“ angewählt. Damit sind die ersten Einzelbilder, die noch dicht zusammen liegen, deutlicher voneinander zu unterscheiden. Das ist besonders bei einer quantitativen Auswertung wichtig. Um diese zu ermöglichen, wurde ein Maßstab in dem Bildausschnitt platziert. Um die Anzahl an Einzelbildern zu reduzieren und das Bild somit übersichtlicher zu gestalten, wurde vor der Erstellung des Stroboskopbildes die Schrittweite verdoppelt. Es wird also nur jedes zweite Einzelbild in das Stroboskopbild aufgenommen. Dabei ist bei einer Auswertung des Bildes zu beachten, dass sich auch die Zeitspanne Δt zwischen zwei Einzelbildern verdoppelt. Für Abbildung 3.27 beträgt dieser Zeitabstand $\Delta t = 0,16s$, wie man aus der Tabelle in *measure Dynamics* ablesen kann.

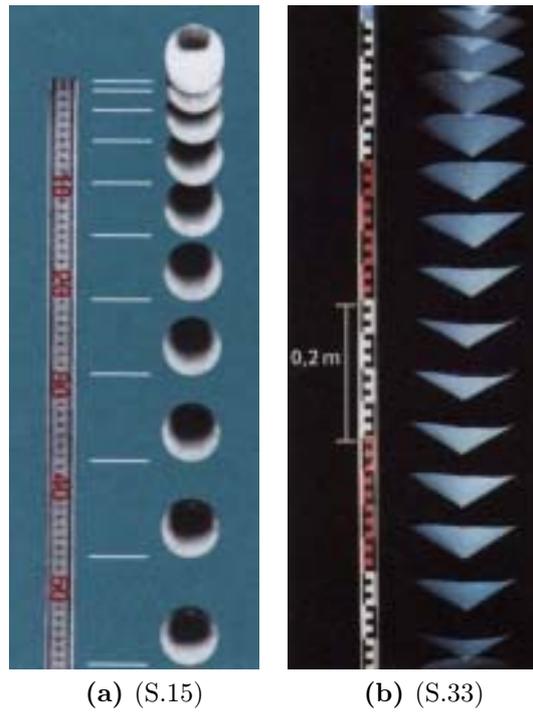


Abbildung 3.25: Stroboskopbilder zur Beschleunigung (Bredthauer u. a. 2007)

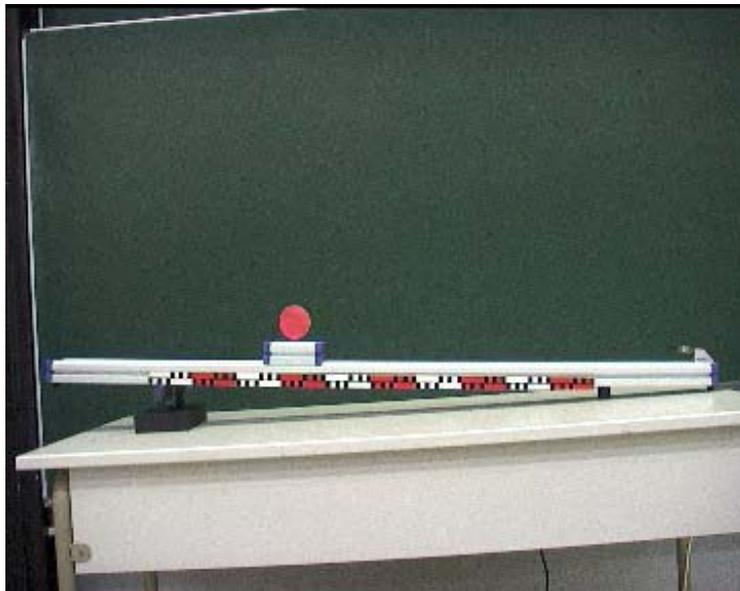


Abbildung 3.26: Neigen der Kamera für horizontale, beschleunigte Bewegungen

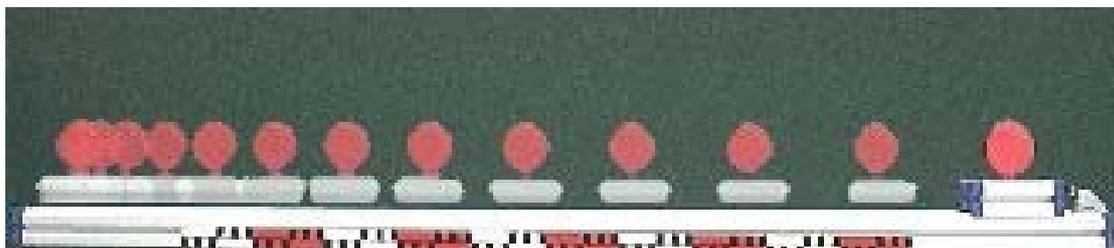


Abbildung 3.27: Stroboskopbild mit durchscheinenden Einzelbildern,
Schrittweite „2“

Um den Unterschied zu verdeutlichen, der durch eine Veränderung der Schrittweite entsteht, sind in Abbildung 3.28 zwei Stroboskopbilder mit verschiedenen Schrittweiten gezeigt. In diesen Bildern wurde wieder ein einfarbiger Hintergrund gewählt. Zusätzlich wurde an dem Schieberegler „Empfindlichkeit“ eine hohe Einstellung gewählt. So wurde ein Verblassen des Wagens gegenüber der roten Markierung erreicht, was diese hervorhebt.



(a) Schrittweite „1“



(b) Schrittweite „2“

Abbildung 3.28: Stroboskopbilder mit unterschiedlicher Schrittweite

Auch in Abbildung 3.27 ist ein Verblassen des Wagens zu sehen. Dabei fällt auf, dass das letzte Einzelbild deutlicher erkennbar ist, als die vorhergehenden Einzelbilder. Als Hintergrund für das Stroboskopbild verwendet *measure Dynamics* den bei der Erstellung des Stroboskopbildes im Videofenster zu sehenden Ausschnitt. Hier war der letzte Frame des Videos zu sehen und wurde als Hintergrund verwendet. Daher ist der Wagen im letzten Bild deutlich abgebildet. Dies muss bei Veränderung der Schrittweite berücksichtigt werden. Ist zum Beispiel bei der Verdopplung der Schrittweite ein ungerader Frame als Hintergrundbild eingestellt, ergibt sich an dieser Stelle im Stroboskopbild eine Abweichung in den Abständen der Einzelbilder. In Abbildung 3.29 ist ein fehlerhaftes Bild mit einer solchen Abweichung zu sehen. Durch den Fehler in der gelben Markierung kann man den Eindruck bekommen, der Wagen würde am Ende der Fahrbahn abgebremst.



Abbildung 3.29: Stroboskopbild mit falschem Hintergrund bei Schrittweite „2“

Kapitel 4

Beispiele für die Anwendung der Videoanalyse im Unterricht

Nachdem in Kapitel 3 bereits die einzelnen Möglichkeiten der Software *measure Dynamics* an Hand von Beispielen und selbst erstellten Videos vorgestellt wurden, werden in diesem Kapitel einige weitere Anwendungsbeispiele der Videoanalyse speziell mit *measure Dynamics* gezeigt. Dabei werden sowohl didaktische Themen, als auch physikalische Betrachtungen einzelner Versuche und deren Umsetzung im Unterricht angesprochen.

4.1 Die Einführung von Diagrammen

Graphen und Diagramme dienen oft dazu, die funktionalen Abhängigkeiten physikalischer Größen wiederzugeben. Zum sicheren Lesen eines oder sogar mehrerer Graphen bedarf es aber angemessener physikalischer Konzepte und Erfahrung. Die Fähigkeit, Graphen zu interpretieren ist ein relevantes Lernziel des Physikunterrichts.¹ Die Einführung des Prinzips der graphischen Darstellung ist daher sehr wichtig. Mit dem Projekt „RFB_Diagrammeinführung.prj“ wird hier eine Möglichkeit zur Einführung mittels digitaler Videoanalyse gezeigt.

4.1.1 t–x–Diagramme am Beispiel „Rollenfahrbahn“

Auf der Demo–Rollenfahrbahn wurde ein einzelner Wagen mit einer Stativstange angestoßen und am Ende der Fahrbahn mittels eines gespannten Gummibandes wieder reflektiert (siehe Abbildung 4.1). Der Wagen wurde zur besseren Erkennung bei der Analyse mit einer roten Markierung, in diesem Fall ein Kreis aus Tonpapier, versehen. Das Video in dem

¹(Wilhelm 2005, S.38ff)

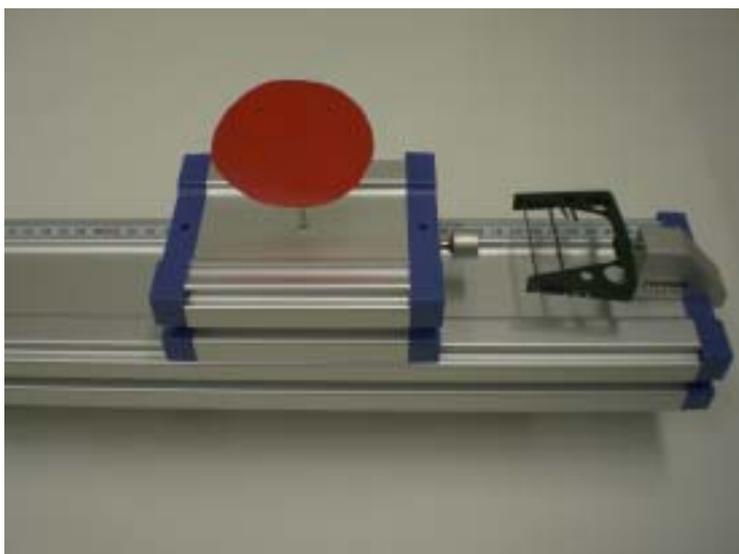


Abbildung 4.1: Wagen und Reflektor auf der Rollenfahrbahn

oben genannten Projekt zeigt einen kompletten Durchlauf des Wagens vom linken Ende der Fahrbahn bis zum Reflektor und von dort nach dem elastischen Stoß wieder zurück an das linke Ende. Bei Versuchen dieser Art wählt man bei unerfahrenen Schülern eine Anfangsbewegungsrichtung von links nach rechts. So können Verwirrungen bei der gleichzeitigen Entstehung des Graphen vermieden werden. In Abbildung 4.2 ist ein Ausschnitt aus diesem Video zu sehen. In *measure Dynamics* wurde über die Option „Anzeige/Zeichnen“ der zusätzlich Maßstab im oberen Teil eingezeichnet und beschriftet.

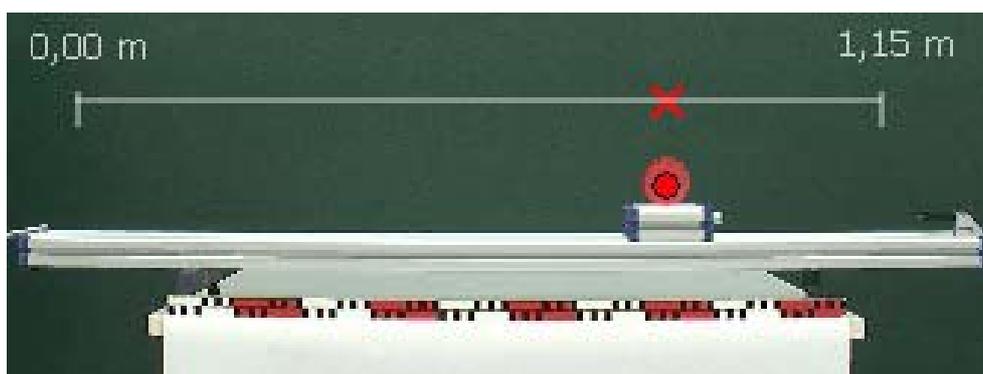


Abbildung 4.2: Schnappschuss aus dem Video „RFB_Diagrammeinführung“

Als Ergänzung zum üblichen Filter „Ort“ wurde der Filter „Ortsmarkierung x“ gesetzt. Dieser hat einen festen Werte bezüglich der y-Richtung (30 Pixel), als x-Koordinate ist der Wert $_x$ in Pixeln eingestellt. Somit läuft das kleine rote Kreuz parallel zum Objekt auf der oberen Längenskala mit. Auf diesem Einzelbild kann man nicht erkennen, ob sich der Wagen auf dem Hin- oder Rückweg befindet. Man könnte jedoch ganz einfach die Spurlänge des Filters „Ort“ erhöhen und würde durch die roten Punkte rechts des Wagens erkennen, dass sich dieser auf dem Rückweg zum linken Ende der Fahrbahn befindet (siehe Abbildung 4.3).

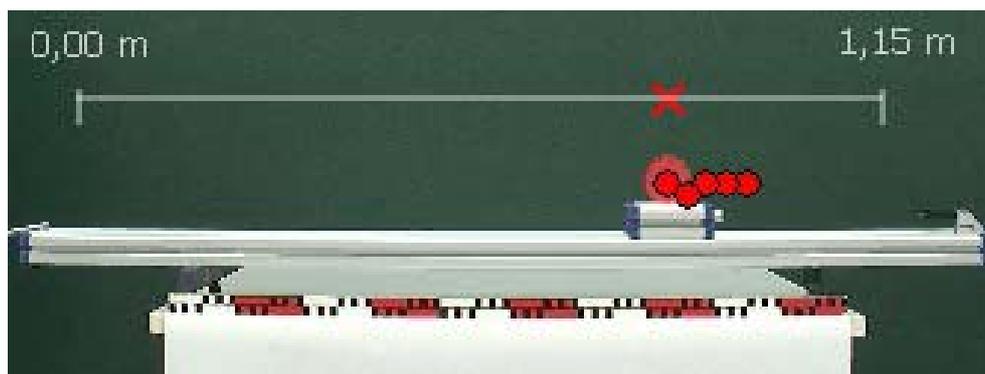


Abbildung 4.3: Darstellung mit gestempelter Spur

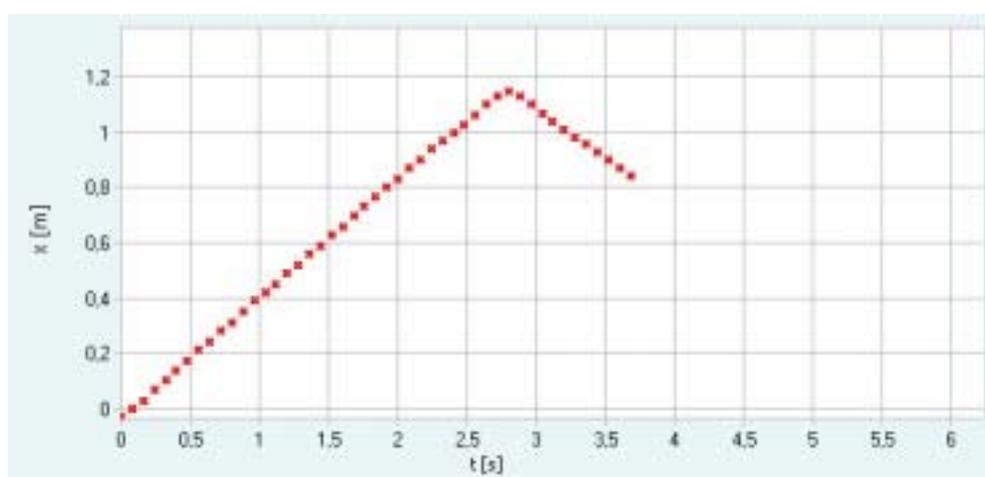


Abbildung 4.4: t-x-Diagramm in Echtzeit, passend zu Abbildung 4.2

Alternativ gewinnt man diese Information aus dem in Echtzeit entstehenden t-x-Diagramm, das in Abbildung 4.4 dargestellt ist. Wird das Video im Unterricht schrittweise, also durch manuell gesteuerte Abfolge der Einzelbilder gezeigt, hat man die Möglichkeit genau am Umkehrpunkt der Bewegung anzuhalten (bei etwa 2,8 Sekunden, siehe Abb. 4.4). Durch gleichzeitige Betrachtung der Ortsmarkierung „rotes Kreuz“ im Video und des Diagrammes kann dem Schüler anschaulich verdeutlicht werden, dass bei fortschreitender Zeit t der Wert x nun wieder kleiner werden muss. Der Verlauf des t-x-Diagrammes kann so erklärt werden.

Als weiterer Schritt wurde, ebenfalls in dem Projekt „RFB_Diagrammeinführung.prj“, der Filter „Ortsmarkierung Balken“ gesetzt. Dieser Filter verdeutlicht den Abstand des Wagens vom Nullpunkt. Der Filter ist in Abbildung 4.5 gezeigt. Eine Darstellung dieses Balkens im Diagramm, wie sie in Abbildung 4.6 zu sehen ist, wäre wünschenswert. Der Zusammenhang zwischen dem Abstand des Wagens vom Nullpunkt und dem Graphen wäre dadurch noch deutlicher. Allerdings konnte diese zusätzliche Darstellung im Diagramm in *measure Dynamics* nicht realisiert werden. Der blaue Balken in Abbildung 4.6 wurde nachträglich mit einem Zeichenprogramm eingefügt. Auf diese Weise bearbeitete Bilder könnten zum Beispiel in einem Arbeitsblatt verwendet werden oder als ergänzende Erklärung mit dem

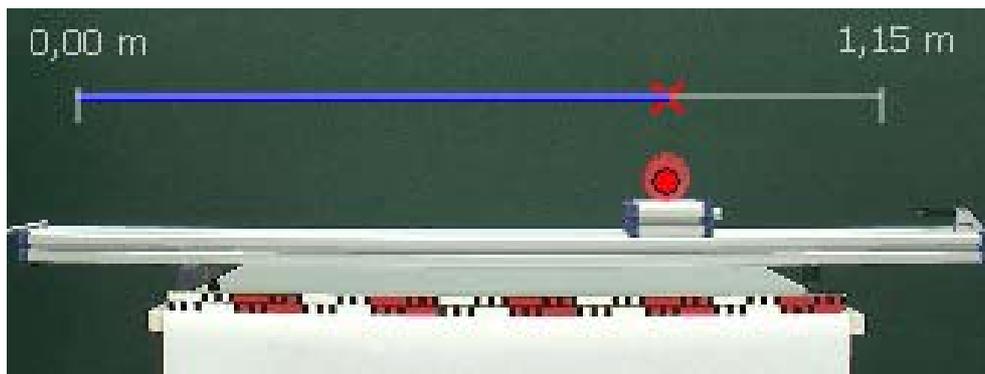


Abbildung 4.5: Zusätzlicher Filter „Ortsmarkierung Balken“

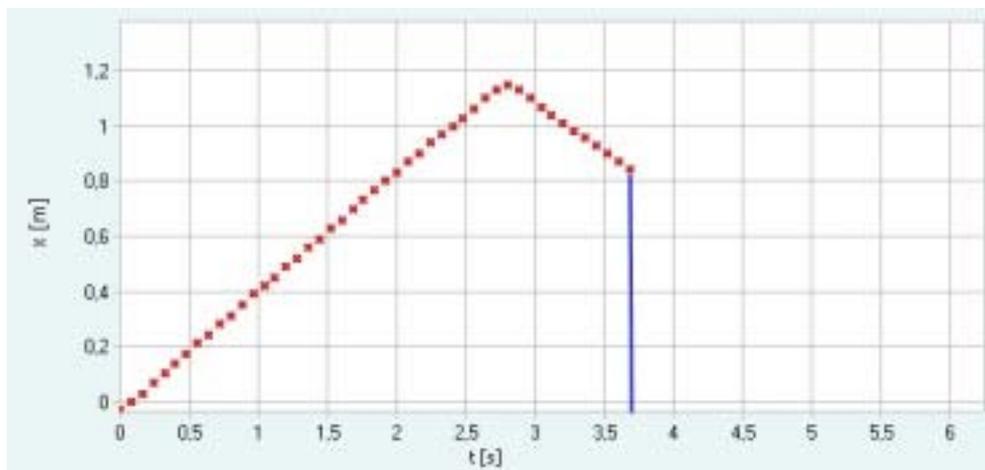
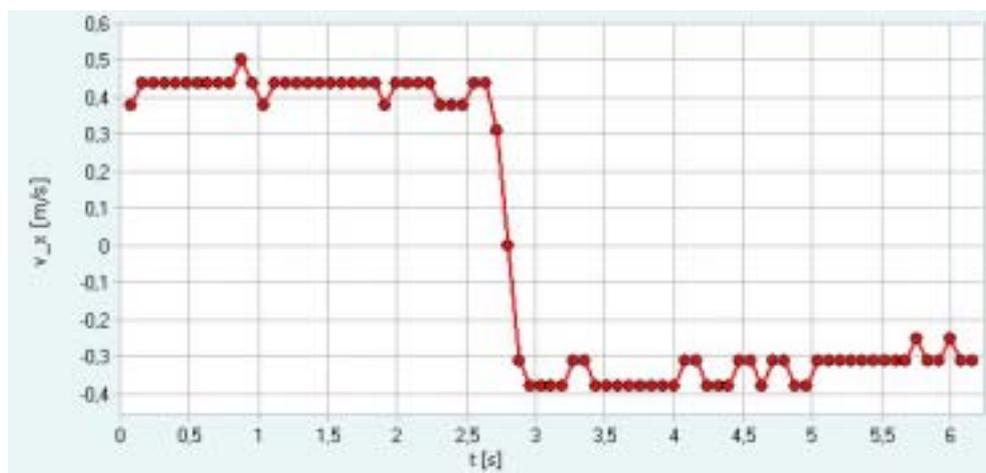


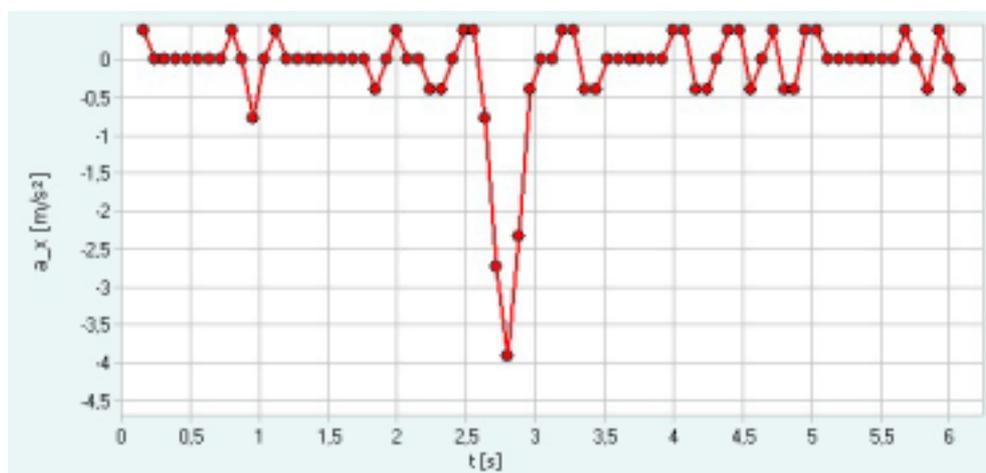
Abbildung 4.6: Diagramm mit nachträglich eingezeichnetem Balken

Overheadprojektor gezeigt werden.

Das Projekt „RFB_Diagrammeinführung.prj“ enthält auch die Diagramme für Geschwindigkeit und Beschleunigung. Diese könnten im späteren Unterrichtsverlauf ergänzend gezeigt werden. Sie sind in Abbildung 4.7 zu sehen. In diesen beiden Diagrammen ist der Stoßprozess am Ende der Rollenfahrbahn deutlich erkennbar. Im t - v -Diagramm ist der Wechsel der Geschwindigkeitsrichtung bei annähernd gleichem Betrag zu sehen. Die Sprünge in den Bereichen der konstanten Geschwindigkeit entstehen durch das Differenzieren bei der Berechnung der Geschwindigkeit aus den gemessenen Ortsdaten. Durch den großen Unterschied der Geschwindigkeiten vor und nach dem Stoß sind sie jedoch hier als Berechnungsfehler vernachlässigbar. Im t - a -Diagramm sind diese Sprünge durch das erneute Differenzieren ausgeprägter. Aber auch in diesem Diagramm hebt sich der Stoß deutlich von diesen Fehlern ab. In beiden Darstellungen in Abbildung 4.7 ist der Stoß als sehr kurzer Prozess zu sehen, was auf eine präzise Messwerterfassung durch *measure Dynamics* schließen lässt.



(a) t-v-Diagramm



(b) t-a-Diagramm

Abbildung 4.7: Weitere Diagramme zum Wagen auf der Rollenfahrbahn

4.1.2 t-v-Diagramme am Beispiel „Federpendel“

Eine Alternative zur Erklärung des Prinzips der graphischen Darstellung bieten die in Abschnitt 3.5 eingeführten Serienbilder. In Kombination mit der dynamisch ikonischen Repräsentation aus Abschnitt 3.3 erhält man eine Veranschaulichung von Diagrammen. Aus dem Projekt „Federpendel.prj“ wurde bei der Darstellung mit den ortsfesten Vektoren für Geschwindigkeit und Beschleunigung (siehe Abbildung 3.6 auf Seite 29) ein Serienbild des Geschwindigkeitsvektors erzeugt. Dazu wurde der Videoausschnitt mit dem Rahmen auf die entsprechende Größe reduziert. In der Steuerungs-Leiste über dem Video wurde das Video zusätzlich zeitlich begrenzt, um das überschaubare Serienbild einer einzelnen Schwingungsperiode zu erhalten. Abbildung 4.8 zeigt das so entstandene Serienbild. Der Kurvenverlauf des Geschwindigkeitsdiagrammes ist in dieser Darstellung des Geschwindigkeitsvektors sichtbar. Durch die Erstellung des Serienbildes, also einer Abfolge von Einzelbildern, erzeugt man eine Zeitachse mit einer von links nach rechts zunehmenden Zeit t . Somit entsteht eine Art Zeit-Geschwindigkeit-Diagramm. Der Vorteil dieser Repräsentation ist, dass man

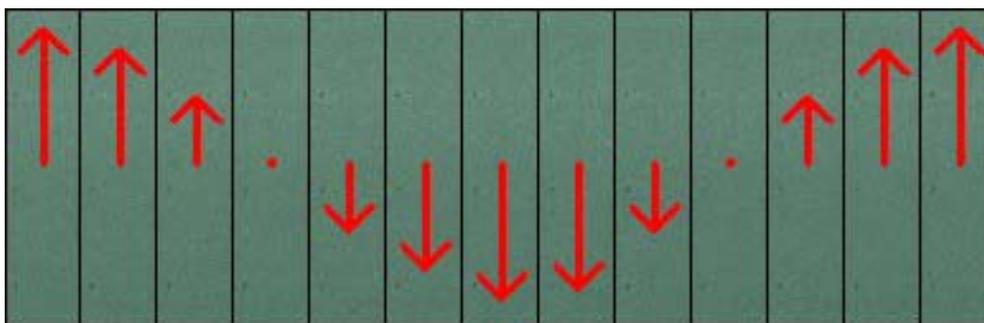


Abbildung 4.8: Serienbild des Geschwindigkeitsvektors aus dem Projekt „Federpendel.prj“

die relevante Größe nicht nur zu jeweils einem Zeitpunkt sieht, sondern hier die zeitliche Entwicklung dokumentiert wird.² Die Geschwindigkeitspfeile sind bereits aus dem bearbeiteten Video bekannt und vertraut, so dass diese Darstellung intuitiver zu verstehen ist als ein reines Liniendiagramm. Um den Zusammenhang zu verdeutlichen, wurde zusätzlich das eigentliche Zeit–Geschwindigkeit–Diagramm in der Skalierung angepaßt, so dass nur eine Schwingungsperiode zu sehen ist. Dieses Diagramm zeigt Abbildung 4.9. Ebenfalls in

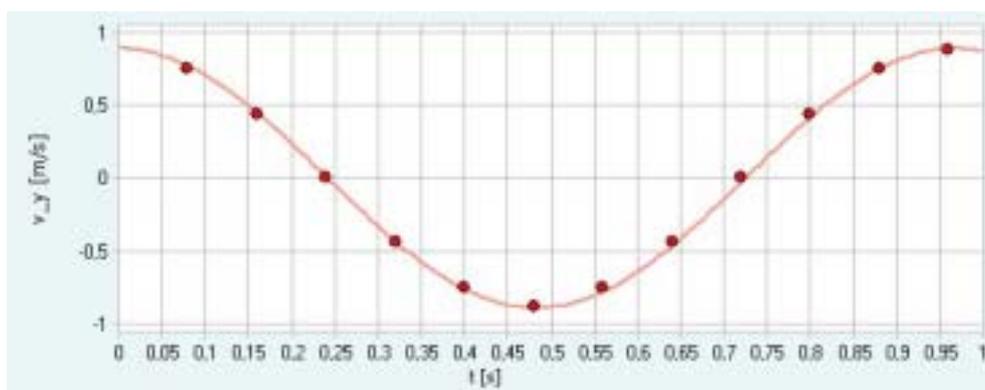


Abbildung 4.9: t–v–Diagramm einer Schwingungsperiode

dem Projekt „Federpendel.prj“ wurde das Serienbild des Geschwindigkeitsvektors als Hintergrund für ein Diagramm gewählt. So konnte eine Überlagerung des Serienbildes und einer Fitkurve erreicht werden. Diese Bild, das der Verdeutlichung des Zusammenhanges zwischen Vektor und Diagramm dient, ist in Abbildung 4.10 zu sehen.

4.2 Quantitative Betrachtung der Fallkegel

Mit der Videoanalyse als Messwerverfassungssystem können viele Versuche ohne komplizierte Versuchsaufbauten quantitativ ausgewertet werden. Als ein Beispiel hierfür dienen die bereits in Abschnitt 3.5 verwendeten Fallkegel. WILHELM hat die quantitative Analyse der Bahrdtschen Fallkegel mit dem computergestützten Messwerverfassungssystem PAKMA

²(Wilhelm 2005, S.43)

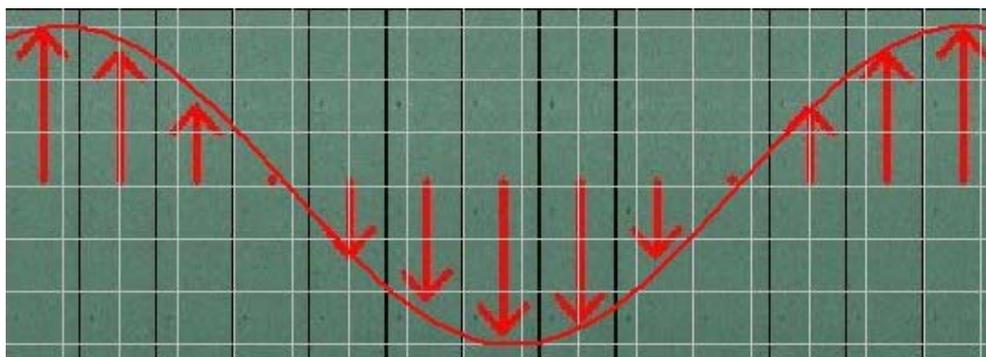


Abbildung 4.10: Serienbild mit Fitkurve

vorgelegt.³ Ähnliche Versuche wurden im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt und mit *measure Dynamics* analysiert. Die Fallkegel wurde aus normalem Papier mit 80 g/m^2 in verschiedenen Farben gebaut. Als Schablone für die Fallkegel wurde ein CD-Rohling mit einem Radius von 12 cm verwendet. Der weitere Zusammenbau richtete sich nach den Empfehlungen von WILHELM(2000, S.28). Es wurde ein Kreissektor mit einem Winkel von 270° ausgeschnitten. Bei einer Überlappung von 10° ergibt sich für den Mittelpunktswinkel $\varphi = 260^\circ$. Für die so gebauten Kegel ergibt sich eine Einzelmasse von 0,71g. Diese Masse wurde als Mittelwert aus den Masse von 14 Kegeln berechnet. Mit Angabe des Fehlers erhält man eine Einzelmasse von $(0,71 \pm 0,03)\text{g}$. Durch Ineinanderstecken mehrere identischer Kegel erhält man Kegel mit der vielfachen Einzelmasse. In diesem Versuch wurden vier identische Kegel ineinander gesteckt. Die Masse des verwendeten Kegels beträgt also 2,84g. Die im Folgenden gezeigten Diagramme und Bilder stammen aus dem Projekt „FK_1Kegel_gelb.prj“. Bei den Versuchen mit den Fallkegeln, sowohl in diesem Teil der Arbeit als auch in Abschnitt 3.5, wurde als Startvorrichtung eine durchsichtige Perlonschnur verwendet. Zwei Schnüre mit einer Länge von je etwa zwei Metern wurden von zwei Helfern parallel zueinander gehalten, so dass die Fallkegel zwischen die beiden Schnüre gelegt werden konnten. Bei raschem Auseinanderziehen der beiden Perlonschnüre ließen sich mit dieser Methode sogar mehrere Fallkegel gleichzeitig aus der selben Höhe starten. Zur Verdeutlichung dieser Methode ist der Aufbau in Abbildung 4.11 mit einer farbigen Schnur dargestellt.

Die in Abschnitt 3.5 gezeigten Serienbilder können als Mittelweg zwischen der konkreten Darstellung einer Bewegung im Video und der abstrakten Darstellung als Diagramm dienen. Sie können bei geschickter Erstellung als Zeit–Ort–Diagramm interpretiert werden. Dabei dient das konkrete Bild des Objektes als Punkt im Ortsdiagramm. In Abbildung 4.12 sind ein Serienbild und ein Zeit–Ort–Diagramm dieser Bewegung im Vergleich dargestellt. Um die Analogie der beiden Darstellungen zu verdeutlichen, wurde bei dem Diagramm im Bildteil (b) die Linie des Diagramms in *measure Dynamics* ausgeblendet. Diese Darstellung als Serienbild erleichtert das Verständnis von Zeit–Orts–Graphen, denn „erst nachdem der Lernende [...] qualitative Zusammenhänge erkannt hat, sollten Graphen [...] zur Präzisierung

³(Wilhelm 2000)

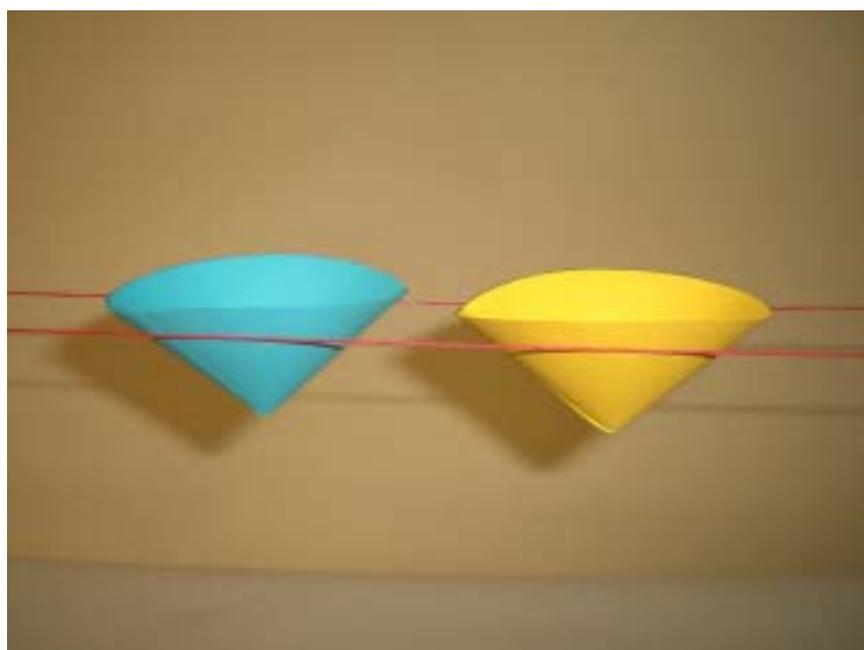


Abbildung 4.11: Startvorrichtung für die Fallkegel

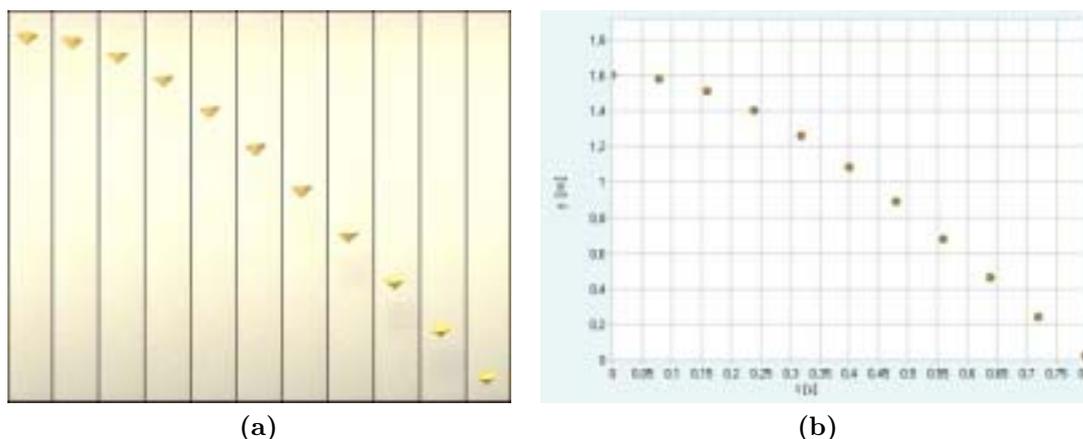


Abbildung 4.12: Vergleich von Serienbild und Zeit–Ort–Diagramm

physikalischer Abhängigkeiten herangezogen werden, deren Interpretation dann zusätzliche Verarbeitungsprozesse erfordert.“ (Heuer 1993, S.371) Man sieht in beiden Darstellungen in Abbildung 4.12, dass sich der Kurvenverlauf mit zunehmender Zeit dem Verlauf einer Gerade annähert, das heißt der Fallkegel erreicht eine konstante Geschwindigkeit. Diese entsteht durch ein Kräftegleichgewicht zwischen der Gewichtskraft F_G und einer Reibungskraft F_R .

Bis zu einem gewissen Grad ist im Einzelfall auch eine quantitative Auswertung des Serienbildes möglich. Es besteht die Möglichkeit, zum Beispiel bei der Verwendung des Serienbildes in einem Arbeitsblatt, eine Zeitskala zu ergänzen. In *measure Dynamics* kann der Zeitabstand zwischen zwei Frames aus der Tabelle abgelesen werden. Somit kann jedem einzelnen Streifen des Serienbildes eine genaue Zeit t zugeordnet werden. Abbildung 4.13 zeigt das Serienbild aus Abbildung 4.12(a) mit einer in einem Graphikprogramm nachträglich einge-

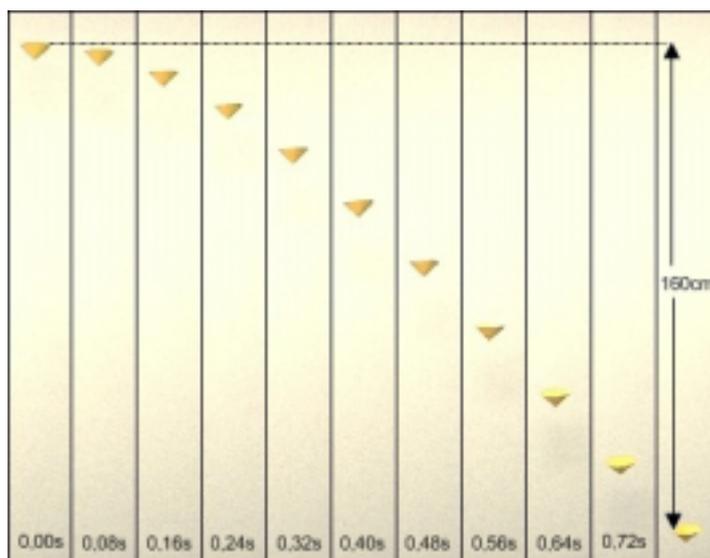


Abbildung 4.13: Serienbild mit nachträglich eingefügter Skaleneinteilung

zeichneten Skalierung. Der Höhenunterschied der Fallkegel im ersten und letzten Teil des Serienbildes wurde in *measure Dynamics* mit der Option „Messen/Längenmessung“ bestimmt. Für eine sinnvolle Auswertung muss dazu vorher die Skalierung vorgenommen werden. Mit einem so vorbereiteten Serienbild kann die konstante Endgeschwindigkeit des Fallkegels bestimmt werden. Betrachtet man das durch das Serienbild erzeugte Zeit–Ort–Diagramm ab dem fünften Einzelbild, kann man mittels eines Steigungsdreiecks die Durchschnittsgeschwindigkeit in der zweiten Hälfte des Falles berechnen. Die Zeitdifferenz Δt ergibt sich zu $\Delta t = 0,80s - 0,32s = 0,48s$. Mittels eines Dreisatzes kann über den angegebenen Maßstab die dazugehörige Fallhöhe Δh bestimmt werden. Man erhält $\Delta h = 1,24m$. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} errechnet man mit diesen zwei Werten $\bar{v} = \Delta h / \Delta t = 2,58 m/s$. Die Berechnung des Durchschnitts der letzten sechs Werte der Geschwindigkeit v_y aus der Tabelle in dem Projekt „FK_1Kegel_gelb.prj“ ergibt eine mittlere Geschwindigkeit von $\bar{v} = 2,50 m/s$. Eine analoge Bearbeitung kann an dem richtigen Zeit–Ort–Diagramm durchgeführt werden. Dabei ist die Skalierung bereits vorgegeben.

Das sich wegen des Kräftegleichgewichts $F_G = F_R$ eine konstante Geschwindigkeit einstellt, kann auch direkt aus dem Zeit–Geschwindigkeit–Diagramm abgelesen werden. In Abbildung 4.14 ist das t – v –Diagramm aus dem oben genannten Projekt zu sehen. Man kann erkennen, dass der Fallkegel zunächst beschleunigt, die Geschwindigkeit aber dann einen konstanten Wert von $2,75 m/s$ annimmt. Dieser Wert ist größer als die aus dem Serienbild und der Tabelle bestimmten Werte, da es sich bei den obigen Berechnungen um Mittelwertbildungen handelt. Die Entstehung des Diagrammes in Echtzeit, parallel zu dem ablaufenden Video, ist hier nochmals als sehr positive Eigenschaft von *measure Dynamics* zu nennen. Aus dieser Endgeschwindigkeit $v_{End} = 2,75 m/s$ kann bei sonst gegebenen Größen der Widerstandsbeiwert c_W des Fallkegels berechnet werden. Für die resultierende Kraft F_{res} gilt $F_{res} = -F_G + F_R = -mg + 1/2 \cdot c_W A \rho v^2$. Dabei ist A die Stirnfläche des Fallkegels. Eine Mes-

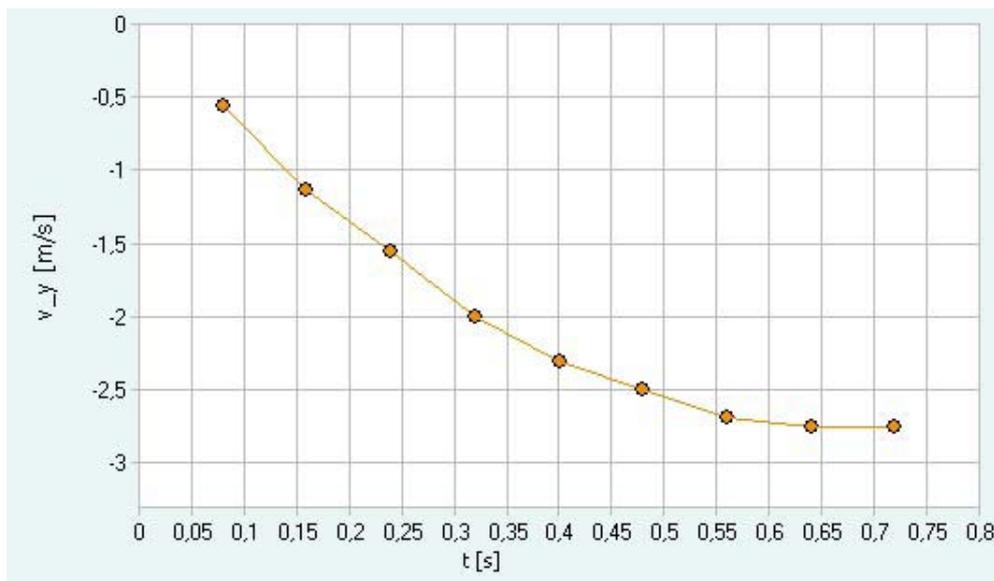


Abbildung 4.14: Deutlich erkennbare Endgeschwindigkeit im t–v–Diagramm

sung an mehreren Fallkegeln ergab für den Durchmesser einen Durchschnittswert von 8,7 cm. Damit ergibt sich für die Stirnfläche $A = r^2\pi = 5,94 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$. In (Hammer u. a. 1994, S.78) ist die Dichte der Luft bei 0°C und 1013 mbar mit $\rho_0 = 1,293 \text{kg/m}^3$ angegeben. Als Abschätzung für die bei der Versuchsdurchführung geltenden Bedingungen wird im Folgenden mit dem Wert $\rho = 1,2 \text{kg/m}^3$ gerechnet. Wie bereits oben bestimmt beträgt die Masse des Fallkegels 2,84g. Aus der Formel für die resultierende Kraft erhält man bei der Division durch die Masse die Gleichung $a = -g + \frac{c_W \rho A}{2m} v^2$. Hat der Fallkegel die konstante Endgeschwindigkeit v_{End} , so ist die Beschleunigung a gleich Null. Man kann somit $c_W = \frac{g \cdot 2m}{\rho A v_{End}^2} = 1,1$ berechnen, was ungefähr dem Ergebnis von WILHELM(2000, S.30) entspricht.

Um eine Betrachtung des Zusammenhanges zwischen Geschwindigkeit und Reibungskraft zu ermöglichen, wurde in *measure Dynamics* eine zusätzliche Tabellenspalte eingefügt. In dieser Spalte wurde das Geschwindigkeitsquadrat $(v_y)^2$ berechnet. Somit hat man die Möglichkeit ein v^2 – a –Diagramm zu erstellen. Dieses Diagramm ist in Abbildung 4.15 gezeigt. Dabei wurde in *measure Dynamics* die reine Darstellung der Punkte ohne die Graphenlinie gewählt. Die Ausgleichsgerade wurde als zusätzliche Funktion in *measure Dynamics* definiert und eingeblendet. Man sieht in diesem Diagramm, dass der Betrag der Beschleunigung mit dem Geschwindigkeitsquadrat abnimmt. Daraus kann man schließen, dass die Reibungskraft mit dem Geschwindigkeitsquadrat zunimmt. Man erkennt den Zusammenhang $F_R \sim v^2$. Auch aus diesem Diagramm kann der Widerstandsbeiwert c_W bestimmt werden. Die Ausgleichsgerade in Abbildung 4.15 ist von der Form $a = -k_1 + k_2 \cdot v^2$. Aus der Formel für die resultierende Kraft folgt für die beiden Konstanten $k_1 = g$ und $k_2 = \frac{c_W \rho A}{2m}$. Aus dem Diagramm liest man für k_1 den Wert $9,6 \text{m/s}^2$ ab, eine gute Näherung der Erdbeschleunigung. Aus der Steigung bestimmt man $k_2 = 1,25 \text{m}^{-1}$. Mit den oben angegebenen

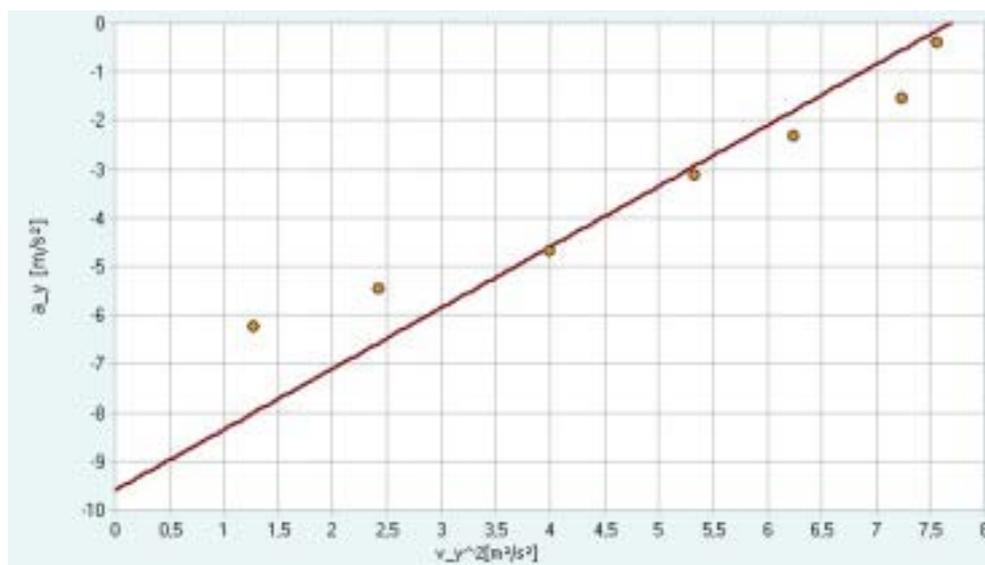


Abbildung 4.15: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Reibung am v^2 - a -Diagramm

Werten für Masse, Stirnfläche und Dichte der Luft ergibt sich damit ein Widerstandsbeiwert von $c_W = 0,99$. Es ist anzunehmen, dass der auf diese Weise bestimmte c_W -Wert weniger nahe an dem tatsächlichen Widerstandsbeiwert liegt, als der oben berechnete Wert $c_W = 1,1$. Durch das zusätzliche Differenzieren zur Bestimmung der Beschleunigung und die Konstruktion der Ausgleichsgeraden entstehen weitere Fehlerquellen.

Mit einem Stroboskopbild mehrerer gleichzeitig fallender Kegel unterschiedlicher Masse kann zusätzlich der Zusammenhang zwischen der Endgeschwindigkeit und der Masse gezeigt werden. Für das Video „FK_Parabel.avi“ wurden sechs Fallkegel gleichzeitig gestartet. Dabei erhöht sich die Masse der Fallkegel durch mehrfaches Ineinanderstecken von links nach rechts jeweils um eine Einzelmasse m . Aus diesem Video wurden Stroboskopbilder mit großen Schrittweiten erstellt. In Abbildung 4.16(a) ist ein Stroboskopbild mit insgesamt fünf Belichtungen zu sehen. Durch die Erhöhung der Masse von $1 * m$ auf insgesamt $6 * m$ ergibt sich eine horizontale Skaleneinteilung mit ganzzahligen Vielfachen der Einzelmasse m . In vertikaler Richtung kann über die unterschiedliche Fallhöhe in der gleichen Zeiteinheit Δt auf die Durchschnittsgeschwindigkeit geschlossen werden. Somit erhält man ein Masse–Geschwindigkeit–Diagramm. Damit kann über den parabelförmigen „Kurvenverlauf“ die quadratische Abhängigkeit $v_{End}^2 \sim m$ veranschaulicht werden. Zur Verdeutlichung dieses Zusammenhanges ist in Abbildung 4.16(b) ein Stroboskopbild mit nur drei Belichtungen, also doppelter Schrittweite zu sehen. Zu beachten ist aber, dass die Fallkegel eine Beschleunigungsphase haben und somit die Durchschnittsgeschwindigkeit nur näherungsweise der Endgeschwindigkeit entspricht.

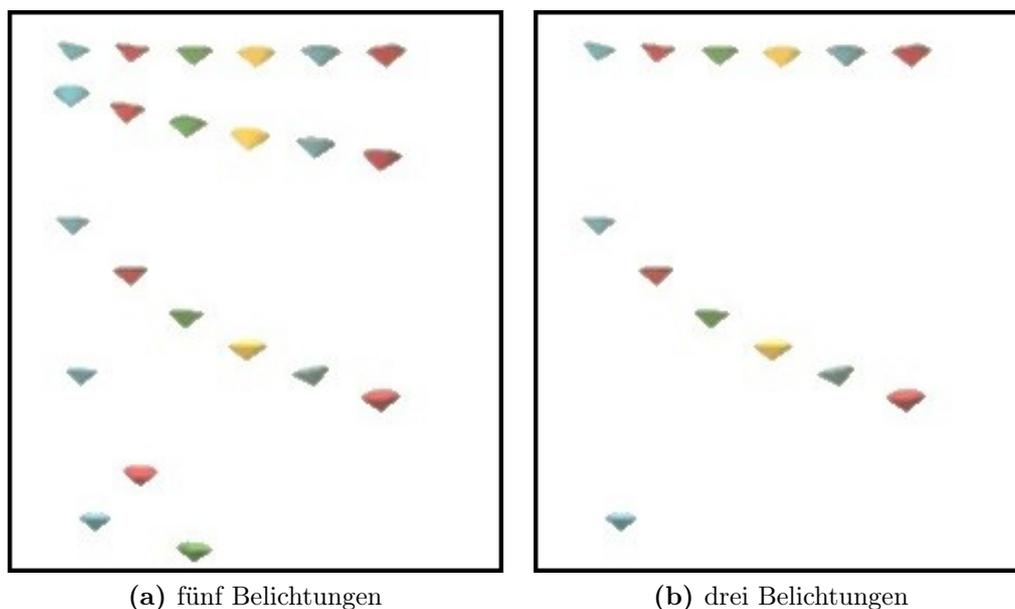


Abbildung 4.16: Zusammenhang zwischen Endgeschwindigkeit und Masse an Hand von Stroboskopbildern

4.3 Die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung

Ein möglicher Einsatz der digitalen Videoanalyse außerhalb des Kinematikunterrichts liegt in der Betrachtung der Maxwell'schen Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen in einem Gas. Die Modellvorstellung MAXWELLS geht von einer großen Anzahl kleiner, harter Teilchen aus, die sich vollkommen elastisch stoßen. Im Idealfall handelt es sich um Teilchen gleicher Masse, die nach den Stoßgesetzen der Mechanik ihre Impulse austauschen. Als anschauliches Beispiel dient hier der Stoß von Billiardkugeln. MAXWELL hoffte, durch dieses Modell die realen Vorgänge in einem Gas erklären zu können: „Wenn sich herausstellen sollte, dass die Eigenschaften eines solchen Teilchensystems mit den Eigenschaften von Gasen korrespondieren, dann hat man eine wichtige physikalische Analogie gewonnen, die zu einem besseren Verständnis der Materieeigenschaften führen könnte.“ (zitiert aus (Harsch 1985, S.129)). Aus diesem Modell berechnete MAXWELL die nach ihm benannte Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen in einem Gas. Die Verteilungsfunktion $F(v)$ lässt sich für ein dreidimensionales Gas in der Form $F(v) = cv^2 \cdot \exp(-kv^2)$ darstellen. Dabei ist v die Teilchengeschwindigkeit. c und k sind Konstanten, die von der Teilchenmasse und der Temperatur abhängen.

Die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung wurde zwar für mikroskopische Teilchen hergeleitet, sie gilt aber auch für makroskopische Teilchen. Diese Erkenntnis kann bei der Durchführung von Demonstrationsexperimenten mit Hilfe von Modellapparaturen genutzt werden. Dabei geht es nicht um eine formelmäßige Herleitung der Verteilung, sondern darum, ausgehend von den zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten zu einer graphi-

schen Darstellung der Maxwellschen Geschwindigkeitsverteilung zu kommen.⁴ Ein übliches Demonstrationsexperiment zur Veranschaulichung dieser Verteilung ist in der Schule die Darstellung mit einem Gerät zur kinetischen Gastheorie, wie es zum Beispiel die Firma Phywe anbietet (Phywe Artikel-Nr. 09060.00, siehe Abb. 4.17) Die über eine Rüttelplatte



Abbildung 4.17: Phywe-Gerät zur kinetischen Gastheorie

in ungeordnete Bewegung versetzten Kügelchen simulieren die Teilchen in einem dreidimensionalen Gas. Diese Kügelchen können das Gehäuse über eine kleine Öffnung verlassen. Dabei müssen sie zwei Blenden passieren, so dass nur Kügelchen mit einer bestimmten Geschwindigkeitsrichtung das Gehäuse verlassen können. Daher kann mit diesem Versuchsaufbau nur die Geschwindigkeitsverteilung eines eindimensionalen Gases untersucht werden. Je nach Geschwindigkeit fliegen die Kügelchen unterschiedlich weit. Durch den Auffänger fallen die Kügelchen entsprechend ihrer Flugweite in die Registrierkammer. Bei genügend langer Versuchsdauer mit gelegentlichem Nachfüllen von Kügelchen ergibt sich in der Registrierkammer eine Verteilung entsprechend der Maxwellschen Theorie. Es ist möglich, eine kleine rote Styroporkugel in die Rüttelkammer zu geben und diese mit *measure Dynamics* zu verfolgen. Eine Alternative zu diesem Versuch wird im Folgenden gezeigt.

Der Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik der Universität Würzburg verfügt über einen Luftkissentisch mit einem beweglichen Rahmen, der auf der Innenseite mit einem Draht

⁴(Görnitz und Scheefer 1987, S.14)

bespannt ist. Dieser Rahmen kann mittels eines Riemenantriebs in Bewegung versetzt werden. Setzt man mehrere Pucks auf den Luftkissentisch, werden diese durch elastische Stöße mit dem Rahmen zu ungeordneten Bewegungen angeregt. Die Pucks aus hartem Plastik stoßen auch untereinander elastisch. Somit erhält man eine Modell eines zweidimensionalen Gases. Ein solcher Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.18(a) zu sehen. Der Motor für



(a) Gesamter Aufbau



(b) Detailaufnahme des Rahmens

Abbildung 4.18: Versuchsaufbau für die Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung

den Riemenantrieb ist hinter der linken Ecke des Luftkissentisches zu sehen. An der Vorderseite ist der Schlauchanschluss für die Luftzufuhr erkennbar. Die Konstruktion mit der Stativstange und dem runden Stativfuß an der linken Seite des Luftkissentisches verhindert ein Verrutschen des relativ leichten Luftkissentisches, wenn der Riemen zum Motor gespannt wird. So wird eine kontinuierliche Bewegungsanregung durch den Rahmen garantiert. In Abbildung 4.18(b) ist eine Detailaufnahme des Rahmens zu sehen. Man kann hier das Prinzip des Antriebs für den Rahmen erkennen. Durch die unterschiedlich langen Be-

festigungen, die durch den Riemen in gleichem Maß angetrieben werden, wird der Rahmen in eine rotierende Bewegung versetzt. Dieser Aufbau wurde direkt von oben gefilmt. Wie schon in Abschnitt 1.2 bemerkt, ist es wichtig, dass die optische Achse senkrecht auf der Bewegungsebene, also in diesem Fall dem Luftkissentisch steht. So werden Verzerrungen vermieden, die zu einer fehlerhaften Auswertung führen könnten. An der Universität Würzburg konnte dies ohne größere Probleme in einer zweistöckigen Versuchshalle durchgeführt werden. Bei einer Anwendung eines ähnlichen Versuches in der Schule könnte das Video alternativ im Treppenhaus aufgenommen werden. Die Anregung der Pucks muss dabei nicht über einen motorbetriebenen Rahmen erfolgen. Für eine einfachere Umsetzung in der Schule wäre auch ein manuelles Anstoßen der Pucks mit einem Drahtrahmen denkbar. Bei dem für die Schule vorgesehenen Luftkissentisch der Firma Phywe (Artikel-Nr. 11204.88) sollte die Konstruktion eines passenden Rahmens ohne größeren technischen Aufwand möglich sein. Durch die Möglichkeit der Projektion mit dem Overheadprojektor würde zudem die Aufnahme erleichtert.

Um den Versuch auszuwerten, wurde ein Video von knapp drei Minuten Länge aufgenommen. Nach der Bearbeitung des Videos in Virtual Dub unter Beachtung der doppelten Einzelbilder (vgl. Abschnitt 2.1.3) stand für die Analyse mit *measure Dynamics* ein Video mit 2157 Frames zur Verfügung. In Abbildung 4.19 ist ein Schnappschuss aus diesem Video zu sehen. Auf das Anbringen eines Maßstabes, wie es auf Seite 9 empfohlen ist, wurde



Abbildung 4.19: Ausschnitt aus dem Video „Geschwindigkeitsverteilung.avi“

hier bewusst verzichtet. Wie man in Abbildung 4.18 sehen kann, boten sich bei dem verwendeten Versuchsaufbau keine günstigen Befestigungsmöglichkeiten für einen Maßstab. Es wurde daher beschlossen, die Rahmenbreite von 78 cm als Skalierung zu benutzen. So

konnte der komplette Bildausschnitt für den Luftkissentisch verwendet werden. Analysiert wurde die Bewegung des rot markierten Pucks. Die automatische Analyse verlief dabei fehlerfrei. So konnte ohne großen Arbeitsaufwand die unbedingt notwendige hohe Anzahl an Frames ausgewertet werden. Das Video und die Datentabelle finden sich in dem Projekt „Geschwindigkeitsverteilung.prj“. Zur Auswertung wurde die Tabelle exportiert und mit Excel bearbeitet. Diese Datei „Excel-Tabelle zur Geschwindigkeitsverteilung.xls“ befindet sich gemeinsam mit den Projektdateien in dem Ordner „Geschwindigkeitsverteilung“. Aus den Geschwindigkeiten v_x und v_y wurde in dem Tabellenblatt „Arbeitstabelle“ mit der Formel $|v_{ges}| = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2}$ der Betrag $|v_{ges}|$ der Gesamtgeschwindigkeit in jedem der 2157 Frames berechnet. Es ergaben sich Werte von 0 m/s bis 1,07 m/s. Um die Geschwindigkeitsverteilung graphisch darstellen zu können, wurden Intervalle mit einer Größe von 0,07 m/s definiert. In Excel wurde anschließend gezählt, wie sich die gemessenen Geschwindigkeiten auf die Intervalle verteilen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 zu sehen. Die Anzahl pro Intervall wurde als Absolutwert bestimmt und zusätzlich als Prozentteil

obere Intervallgrenze in m/s		0,07	0,14	0,21	0,28	0,35	0,42	0,49	0,56	0,63
Anzahl	absolut	114	181	496	353	367	250	162	89	55
	in Prozent	5,3	8,4	23,0	16,4	17,0	11,6	7,5	4,1	2,5

obere Intervallgrenze in m/s		0,70	0,77	0,84	0,91	0,98	1,05	1,12	1,19	1,26
Anzahl	absolut	32	28	12	10	5	2	1	0	0
	in Prozent	1,5	1,3	0,6	0,5	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0

Tabelle 4.1: Verteilung der Geschwindigkeiten

aller 2157 Geschwindigkeitswerte ausgegeben. Die relevante Teile des Tabellenblattes „Arbeitstabelle“ wurden zur besseren Übersicht in einem weiteren Tabellenblatt „Ergebnisse“ zusammengefasst. Aus diesen Daten wurde ein Balkendiagramm der Geschwindigkeitsverteilung erstellt, das in Abbildung 4.20 zu sehen ist. Über das Diagramm wurde eine Fitkurve der Form $F(v) = cv \cdot \exp(-kv^2)$ gelegt. Dies entspricht der Verteilungsfunktion für ein zweidimensionales Gas. Mittels dieser Fitkurve wird ein Vergleich des gemessenen und des theoretischen Ergebnisses vereinfacht. Obwohl die Teilchenzahl mit insgesamt nur 24 Teilchen sehr gering ist, hat die gemessenen Verteilung in guter Näherung die zu erwartenden Form. Somit kann ein Demonstrationsversuch zur Maxwellschen Geschwindigkeitsverteilung im Unterricht vorgeführt und mit dem Projekt „Geschwindigkeitsverteilung.prj“ und der zugehörigen Exceltabelle ohne großen Aufwand ausgewertet werden.

Um den Schülern den Zusammenhang zwischen den beiden Geschwindigkeiten v_x und v_y und der Gesamtgeschwindigkeit v_{ges} zu verdeutlichen, wurden in dem oben genannten Projekt Vektoreinblendungen für diese drei Geschwindigkeiten erstellt. Dabei kann zwischen einer ortsfesten Darstellung mit Pfeilfuss in der Mitte des Luftkissentisches und

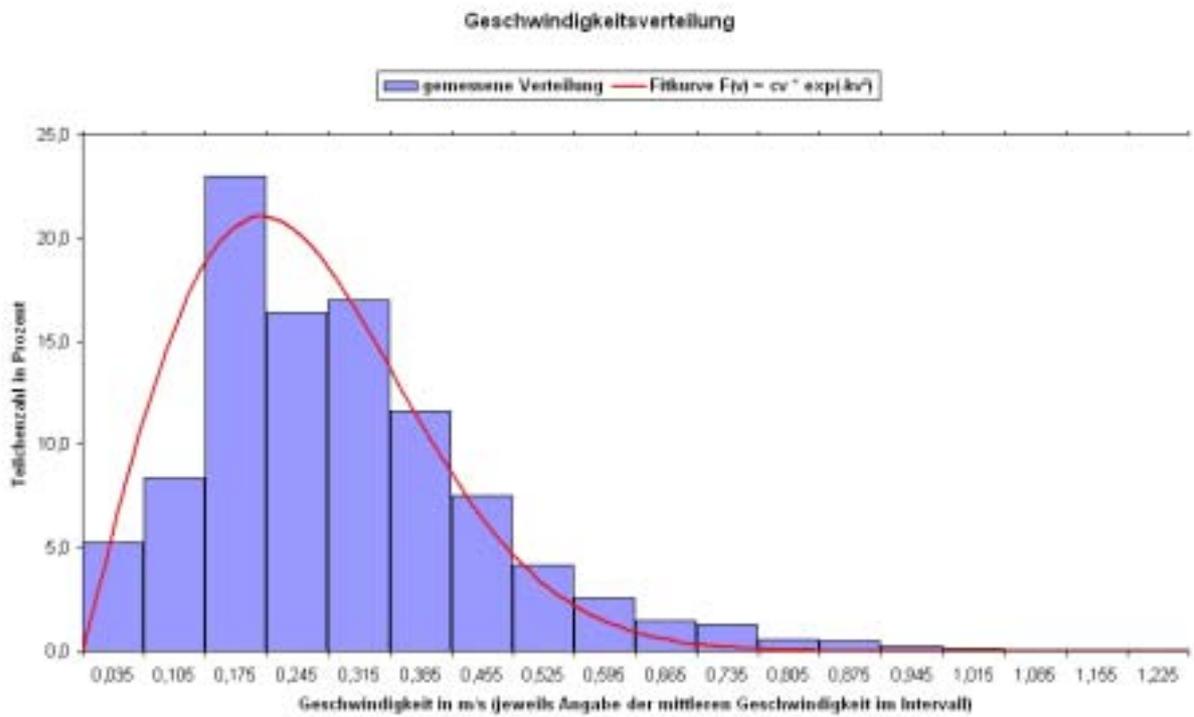


Abbildung 4.20: Diagramm der Geschwindigkeitsverteilung

einer Darstellung mit angehefteten Vektoren gewählt werden. Beide Möglichkeiten werden in Abbildung 4.21 gezeigt. Durch diese dynamisch ikonische Repräsentation kann die Entstehung der Gesamtgeschwindigkeit aus den beiden Geschwindigkeiten v_x und v_y leicht erklärt werden.

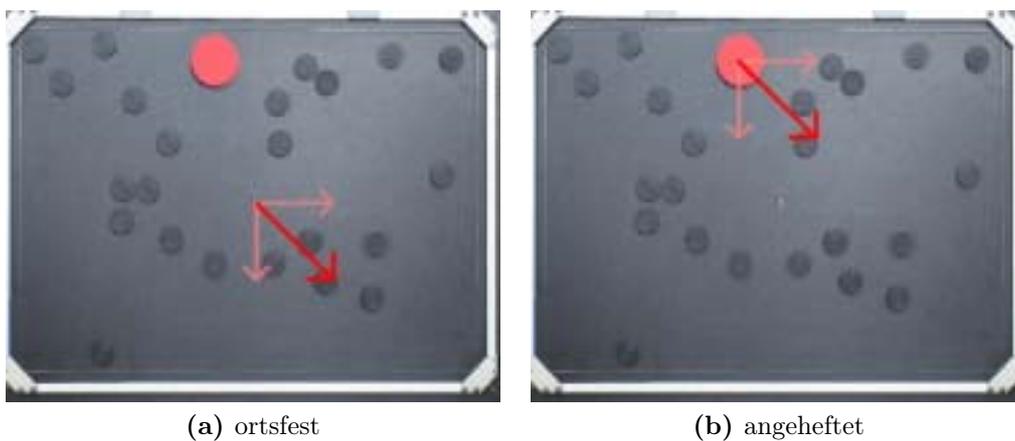


Abbildung 4.21: Verschiedene Darstellungen der Geschwindigkeitsvektoren

Zusammenfassung und Schlussgedanke

Der Computereinsatz ist aus dem heutigen Unterricht nicht mehr weg zu denken. Gerade im Fach Physik bietet sich zahlreiche Möglichkeiten durch Simulationen, Java-Applets oder Systeme zur computergestützte Messwerterfassung. Die digitale Videoanalyse, das Aufnehmen von Bewegungen und deren Auswertung mit einer Software, war dabei bisher ein eher umständliches Verfahren, das bei relativ großem Aufwand vergleichsweise wenig neue Möglichkeiten bot. Gerade bei der Auswertung von Laborversuchen lieferten andere Messwerterfassungssysteme bei geringerem Arbeitsaufwand für Aufbau und Auswertung einfacher die gewünschten Ergebnisse. Mit *measure Dynamics* von Phywe ist ein Programm verfügbar, das den Einsatz der digitalen Videoanalyse im Physikunterricht attraktiver macht. Der Arbeitsaufwand bei der Erstellung der Videos hat sich zwar nicht verändert, aber die neuen Möglichkeiten in der Auswertung und in der Darstellung und Präsentation der Ergebnisse rechtfertigen diesen Aufwand. Gerade im Kinematikunterricht bietet die neue Software eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten. Mit den in Echtzeit entstehenden Diagrammen, die nach WILHELM ein Verständnis der abstrakten graphischen Darstellung erleichtern, kann die digitale Videoanalyse von Beginn an eingesetzt werden.⁵ Die Vielzahl an frei definierbaren Einblendungen, die in *measure Dynamics* zur Verfügung stehen, erlauben eine anschaulichen Darstellung von Bewegungsabläufen und den Beziehungen zwischen Größen wie Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung. Besonders die Vektoreinblendungen bieten sich in der Kinematik an. Durch diese dynamisch ikonische Repräsentation wird ein anschaulicher Einblick in physikalische Vorgänge gegeben.⁶ Durch die Einblendung ortsfester Vektoren wird der Vergleich der Vektoren untereinander und mit der Bewegung des Objektes erleichtert.⁷ Zudem lassen sich in *measure Dynamics* mehrere Objekte gleichzeitig verfolgen. So können zum Beispiel Stoßprozesse oder gekoppelte Bewegungen mit der digitalen Videoanalyse ausgewertet werden. Die Option, das der Auswertung zu Grunde liegende Koordinatensystem drehen zu können, erlaubt die einfache Auswertung von Bewegungen, die nicht exakt horizontal oder vertikal verlaufen. Die mit *measure Dynamics* sehr einfach zu erstellenden Stroboskopbilder können in vielen Bereichen des Physikunterrichts eingesetzt werden.

⁵(Wilhelm u. a. 2003, S.24)

⁶(Heuer 1996, S.12)

⁷(Wilhelm 2005, S.44)

Das Programm *measure Dynamics* bietet die Möglichkeit, fertig bearbeitete Videos mit allen Einblendungen zu exportieren, um sie unabhängig von *measure Dynamics* verwenden zu können. Gerade diese Option, aber auch die digitale Videoanalyse an sich, können leicht dazu führen, dass im Unterricht anstatt eines realen Experiments nur ein Video gezeigt oder ausgewertet wird. Zum Schluss dieser Arbeit muss daher trotz der vielen neuen Möglichkeiten, die sich mit *measure Dynamics* im Bereich der Videoanalyse bieten, darauf hingewiesen werden, dass die Durchführung eines Experiments im Unterricht auf keinen Fall durch das Abspielen von Videos zu ersetzen ist. Im Idealfall wird das Experiment „live“ durchgeführt und dabei gefilmt, um anschließend das Video und damit den gezeigten Versuch auswerten zu können. Schließlich kann der gezielte Einsatz der digitalen Videoanalyse sowohl für die Schüler als auch für den Lehrer eine Bereicherung sein.

Literaturverzeichnis

- [Ado 2000] Adobe Dynamic Media Group: *Ein Handbuch zur digitalen Videobearbeitung*. Juni 2000. – <http://www.adobe.com/de/products/pdfs/dvprimer.pdf>, zuletzt aufgerufen am 26.11.2007
- [Bredthauer u. a. 2007] BREDTHAUER, Wilhelm ; BRUNS, Klaus ; DORN, Hans-Jerg ; GROTE, Manfred ; HANNIBAL, Ludger ; RENNER, Michael ; SCHELL, Norbert ; SCHMIDT, Martin ; WOJKE, Peter ; ZIMMERSCHIED, Frank: *Impulse Physik — Oberstufe*. Stuttgart : Ernst Klett Verlag, 2007
- [Fösel u. a. 2005] FÖSEL, Angela ; HILSCHER, Helmut ; THANNER, Anton ; VITZ, Sylvia ; WÖRLEN, Friedrich: *Natur und Technik — Physik 7*. Berlin : Cornelsen Verlag, 2005 (Gymnasium Bayern)
- [Gröber u. a. 2005] GRÖBER, Sebastian ; POTH, Thomas ; WILHELM, Thomas: Zweidimensional-vektorielle Kinematik mit Videoanalyse. In: *Praxis der Naturwissenschaften — Physik in der Schule* (2005), Nr. 8/54, S. 41–47
- [Göriz und Scheefer 1987] GÖRITZ, Gunnar-Hasso ; SCHEEFER, Hans-Joachim: Computersimulation der Maxwellschen Energie- und Geschwindigkeitsverteilung. In: *Praxis der Naturwissenschaften — Physik* (1987), Nr. 6/36, S. 13–15
- [Hammer u. a. 1994] HAMMER, Anton ; HAMMER, Hildegard ; HAMMER, Karl: *Physikalische Formeln und Tabellen*. München : J. Lindauer Verlag (Schaefer), 1994
- [Harsch 1985] HARSCH, Günther: Die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung. In: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* (1985), Nr. 3/38, S. 129–138
- [Hes 2005] Hessisches Kultusministerium: *Lehrplan Physik: Gymnasialer Bildungsgang*. 2005. – http://www.kultusministerium.hessen.de/irj/HKM_Internet?cid=660f59b5786b6fae1e896579c8085c6f, zuletzt aufgerufen am 23.11.2007
- [Heuer 1993] HEUER, Dieter: Dynamische Physik-Repräsentationen in Realexperimenten — Beispiele. In: DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT, Fachausschuss Didaktik der P. (Hrsg.): *Didaktik der Physik: Vorträge — Physikertagung 1993 Esslingen*, 1993, S. 371–378

- [Heuer 1996] HEUER, Dieter: Dynamische Repräsentationen. In: *Praxis der Naturwissenschaften — Physik* (1996), Nr. 4/45, S. 12–18
- [Hilscher 2000] HILSCHER, Helmut: Videoeinsatz in der Lehre. In: *Physik in der Schule* 38 (2000), Nr. 3, S. 193–200
- [Koch 2005] KOCH, Klaus J.: Mechanikversuche digital filmen. In: *Praxis der Naturwissenschaften — Physik in der Schule* (2005), Nr. 2/54, S. 38–42
- [Lippky 2003] LIPPKY, Hans-Peter: Bewegte Physik: Bewegung wird messbar. In: *Praxis der Naturwissenschaften — Physik in der Schule* (2003), Nr. 2/52, S. 30–33
- [Michel 2007] MICHEL, Christine: *Videoanalyse zweidimensionaler Bewegungen mit dynamisch ikonischen Repräsentationen im Physikunterricht*. 2007. – Staatsexamensarbeit für das Lehramt an Gymnasien, Universität Würzburg
- [Schmidt 2000] SCHMIDT, Ulrich: *Professionelle Videotechnik*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2000
- [Son 2000] Sony Corporation: *Digital Video Camera Recorder DCR-VX2000E Bedienungsanleitung*. 2000. – Kennnummer 3-061-508-21 (1)
- [Wilhelm 2000] WILHELM, Thomas: Der alte Fallkegel — modern behandelt. In: *Praxis der Naturwissenschaften — Physik* (2000), Nr. 6/49, S. 28–31
- [Wilhelm 2005] WILHELM, Thomas: Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung. In: NIEDDERER, H. (Hrsg.) ; FISCHLER, H. (Hrsg.) ; SUMFLETH, E. (Hrsg.): *Studien zum Physik- und Chemielernen* Bd. 46. Berlin : Logos Verlag, 2005
- [Wilhelm u. a. 2003] WILHELM, Thomas ; GESSNER, Thomas ; SULEDER, Michael ; HEUER, Dieter: Sportaktivitäten vielseitig analysieren und modellieren. In: *Praxis der Naturwissenschaften — Physik in der Schule* (2003), Nr. 2/52, S. 23–30
- [Wilhelm und Heuer 2002] WILHELM, Thomas ; HEUER, Dieter: Fehlvorstellungen in der Kinematik vermeiden. In: *Praxis der Naturwissenschaften — Physik in der Schule* (2002), Nr. 7/51, S. 29–34

Abbildungsverzeichnis

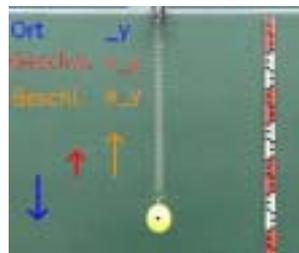
1.1	Videoausschnitt	9
2.1	FireWire Kabel (von http://images.google.de/images?q=firewire&gbv=2&ndsp=18&svnum=10&hl=de&start=90&sa=N am 13.12.2007)	13
2.2	Codec-Auswahl bei Virtual Dub	14
2.3	Virtual Dub Benutzeroberfläche	15
2.4	Virtual Dub Menüpunkt „Video“	16
2.5	Virtual Dub Menüpunkt „Filter“	16
2.6	Sony Mini-DV Kamera DCR-VX2000E	18
2.7	Strahlteilerprisma (Schmidt 2000, S.226)	18
2.8	Casio EX-Z5 von http://www.exilim.de/global/images/productoverview/exz5_front.jpg am 18.12.2007	20
2.9	Unterschiedliche Aufnahmen des gleichen Experimentes	21
2.10	Ortspunkte der Analyse	22
3.1	Tabelle in <i>measure Dynamics</i>	25
3.2	Erzeugung des Zeit-Ort-Diagrammes in Echtzeit	26
3.3	Screenshot mit Diagrammen für Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung (von oben nach unten)	27
3.4	Federpendel mit „angehefteten“ Vektoren	28
3.5	Dynamisch ikonische Repräsentation mit Vektorpfeil	29
3.6	Einblendung mehrerer ortsfester Vektoren	29
3.7	Screenshot aus dem Video „RFB_Stoß_Ort“ nach dem Stoß	30
3.8	t-x-Diagramm der beiden Wagen auf der Rollenfahrbahn mit zusätzlicher Hilfsgerade (schwarz)	31
3.9	t-v-Diagramm der beiden Wagen mit unterschiedliche Schrittweite bei der Analyse	32
3.10	Ungünstiges t-v-Diagramm	33
3.11	Serienbild aus dem Video „FK_2Kegel.avi“	34
3.12	Serienbild eines Kegels aus dem Video „FK_2Kegel.avi“	34
3.13	Serienbild einer horizontalen Bewegung bei einem inelastischen Stoß	35

3.14	Screenshot mit gedrehtem Koordinatensystem	36
3.15	t–x–Diagramme des Wagens auf der schiefen Ebene	37
3.16	t–y–Diagramme des Wagens auf der schiefen Ebene	38
3.17	t–v _x –Diagramm des Wagens auf der schiefen Ebene (gedrehtes Koordinatensystem)	38
3.18	t–v _y –Diagramme des Wagens auf der schiefen Ebene	39
3.19	Einblendung eines waagrechten Vektors	40
3.20	Schnappschuss mit Winkelmessung	41
3.21	t–x–Diagramme der aufsteigenden Luftblase	42
3.22	Bewegungsablauf beim Trampolinspringen (Fösel u. a. 2005, S.123)	43
3.23	Stroboskopbild aus dem Video „Tennisball.avi“	44
3.24	Verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten mit <i>measure Dynamics</i>	45
3.25	Stroboskopbilder zur Beschleunigung (Bredthauer u. a. 2007)	46
3.26	Neigen der Kamera für horizontale, beschleunigte Bewegungen	46
3.27	Stroboskopbild mit durchscheinenden Einzelbildern, Schrittweite „2“	46
3.28	Stroboskopbilder mit unterschiedlicher Schrittweite	47
3.29	Stroboskopbild mit falschem Hintergrund bei Schrittweite „2“	47
4.1	Wagen und Reflektor auf der Rollenfahrbahn	50
4.2	Schnappschuss aus dem Video „RFB_Diagrammeinführung“	50
4.3	Darstellung mit gestempelter Spur	51
4.4	t–x–Diagramm in Echtzeit, passend zu Abbildung 4.2	51
4.5	Zusätzlicher Filter „Ortsmarkierung Balken“	52
4.6	Diagramm mit nachträglich eingezeichnetem Balken	52
4.7	Weitere Diagramme zum Wagen auf der Rollenfahrbahn	53
4.8	Serienbild des Geschwindigkeitsvektors aus dem Projekt „Federpendel.prj“	54
4.9	t–v–Diagramm einer Schwingungsperiode	54
4.10	Serienbild mit Fitkurve	55
4.11	Startvorrichtung für die Fallkegel	56
4.12	Vergleich von Serienbild und Zeit–Ort–Diagramm	56
4.13	Serienbild mit nachträglich eingefügter Skaleneinteilung	57
4.14	Deutlich erkennbare Endgeschwindigkeit im t–v–Diagramm	58
4.15	Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Reibung am v^2 – a –Diagramm	59
4.16	Zusammenhang zwischen Endgeschwindigkeit und Masse an Hand von Stroboskopbildern	60
4.17	Phywe–Gerät zur kinetischen Gastheorie von http://www.phywe.de/download/products/0906000d.pdf am 12.01.2008	61
4.18	Versuchsaufbau für die Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung	62
4.19	Ausschnitt aus dem Video „Geschwindigkeitsverteilung.avi“	63
4.20	Diagramm der Geschwindigkeitsverteilung	65

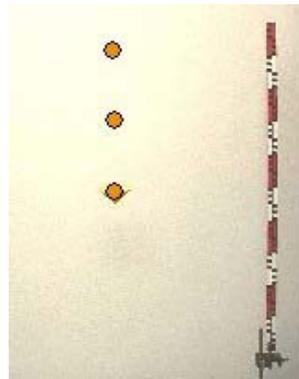
4.21 Verschiedene Darstellungen der Geschwindigkeitsvektoren	65
--	----

Inhaltsübersicht der CD

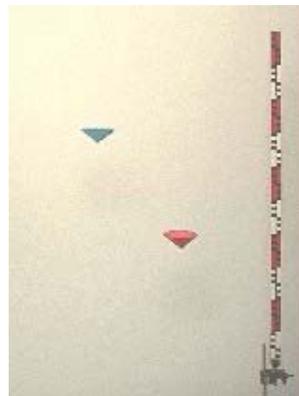
Federpendel.prj
FP_DynIkonRepräsentation.prj
FP_Echtzeitdiagramme.prj



FK_1Kegel_Gelb.prj



FK_2Kegel.avi



FK_Parabel.prj



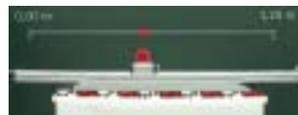
Geschwindigkeitsverteilung.prj



Luftblase.prj



RFB_Diagrammeinführung.prj



RFB_Inelastisch.avi

RFB_Zwei_Objekte.prj

RFB_Zwei_Objekte_Geschw.prj

RFB_Zwei_Objekte_Ort.prj



SE_Geneigt.avi



SE_Steil.prj



Tennisball.avi



Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Zunächst gilt mein großer Dank meinem Betreuer Herrn Dr. Thomas Wilhelm. Er hatte über die Dauer der gesamten Arbeit stets Zeit für Fragen und Wünsche. Seine unermüdliche Unterstützung ging dabei weit über das übliche Maß hinaus und verdient große Anerkennung.

Mein Dank gilt auch der Firma Phywe und insbesondere Herrn Markus Grumann, der mir neben der Software eine große Zahl von Experimenten und Material zur Verfügung gestellt hat. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Michael Suleder, der die Software *measure Dynamics* programmiert hat. Er stand besonders in der Anfangsphase der Arbeit mit seinem Programm mit Rat und Tat zur Seite und hat Anfragen und Wünsche rasch beantwortet und umgesetzt.

Vielen Dank schulde ich auch Christine Michel, Christiane Arndt, Renate Strobel und Stefan Herold, die mich bei den zahlreichen Videoaufnahmen mit viel Geduld tatkräftig unterstützt haben.

Ein besondere Dank gilt meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglichten und mich in all meinen Entscheidungen unterstützt haben. Für die Unterstützung während des Studiums möchte ich mich auch bei meinen Großeltern herzlich bedanken.

Mein größter Dank gilt meiner Freundin Vanessa. Für alles!

Selbständigkeitserklärung

ERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit in allen Teilen selbständig gefertigt und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Soweit nicht anders angegeben stammen alle Abbildungen aus selbst erstellten Videos.

Würzburg, den

Michael Benz