

Ein Tutorial

zu

measure dynamics

von

Markus Sauer

März 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	1
1.1	Wichtige Informationen zum Lesen dieses Tutorials	2
2	Vorbereitungen	3
2.1	Aufnahme eines Videos	3
2.1.1	Position von Objekt und Kamera	3
2.1.2	Beleuchtung	6
2.1.3	Belichtung	7
2.2	Videokameras für die Analyse	8
2.2.1	Digitaleameratechnik	8
2.2.2	Die Wahl der Kamera	11
2.3	Installation der benötigten Programme	12
2.3.1	measure Dynamics	13
2.3.2	convideo	15
2.3.3	Xvid MPEG4 Codec	15
2.4	Vorbereitung des Videos	15
3	Videoanalyse mit measure Dynamics	19
3.1	Die grundlegenden Funktionen	19
3.1.1	Dateien und Projekte öffnen, speichern, kopieren und verschieben	21
3.1.2	Videos betrachten und schneiden	22
3.2	Die erste Analyse	27

3.2.1	Skalierung	27
3.2.2	Automatisch analysieren	30
3.2.3	Genauigkeit der Analyse	31
3.2.4	Manuell analysieren	37
3.2.5	Das Tabellenfenster	38
3.2.6	Diagramme	42
3.2.7	Visualisierungen	47
3.2.8	Video-Export	51
3.3	Das Fadenpendel	53
3.3.1	Versuch	53
3.3.2	Videoanalyse	55
3.3.3	Auslenkwinkel	56
3.3.4	Geschwindigkeit und Beschleunigung	61
3.3.5	Energieerhaltung	66
3.4	Beschleunigungsvorgänge beim Auto	76
3.4.1	Versuch	76
3.4.2	Videoanalyse	76
3.4.3	Vom Vektorpfeil zum Graphen	78
3.4.4	Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Leistung	86
3.4.5	Vollbremsung	88
4	Fazit	93
5	Tipps und Tricks	95
5.1	Filter und Einblendungen unsichtbar	95
5.2	Mehrere Bildschirme	95
5.3	Unsichtbare Verbindungslinien von Anfassern	96
5.4	Darstellung vieler Filter langsam	96
5.5	Einstellen der Berechnungsgenauigkeit	96
5.6	Einstellung der Punktgröße im Diagramm	97
6	Verzeichnisse	99
	Glossar	99
	Literaturverzeichnis	101

1 Vorwort

Mit *measure Dynamics* von Michael Suleder wird seit einigen Jahren von der Firma Phywe Systeme GmbH & Co. KG ein Programm vertrieben, das Videos analysieren und anschließend auf vielfältige Weise auswerten kann. Durch die eingebaute Objekterkennung lassen sich Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Gegenstandes zu jedem Zeitpunkt in wenigen Sekunden bestimmen. Zur Veranschaulichung lassen sich Graphen und dynamisch ikonische Repräsentationen¹¹ von physikalischen Größen im Video anzeigen. Dadurch werden physikalische Größen multicodiert, also gleichzeitig durch verschiedene Repräsentationen dargestellt.¹²

Dieses Tutorial zeigt dem Anwender, dass er sich bereits beim Videodreh Gedanken machen muss, wie und mit welcher Kamera ein Versuch gefilmt werden sollte, um bei der späteren Analyse möglichst gute Messwerte zu erhalten. Hierzu werden in Kapitel 2.1 Kriterien erarbeitet. Oft können von einer Kamera erstellte Videos nicht direkt am PC geöffnet werden, da ein sogenannter Codec fehlt. Um dieses Problem zu lösen, wurde das Programm *convideo* erstellt, das praktisch jedes Video in ein geeignetes Format umwandeln kann (Kap. 2.3.2). In den Versuchen der folgenden Kapitel wird der Anwender schließlich in das Arbeiten mit dem Programm *measure Dynamics* eingeführt. Während zunächst die Grundfunktionen wie das Öffnen, Abspielen und Schneiden von Videos gezeigt und einfache Diagramme und Visualisierungen erstellt werden (Kap. 3.2), kommen später komplexere Anwendungsmöglichkeiten hinzu, die durch geschicktes Einstellen der Programmwerkzeuge erreicht werden können.

¹¹vgl. Heuer (1996)

¹²vgl. Michel (2007, S. 34ff)

1.1 Wichtige Informationen zum Lesen dieses Tutorials

In diesem Tutorial werden Programmnamen und -funktionen, sowie Beschriftungen Elementen der grafischen Oberfläche *kursiv* gedruckt. Zahlen, Formeln und andere Zeichenketten, die in das Programm eingegeben werden, sind in einer **dicktengleichen Schrift** gesetzt.

2 Vorbereitungen

In diesem Kapitel werden die Vorbereitungen zu einer erfolgreichen Videoanalyse getroffen. Zunächst wird besprochen, welche Dinge während des Videodrehs beachtet werden müssen. Darauf aufbauend werden Kameras vorgestellt, die sich für den Einsatz in der Schule eignen. Anschließend wird auf die Installation der benötigten Programme und das Umwandeln eines Videos in ein geeignetes Format eingegangen.

2.1 Aufnahme eines Videos

Bei der Videoanalyse wird grundsätzlich der Ort eines Objekts zu unterschiedlichen Zeitpunkten aus den Bildern eines Videos bestimmt. Dabei wird der Position des Objekts im Bild $(x_{\text{Bild}}, y_{\text{Bild}})$ in **Pixeln** durch Multiplikation mit einem Skalierungsfaktor ein Ort (x, y) zugewiesen. Bei der Aufnahme sollen für diesen Prozess möglichst geeignete Bilder entstehen. Im Folgenden werden hierzu Kriterien erarbeitet.

2.1.1 Position von Objekt und Kamera

Die Kamera darf sich während der Durchführung des Versuchs nicht bewegen. Sie sollte idealerweise mittels Stativ befestigt sein, keinesfalls jedoch in der Hand gehalten werden, da sich das Koordinatensystem und somit dessen Ursprung ansonsten unzulässig bewegen würde. Gleichzeitig sollte die Bewegung des Versuchsobjekts auf eine Ebene senkrecht zur optischen Achse der verwendeten Kamera beschränkt sein. Dies liegt daran, dass das Videobild keine geeigneten Tiefeninformationen

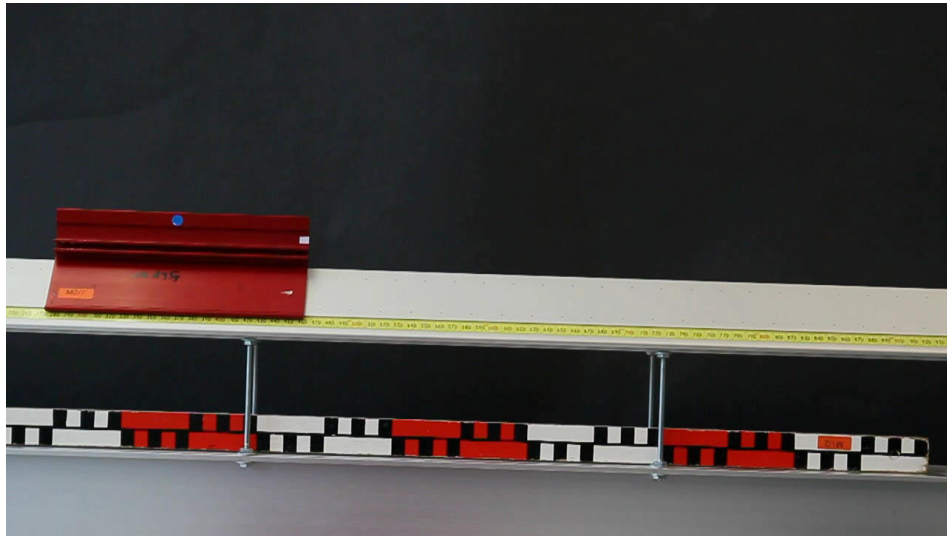


Abbildung 2.1: Standbild eines Experiments

enthält und es bei einem schrägen Blickwinkel zu perspektivischen Verzerrungen kommt. Besitzt die Kamera ein Zoom-Objektiv kommt es gerade im Bereich kurzer Brennweiten (also geringer Vergrößerung) zu einer tonnenförmigen Verzeichnung. Lange Brennweiten führen zu einer, wenn auch meist schwächeren, kissenförmigen Verzeichnung. Wenn möglich sollte also eine mittlere Brennweite gewählt werden. Die gerade genannten Abbildungsfehler sind in [Abbildung 2.2](#) visualisiert.

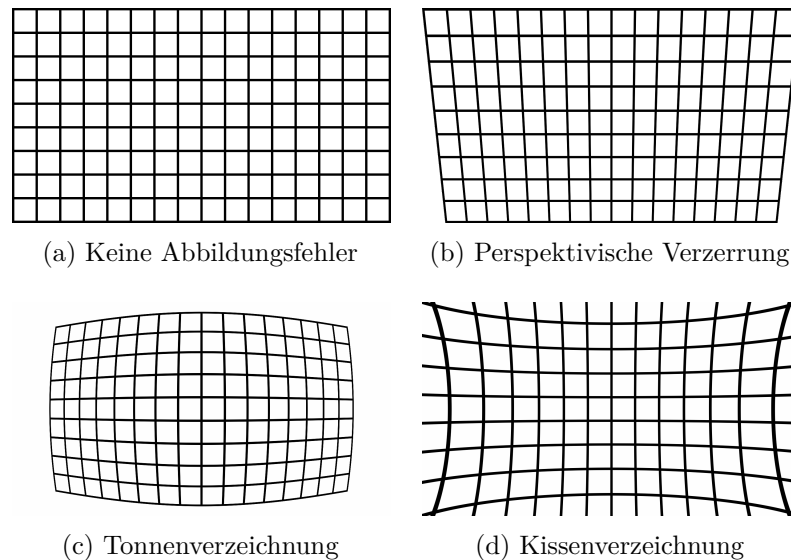


Abbildung 2.2: Verschiedene Abbildungsfehler

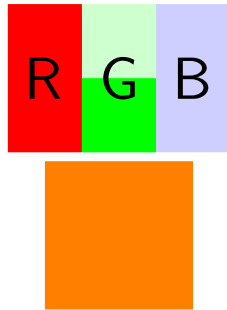
Sie führen dazu, dass gleich lange Strecken im Bild unterschiedlich lang erscheinen und Parallelen sich (wenn auch außerhalb des Bildes) schneiden bzw. Geraden gekrümmt werden. Eine nachträgliche Korrektur ist mit größerem Rechenaufwand, jedoch nicht direkt mit *measure Dynamics*, möglich.

measure Dynamics benutzt zur Objekterkennung Bewegungs- und/oder Farberkennungsverfahren. Das zu beobachtende Objekt sollte daher stets komplett auf dem Bild zu sehen sein und der Bildausschnitt sollte für eine maximale Genauigkeit so gewählt sein, dass der gefilmte Bereich von der Bahn des Objekts bestmöglich ausgenutzt wird. Ideal für die Erkennung eignen sich einfarbige Objekte, die eine einfache geometrische Form aufweisen und deren Farbe im Rest des Videobildes nicht wieder auftritt. Alternativ kann das Objekt auch mit einem kreisförmigen, (neon-)farbigen Aufkleber von möglichst kleiner noch aufnehmbarer Größe markiert werden.¹³ Zur Bestimmung des Skalierungsfaktors haben sich im Video abseits der Bewegung horizontal oder vertikal angebrachte, definierte Maßstäbe, wie z. B. ein Lineal, bewährt. Der Hintergrund sollte möglichst einfarbig sein und einen hohen Helligkeits- und Farbkontrast zum beobachteten Objekt aufweisen.¹⁴ Hier eignen sich weiße, graue oder schwarze Kartons oder einfach die Tafel oder das interaktive Whiteboard im Klassenzimmer. Weiterhin sollten möglichst wenig andere, sich bewegende Gegenstände, im Bild befinden, da sie die Bewegungsanalyse stören können.

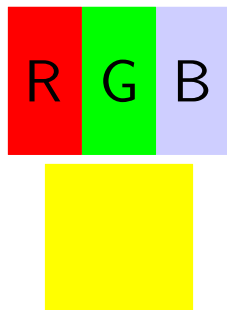
¹³Benz (2008, S. 8)

¹⁴Benz (2008, S. 9)

2.1.2 Beleuchtung



(a) Normal belichtet



(b) Überbelichtet

Abbildung 2.3:
Normal- und
Überbelichteter
Pixel

Aufgrund der digitalen Videotechnik muss Überbelichtung bei der Aufnahme vermieden werden. Wird das Video überbelichtet, so wird mindestens einer der drei RGB-Kanäle übersteuert, was zur Folge hat, dass das entsprechende Farbsignal beim Maximum abgeschnitten wird. Infolge dessen verändert sich das Verhältnis der einzelnen Farbkanäle zueinander und somit auch der Farbton. Wird ein kräftiges Orange (100% rot, 50% grün) stark überbelichtet, ändert sich die Farbe in Richtung gelb (s. Abb. 2.3).

Sehr deutlich erkennt man dies bei Digitalfotos auf denen nebenbei ein blauer Himmel fotografiert wurde. Da der Himmel oft viel heller als das Hauptmotiv ist, übersteuert der blaue Kanal stark und dabei erreichen die anderen beiden Kanäle Werte in der Nähe des Maximums. Der Himmel erscheint somit (bläulich) weiß. Eine Videoanalyse, die auf dem Farbton basiert, wird somit durch eine Überbelichtung erschwert.

Bei Versuchsvideos tritt dieses Phänomen besonders häufig dann auf, wenn ein Gegenstand vor einem dunklen Hintergrund aufgenommen wird. Die Aufnahmeautomatik von Digitalkameras regelt die durchschnittliche Helligkeit eines Videos in automatischen Modi grundsätzlich auf ein Mindestmaß herauf, sodass kleinere helle Bereiche überbelichtet sind. Wenn die Kamera einen manuellen Videomodus besitzt, lässt sich dieses Problem durch manuelle Einstellung der Belichtung (s. nächstes Kapitel) lösen. Alternativ kann ein hellerer oder stärker beleuchteter Hintergrund Abhilfe schaffen. Überbelichtungen treten auch häufig durch Reflexionen an metallischen Gegenständen auf. Diese können mittels eines Luftballons mattiert¹⁵ oder unbelichtet vor einem hellen Hintergrund aufgenommen werden.

¹⁵Michel (2007, S. 49)

Zum Erreichen eines durchgehend hohen Kontrasts ist eine helle, möglichst gleichmäßige Ausleuchtung wichtig. Um eine Schattenbildung zu vermeiden, die die Analyse möglicherweise stören könnte, eignen sich idealerweise großflächige Lichtquellen. Hierbei muss man nicht zwingend mit Softboxen ausgestattet sein. Meist genügt indirektes Sonnenlicht oder eine indirekte Beleuchtung mit, in der Anschaffung günstigen, Baustrahlern. Diese richtet man gegen eine nahe Wand oder an die Decke über dem Versuchsaufbau. Benötigt man eine hohe Helligkeit und eine möglichst gleichmäßige und schattenfreie Beleuchtung bietet es sich an, zwei Lichtquellen links und rechts von der Kamera und auf den Versuch ausgerichtet, aufzustellen. Damit wird die Entstehung von störenden Schatten vermieden.

2.1.3 Belichtung

Neben den äußeren Bedingungen hängt die korrekte Belichtung eines Videobildes von drei Einstellungen in der Kamera ab: Der Lichtempfindlichkeit des Sensors, der Blende und der Belichtungszeit.

1. Die in ISO-Werten (meist ISO 100, ISO 200, ISO 400, ...) angegebene Lichtempfindlichkeit des Kamerasensors gibt an, wie empfindlich dieser auf Lichteinfall reagiert. Je höher dieser Wert ist, umso mehr wird das Signal im Analog-Digital-Wandler verstärkt, was in hohen Einstellungen zu Bildrauschen (s. Abb. 2.4a) führt. Dieses ist jedoch meist mehr ein ästhetisches Problem, da die automatische Videoanalyse erst bei starkem Rauschen merklich gestört wird.
2. Die Blendenzahl gibt das Verhältnis zwischen Brennweite und Durchmesser der Blendenöffnung an.¹⁶ Eine kleinere Blendenzahl bedeutet somit eine größere Blendenöffnung und höhere Lichtstärke. Eine weit geöffnete Blende führt zu einer geringen Tiefenschärfe (s. Abb. 2.4b), also einem kleineren Bereich, in dem Gegenstände im Video scharf erscheinen. Das stellt jedoch kein Problem dar, da der Versuchgegenstand die Schärfebene während des Versuchs nicht verlässt.

¹⁶vgl. Erhardt (2008, S. 58)

3. Eine lange Belichtungszeit eines Einzelbildes führt aufgrund der Bewegung des Versuchsgegenstands zu Bewegungsunschärfen (Abb. 2.4c). Der Gegenstand „verschmiert“ und eine genaue Positionsbestimmung ist nicht mehr möglich. Die Belichtungszeit sollte in der Regel nicht mehr als $1/100\text{ s}$ betragen. Bei schnellen Bewegungen muss sie weitaus kürzer gewählt werden.

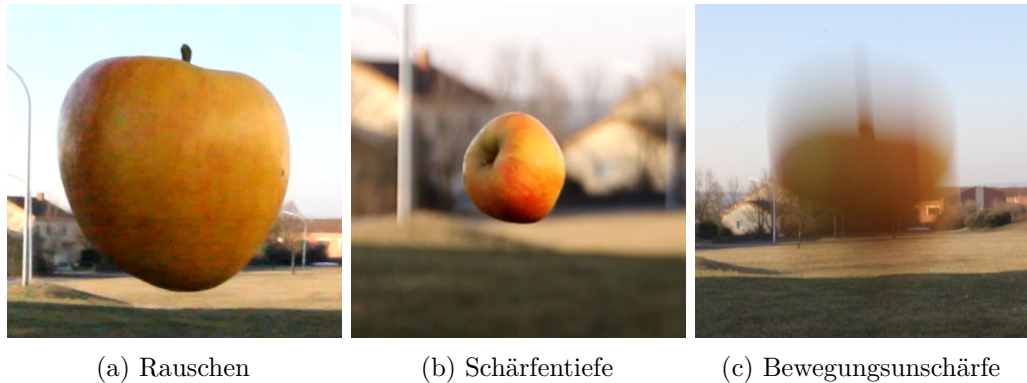


Abbildung 2.4: Belichtung

Bei direkter Sonneneinstrahlung oder leicht bewölktem Himmel ist es oft möglich, gleichzeitig einen kleinen ISO-Wert, eine große Blendenzahl und eine kurze Belichtungszeit zu wählen. Unter weniger optimalen Bedingungen ist es ratsam, zunächst die Blendenzahl zu verkleinern und anschließend die Lichtempfindlichkeit zu erhöhen.

2.2 Videokameras für die Analyse

2.2.1 Digitaleameratechnik

Mit der Einführung des DV-Formats im Jahr 1995 wurde der Grundstein für die digitale Videoaufnahme und -bearbeitung am heimischen PC gelegt¹⁷. Die Aufnahme eines digitalen Videobildes basiert auf dem inneren photoelektrischen

¹⁷Schmidt (2009, S. 14f)

Effekt in [CCD-](#) bzw. [CMOS-Sensoren](#). In den letzten Jahren wurden Magnetbänder und andere Aufzeichnungsmedien fast vollständig von SD-Speicherkarten verdrängt. Aufgrund der daraus entstehenden technischen Ähnlichkeiten besitzen mittlerweile alle erhältlichen digitalen Fotokameras Videoaufzeichnungsfunktionen.

Digitale Videos unterscheiden sich grundlegend zunächst in Auflösung und Bildrate. Aktuelle Kameras filmen meist in den HD-Auflösungen 1920×1080 bzw. 1280×720 (Anzahl der Spalten \times Anzahl der Zeilen). Die Bildrate entspricht dabei einer der alten Fernsehnormen PAL und NTSC, also entweder 25 oder 50 bzw. 29,97 oder 59,94 Bildern pro Sekunde (fps, *engl. frames per second*). Obwohl technisch veraltet, wird bei einigen Camcordern weiterhin das Zeilensprungverfahren eingesetzt, bei dem nacheinander zunächst die ungeraden, dann die geraden Zeilen eines Videobildes aufgenommen werden. Dies führt bei der Einzelbildbetrachtung zu Kamm-Artefakten, die eine Positionsanalyse stark erschweren. Als Kurzschreibweise haben sich Bezeichnungen wie 1080p25 eingebürgert, bei denen die erste Zahl für die Zeilenanzahl (hier ist die Auflösung also 1920×1080), der Buchstabe für das Aufnahmeverfahren (*engl. progressive* vs. *interlaced*, Vollbild- bzw. Zeilensprungverfahren) und die zweite Zahl für die Bildfrequenz steht (hier: 25 Bilder pro Sekunde). Weitere, häufig verwendete Auflösungen sind 720×576 (DVD), 640×480 und 320×240 . Insbesondere bei DVD-Videos ist zu beachten, dass hier die Pixel im Verhältnis 5:4 zwischen horizontaler und vertikaler Auflösung gespeichert, aber beispielsweise im Verhältnis 16:9 angezeigt werden. Ein Pixel ist somit nicht quadratisch, sondern rechteckig. Eine Analyse mit *measure Dynamics* unterstützt aber nur quadratische Pixel. Ein Video muss vor der Analyse also eventuell ins richtige Pixel-Seitenverhältnis umgerechnet werden.

Hochgeschwindigkeitskameras besitzen Zeitlupenfunktionen mit bis zu 1200 Bildern pro Sekunde, jedoch teilweise in stark verminderter Auflösung. Gerade bei schnellen Bewegungen oder ruckartigen Bewegungsänderungen, die z. B. bei Stößen auftreten, hat dies Vorteile.

Rolling Shutter Effekt



Abbildung 2.5:
Rolling Shutter
Effekt

Fast alle Kameras mit CMOS-Chip besitzen einen sog. Rolling Shutter.¹⁸ Bei der Aufnahme werden die Zeilen des Videobilds in schneller Abfolge nacheinander aufgenommen. Bei sehr schnellen Bewegungen und kurzen Belichtungszeiten werden bewegte Objekte verformt (s. Abbildung 2.5). Für die Analyse bedeutet dies, dass ein Gegenstand die auf dem Bild sichtbare Position erst bis zu einem Bild später erreicht hat.

Videoformate

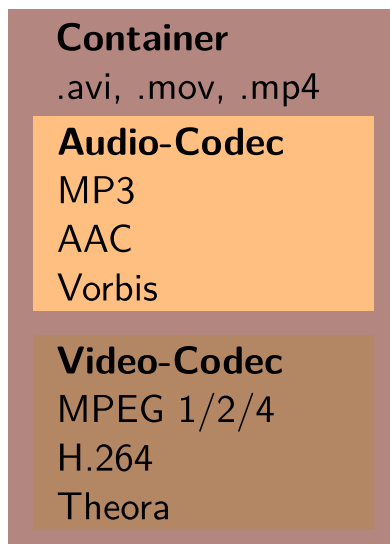


Abbildung 2.6: Gängige Containerformate und Codecs

Das digitale Video befindet sich in einer Datei, dessen Containerformat man anhand der Dateierdung erkennen kann. Es gibt u. a. an, wie die Video-, Audio- und Untertitelspuren gemeinsam gespeichert und synchronisiert werden, jedoch nicht, in welchem Format diese jeweils gespeichert werden. Bekannte Containerformate sind Audio Video Interleave (.avi), QuickTime (.mov, .qt), MP4 (.mp4) oder Matroska (.mkv). Da ein einzelnes Videobild eine unkomprimierte Größe von bis zu ca. 6 MB besitzt, wurden in den letzten beiden Jahrzehnten etliche **Videocodecs** entwickelt um die benötigte

Datenrate zu verringern und somit eine effiziente Speicherung zu ermöglichen. Bekannte Codecs sind MPEG-1 (Video-CD), MPEG-2 (DVD, Di-

gitales Fernsehen), MPEG-4 und dessen Verbesserung H.264 (auch bekannt als MPEG-4/AVC) von der Motion Picture Experts Group, Windows Media Video von Microsoft oder Theora von der Xiph.Org Foundation.

¹⁸[Eastman Kodak Company \(2011\)](#)

Im Grunde funktionieren die meisten modernen Codecs nach folgendem Prinzip¹⁹: Mehrere Bilder werden zu einer *group of pictures* (**gop**) zusammengefasst, wobei nur das erste Bild komplett gespeichert wird (sog. I-Frame). Die Kompression entspricht hierbei ungefähr der eines einzelnen JPEG-Bildes. Bei nachfolgenden Bildern wird die Differenz zum vorhergehenden Bild berechnet und diese als sog. P-Frame gespeichert. Um noch mehr Speicherplatz zu sparen, werden zwischen den I- und P-Frames noch jeweils ein bis zwei sog. B-Frames eingefügt, die Bildinformationen von vorherigen und nachfolgenden Frames nutzen. Da sich der Hintergrund bei zu analysierenden Videos nicht ändert, kann der Einsatz von P-Frames die Größe eines Videos bei gleicher Qualität im Vergleich zu einem ausschließlichen Einsatz von I-Frames um bis zu 90% verringern. Beim Abspielen müssen Programme ständig die letzten dekomprimierten Bilder vorhalten, um das jeweils folgende Bild schnell berechnen zu können. Für die Videoanalyse ist das Speichern von Bilddifferenzen jedoch unpraktikabel, da hier oft in regelmäßigen Abständen Bilder übersprungen werden, diese jedoch für das Dekodieren benötigt werden.

Als Kompromiss zwischen Qualität, Dateigröße und Analysegeschwindigkeit ist die Verwendung eines MPEG-4 Codecs und des avi-Containers zu empfehlen. Dabei sollten B-Frames deaktiviert sein und die Größe der *group of pictures* nicht größer als 12 gewählt werden.

2.2.2 Die Wahl der Kamera

Viele aktuelle digitale Fotokameras nehmen Videos mit einer Auflösung von 1280×720 Pixeln und 30 Bildern pro Sekunde auf und sind ab ca. 140 € erhältlich. Günstigere Modelle begnügen sich oft auch mit einer geringeren Auflösung (640×480). Meist lässt sich die Belichtung (s. 2.1.3) manuell einstellen, sodass kurze, konstante Verschlusszeiten erreicht werden können. Mehrere Hersteller haben günstige Hochgeschwindigkeitskameras für einen Preis von ca. 200 € im Angebot, die Videos mit 120 fps (Auflösung 640×480), 240 fps (320×240) oder noch höheren Bildraten aufnehmen. Da die meisten Schüler mit der Bedienung von Digitalkameras vertraut sind, eignen sich diese Kameras auch für Schülerversuche.²⁰

¹⁹vgl. Schmidt (2009, S. 158ff)

²⁰vgl. Eberlein (2011, S. 106)

An dieser Stelle sollen zwei Kameras vorgestellt werden, die sich exemplarisch für die Videoanalyse eignen.

- Die *Casio EXILIM EX-ZR200* ist eine Hochgeschwindigkeitskamera, die Videos mit Frameraten von 15 fps bis 1000 fps und Auflösungen von 224×64 bis 1920×1080 aufnimmt²¹. Für die Videoanalyse sind die Einstellungen 30 fps (1920×1080), 120 fps (640×480) und 240 fps (512×384) interessant, da in einer großen Mehrzahl der Fälle nur diese Auflösungen für eine quantitative Analyse ausreichen. Im Gegensatz zu den Vorgängerkameras der *ZR200* lässt sich die Belichtungszeit im Videomodus nicht einstellen.²²
- Die *Canon EOS 60D* nimmt Videos mit 25, 29,97 (1920×1088), 50 oder 59,97 fps (1280×720) auf. Als digitale Spiegelreflexkamera besitzt sie eine sehr hohe Lichtempfindlichkeit von bis zu ISO 6400. Blende, Belichtungszeit und Lichtempfindlichkeit lassen sich manuell einstellen. Trotz der im Vergleich zu Kompaktkameras deutlich besseren Bildqualität kann der relativ starke Rolling Shutter Effekt die Analyse von Bewegungen stören. Aufgrund des sehr hohen Preises (mehr als 700 € ohne Objektiv) ist die Anschaffung einer solchen Spiegelreflexkamera meist nur dann rentabel, wenn damit gleichzeitig auch Schulveranstaltungen festgehalten und Klassenfotos erstellt werden sollen.

2.3 Installation der benötigten Programme

Um Inkompatibilitäten durch unterschiedliche Containerformate und Codecs zu umgehen, wurde für dieses Tutorial ein Programm geschrieben, das quasi beliebige Videos in das MPEG-4 Format in einem AVI-Container umwandelt. Zusätzlich benötigt man noch einen MPEG-4 Codec, der dem Betriebssystem und somit auch *measure Dynamics* das Lesen und Erstellen von MPEG-4 Videos erlaubt.²³ Hier fiel die Wahl auf Xvid, da es sich hierbei um Open Source Software handelt.

²¹vgl. <http://de.exilim.eu/de/exilimzrserie/exzr200/specifications/>

²²Rühl (2012)

²³Ein Videostandard definiert in der Regel nur das Dekodieren eines Videos. Im Laufe der Zeit werden dann verschiedene Implementierungen geschrieben, die sich vor allem beim Kodieren unterscheiden. Bekannte MPEG-4 Implementierungen sind beispielsweise DivX oder Xvid.

2.3.1 **measure Dynamics**

Zur Installation von *measure Dynamics* wird die Installationsdatei **MDSetup.exe** benötigt, die am Besten von der *measure Dynamics* Unterseite²⁴ auf phywe.de abgerufen werden kann²⁵. Dort erscheinen regelmäßig neue Programmversionen die Fehlerbehebungen und neue Funktionen enthalten. Diese können durch erneuten Download und Installation eingespielt werden. Die Seite kann auch über die Menüpunkte *Download-Bereich* → *Downloads* → *Software* → *measure Dynamics* aufgerufen werden.

Nach dem Ausführen der Anwendung erscheint nach der Sprachwahl zunächst ein Begrüßungsfenster (Abb. 2.7a), nach einem Klick auf *Weiter* erscheint der Lizenzvertrag (Abb. 2.7b), der bestätigt werden muss. Anschließend kann ein Lizenzschlüssel eingegeben werden (Abb. 2.7c). Im Demomodus kann *measure Dynamics* kostenfrei ausprobiert werden, wobei es jedoch zwei Einschränkungen gibt: Der Programmstart ist je nachdem, wie oft *measure Dynamics* bereits benutzt wurde, um bis zu zehn Minuten verzögert. Auf allen Videos und Diagrammen erscheinen dann Hinweise auf die Demoversion und das Programm. Für eine nachträgliche Eingabe eines Lizenzschlüssels muss die Installation erneut gestartet werden. Bei der Wahl des Installationsordners (Abb. 2.7d) kann die Voreinstellung beibehalten werden. Nach der Installation kann *measure Dynamics* über eine entsprechende Verknüpfung auf dem Desktop ausgeführt werden.

²⁴<http://www.phywe.de/141n110/Service/Downloads/Software.htm>

²⁵Auf videoanalyse.z63.de → *Links* findet man einen Direktlink

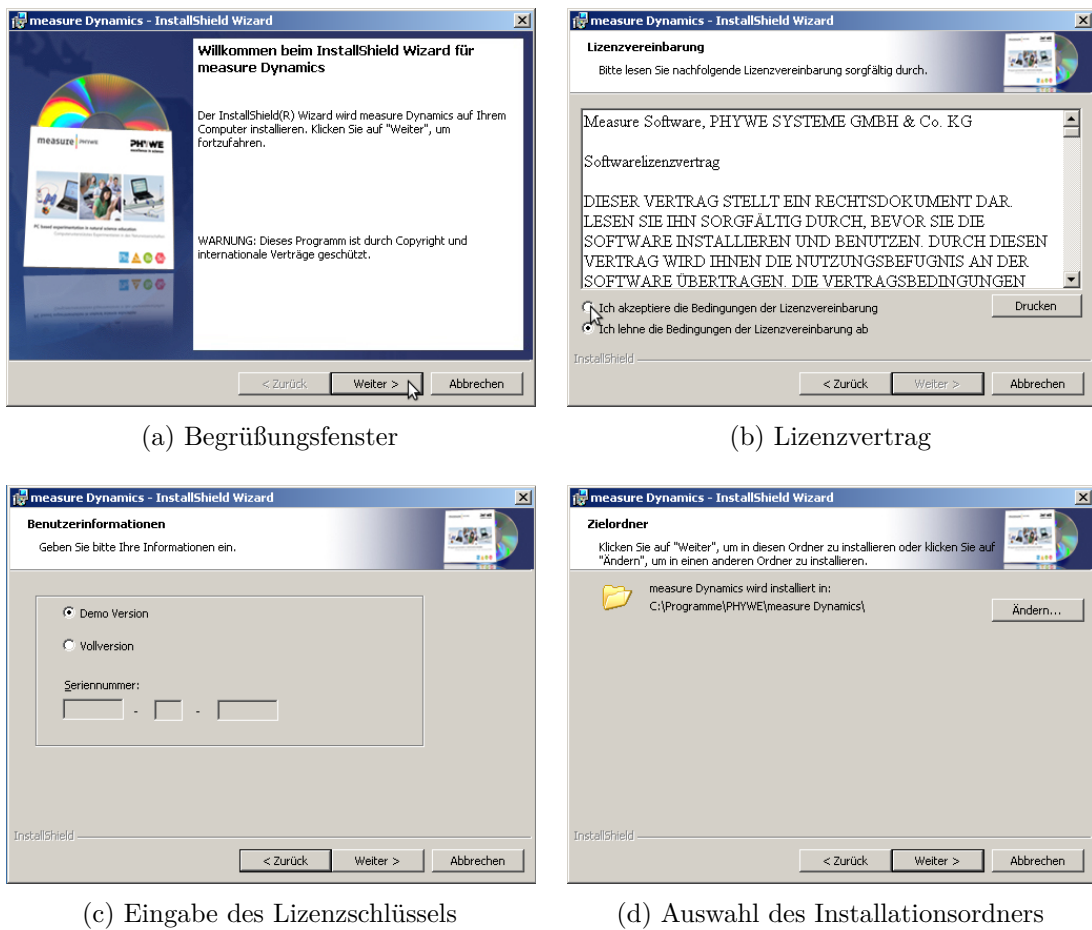


Abbildung 2.7: Installation von measure Dynamics

Installation auf mehreren Rechnern

Soll *measure Dynamics* auf mehreren Rechnern oder einem Rechner auf dem man eingeschränkte Zugriffsrechte besitzt, benutzt werden, so genügt es, den Programmordner zu kopieren und die darin enthaltene *measureDynamics.exe* auszuführen.

2.3.2 convideo

Das für diese Arbeit geschriebene Programm *convideo* kann von der Website videoanalyse.z63.de heruntergeladen werden.²⁶ Anschließend müssen die Programmdateien aus der ZIP-Datei extrahiert werden (*Rechtsklick* → *Alle Extrahieren*). Das Programm selbst wird durch Doppelklick auf die Datei *convideo.jar* gestartet.

2.3.3 Xvid MPEG4 Codec

Der für das Abspielen und Speichern von Videos sinnvolle Codec Xvid kann von dessen offizieller Website www.xvid.org unter *Xvid Video* → *Downloads* heruntergeladen werden. Zur Installation startet man die heruntergeladene Anwendung und wählt anschließend die Sprache der Installation. Auch hier erscheint wie bei der Installation von *measure Dynamics* ein Begrüßungsfenster, ein Lizenzvertrag und ein Fenster zur Wahl des Installationsordners. Nun können mit MPEG4 kodierte Videos abgespielt und erstellt werden. Sinnvolle und wichtige Einstellungen wie das Abschalten von B-Frames und das Setzen einer geringen *gop size* können anschließend durch Betätigen der Schaltfläche *Xvid konfigurieren* in *convideo* gemacht werden.

2.4 Vorbereitung des Videos

Videodateien, die von einer Kamera erstellt wurden, sind in der Regel aufgrund deren beschränkter Rechenleistung oder der Wahl des Codecs nur unzureichend komprimiert. Teilweise sind die verwendeten Codecs nicht vorinstalliert. Um diese Probleme zu umgehen, wurde das Programm *convideo* entwickelt, das auf dem Open Source-Programm *ffmpeg*²⁷ aufbaut. Es kann nahezu jegliches Video in das MPEG4-Format umwandeln und speichert es in einem avi-Container. Enthaltene

²⁶Man benötigt außerdem eine Java Laufzeitumgebung, die im Regelfall installiert sein sollte und ansonsten von www.java.com heruntergeladen werden kann.

²⁷<http://ffmpeg.org/>

Tonspuren werden verworfen, da sie für die Videoanalyse nicht benötigt werden. Um das entstandene Video anschließend abspielen oder analysieren zu können, muss lediglich ein Codec installiert werden (s. Kap. 2.3.3).

Nach dem Start des Programms durch Doppelklick auf die Datei *convideo.jar* erscheint das Programmfenster (Abb. 2.8).

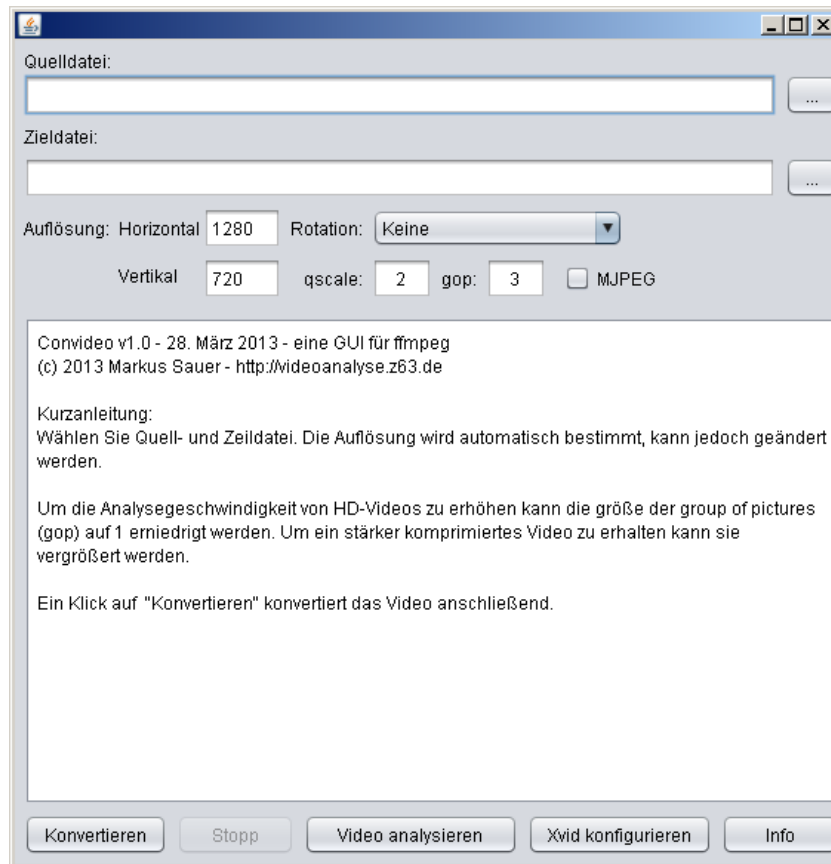
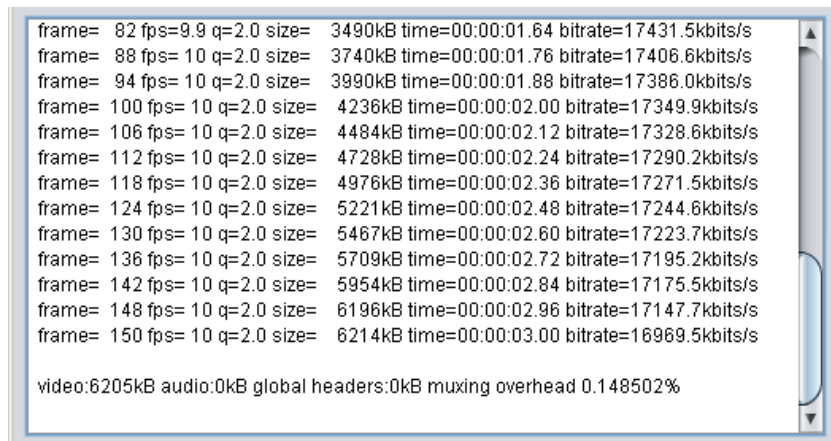


Abbildung 2.8: convideo Programmfenster

Um ein Video zu konvertieren, muss zunächst eine Quelldatei ausgewählt werden, was durch einen Klick auf die entsprechende Schaltfläche neben der Eingabezeile geschehen kann. Für die Zielfile kann entsprechend verfahren werden, wobei nach Auswählen der Quelldatei automatisch ein Speicherort vorgeschlagen wird, der übernommen werden kann. Nach der Auswahl eines Videos wird es kurz analysiert und dabei die Auflösung bestimmt. Weitere Informationen über das

Video erscheinen im Nachrichtenfenster. Als nächstes sollte die Größe der *group of pictures (gop)* angepasst werden. Um Videos in *measure Dynamics* ausreichend schnell abspielen und analysieren zu können, bietet sich bei hochauflösendem Material (ab 1280×720) eine *gop size* von 1-3, bei niedriger aufgelösten Videos von 12 an. Wurde das Video hochkant aufgenommen, um beispielsweise einen freien Fall aufzunehmen, kann die Rotation dementsprechend eingestellt werden. Durch Betätigen der Schaltfläche *Konvertieren* wird die Umwandlung gestartet. Dabei erscheint im Nachrichtenbereich die Ausgabe von *ffmpeg* (Abb. 2.9), die unter anderem angibt, welches Bild gerade umgewandelt wird (*frame*), wieviele Bilder pro Sekunde umgewandelt werden (*fps*), bei welchem Zeitindex man bereits angekommen ist (*time*) und mit welcher Bitrate komprimiert wird (*bitrate*).

The image shows a screenshot of a terminal window with a blue border. It displays the output of the ffmpeg command, showing a list of frames being processed. Each line includes the frame number, fps, quality (q), size, time, and bitrate. At the bottom, it shows summary statistics for the video, audio, global headers, and muxing overhead.

```
frame= 82 fps=9.9 q=2.0 size= 3490kB time=00:00:01.64 bitrate=17431.5kbits/s
frame= 88 fps= 10 q=2.0 size= 3740kB time=00:00:01.76 bitrate=17406.6kbits/s
frame= 94 fps= 10 q=2.0 size= 3990kB time=00:00:01.88 bitrate=17386.0kbits/s
frame= 100 fps= 10 q=2.0 size= 4236kB time=00:00:02.00 bitrate=17349.9kbits/s
frame= 106 fps= 10 q=2.0 size= 4484kB time=00:00:02.12 bitrate=17328.6kbits/s
frame= 112 fps= 10 q=2.0 size= 4728kB time=00:00:02.24 bitrate=17290.2kbits/s
frame= 118 fps= 10 q=2.0 size= 4976kB time=00:00:02.36 bitrate=17271.5kbits/s
frame= 124 fps= 10 q=2.0 size= 5221kB time=00:00:02.48 bitrate=17244.6kbits/s
frame= 130 fps= 10 q=2.0 size= 5467kB time=00:00:02.60 bitrate=17223.7kbits/s
frame= 136 fps= 10 q=2.0 size= 5709kB time=00:00:02.72 bitrate=17195.2kbits/s
frame= 142 fps= 10 q=2.0 size= 5954kB time=00:00:02.84 bitrate=17175.5kbits/s
frame= 148 fps= 10 q=2.0 size= 6196kB time=00:00:02.96 bitrate=17147.7kbits/s
frame= 150 fps= 10 q=2.0 size= 6214kB time=00:00:03.00 bitrate=16969.5kbits/s

video:6205kB audio:0kB global headers:0kB muxing overhead 0.148502%
```

Abbildung 2.9: convideo beim Konvertieren eines Videos

Ein zeitlicher oder räumlicher Schnitt des Videos ist nach dem Umwandeln durch *convideo* mit *measure Dynamics* möglich. Um Zeit zu sparen kann bei der ersten Umwandlung *gop* auf 1 gesetzt werden. Zum Beschneiden siehe Kapitel 3.1.2.

3 Videoanalyse mit *measure Dynamics*

measure Dynamics bietet vielfältige Möglichkeiten Bewegungen qualitativ und quantitativ zu untersuchen. So wird aus den manuell oder automatisch bestimmten Positionen eines oder mehrerer Objekte dessen Geschwindigkeit und Beschleunigung bestimmt und in einer Tabelle oder einem Diagramm ausgegeben. Darüberhinaus können weitere Größen wie beispielsweise die kinetische Energie berechnet werden. Alle Werte lassen sich in Diagrammen oder als dynamisch ikonische Repräsentationen, wie Vektoren oder Säulen, im Video anzeigen.

Anhand des Projekts *schiefe ebene* werden zunächst die grundlegenden Funktionen des Programms erklärt. Anhand der Projekte *fadenpendel kleine auslenkung*, *auto anfahren* und *auto vollbremsung* werden anschließend komplexere Programmfunktionen erörtert.

3.1 Die grundlegenden Funktionen

Beim ersten Start von *measure Dynamics* erscheint ein Begrüßungsfenster (Abb. 3.1), das die letzten Änderungen und eine Möglichkeit zur Registrierung anzeigt. Für den schnellen Einstieg kann *Ich möchte mich später registrieren* ausgewählt und der Haken bei *Fenster beim Start erneut anzeigen* entfernt werden. Das Fenster kann später im Hauptmenü über *Hilfe → Was ist neu* aufgerufen werden.

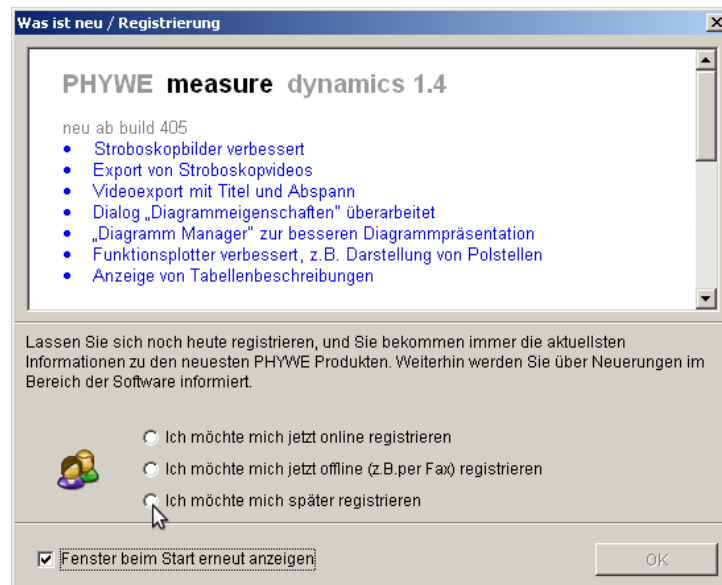


Abbildung 3.1: Begrüßungsfenster

Nach dem Betätigen der Schaltfläche *OK* erscheint das Programmfenster (Abb. 3.2), dessen Hauptkomponenten die Menü- und Symbolleiste (rot), das Auswahlfenster (gelb), das Videofenster (cyan) und das Tabellenfenster (grün) sind. Regelmäßig erscheint zusätzlich das Hinweisfenster (blau), das Funktionen erklärt und Zusatzinformationen liefert.

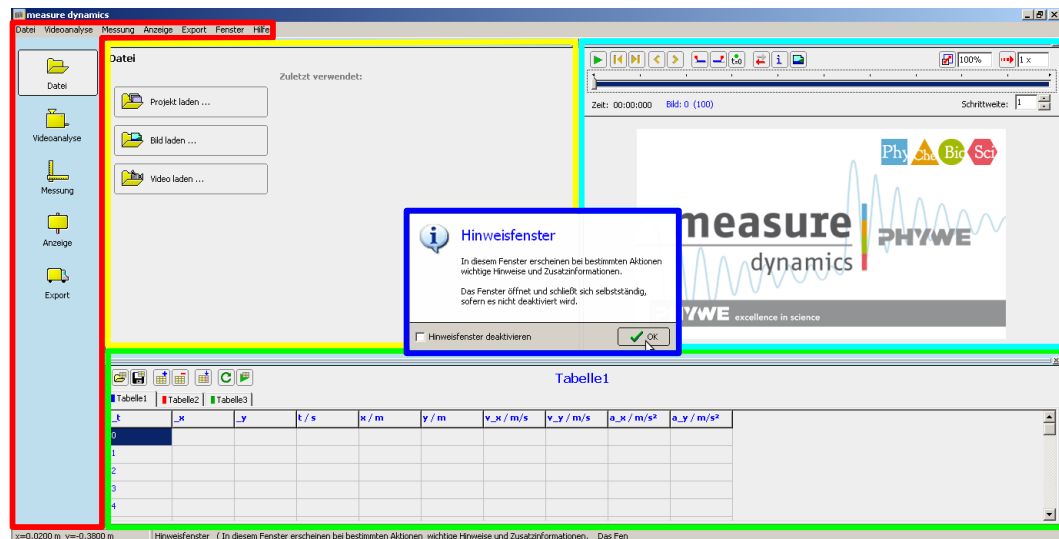


Abbildung 3.2: Programmfenster

Fast alle Funktionen der Menüleisten lassen sich je nach Vorliebe über die Menü- oder die Symbolleiste ansprechen. Nur wenige Funktionen lassen sich allein über die Menüleiste aufrufen. In diesem Tutorial wird, soweit möglich, die Symbolleiste benutzt.

3.1.1 Dateien und Projekte öffnen, speichern, kopieren und verschieben

Mit *measure Dynamics* lassen sich drei Arten von Dateien öffnen: Videodateien (*.avi, *.mpg oder *.mov-Container bzw. AviSynth-Steuerdatei), Bilddateien (*.bmp, *.jpg, *.tif, *.gif oder *.png) und Programmeigene Projekte (*.prj). Nach Betätigen des *Video laden*-Icons erscheint der *Video öffnen*-Dialog, in dem in Abbildung 3.3 bereits das Video *schiefe ebene.avi* ausgewählt wurde.

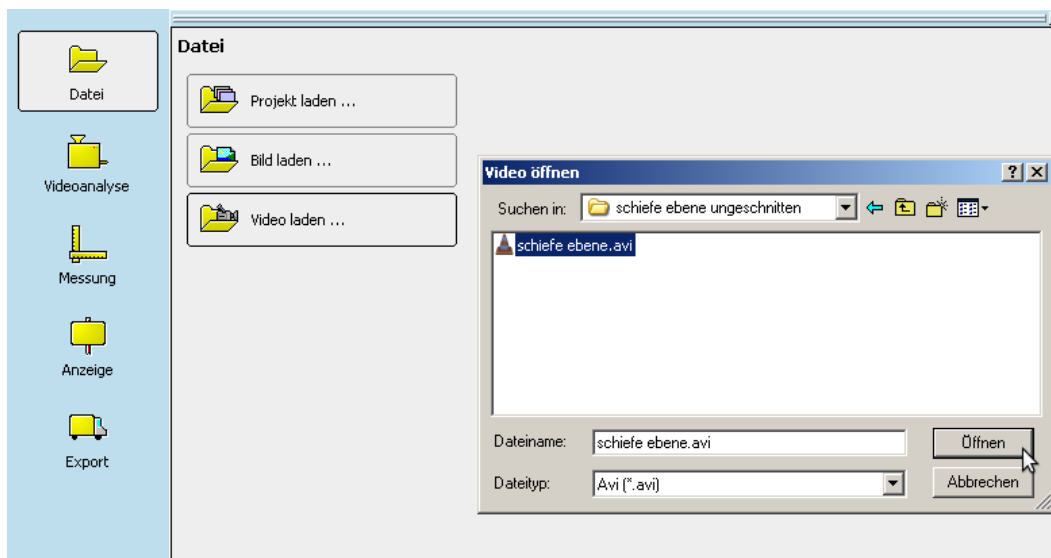


Abbildung 3.3: Öffnen eines Videos

Im Menü *Datei* gibt es drei verschiedene Möglichkeiten Dateien zu speichern: *Bild speichern*, *Video speichern* und *Projekt speichern*. Das Speichern von Bildern und Videos wird in den Kapiteln 3.1.2 und 3.2.8 behandelt.

Beim Speichern eines Projektes werden neben einer **.prj*-Datei noch weitere gleichnamige Dateien (**.ana*, **.avi*, **.bmp*, **.csv*, **.obj*, **.pfs*, **.prj* und **.fct*) angelegt, die das Video, die Tabelle mit den Messwerten und daraus abgeleiteten Größen, sowie die Einstellungen für Filter und Diagramme und noch vieles mehr enthalten. Es ist sinnvoll, für jedes Projekt einen eigenen Ordner anzulegen. Um ein Projekt weiterzugeben, genügt so das Kopieren dieses Projektordners. Will man den (Datei-)Namen eines Projektes ändern, muss unbedingt auf die entsprechenden Funktionen von *measure Dynamics* zurückgegriffen werden, da die Referenzen innerhalb der Projektdateien sonst ins Leere laufen würden. Hierzu kann man entweder ein Projekt öffnen und anschließend an einem beliebigen anderen Ort speichern oder man benutzt die *Projekt kopieren*- bzw. *Projekt speichern*..-Funktionen im Menü *Datei*. Es erscheinen hierbei jeweils zwei Datei-Dialoge: Im ersten Dialog wählt man das Quell- und im zweiten das Zielprojekt.

3.1.2 Videos betrachten und schneiden

Nachdem im vorigen Kapitel beschriebenen Öffnen des Videos *schiefe ebene.avi* ist im Videofenster ein Gleiter auf einer leicht geneigten Luftkissenfahrbahn zu sehen, der sich nach Anschalten der Luftkissenfahrbahn nahezu reibungsfrei „bergab“ bewegt. Das Video wurde nach der Aufnahme lediglich mit *convideo* umgewandelt.

Nach dem Öffnen des Videos *schiefe ebene.avi* ist im Videofenster ein Gleiter auf einer leicht geneigten Luftkissenfahrbahn zu sehen. Nach dem Anschalten der Luftzufuhr bewegt sich der Gleiter nahezu reibungsfrei „bergab“. Das Video wurde nach der Aufnahme lediglich mit *convideo* umgewandelt.

Physikalische Theorie

Auf den Luftkissengleiter wirken zwei Kräfte: Die nach unten gerichtete Gewichtskraft \vec{F}_G und die auf die senkrecht auf die Luftkissenbahn stehende Normalkraft \vec{F}_N . Die resultierende Kraft \vec{F}_R zeigt in Bahnrichtung nach unten und hat den Betrag $F_R = \sin \varphi \cdot F_G$.

Video abspielen

Das Video kann durch die in Abbildung 3.4 beschriebenen Bedienelemente gesteuert werden. Durch Verschieben des Markers in der Zeitleiste können beliebige Stellen des Videos angesprungen werden. Mit dem Mause rad oder den Cursortasten kann um einzelne Bilder nach vorn oder hinten gesprungen werden. Im Gegensatz zum entsprechenden Icon wird dabei die Schrittweite nicht beachtet.

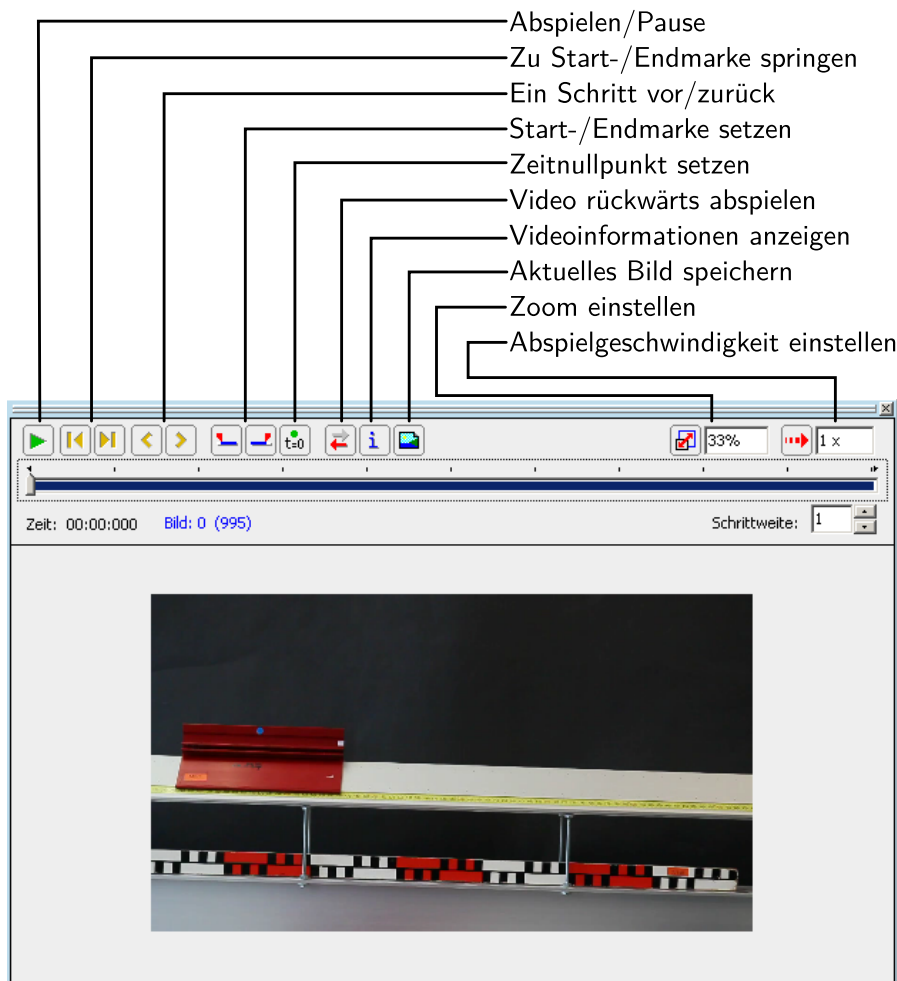


Abbildung 3.4: Videofenster nach dem Öffnen eines Videos (nach [Measure Dynamics Handbuch](#) (2009, S. 17))

Durch Einstellen der Abspielgeschwindigkeit können schnelle Bewegungen verlang-

samt und langsame Bewegungen, wie z. B. das Wachstum von Pflanzen, beschleunigt werden. Videos können noch schneller abgespielt werden, wenn die Schrittweite erhöht wird.

Video schneiden

In der Regel sollte das Video nun geschnitten werden, um Speicherplatz zu sparen und ein leichteres Navigieren mit der Zeitleiste zu ermöglichen. Dies geschieht am einfachsten durch Verschieben des Zeitleistenmarkers unter Beobachtung des sich verändernden Videobildes. Ist die gewünschte Stelle gefunden, muss nun noch auf das Start- bzw. Endmarken-Icon geklickt werden. Im Video *schiefe Ebene* ist es zum Beispiel sinnvoll die Startmarke einige Bilder vor Beginn der Bewegung und die Endmarke direkt nach dem ersten Verlassen des Bildausschnitts durch den Gleiter zu setzen. Die weggeschnittenen Bereiche sind nun in der Zeitleiste weiß gefärbt (s. Abb. 3.5).

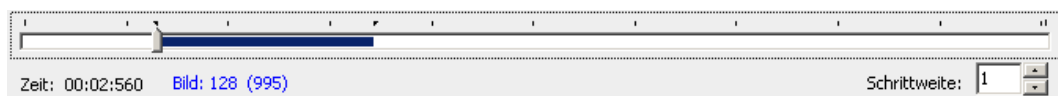


Abbildung 3.5: Zeitleiste nach Setzen von Start- und Endmarke

Um nun das geschnittene Video abzuspeichern, wird zunächst wie in Abbildung 3.6 der Xvid-Codec ausgewählt. Da die Konfiguration des Codecs bereits in Kapitel 2.3.3 vorgenommen wurde, kann die Auswahl direkt bestätigt werden.

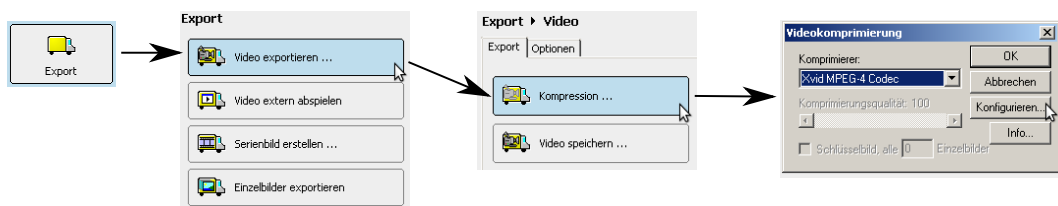


Abbildung 3.6: Auswahl des Codecs

Unter dem Reiter *Optionen* sind zunächst nur die Einstellungen zur Framerate und zur Verwendung eines Beschneidungsrechtecks interessant (Abb. 3.7).

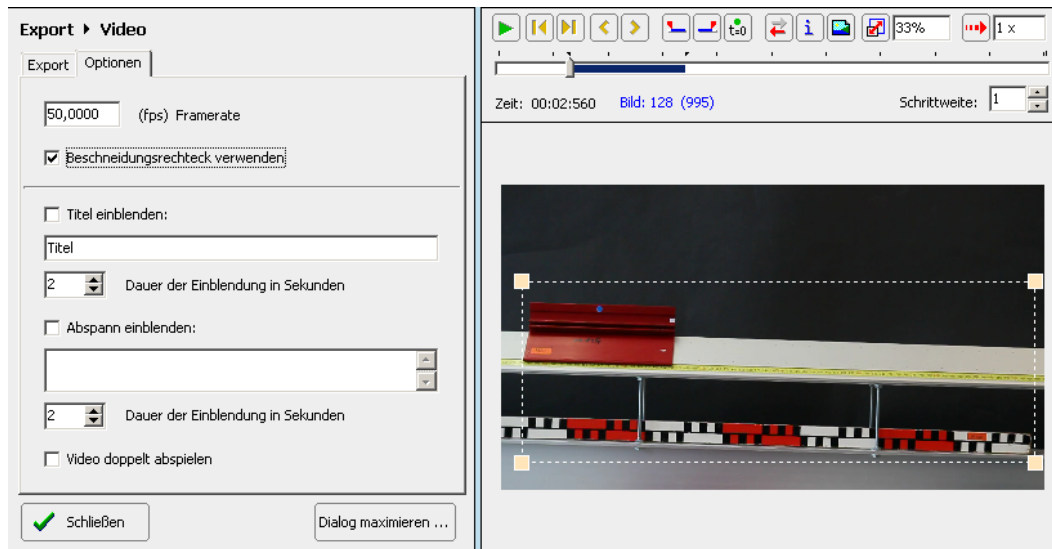






Abbildung 3.7: Optionen des Video-Exports

Standardmäßig ist die im Video gespeicherte Framerate angegeben. Bei den meisten Hochgeschwindigkeitskameras werden zwar mehrere hundert Bilder pro Sekunde aufgenommen, im Video wird jedoch eine normale Bildrate gespeichert. Dies führt beim Abspielen zu einem Zeitlupeneffekt und bei der quantitativen Analyse zu Problemen bei der Bestimmung von Geschwindigkeit und Beschleunigung. Anstatt die Framerate hier vor dem Speichern des Videos anzupassen, kann der im Video gespeicherte Wert auch nach dem Öffnen bei der Skalierung für die Videoanalyse überschrieben werden (Kapitel 3.2.1). Da *measure Dynamics* beim Abspielen von Videos überschriebene Bildraten ignoriert, können Hochgeschwindigkeitsvideos nach dem Schneiden nur dann sehr langsam (mehr als 5-fach-Zeitlupe; Einstellung 1/5 im Videofenster) abgespielt werden, wenn beim Konvertieren ein Bruchteil der Bildrate eingestellt wird (z. B. 1/10).

Von sehr langsamen Bewegungen, z. B. beim Beobachten von Pflanzenwachstum, können Zeitrafferaufnahmen erstellt werden, um Speicherplatz zu sparen. Hierzu wählt man im Videofenster eine hohe Schrittweite.

Insbesondere bei linearen Bewegungen ist es sinnvoll das Video auch räumlich zu beschneiden. Nach dem Aktivieren der Option *Beschneidungsrechteck verwenden* werden hierzu die im Videobild erscheinenden Anfasser verschoben. Drückt man

während des Verschiebens die **Strg**-Taste, werden Rahmen und Anfasser weiß, um das Beschneiden von dunklen Bildbereichen zu erleichtern. Um den Ausschnitt pixelgenau einzustellen kann die sogenannte Tastenmaus benutzt werden: Die Position des Mauscurors kann durch Betätigen einer Pfeiltaste (   ) kleinschrittig geändert werden. Dabei sollte beachtet werden, dass Zoomfaktoren $< 100\%$ ein Pixel Verschiebung mittels der Tastenmaus mehreren Pixeln im Video entspricht (bei 50% bspw. 2 Pixel pro Tastendruck).

Um das zeitlich und räumlich geschnittene Video zu exportieren, wird nun wieder der *Export*-Reiter aktiviert und anschließend die Schaltfläche *Video speichern* betätigt. Nach dem Auswählen des Speicherorts erscheint ein Fortschrittsbalken und ein Statusfenster des Xvid-Codecs (Abb. 3.8). Das neu gespeicherte Video ist nun bereit zur Analyse.

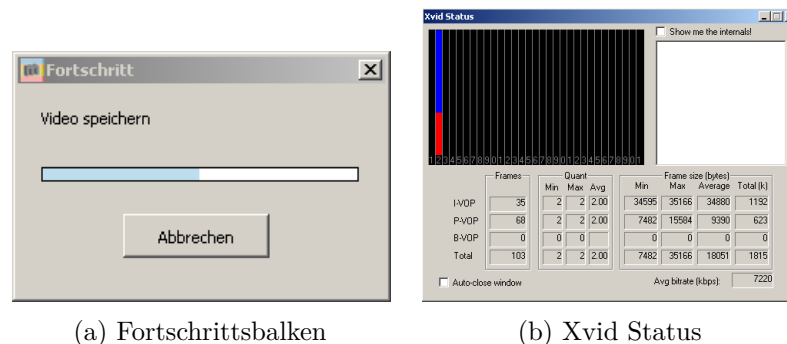


Abbildung 3.8: Statusfenster beim Export eines Videos

Hinweis

Da die horizontale und die vertikale Auflösung von Videos, die mit dem Xvid-Codec komprimiert werden sollen, durch zwei teilbar sein müssen, erscheint unter Verwendung der Option *Beschneidungsrechteck verwenden* in vielen Fällen kein Statusfenster und das geschnittene Video wird nicht gespeichert. Um eine entsprechende Auflösung einzustellen, ist es am praktikabelsten einen Anfasser mittels der Tastenmaus in einzelnen Schritten jeweils um ein Pixel nach rechts, oben und links zu bewegen und das Speichern nach jedem Schritt erneut zu versuchen. Dabei dürfen jedoch nicht die Zoomstufen 10 %, 25 % oder 50 % eingestellt sein.

3.2 Die erste Analyse

3.2.1 Skalierung

Um ein Video nach dem Öffnen zu analysieren, wird zunächst das Koordinatensystem und dessen Skalierung festgelegt. Hierzu wählt man in der Symbolleiste *Videoanalyse* und anschließend im Auswahlfenster *Skalierung*, woraufhin automatisch die Einstellung des Maßstabs angeboten wird (Abb. 3.9).

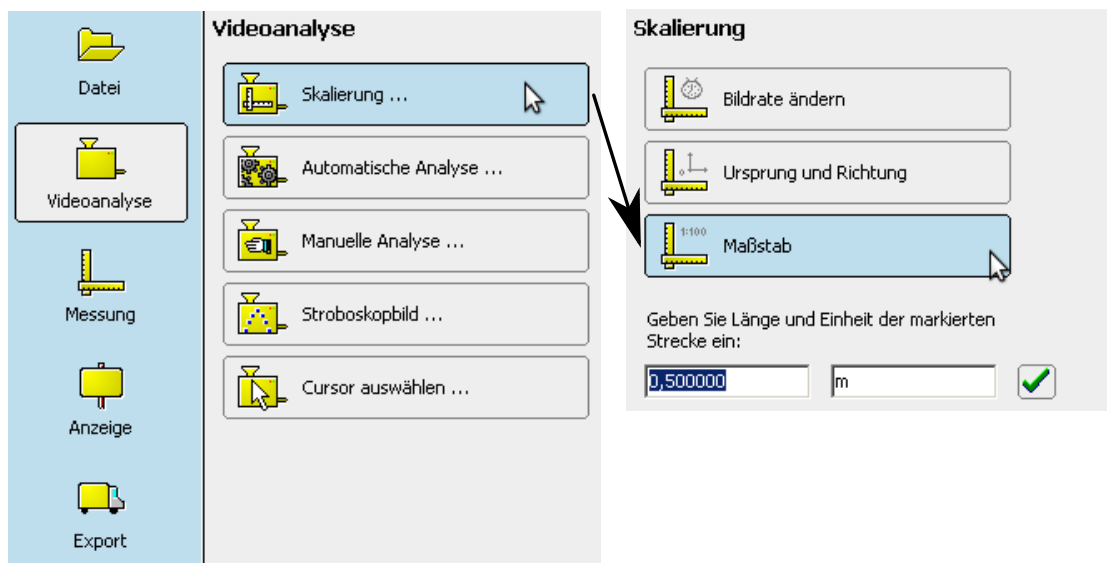


Abbildung 3.9: Einstellung des Maßstabs

Hierzu verschiebt man die im Videofenster erscheinenden Anfasser an die Enden einer bekannten Strecke (Abb. 3.10). Wie bereits in Kapitel 2.1.1 beschrieben, eignen sich bei der Aufnahme besonders Lineale, die einen möglichst großen Bereich des Bildrands einnehmen. Anschließend werden noch die Länge und Einheit in die entsprechenden Textfelder eingetragen (Abb. 3.9).

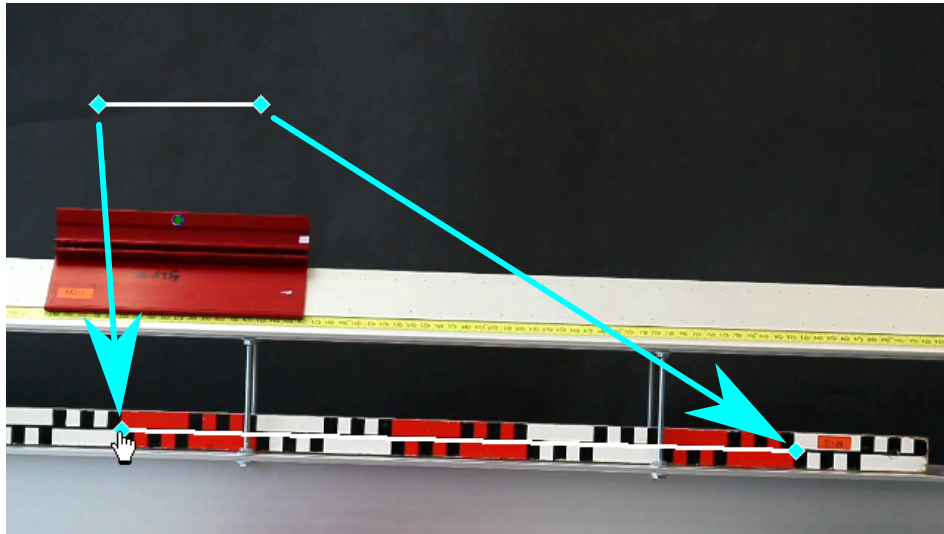


Abbildung 3.10: Verschieben der Anfasser beim Skalieren eines Videos.

Sollen später abgeleitete Größen wie Energie oder Impuls ausgerechnet werden, so sollte die SI-Einheit Meter benutzt werden. Bei kleineren Versuchsaufbauten ist dies jedoch manchmal unpraktikabel und man gibt die Längen eher in *cm* oder *mm* an. Dann muss später beim Angeben der Formeln für abgeleitete Größen jeweils ein entsprechender Umrechnungsfaktor angegeben werden. Wird als Einheit der Meter benutzt, muss bei kleiner Dimensionierung die Rechengenauigkeit erhöht werden, da standardmäßig nur zwei Nachkommastellen genutzt werden (s. Tipps & Tricks, Kap. 5.5).

Betätigt man die Schaltfläche *Ursprung und Richtung* erscheint ein Koordinatensystem dessen Ursprung mit der linken Maustaste gesetzt wird. Es bietet sich an, ihn an die Position der blauen Markierung des Luftkissengleiters vor Beginn der Bewegung zu setzen (Abb. 3.11a). Mit der rechten Maustaste wird die Richtung der x-Achse verändert. In Abbildung 3.11b wird die Zeitmarke auf den Zeitpunkt, kurz bevor der Gleiter das Video verlässt, gesetzt. Anschließend wird die x-Achse so ausgerichtet, dass sie mitten durch die Farbmarkierung verläuft. Somit muss nach der Analyse nur noch die x-Koordinate betrachtet werden. Zur einfacheren Fehlerbetrachtung und um später die Bestimmung der potentiellen Energie zu vereinfachen, wird in diesem Beispiel jedoch auf die Drehung verzichtet.

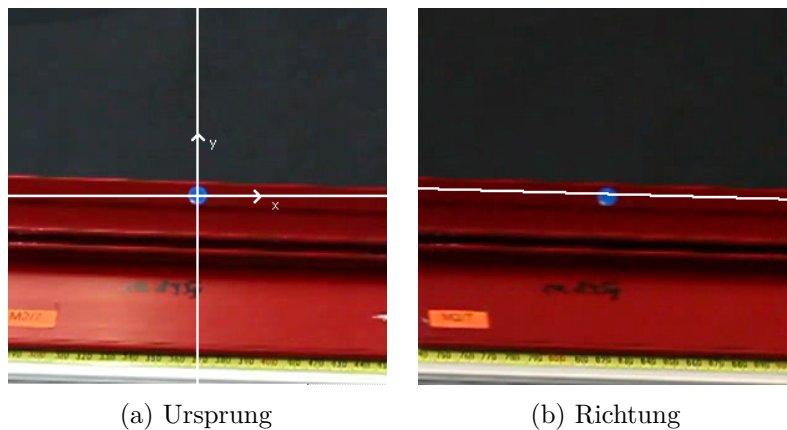


Abbildung 3.11: Einstellen von Ursprung und Richtung des Koordinatensystems

Um einen Zeitnullpunkt zu bestimmen, setzt man den Zeitmarker an die entsprechende Stelle, hier genau ein Bild vor Beginn der Bewegung und betätigt das entsprechende Icon (Aufschrift: $t = 0$) über der Zeitleiste (Abb. 3.4). Über dem Zeitmarker erscheint ein grüner Punkt, mit dessen Hilfe man stets an den Zeitnullpunkt zurückkehren kann. Da das Video zuvor eher grob geschnitten wurde, müssen Start- und Endmarke für die Analyse enger gewählt werden. Als Startmarke wird ein Zeitpunkt einige Bilder vor Beginn der Bewegung gewählt. Die Endmarke kommt an die Stelle des Videos, an der die blaue Markierung das letzte Mal komplett zu sehen ist.

Über die Schaltfläche *Bildrate ändern* kann die Bildrate geändert werden. Dies ist jedoch in der Regel nur bei Hochgeschwindigkeitsvideos der Fall, da durch die falsche Angabe in der Videodatei ein Zeitlupeneffekt beim normalen Abspielen erreicht wird.

Hinweis

Die Skalierung kann auch nach der Analyse verändert werden. Hierzu stellt man Maßstab, Ursprung, Richtung und Bildrate wie gewünscht ein und betätigt anschließend die Schaltfläche *Skalierung übernehmen* unter *Videoanalyse* → *Skalierung*.

3.2.2 Automatisch analysieren

Das Video kann jetzt analysiert werden. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten: Die manuelle und die automatische Analyse. Unter Beachtung der in Kapitel 2.1 genannten Kriterien für eine gute Aufnahme lassen sich Videos, schnell, einfach und exakt automatisch analysieren. Ruft man die *Automatische Analyse* unter *Videoanalyse* auf, so wird zunächst eine Voruntersuchung durchgeführt, die in der Regel wenige Sekunden dauert.

Wie bei der manuellen Analyse werden auch hier Start- und Endmarke an das Video angepasst. Die Schrittweite kann für die erste Analyse den Wert 1 behalten.

Nach dem Auswählen des zu analysierenden Objekts mittels der linken Maustaste erscheint an dessen Position eine farbige Markierung (Abb. 3.12). Im Idealfall ist diese grün, sodass der Analyse in der Regel nichts im Wege steht. Eine gelbe Markierung zeigt an, dass das Objekt nur schwer zu erkennen ist. Eine Analyse ist oft erst dann erfolgreich, wenn unter dem Reiter *Optionen* weitere Einstellungen vorgenommen werden. Ist die Markierung rot, ist eine Analyse mit den derzeitigen Einstellungen unmöglich.

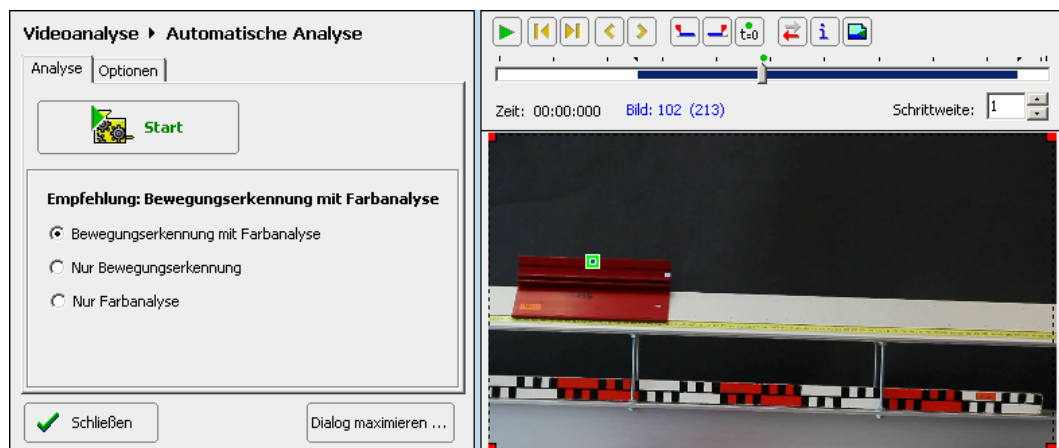


Abbildung 3.12: Automatische Analyse

Das Programm *measure Dynamics* bietet drei grundlegende Analysemodi: Die Bewegungserkennung, die Farbanalyse und die Kombination aus beiden, die in der Regel die besten Ergebnisse liefert und voreingestellt ist.

Zeitweise ruhende Objekte, wie der erst nach kurzer Zeit beschleunigende Gleiter, werden oft erst dann gefunden, wenn ein entsprechender Haken im Reiter *Optionen* gesetzt wurde. Springt die Markierung bei der Analyse plötzlich an eine komplett falsche Stelle im Video, sollte zunächst der Analysebereich mittels des aus dem Export bekannten Rechtecks auf die vom Objekt überstrichene Fläche reduziert werden. Zusätzlich kann ein *eingeschränkter Suchradius*, dessen Wert jedoch groß genug gewählt werden sollte, die Sprungneigung verringern. Aktiviert man die Option *Bewegungsumriss anzeigen*, offenbart das Programm, welches Objekt es genau erkannt hat, sodass sich über das Regeln der *Empfindlichkeit* weitere Verbesserungen erzielen lassen. Abbildung 3.13 zeigt das Videofenster während der automatischen Analyse. Neben einem Fortschrittsbalken erscheint zur Kontrolle eine Ortsmarkierung (magenta) und je nach Einstellung der Bewegungsumriss (gelb) und der Suchkreis (magenta).

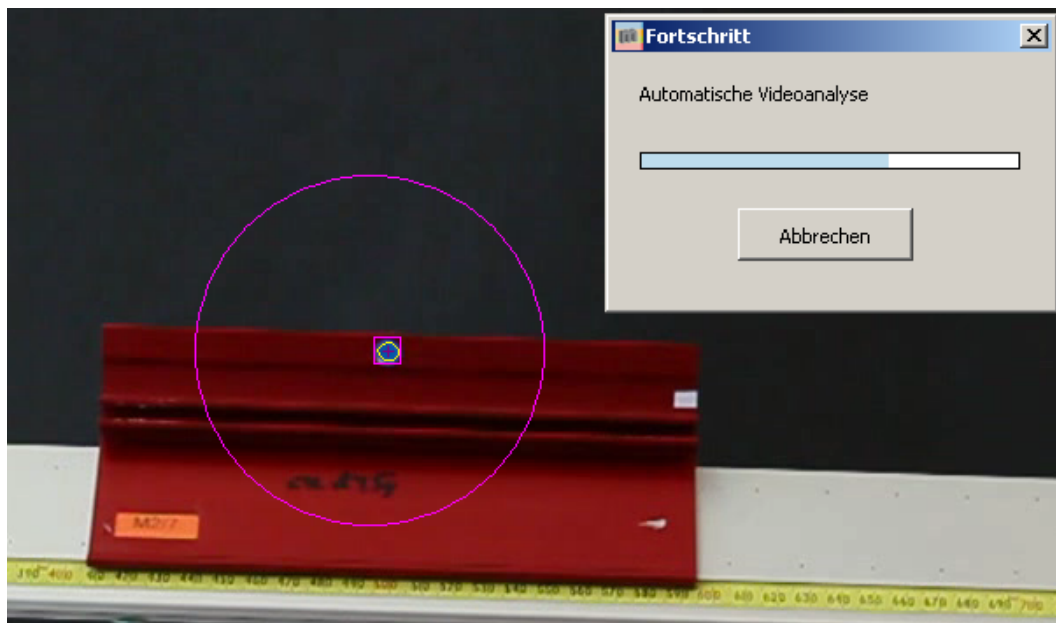


Abbildung 3.13: Videofenster während der Analyse

3.2.3 Genauigkeit der Analyse

Neben der Bestimmung des Ortes berechnet *measure Dynamics* nach der Analyse automatisch Geschwindigkeit und Beschleunigung des analysierten Objekts. Auf-

grund der diskreten Werte kommt dabei ein Differenzenquotient zum Einsatz, wobei sich der Benutzer für eine geglättete oder ungeglättete Berechnung entscheiden kann.

Dabei wird für den Zeitindex n und der dazugehörigen Position s_n , die Geschwindigkeit v_n und die Beschleunigung a_n in der ungeglätteten Variante wie folgt berechnet:²⁸

$$v_n = \frac{s_{n+1} - s_n}{\Delta t} \quad a_n = \frac{v_n - v_{n-1}}{\Delta t} = \frac{s_{n+1} + s_{n-1} - 2 \cdot s_n}{\Delta t^2}.$$

Ist die Glättung aktiviert, gilt

$$v_n = \frac{s_{n+1} - s_{n-1}}{2 \cdot \Delta t} \quad a_n = \frac{v_{n+1} - v_{n-1}}{2 \cdot \Delta t} = \frac{s_{n+2} + s_{n-2} - 2 \cdot s_n}{(2 \cdot \Delta t)^2},$$

wobei Δt jeweils den zeitlichen Abstand zwischen zwei analysierten Bildern bezeichnet.

Abbildung 3.14 zeigt die Berechnung grafisch. Der Differenzenquotient ist der Mittelwert der Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung im entsprechenden Zeitintervall²⁹. Die Geschwindigkeit in der ungeglätteten Variante wird dabei an den Anfang, alle anderen Werte in die Mitte des jeweiligen Intervalls gesetzt.

²⁸Suleder (2010, S. 15)

²⁹vgl. Suleder (2010, S. 15)

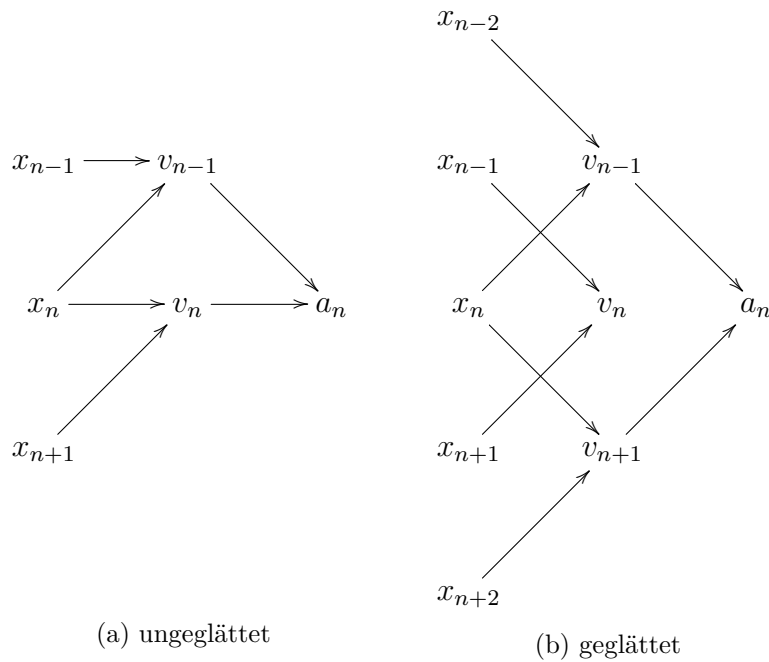


Abbildung 3.14: Berechnung von Geschwindigkeit und Beschleunigung

Messfehler

Die Genauigkeit der Ortsbestimmung ist stark abhängig von der Qualität des Videomaterials. Während die Position der blauen Markierung auf dem Gleiter durch dessen Form, den hohen Farbkontrast, die kurze Belichtungszeit und die konstante Beleuchtung auf den Pixel genau bestimmt werden kann, ist der Fehler bei schlechteren Aufnahmen eher im Bereich von einigen Pixeln anzusiedeln. Da die Gauß'sche Fehlerrechnung bedingt durch die Quantisierung auf 1 Pixel nicht anwendbar ist, wird für die Berechnung des Messfehlers der Größtfehler herangezogen. Gleichzeitig bleibt zur Vereinfachung der Rechnung eine eventuelle Drehung des Koordinatensystems unberücksichtigt. Der Fehler der Zeitmessung wird vernachlässigt, da Messungen mit einer Belichtungszeit von $1/4000$ s und einer Uhr, die die Zeit auf $1/100$ ms genau anzeigen kann, ergeben haben, dass der statistische Fehler im Bereich von wenigen zehntel Millisekunden liegen muss.

Ungeglättete Berechnung

Für die ungeglättete Geschwindigkeit ergibt sich für den Fehler δv_n

$$\delta v_n = \frac{\delta s_{n+1} + \delta s_n}{\Delta t} = \frac{2 \cdot \delta s}{\Delta t} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\delta v_n}{v_n} = \frac{2\delta s}{\Delta s}$$

und für die ungeglättete Beschleunigung analog

$$\delta a_n = \frac{\delta s_{n+1} + 2 \cdot \delta s_n + \delta s_{n-1}}{\Delta t^2} = \frac{4 \cdot \delta s}{\Delta t^2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\delta a_n}{a_n} = \frac{4 \cdot \delta s}{s_{n+1} - 2s_n + s_{n-1}}.$$

Mit dem Skalierungsfaktor $\lambda = \frac{0,5 \text{ m}}{912 \text{ Pixel}}$, einem Längenfehler $\delta s = 1 \text{ Pixel} \cdot \lambda = 0,55 \text{ mm}$ und $\Delta t = 1/50 \text{ s}$ erhält man

$$\delta v_n = 55 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{und} \quad \delta a_n = 5,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2},$$

wobei alle Werte durch die Quantisierung ein Vielfaches von

$$v_{\min} = \frac{1 \text{ Pixel} \cdot \lambda}{\Delta t} = 27 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{bzw.} \quad a_{\min} = 1,4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

betragen.

Geglättete Berechnung

Bei der geglätteten Geschwindigkeit beträgt der Fehler

$$\delta v_n = \frac{\delta s_{n+1} + \delta s_{n-1}}{2 \cdot \Delta t} = \frac{\delta s}{\Delta t} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\delta v_n}{v_n} = \frac{\delta s}{\Delta s}$$

und für die geglättete Beschleunigung analog

$$\delta a_n = \frac{\delta s_{n+2} + 2 \cdot \delta s_n + \delta s_{n-2}}{(2 \cdot \Delta t)^2} = \frac{\delta s}{\Delta t^2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\delta a_n}{a_n} = \frac{4 \cdot \delta s}{s_{n+2} - 2s_n + s_{n-2}}.$$

Im Beispielprojekt ergibt dies einen Fehler von

$$\delta v_n = 27 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ und } \delta a_n = 1,4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2},$$

bei einer Quantisierung von

$$v_{\min} = \frac{1 \text{ Pixel} \cdot \lambda}{\Delta t} = 27 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ bzw. } a_{\min} = 0,34 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

Abbildung 3.15 zeigt den mittels automatischer Analyse gewonnenen zeitlichen Verlauf von Geschwindigkeit und Beschleunigung in x -Richtung.

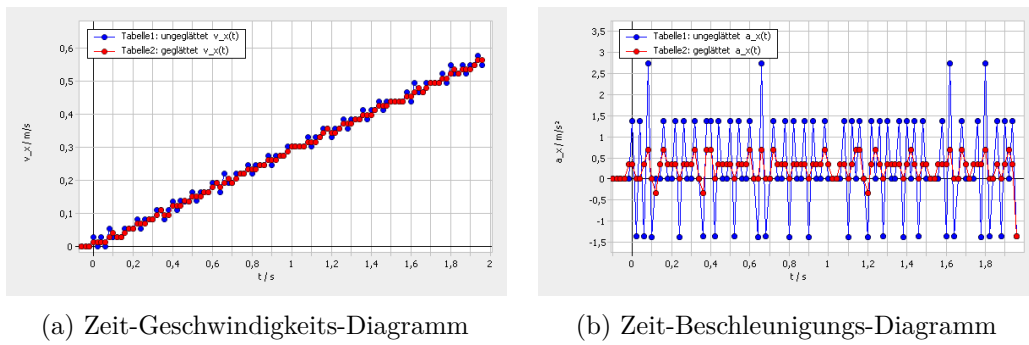


Abbildung 3.15: Geschwindigkeit und Beschleunigung in Abhängigkeit von der Zeit

Das Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm zeigt den bei einer konstanten Beschleunigung erwarteten linearen Verlauf. Bedingt durch die Quantisierung ergeben sich charakteristische „Treppen“. Im Graphen der ungeglätteten Beschleunigung erkennt man zusätzlich einige vertikale Ausreißer, die jeweils einen Zeitschritt später durch einen entsprechenden Ausreißer in die andere Richtung ausgeglichen werden. Dennoch sind die Werte jeweils gut brauchbar und die Daten lassen eine ungefähr konstante Beschleunigung von ca. $0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ erwarten. Das Zeit-Beschleunigungs-Diagramm zeigt jedoch ein gänzlich anderes Bild: Bedingt durch die grobe Quantisierung schwanken die Werte insbesondere bei der ungeglätteten Berechnung stark. Der Fehler ist jedoch nur in wenigen Fällen größer als eine Quantisierungseinheit und

erreicht zu keinem einzigen Zeitpunkt den errechneten Größtfehler.³⁰ Dennoch sind die Beschleunigungs-Messwerte so nicht zu gebrauchen.

Um bessere Werte zu erhalten, sollte die Schrittweite erhöht werden, wodurch die Bildfrequenz kleiner wird. Dadurch, dass diese linear (Geschwindigkeit) bzw. quadratisch (Beschleunigung) in den Fehler mit eingehen, genügt im Beispiel eine Schrittweite von 3, um den Fehler zu kontrollieren (Abb. 3.16).

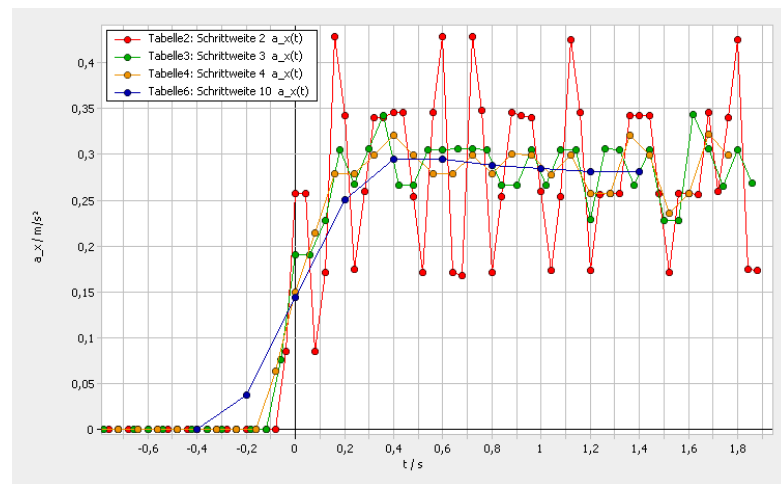


Abbildung 3.16: Beschleunigung bei unterschiedlichen Schrittweiten (geglättet)

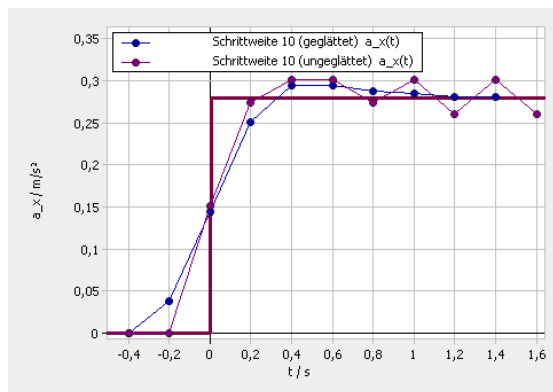


Abbildung 3.17: Mittelung der Beschleunigung über ein Zeitintervall (theoretischer Verlauf ohne Reibung)

Dabei wirkt sich jedoch die Tatsache nachteilig aus, dass über einen längeren Zeitraum gemittelt wird. Dies ist besonders gut an dem Verlauf der Beschleunigung bei der Einstellung der Schrittweite auf den Wert 10 zu sehen (Abb. 3.17): Durch die Glättung wird bereits einen Zeitschritt vor Beginn der Bewegung eine Beschleunigung registriert, die zum Zeitpunkt Null aufgrund der Mittelung über die

³⁰Durch Interpolation auf eine höhere Auflösung lässt sich die Genauigkeit der Messung sogar noch etwas steigern.

Zeit ungefähr die halbe Endbeschleunigung erreicht. Erst beim zweiten Zeitschritt nach dem Nullpunkt erreicht die Kurve den aus dem Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm bestimmten Wert. Ohne Glättung zeigt sich zwar keine zu frühe Beschleunigung, die Werte schwanken jedoch entsprechend der geglätteten Berechnung bei halber Schrittweite.

In der Praxis ist die Wahl der Schrittweite abhängig vom beobachteten Experiment. Werden Größen betrachtet die lediglich von Ort und Geschwindigkeit abhängen, genügen in der Regel kleine Schrittweiten. Bei sehr langsamen Bewegungen (z. B. bei einer brennenden Kerze) oder Hochgeschwindigkeitsvideos, bei denen sich Gegenstände – wenn überhaupt – nur wenige Pixel pro Bild bewegen, muss sie jedoch oftmals erhöht werden³¹. Bei Stößen führt eine hohe Schrittweite aufgrund der Mittelwertbildung zu einer starken Abflachung der Beschleunigung zum Zeitpunkt des Stoßes.

3.2.4 Manuell analysieren

Die manuelle Analyse (*Videoanalyse* → *Manuelle Analyse*) eignet sich insbesondere bei der Einführung der Videoanalyse im Unterricht ³². Die Schrittweite wird zur Verbesserung der Genauigkeit und um mehr als hundertmaliges Klicken zu vermeiden, auf den Wert 5 gesetzt. Eine höhere Genauigkeit wird erreicht, wenn der Zoomfaktor erhöht wird. Zur eigentlichen Messung klickt man im Video Bild für Bild auf die Mitte der blauen Markierung. In der Voreinstellung werden dabei die vorigen Objektpositionen mittels eines Kreises in der Farbe der aktuellen Tabelle gestempelt (Abb. 3.18).

³¹vgl. Michel (2010, S. 20)

³²vgl. Benz (2008)

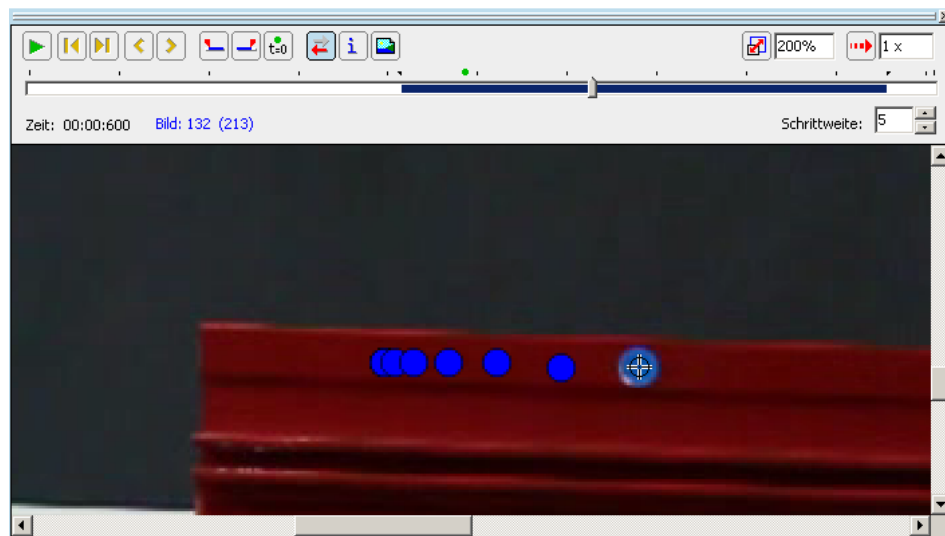


Abbildung 3.18: Videofenster bei der manuellen Videoanalyse

Gleichzeitig erscheinen die Messwerte im Tabellenfenster.

Mit der Option *Mit Neuwahl des Koordinatensystems* ist es in einem gewissen Umfang möglich, Videos, bei denen die Kamera nicht stillstand, auszuwerten. Dazu erscheint zusätzlich das aus der Skalierung bekannte Koordinatensystem auf dem Bildschirm, das auch hier dieselben Funktionen bietet: Nach einem Linksklick, der den Ursprung setzt, bestimmt ein zweiter Linksklick die Position des Objekts. Das nachträgliche Skalieren verfälscht in diesem Modus die Messwerte und darf somit nicht vorgenommen werden.

Hinweis

Um die Messwerte zu behalten, sollte der Versuch nun mit der Funktion *Datei → Projekt speichern* gesichert werden.

3.2.5 Das Tabellenfenster

Das Tabellenfenster (Abb. 3.19), dessen Layout an gängige Tabellenkalkulationsprogramme angelehnt ist, bietet einige Möglichkeiten die in der Messung gewonnenen

Daten anzuzeigen, zu bearbeiten und aus den Messwerten abgeleitete Größen zu berechnen.

Normalerweise richtet sich die Anzahl der angezeigten Nachkommastellen eines Messwertes nach der entsprechenden Einstellung der Tabellenansicht (*Datei* → *Einstellungen* → *Tabellen*). Wird eine Zelle mittels Linksklick aktiviert, werden alle gespeicherten Nachkommastellen angezeigt. Gleichzeitig springt das Videofenster an das zum entsprechenden Zeitpunkt gehörige Bild. Nach einem weiteren Klick kann jeder Wert manuell geändert werden.

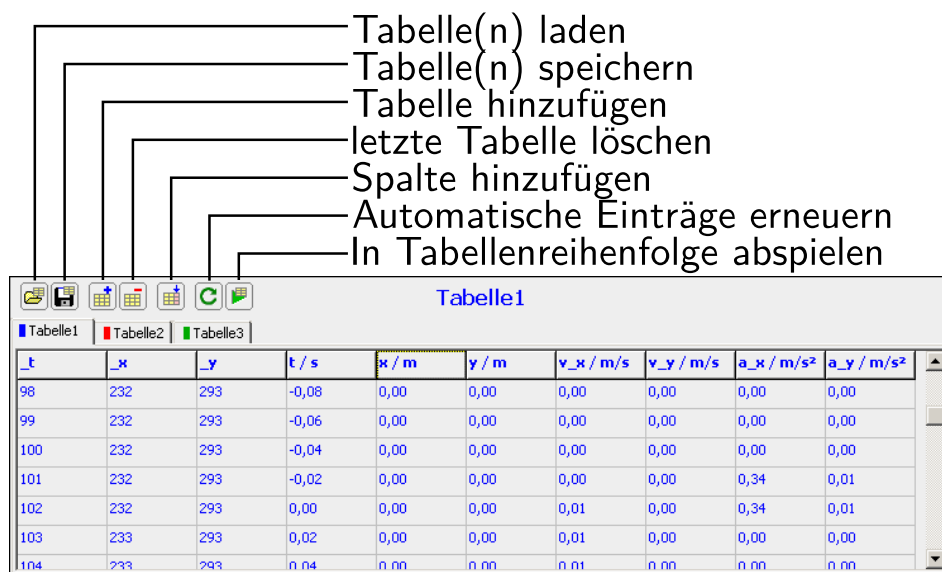


Abbildung 3.19: Tabellenfenster nach der Videoanalyse

Um mehrere Objekt(teil)e oder ein Objekt bei mehreren Schrittweiten zu analysieren, wählt man vor jeder Analyse eine neue Tabelle über den entsprechenden Reiter aus. Durch das Hinzufügen von Tabellen lässt sich deren Anzahl auf maximal zwölf erhöhen.

Fügt man eine benutzerdefinierte Spalte hinzu, so erscheint automatisch das Formelfenster (s. Abb. 3.20), in dem neben vordefinierten Formeln auch eigene eingegeben werden können. Die Formelsyntax entspricht dabei größtenteils der, die auch in vielen anderen Programmen genutzt wird. Als Dezimaltrennzeichen können wahlweise das Komma oder der Punkt genutzt werden. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit

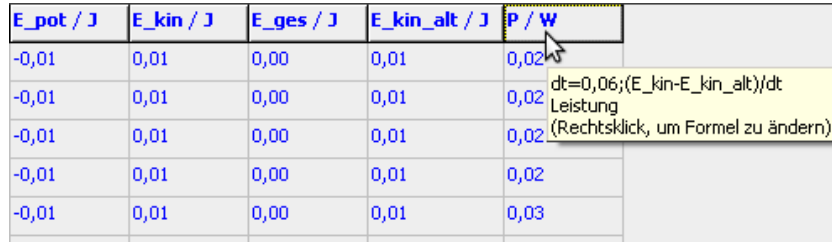
einer Formel können nur für die jeweilige Formel gültige Konstanten³³ vor die eigentliche Formel geschrieben und mittels Strichpunkt getrennt werden. Die in der Abbildung sichtbare Formel $m = 0,290; 0,5*m*(v_x^2 + v_y^2)$ berechnet die kinetischen Energie E_{kin} des Luftkissengleiters der Masse $m = 0,290 \text{ kg}$.

Abbildung 3.20: Hinzufügen einer benutzerdefinierten Tabellenspalte.

Neben der Angabe von Referenzen auf andere Tabellenspalten, kann auch auf andere Tabellen oder Zeitpunkte zugegriffen werden. Hierzu fügt man vor der eigentlichen Formel **TABLEn:** bzw. **TIME+m** ein. Dabei steht **n** für die entsprechende Tabellennummer und **m** für die Anzahl der Zeitschritte relativ zum jeweiligen Zeitpunkt. Innerhalb einer Formel kann kein Bezug auf mehrere Tabellen oder Zeitpunkte hergestellt werden. Um die Leistung $P = dE/dt \approx \Delta E/\Delta t$ des Luftkissengleiters zu bestimmen, fügt man die Hilfsspalte $E_{\text{kin_alt}}$ mit der Formel **TIME-1:E_kin** und

³³Formeln, egal ob mit oder ohne Variable sind nicht erlaubt.

zusätzlich die Spalte P mit der Formel $dt=0,06; (E_{kin}-E_{kin_alt})/dt$ (Schrittweite 3, $\Delta t = 3 \cdot 1/50 \frac{1}{s} = 0,06 \text{ s}$, Abb. 3.21) hinzu.



E_pot / J	E_kin / J	E_ges / J	E_kin_alt / J	P / W
-0,01	0,01	0,00	0,01	0,02
-0,01	0,01	0,00	0,01	0,02
-0,01	0,01	0,00	0,01	0,02
-0,01	0,01	0,00	0,01	0,02
-0,01	0,01	0,00	0,01	0,03

Abbildung 3.21: Tabellenfenster nach dem Hinzufügen mehrerer Formeln

Um Gesamtstrecke, -geschwindigkeit und -beschleunigung zu berechnen, werden zusätzlich die Spalten r , v und a angelegt, die als Formel $\text{sqrt}(x^2+y^2)$, $\text{sqrt}(v_x^2+v_y^2)$ bzw. $\text{sqrt}(a_x^2+a_y^2)$ erhalten.

Zur weiteren Bearbeitung der Daten mit Tabellenkalkulationsprogrammen, wie *Microsoft Excel* oder *Apache OpenOffice/LibreOffice Calc*³⁴, können einzelne oder alle Tabellenblätter als **CSV-Datei** gespeichert werden. Weiterhin können bearbeitete Daten oder mittels eines Modellbildungssystems erstellte Daten importiert werden.

Hinweise

Beim Hinzufügen einer benutzerdefinierten Tabellenspalte wird diese stets in allen Tabellen erstellt. Die Formel kann sich dabei jedoch unterscheiden, wenn nicht die Option *Formel in alle Tabellenblätter übernehmen* aktiviert wird.

Wird auf einen anderen Zeitpunkt Bezug genommen, entstehen am Anfang oder am Ende einer Spalte Referenzen auf leere Zellen, die automatisch auf 0 gesetzt werden. Dies führt jedoch zu physikalisch sinnlosen Ausreißern. Die Werte können gelöscht werden (Rechtsklick auf die entsprechende Zelle → *Zelle löschen*), jedoch stellt jegliche automatisch oder manuell angestoßene Neuberechnung den Wert wieder her.

³⁴Freie Software. Kostenlos erhältlich unter: <http://de.libreoffice.org>

Werden bei der Analyse unterschiedliche Schrittweiten oder Startzeitpunkte gewählt, weist ein Bezug auf eine andere Tabelle nicht auf den gewünschten Zeitpunkt. Denn bei der Berechnung wird lediglich die Zeilennummer, jedoch nicht der Zeitpunkt berücksichtigt.

3.2.6 Diagramme

Das Programm *measure Dynamics* kann Daten in Form von Diagrammen grafisch darstellen. Nach der Wahl von *Anzeige* in der Symbolleiste erscheinen im Auswahlfenster verschiedene Funktionen, von denen in diesem Kapitel die Optionen *Diagramm*, *Extra Diagramm* und *Diagramm Manager* behandelt werden.

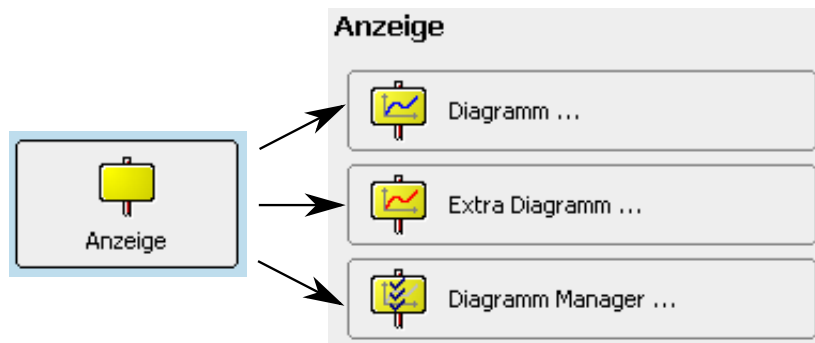


Abbildung 3.22: Diagramme

Während die erste Option ein Diagramm im Auswahlfenster erstellt, öffnet die zweite hierfür zusätzliche, skalierbare Fenster, sodass mehrere Diagramme auf einfache Weise neben- und untereinander angeordnet werden können. Um Unordnung zu vermeiden, können *Extra Diagramme* mit dem *Diagramm Manager* ein- und ausgeblendet werden.

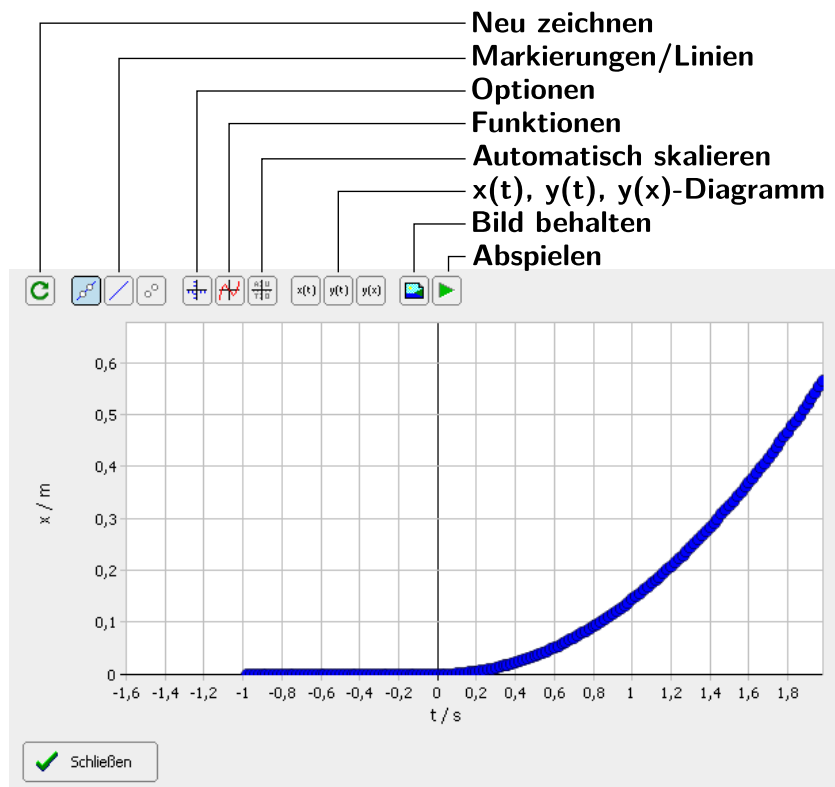


Abbildung 3.23: Diagrammfenster

Abbildung 3.23 zeigt das Diagrammfenster direkt nach dem Öffnen. Zur Auswahl der entsprechenden zu zeichnenden Kurven wird die Funktion *Optionen* durch Klick auf das entsprechende Icon ausgeführt. Dabei erscheint das Fenster *Diagramm Einstellungen* (Abb. 3.24).

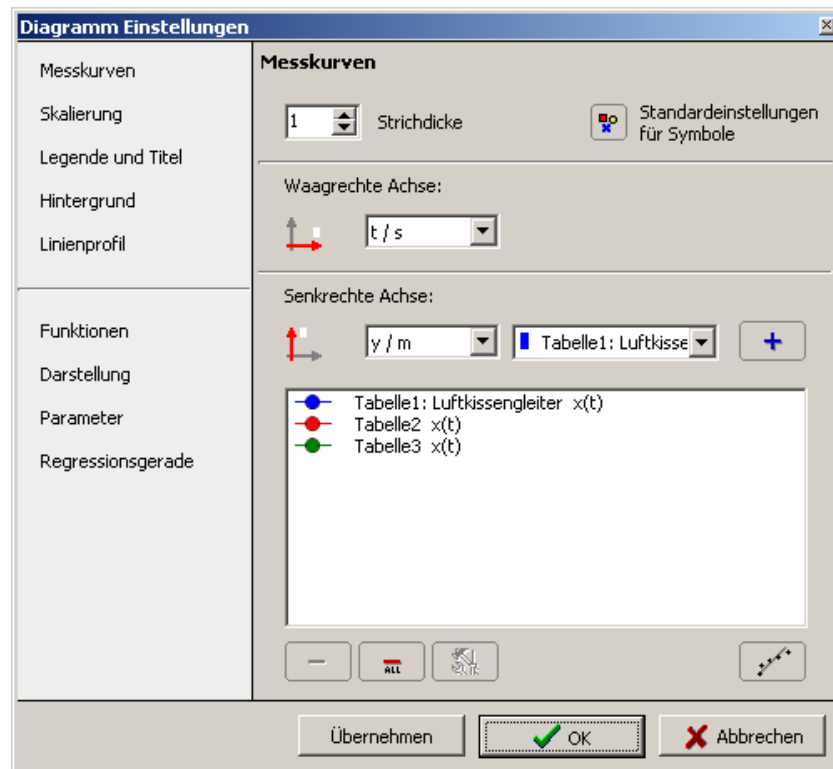


Abbildung 3.24: Diagramm Einstellungen

Hier kann für die waagerechte sowie für die senkrechte Achse jede Spalte angegeben werden. Um ein Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm zu erstellen, belässt man die waagerechte Achse bei t / s und entfernt zunächst alle Messreihen durch Klick auf das Minus-ALL-Symbol. Anschließend wird $v / m/s$ aus **Tabelle1** als Datenquelle für die senkrechte Achse ausgewählt und die Messreihe durch Klick auf das Plus-Symbol hinzugefügt.

Um das Lesen von Diagrammen zu vereinfachen, ist es sinnvoll, der gleichen physikalischen Größe stets dieselbe Farbe zuzuweisen. In diesem Tutorial wird deswegen weitgehend für den Ort blau, für die Geschwindigkeit rot und für die Beschleunigung die Farbe gelb verwendet.³⁵ Zum Einfärben des Graphen markiert man die entsprechende Messreihe und öffnet durch Betätigen der *Werkzeug*-Schaltfläche das *Optionen*-Fenster (Abb. 3.25). Nach Klick auf die derzeit eingestellte *Farbe*

³⁵Wilhelm (2012)

kann diese in einem Auswahlfenster, wie gewünscht, geändert werden (wie hier im Beispiel: *rot*).

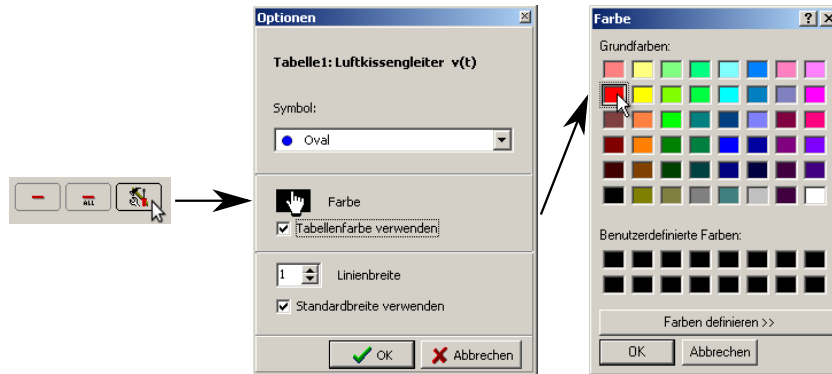


Abbildung 3.25: Farbe eines Graphen ändern

Abbildung 3.26 zeigt das entstandene Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm. Um das Diagramm auf einen Bereich einzuschränken, zieht man mit der Maus ein Rechteck von der gewünschten linken oberen Ecke in die gewünschte rechte untere (Abb. 3.27). Wird ein Rechteck in eine andere Richtung aufgespannt, wird das Diagramm wieder automatisch skaliert. Alternativ können die Achsen im *Optionen*-Fenster im Reiter *Skalierung* eingestellt werden.

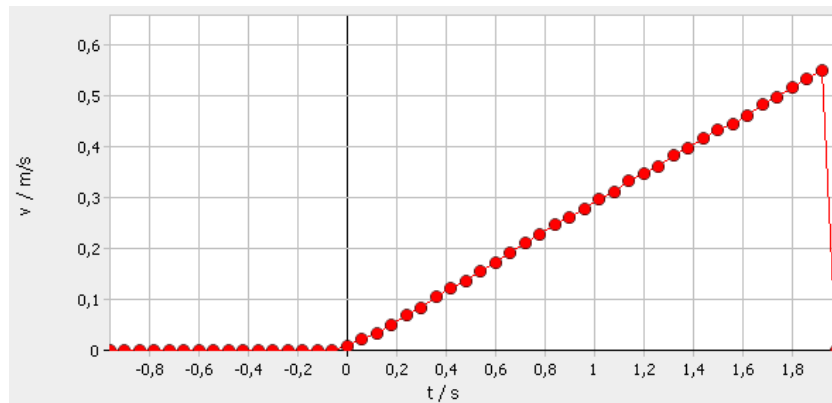


Abbildung 3.26: Das fertige Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm

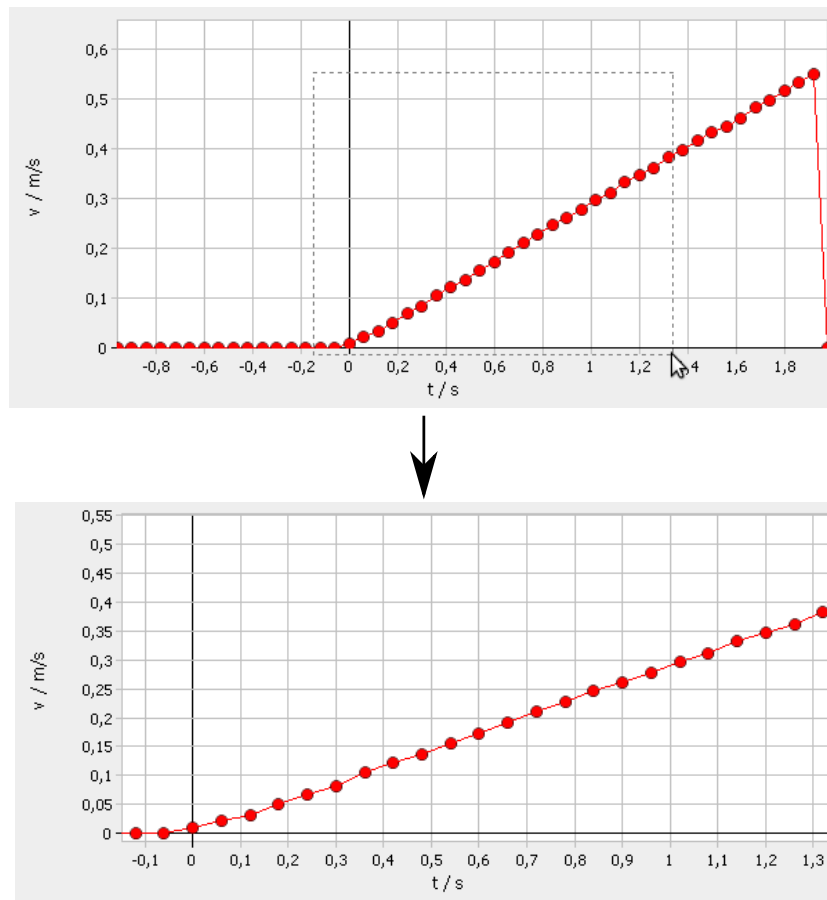


Abbildung 3.27: Diagrammbereich auswählen

Ist ein Diagrammfenster während des Abspielens eines Videos geöffnet, baut sich der Graph mit dem Fortgang des Experiments dynamisch auf. Gerade für Schüler, die bisher wenig Erfahrung mit Graphen hatten, ist es so „(...) einfacher zu erkennen, welche Phase im Video welchem Graphenteilstück entspricht (...).“³⁶ Die Funktion *Neu zeichnen* des Diagrammfensters zeichnet das Diagramm, unabhängig von der Position im Video, vollständig.

³⁶Wilhelm u. a. (2003)

3.2.7 Visualisierungen

Während andere Videoanalyseprogramme lediglich Orts-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren einblenden können, bietet *measure Dynamics* viele weitere Möglichkeiten dynamisch ikonische Repräsentationen von physikalischen Größen³⁷ im Videobild anzuzeigen.

Die meisten grafischen Elemente lassen sich über die Auswahl von *Anzeige* → *Filter* und *Einblendungen* erstellen, löschen und konfigurieren (Abb. 3.28).

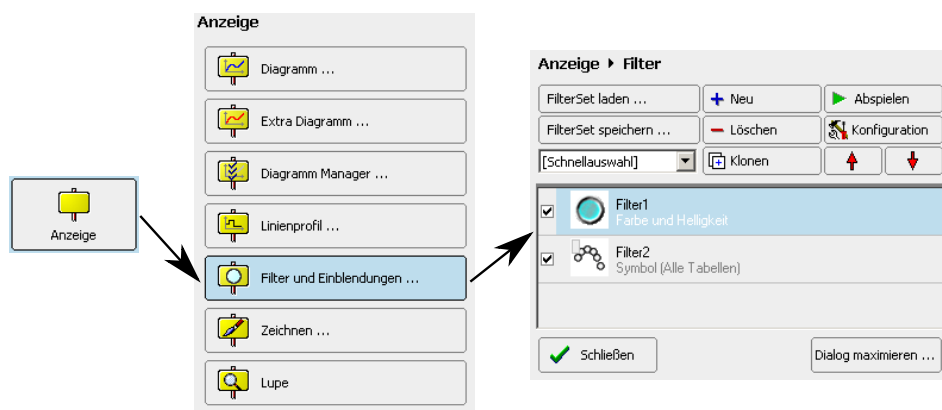


Abbildung 3.28: Filter und Einblendungen

Standardmäßig sind Filter, die die Helligkeit um 20% heraufsetzen, sowie farbige Kreise an den letzten zehn Objektpositionen zeichnet, aktiviert.

³⁷Heuer (1996)

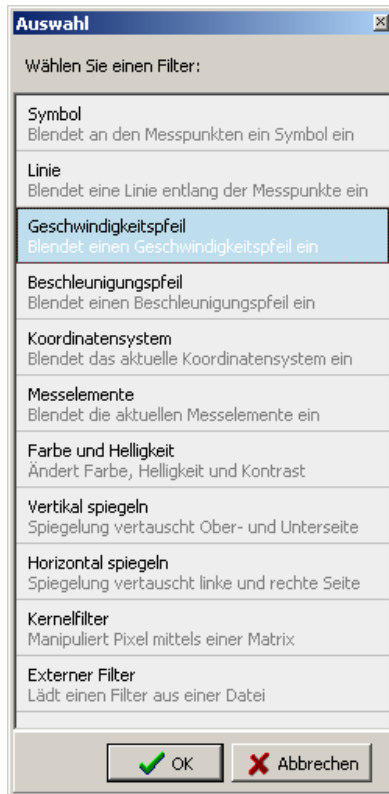


Abbildung 3.29: Filter hinzu-

Um einen Geschwindigkeitspfeil im Bild einzublenden klickt man auf den Button *Neu*. Es erscheint ein *Auswahl*-Fenster (Abb. 3.29) mit den möglichen Optionen für Einblendungen. Insbesondere die Option *Symbol* bietet vielfältige Konfigurationsmöglichkeiten (s. spätere Kapitel). Nach Auswahl des gewünschten Filters und Bestätigung durch Klick auf die Schaltfläche *OK* erscheint im Video ein Beschleunigungspfeil am Luftkissengleiter (Abb. 3.30).

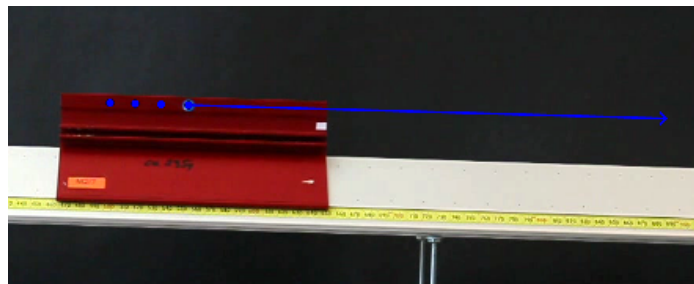


Abbildung 3.30: Geschwindigkeitspfeil an Objekt

Ohne weitere Einstellungen wird der Pfeil mit dem eingestellten Maßstab skaliert, d. h. die Länge des Pfeils bei einer Geschwindigkeit von $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ entspricht der Länge eines ein Meter langen Objekts. Da die aufgenommene Szene jedoch weniger als einen Meter breit ist, verlässt die Pfeilspitze bereits kurz nach Beginn der Bewegung den Bildbereich. Durch Auswahl des Geschwindigkeitspfeil-Filters und anschließendem Klick auf *Konfiguration* öffnet sich im Auswahlfenster die Filterkonfiguration. Nach Wahl des Reiters *Datenquelle* kann der *Streckungsfaktor* eingestellt werden (Abb. 3.31). Hier genügt ein Wert von ca. 30%, bezogen auf die *benutzerdefinierte Skalierung*.

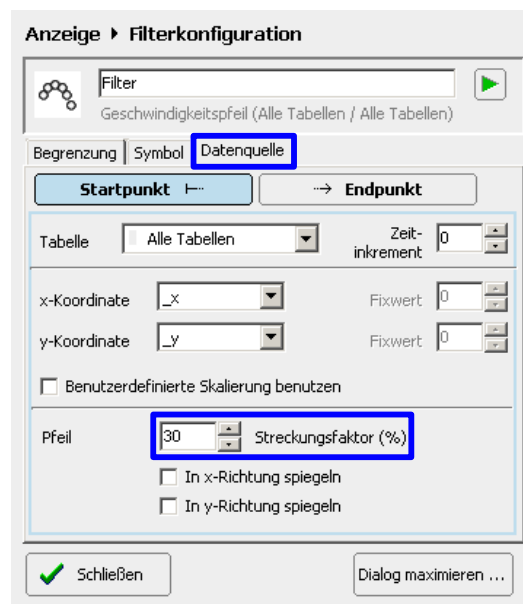


Abbildung 3.31: Pfeillänge ändern

Da der Pfeil aufgrund des hochau aufgelösten Videos (hier: 1280×720) sehr klein erscheint, sollte dessen Linienstärke noch angepasst werden. Im Reiter *Symbol* (Abb. 3.32) öffnet sich nach einem Klick auf *Symbol ändern* eine Auswahl. Unter dem Reiter *Eigenschaften* lässt sich die Linienstärke des Pfeils ändern. Hier kann auch die Farbe **rot**, die bereits im Diagramm für die Geschwindigkeit genutzt wurde, ausgewählt werden.

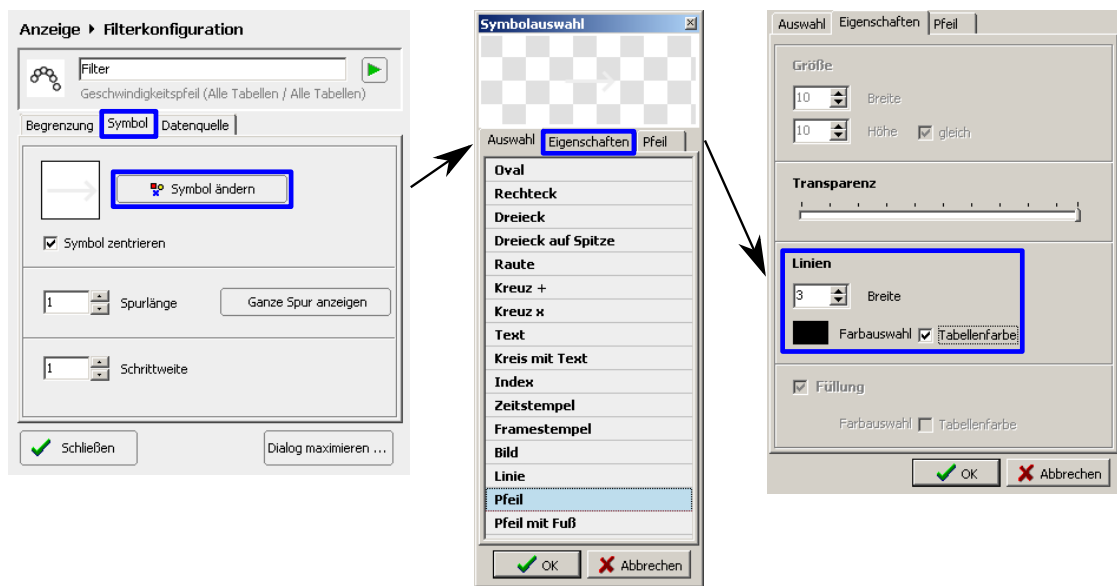


Abbildung 3.32: Einstellung der Linienbreite und Farbe eines Pfeils

Hinweis

Bei *Geschwindigkeits-* und *Beschleunigungspfeilen* werden die Koordinaten des Endpunktes als relativ zum Startpunkt aufgefasst, bei allen anderen Pfeilen wird der Endpunkt absolut angegeben. Bei vielen physikalischen Größen ist es so sinnvoller, den Endpunkt eines Geschwindigkeitspfeils umzudefinieren, um die entsprechende Größe an das Versuchsobjekt zu heften.

Filter und Einblendungen werden in der angezeigten Reihenfolge auf das Videobild angewandt. Soll ein Video aufgehellt werden, sollte dieser Filter also am Anfang stehen, da ansonsten Pfeile und andere Einblendungen auch aufgehellt werden würden.

Falls im Videobild keine grafischen Elemente erscheinen, sollte Tipp 5.1 beachtet werden.

3.2.8 Video-Export

Neben dem bereits in den Grundzügen vorgestellten Video-Export gibt es in *measure Dynamics* noch die Optionen *Serienbild* und *Stroboskopbild*, die später vorgestellt werden.

Mit der Export-Funktion (*Export* → *Video exportieren*) lassen sich Videos nicht nur zeitlich und räumlich beschneiden, sondern zusätzlich zu den *Filtern und Einblendungen* auch Titel und Abspann hinzufügen, die am Anfang bzw. am Ende des Videos eingeblendet werden. Unter *Export* → *Video exportieren* → *Optionen* findet man entsprechende Auswahlboxen und Textfelder (Abb. 3.33). Aufgrund eines Programmierfehlers in der aktuellen Version von *measure Dynamics* kann das Video bei Einblendung eines Titels oder Abspanns nicht beschnitten werden, da das entstehende Video ansonsten defekt ist. Stattdessen muss man hier in zwei Exportvorgängen zunächst das Video räumlich beschneiden um dem entstandenen Video anschließend Titel oder Abspann hinzuzufügen.

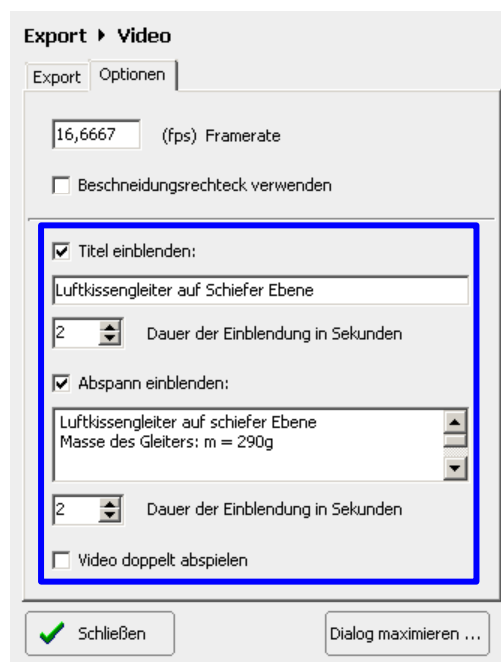


Abbildung 3.33: Optionen des Video-Exports

Im Abspann können Einzelheiten des Versuchsaufbaus, wie hier die Masse des

Luftkissengleiters oder in anderen Fällen die Länge eines Bezugsmaßstabs, die Framerate bei Hochgeschwindigkeitsvideos, sowie Urheber und Ort des Videos angegeben werden.

Die Funktion *Video doppelt abspielen* zeigt das Video zunächst mit *Filtern und Einblendungen*, anschließend ohne. Da die Schrittweite den Wert 3 besitzt, wird für die einfache Abspielgeschwindigkeit 16,6667 (50/3) gewählt.

Sind alle Einstellungen getroffen, betätigt man zunächst die Schaltfläche *Kompression* im Reiter *Export* und wählt dort den gewünschten Codec, wobei hier wieder der *Xvid MPEG-4 Codec* empfohlen wird. Anschließend betätigt man die Schaltfläche *Video speichern* und wählt im erscheinenden Datei-Dialog den gewünschten Speicherort.

3.3 Das Fadenpendel

3.3.1 Versuch

Als erster weiterführender Versuch soll das Fadenpendel dienen. Neben einer Kurve, die im Diagramm an die gewonnenen Daten gefittet wird, sollen zusätzlich Geschwindigkeits- und Kraft- bzw. Beschleunigungspfeile angeheftet werden. Die verschiedenen Energieformen werden außerdem im Diagramm und als Säulen im Videobild betrachtet.

Physikalische Theorie

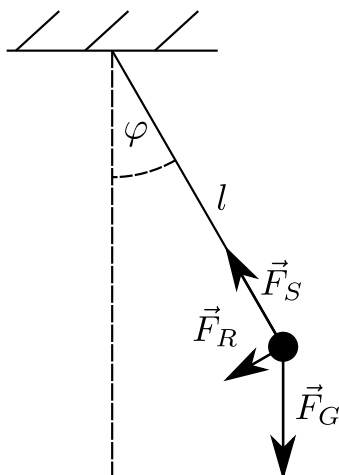


Abbildung 3.34: Das Fadenpendel im Umkehrpunkt

der Gewichtskraft. Der Betrag ist $F_T = m \cdot g \cdot \sin \varphi$. Betrachtet man die Bahneindimensional, entspricht dies einer Beschleunigung von $a = g \cdot \sin \varphi$. Mit der konstanten Länge l des Seils lässt sich diese ausdrücken als

$$a = l \cdot \ddot{\varphi} = \frac{F_T}{m} = g \cdot \sin \varphi .$$

³⁸Die physikalische Theorie basiert auf [Tipler \(1994, S. 394ff\)](#)

Für kleine Winkel vereinfacht sich diese Differentialgleichung mit der Kleinwinkelnäherung $\varphi \approx \sin \varphi$ zu

$$\ddot{\varphi} = \frac{g}{l} \cdot \varphi$$

die von den Funktionen

$$\varphi(t) = \varphi_{\max} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \text{ mit } \omega = \sqrt{g/l} \quad (3.1)$$

gelöst wird. Dabei bezeichnet φ_{\max} den maximalen Auslenkwinkel. Unter erneuter Anwendung der Kleinwinkelnäherung ergibt sich als Auslenkung in x-Richtung

$$x(t) = x_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$

mit der maximalen Auslenkung x_0 .

Aufgrund der vernachlässigten Reibung gilt Energieerhaltung: Potentielle und kinetische Energie werden ständig ineinander umgewandelt. Es gilt: $E_{\text{ges}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = \text{konst.}$

Aufbau und Videodreh



Abbildung 3.35: Aufbau des Versuchs
- Standbild aus dem Versuchsvideo

Um zu verhindern, dass der Faden die Filmebene verlässt, wird dieser beim Aufbau des Versuchs an einer Rolle befestigt. Diese wird an einer waagerecht befestigten Stange angebracht, um Analyseschwierigkeiten zu vermeiden, die entstehen können, wenn die Masse im Video einen Teil des Aufbaus passiert. Die hier gewählte, metallische Masse wird mittels eines pinkfarbenen Luftballons mattiert. Ein Maßstab wird unterhalb des Pendels angebracht und mit einer Wasserwaage horizontal ausgerichtet. Als Hintergrund wird ein schwarzer Karton gewählt. Als Lichtquelle dienen zwei Softboxen, die den Versuch von beiden Seiten schräg von vorne beleuchten. Die Kamera wird hochkant so aufgestellt, dass der Mittelpunkt der Rolle und die pendelnde Masse auch bei maximaler Auslenkung zu sehen sind und der Faden außerdem möglichst lang erscheint. Mit dem Maßstab am Rand des Sucherbildes lässt sich

die Kamera exakt ausrichten. Als Belichtungszeit genügt $1/250\text{ s}$. Nach der Aufnahme wird das Video mit *convideo* umgewandelt und dabei zusätzlich um 90° auf hochkant gedreht. Das Beispielvideo *fadenpendel kleine auslenkung* kann von <http://videoanalyse.z63.de> heruntergeladen werden.

3.3.2 Videoanalyse

Bei der Auswertung des Videos werden unter dem Punkt *Videoanalyse* → *Skalierung* der *Maßstab* eingestellt und der Ursprung auf den grün markierten Mittelpunkt der

Rolle gesetzt. Der Vorgang des Loslassens wird durch Setzen einer Startmarke weggeschnitten und der Zeitnullpunkt zur einfacheren Bestimmung einer interpolierten Kurve durch die Messwerte auf einen Nulldurchgang gelegt. Für die *automatische Analyse* ist es sinnvoll, den Maßstab durch die Wahl eines geeigneten Beschneidungsrechtecks von der Analyse auszuschließen, da es sonst zu Fehlerkennungen der rosa gefärbten Masse kommen könnte. Aufgrund des hohen Kontrastes zum homogenen Hintergrund gibt es hier ansonsten keine weiteren Probleme bei der automatischen Videoanalyse. Je nach Pendellänge muss die Schrittweite gegebenenfalls erhöht werden. Im Beispielvideo sollte die Schrittweite den Wert 2 oder 3 besitzen. In den Beispieldateien wurden zu beiden Schrittweiten Analysen durchgeführt. Diese befinden sich in unterschiedlichen Tabellen.

3.3.3 Auslenkwinkel

Zur Bestimmung des Auslenkwinkels φ erstellt man eine neue Tabellenspalte und trägt als Funktion `arctan(x/(-y))` ein (s. Kap. 3.2.5). Das Diagramm in Abbildung 3.36 zeigt den zeitlichen Verlauf von φ . Es wurde, wie in Kapitel 3.2.6 (S. 42) beschrieben, erstellt. Der Übersichtlichkeit halber wurden die Messpunkte durch Klick auf den Button *Nur Linien* (Abb. 3.23, S. 43) ausgeblendet.

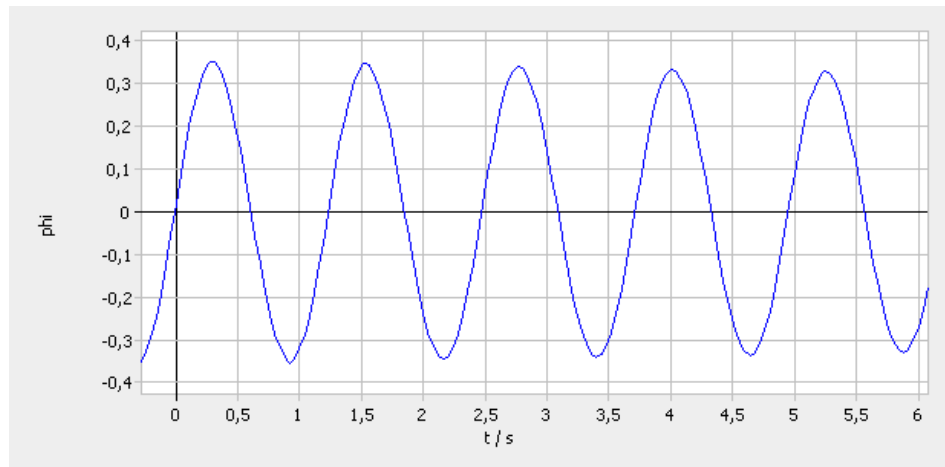


Abbildung 3.36: Auslenkung des Fadenpendels

Auf den ersten Blick ist kaum eine Abweichung von einer Sinuskurve erkennbar. Es ist lediglich eine leichte Abnahme der Amplitude festzustellen, die sich durch Luft- und Lagerreibung erklären lässt. Um Amplitude und Periodendauer der Schwingung aus dem Diagramm zu bestimmen, gibt es zwei Methoden: Liest man Amplitude und Periodendauer direkt aus dem Diagramm ab, kann zusätzlich ein *Fadenkreuz mit Koordinatenanzeige* eingeblendet werden. Dieses kann im Diagrammfenster unter *Optionen* → *Hintergrund* aktiviert werden. Die Koordinaten des Mauscursors im Diagramm werden im Hinweisfenster (Abb. 3.37), sowie in der Statusleiste am unteren Fensterrand angezeigt. Mit der Tastenmaus kann der Cursor im Diagramm exakt positioniert werden. Betrachtet man die erste Schwingung, ergibt sich für die Periodendauer $T = 1,23\text{ s}$ und für die Amplitude $\varphi_0 = 0,35$. Weiterhin ist $\omega = \frac{2\pi}{T} \approx 5,11 \frac{1}{\text{s}}$.

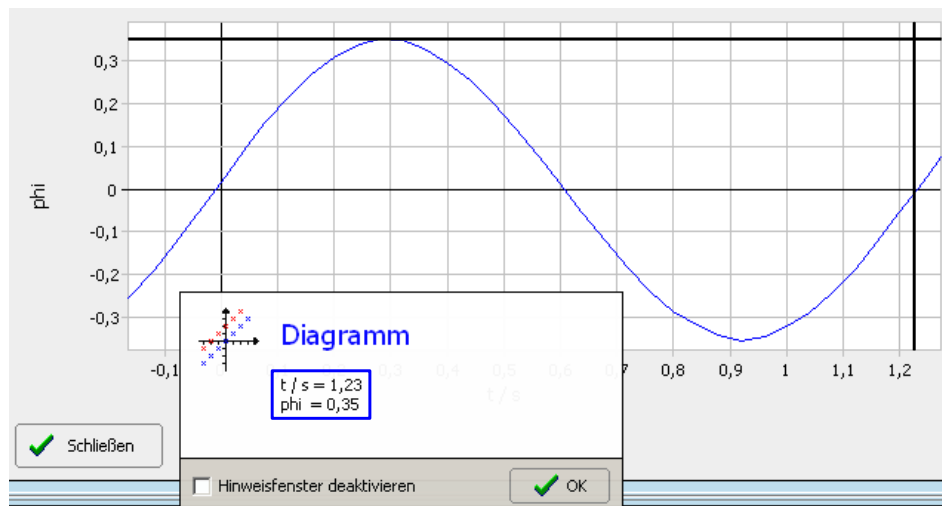


Abbildung 3.37: Bestimmung der Periodendauer und Amplitude des Fadenpendels aus dem Diagramm

Anpassen eines Funktionsgraphen

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Amplitude und der Periodendauer besteht darin, einen Funktionsgraphen möglichst gut an die Messwerte anzupassen. Hierzu wählt man im Diagrammfenster unter *Optionen* den Reiter *Funktionen* (Abb. 3.38) und trägt dort eine Vergleichsfunktion ein, deren Graph nach einem

Klick auf die Schaltfläche *Neu zeichnen* im Diagramm erscheint. Anschließend passt man die Funktion Schritt für Schritt an die gemessenen Werte an und erhält so als gute Näherung $\varphi(t) = 0,35 \cdot \sin(5,1 \frac{1}{s} \cdot t)$.

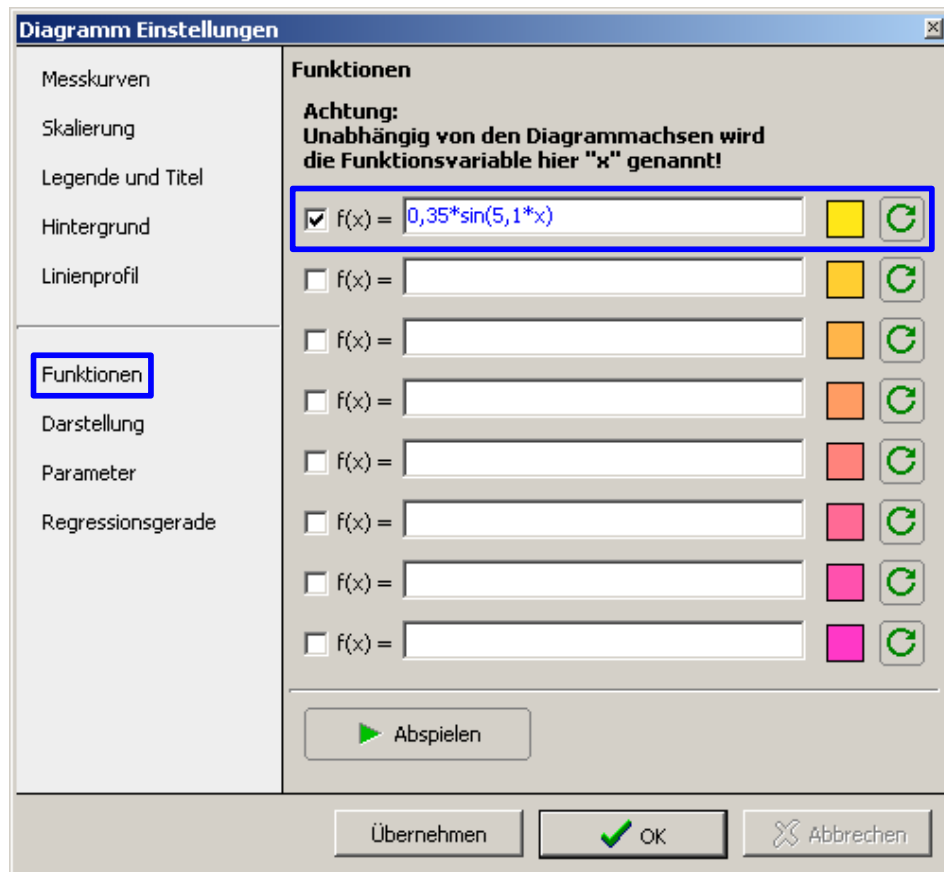


Abbildung 3.38: Hinzufügen einer Vergleichsfunktion in ein Diagramm

Funktionen mit Parametern

Das Anpassen einer Kurve kann zusätzlich dadurch erleichtert werden, dass man einen oder mehrere Parameter, die über Schieberegler verändert werden können, hinzufügt. Parameter haben die folgende Syntax:

<Name;Minimum;Maximum;Startwert;Nachkommastellen>

Für die Amplitude wählt man so beispielsweise als Namen A, Minimum 0,2, Maximum 0,4, Startwert 0,3 und Nachkommastellen 2. Analog ergibt sich als

Parameter für den Winkel $\langle \omega; 0; 10; 1; 2 \rangle$. Diese Parameter fügt man in die Modellfunktion ein und erhält die Funktion in Abbildung 3.39.



Abbildung 3.39: Modellfunktion mit Parametern

Befindet sich der Cursor in der Zeile der entsprechenden Funktion, erscheinen unter dem Reiter *Parameter* Schieberegler, mit denen die Funktion an die gemessenen Werte angepasst werden kann. Neben der Maus können hier auch zur feinen Einstellung die Cursortasten \leftarrow und \rightarrow genutzt werden. Abbildung 3.40 zeigt die Einstellung für eine möglichst gute Anpassung.

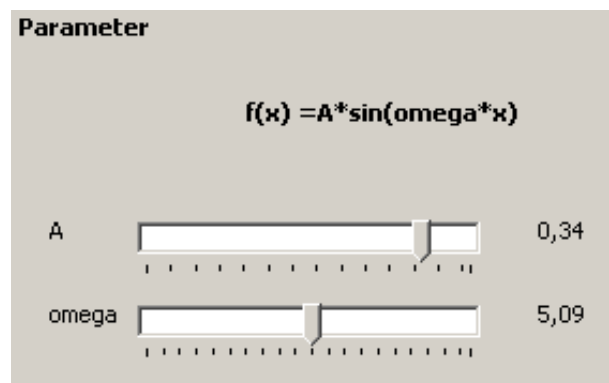


Abbildung 3.40: Einstellen der Parameter einer Vergleichsfunktion

Den zugehörigen Graphen zeigt Abbildung 3.41. Die Markierungen der Messwerte wurden gemäß Tipp 5.6 verkleinert.

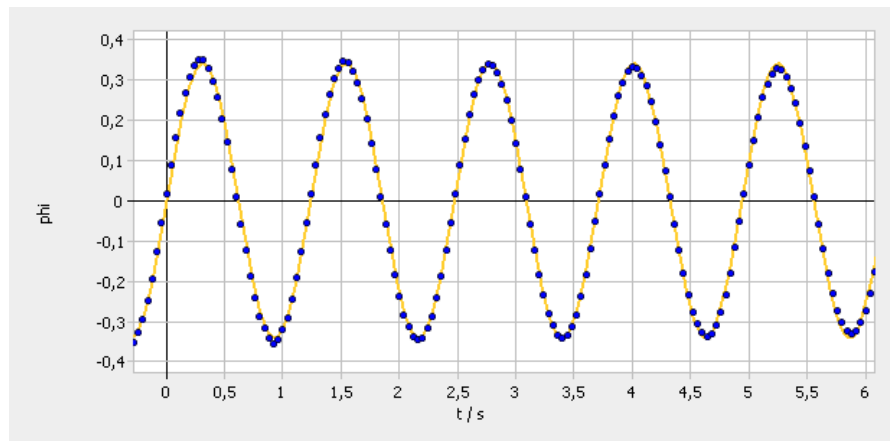


Abbildung 3.41: Auslenkung des Fadenpendels – Messwerte als Markierungen und Graph der Vergleichsfunktion als Linie

Als Modellfunktion ergibt sich also $\varphi(t) = 0,34 \cdot \sin(5,09 \frac{1}{s} \cdot t)$. Ihr Graph zeigt nur geringe Abweichungen von den gemessenen Werten.

Alle drei Methoden zur Bestimmung einer Modellfunktion liefern, bis auf eine kleine Varianz in der zweiten Nachkommastelle, gleiche Ergebnisse. Die Nutzung eines Schiebereglers ist dann besonders komfortabel, wenn dieser vorbereitet werden kann oder wenn eine sehr genaue Anpassung mit mehreren Variablen durchgeführt werden soll. Zusätzlich kann leichter demonstriert werden, wie der Funktionsgraph von den einzelnen Parametern abhängt.

Vergleich mit dem physikalischen Modell

Für das ideale Pendel ergibt sich eine Kreisfrequenz von $\omega = \sqrt{g/l}$. Die Länge des Pendels lässt sich mit der Funktion *Messung* → *Längenmessung* bestimmen (Abb. 3.42). Wie bei der Skalierung erscheinen Anfasser, die auf Aufhängepunkt und Mittelpunkt der Masse verschoben werden. Die Länge kann anschließend im Hinweisfenster, sowie in der Statusleiste, abgelesen werden.

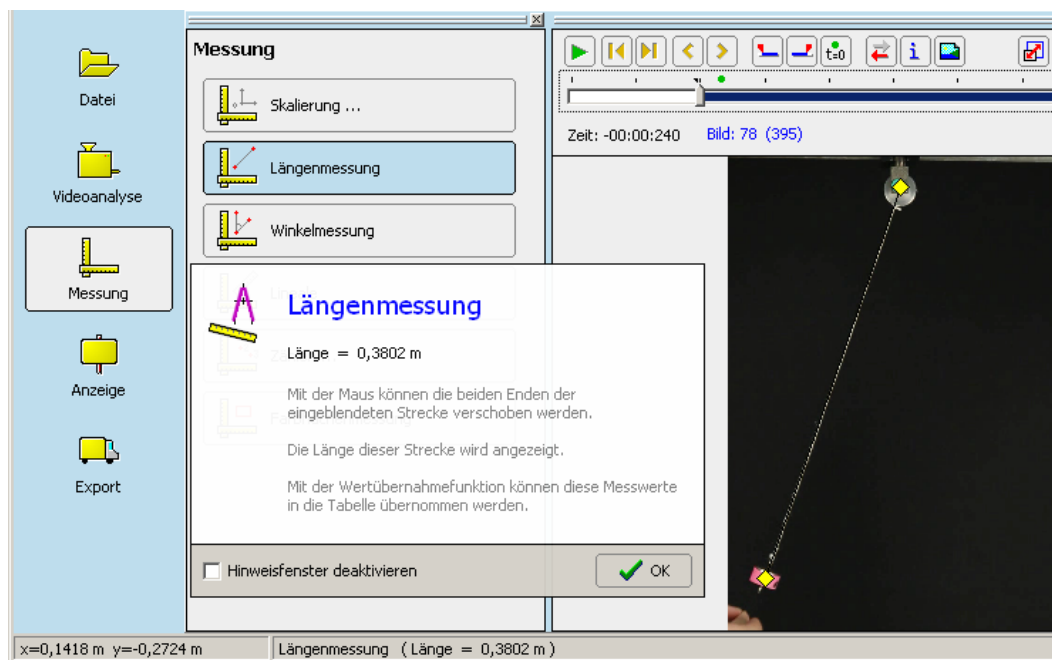


Abbildung 3.42: Messung der Länge des Fadenpendels

Aus der gemessenen Länge von $l = 0,3802 \text{ m}$ errechnet man mit Gleichung 3.1 die Kreisfrequenz von $\omega = \sqrt{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} / 0,3802 \text{ m}} = 5,08 \frac{1}{\text{s}}$. Diese weicht wieder lediglich in der zweiten Nachkommastelle von den zuvor bestimmten Werten ab.

3.3.4 Geschwindigkeit und Beschleunigung

„Um (...) den vektoriellen Charakter der Größe Geschwindigkeit von Anfang an deutlich zu machen, ist es sinnvoll, schon bei der Einführung der Geschwindigkeit von einer zweidimensionalen Bewegung auszugehen.“³⁹ Hierzu eignet sich die zweidimensionale Betrachtung des Fadenpendels gut, da sich so Fehlvorstellungen verhindern lassen, die bei einer eindimensionalen Betrachtung hervorgerufen werden können. Hierzu werden unter *Anzeige* → *Filter und Einblendungen* durch mehrmaliges Klicken auf *Neu* mehrere Filter erstellt:

³⁹Wilhelm u. Heuer (2002)

- Der Filter *Symbol* blendet jeweils an der Stelle der Pendelmasse ein kleines Kreuz ein. Wie in Kapitel 3.2.7 gezeigt, lässt sich die Farbe in der *Konfiguration* des Filters auf **blau** setzen. Dort kann auch die Linienbreite erhöht werden.
- Die Filter *Geschwindigkeitspfeil* und *Beschleunigungspfeil* erzeugen jeweils einen an das Objekt gehefteten Pfeil, dessen Länge proportional zum Wert der entsprechenden Größe ist. Hier wird die Linienbreite aufgrund der hohen Auflösung auf ca. 7 vergrößert und die Farbe auf **rot** bzw. **gelb** gesetzt. Um die Sichtbarkeit der Vektoren auch in Bildern, die nicht analysiert wurden, zu garantieren, sollte die *Spurlänge* in der *Konfiguration* unter dem Reiter *Symbol* gemäß Tipp 5.1 an die Schrittweite angepasst werden. Unter dem Reiter Datenquelle wird anschließend der *Streckungsfaktor* so angepasst, dass die Pfeile das Videobild nicht verlassen. Dies entspricht bei der Geschwindigkeit einem *Streckungsfaktor* von 12% und bei der Beschleunigung von 5%.

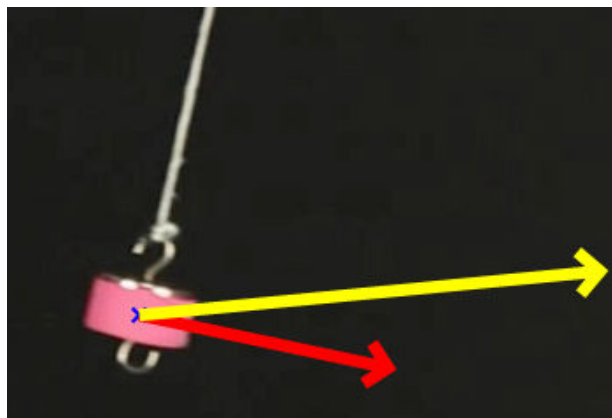


Abbildung 3.43: Pfeile am Fadenpendel

Abbildung 3.43 zeigt einen Ausschnitt aus einem Standbild des Versuchsvideos. Insbesondere beim langsamen Abspielen des Videos erkennt man, dass der Geschwindigkeitsvektor stets tangential auf die Kreisbahn steht. Der Betrag nimmt vom Umkehrpunkt bis zum Ruhepunkt zu und bis zum nächsten Umkehrpunkt wieder auf 0 ab. Ein komplizierteres Bild zeigt die Beschleunigung. Um deren Verlauf zu veranschaulichen, bieten sich zwei Methoden an:

Mehrere Pfeile in einem Bild

Bei der ersten Methode sollen die Pfeile verschiedener Zeitpunkte in einem Standbild angezeigt werden.⁴⁰ Nachdem ein Videobild, in dem sich das Fadenpendel in einem Umkehrpunkt befindet, ausgewählt wurde, wird die Spurlänge der einzelnen Filter solange erhöht, bis die Ortsmarkierungen, Geschwindigkeits- sowie Beschleunigungspfeile einer halben Schwingungsperiode gleichzeitig angezeigt werden. Um unübersichtliche Überschneidungen der Vektoren zu vermeiden, muss die *Schrittweite* aller Filter im Beispielvideo auf den Wert 2 und der *Streckungsfaktor* bei der Beschleunigung auf 1% reduziert werden. Wird gleichzeitig noch durch geschickte Wahl des Videobildes darauf geachtet, dass Pfeile und Markierung im Tiefpunkt zu sehen sind, ergibt sich ein Bild wie in Abbildung 3.44.



Abbildung 3.44: Visualisierung des Verlaufs von Geschwindigkeit und Beschleunigung durch mehrere Pfeile im Standbild

In der Nähe der Umkehrpunkte ist die Beschleunigung tangential. Mit steigendem Tempo erhält sie eine zusätzliche, nach innen gerichtete, radiale Komponente, die das Gewicht auf der Kreisbahn hält, während die Tangentialbeschleunigung mit kleiner werdendem Auslenkwinkel sinkt. Im Tiefpunkt steht die Beschleunigung schließlich senkrecht auf die Bewegungsrichtung, da der tangentielle Anteil dort wegfällt. Nach dem Durchschreiten dieses Punktes wird das Fadenpendel durch die nun entgegen der Bewegungsrichtung einsetzende tangentiale Kraft abgebremst, was wiederum zu einer kleiner werdenden radialen Komponente führt, die im Umkehrpunkt verschwindet.

⁴⁰vgl. [Schüttler u. Wilhelm \(2011\)](#)

Pfeile im Serienbild

Bei der zweiten Methode wird ein Serienbild erstellt, das den zeitlichen Verlauf der Vektorpfeile darstellt.⁴¹ Dabei soll die Beschleunigung in zwei Komponenten aufgeteilt werden: Die Fallbeschleunigung und die durch die Seilkraft resultierende „Seilbeschleunigung“. Hierzu werden zwei zusätzliche Tabellenspalten erstellt: Die erste ist die y-Komponente der Fallbeschleunigung und erhält den *Namen* `a_g`, die *Einheit* `m/s2` und die *Formel* `-9,81`. Bei der zweiten Spalte wird die Fallbeschleunigung von der y-Komponente der gemessenen Beschleunigung abgezogen. Sie erhält den *Namen* `a_y_2`, die *Einheit* `m/s2` und die *Formel* `a_y+9,81`.

Wie bei der ersten Methode wird ein Orts- und ein Beschleunigungsfilter erstellt. *Schritt-* und *Spurweite* der Filter bleiben jedoch beim Wert 1. Zum Erstellen der Pfeile für die beiden weiteren Beschleunigungen wird der ursprüngliche Beschleunigungsfilter geklont. In der *Konfiguration* der Klone wird unter dem Reiter *Datenquelle* im Falle der „Beschleunigung ohne Fallbeschleunigung“ die *y-Koordinate* durch die gerade eben erstellte Spalte `a_y_2` ersetzt. Bei der Fallbeschleunigung erhält die *x-Koordinate* den *Fixwert* 0 und die *y-Koordinate* wird mit der Spalte `a_g` verknüpft.

Der zeitliche Verlauf der erstellten Pfeile soll nun in einem Serienbild festgehalten werden. Zunächst wird ein passender, kurzer Ausschnitt aus dem Video durch Setzen von Start- und Endmarke ausgewählt. Da bei der Analyse eine Schrittweite größer als 1 gewählt wurde, muss darauf geachtet werden, dass der Startframe analysiert wurde, da ansonsten keine Pfeile angezeigt werden. Aus dem gleichen Grund muss die Schrittweite, die bei der Erstellung eines *Serienbildes* aus der Einstellung im Videofenster übernommen wird, ein Vielfaches der Analyse-Schrittweite betragen. Im Beispiel wurde der Wert 6 gewählt, um wie zuvor fünf Zeitpunkte zu betrachten.

⁴¹vgl. [Schüttler \(2011, S. 70f\)](#)

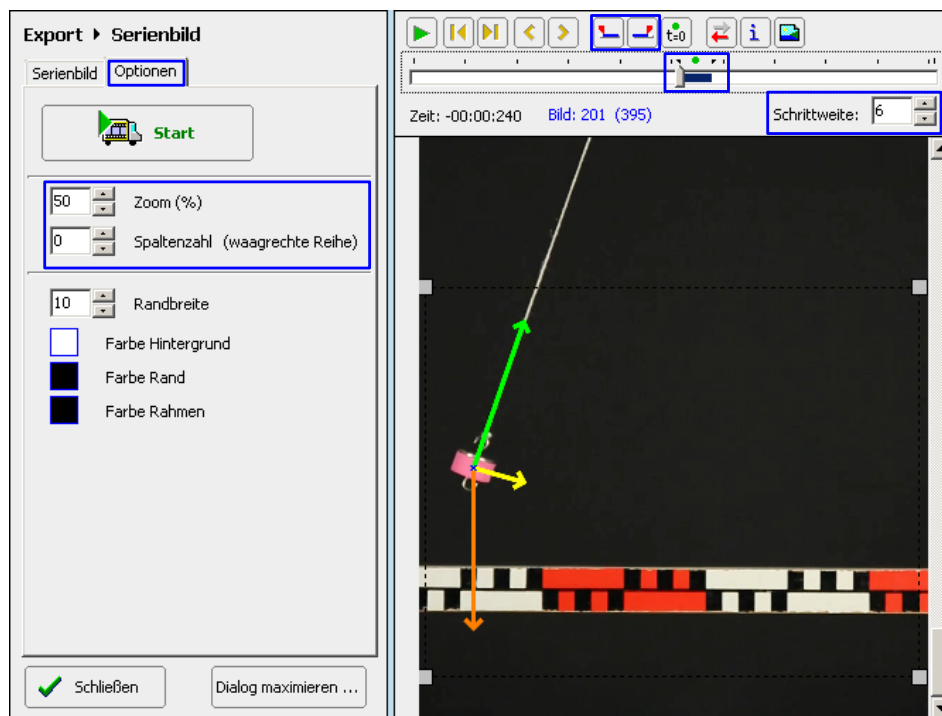


Abbildung 3.45: Erstellung eines Serienbildes

Nun wird die Funktion *Export* → *Serienbild erstellen* aufgerufen (Abb. 3.45). Unter dem Reiter *Optionen* wird zunächst der *Zoom* eingestellt. Insbesondere, wenn viele Standbilder neben- und untereinander angeordnet werden sollen, würde die Auflösung des Serienbildes ansonsten schnell in kaum verwendbare Größen steigen. Deswegen wird hier ein *Zoom* mit einer Einstellung von 50% gewählt. Mit der Wahl einer *Spaltenanzahl* von 0 bleiben alle Teilbilder in einer Zeile. Je nach Wunsch kann außerdem *Breite*, *Farbe* und *Hintergrund* des *Rands* um die Bilder und den *Rahmen* des Serienbildes eingestellt werden. Durch Anfasser im Videobild wird der zu exportierende Bereich zusätzlich eingeschränkt.

Durch Klick auf die Schaltfläche *Start* wird das Serienbild erstellt und im Aktionsfenster angezeigt. Über die Schaltfläche *Dieses Bild behalten* lässt sich ein Dialog aufrufen, über den sich das Bild *speichern*, *in die Zwischenablage kopieren* oder *drucken* lässt (Abb. 3.46).

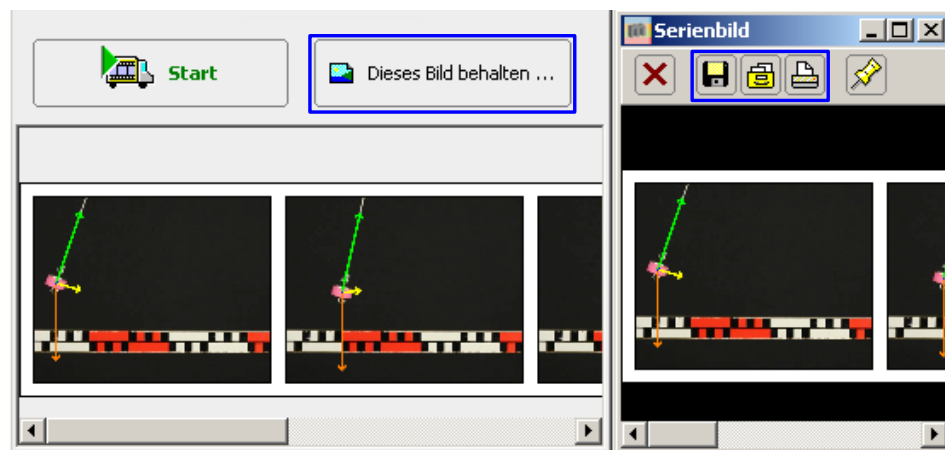


Abbildung 3.46: Speichern, Kopieren und Drucken eines Serienbildes

Abbildung 3.47 zeigt das erstellte Serienbild. Da sich die Beschleunigungspfeile gemäß des zweiten Newtonschen Gesetzes ($\vec{F} = m \cdot \vec{a}$) auch als Kraftpfeile interpretieren lassen, wird das Modell gestützt, dass am Fadenpendel zwei Kräfte wirken: Die senkrecht nach unten gerichtete Gewichtskraft mit konstantem Kraftbetrag und die in Richtung des Fadens wirkende Seilkraft, die nicht nur die radiale Komponente der Gewichtskraft kompensiert, sondern das Gewicht zusätzlich durch eine geschwindigkeitsabhängige Zentripetalkraft auf der Kreisbahn hält.

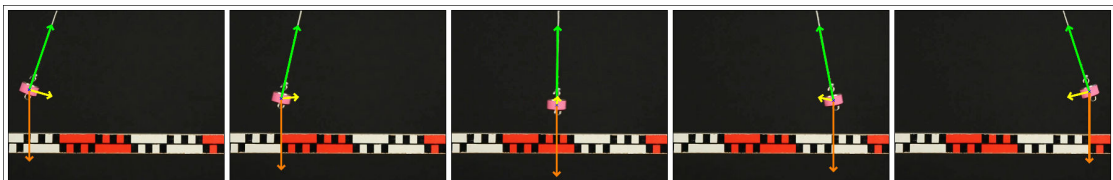


Abbildung 3.47: Serienbild der verschiedenen Beschleunigungen

3.3.5 Energieerhaltung

Das Fadenpendel kann unter dem Gesichtspunkt der Energieerhaltung betrachtet werden. Potentielle und kinetische Energie der Pendelmasse werden im Verlauf der Schwingung ständig ineinander umgewandelt. Ihre Summe bleibt jedoch konstant.

Zur Berechnung der Potentiellen Energie sollte der Nullpunkt des Koordinatensystems unter *Videoanalyse* → *Skalierung* → *Ursprung und Richtung* auf den

Tiefpunkt der Bahnkurve der Pendelmasse gelegt werden. Anschließend wird diese Einstellung über die Schaltfläche *Skalierung übernehmen* auf die Daten in der Tabelle angewandt. Dann entspricht die potentielle Energie genau der Arbeit, die beim Auslenken aus der Ruhelage am Pendel geleistet wurde.

Zur Berechnung der Energien werden drei Tabellenspalten hinzugefügt:

- Bei der ersten Spalte wird die Formel für die *Potenzielle Energie* im Drop-Down-Menü ausgewählt. Sie erhält damit den Namen **E_pot**, die Einheit J und die Formel $m=1; g=9,81; m \cdot g \cdot y$, bei der noch die 1 gegen die Masse des Pendels in kg (0,045) getauscht werden muss.
- Bei der zweiten Spalte wird analog *kinetische Energie* ausgewählt und die Formel $m=1; 0,5 \cdot m \cdot (v_x^2 + v_y^2)$ an die Pendelmasse angepasst.
- Die dritte Spalte erhält den Namen **E_ges**, die Einheit J und die Formel $E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$.

E_pot	E_kin	E_ges	
0,00	0,01	0,01	
0,00	0,01	0,01	E_pot+E_kin (Rechtsklick, um Formel zu ändern)
0,00	0,01	0,0110	

Abbildung 3.48: Kinetische, potentielle und Gesamtenergie im Tabellenfenster

Zeit-Energie-Diagramm

Eine Möglichkeit, den Verlauf der berechneten Energien anzuzeigen ist das $t - E$ -Diagramm. Unter *Anzeige* → *Diagramm* → *Optionen* werden hierzu die Daten der gerade erstellten Spalten hinzugefügt (Abb. 3.49).

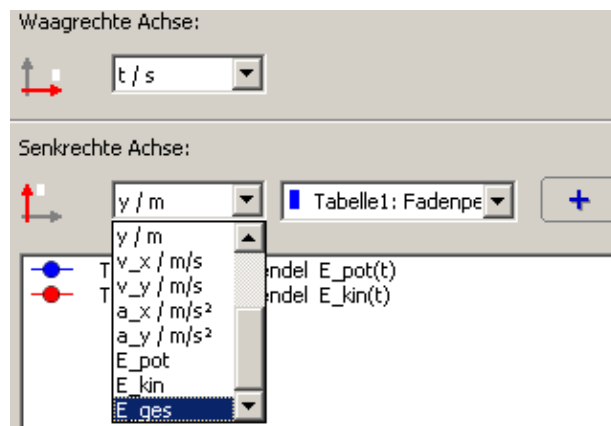


Abbildung 3.49: Hinzufügen der Daten zum Diagramm

Da die verschiedenen Graphen ihre Daten aus der selben Tabelle beziehen, erhalten sie standardmäßig dieselbe Farbe. Nach Doppelklick auf die entsprechenden Datenzeilen sollte deswegen die Farbe der Kurven im *Optionen*-Fenster geändert werden. Abbildung 3.50 zeigt einen verkürzten Ausschnitt aus dem Zeit-Energie-Diagramm.

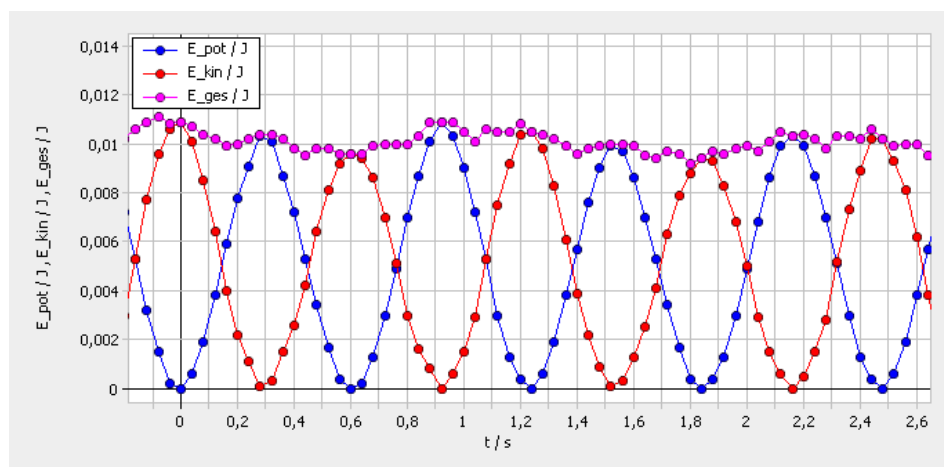


Abbildung 3.50: Hinzufügen der Daten zum Diagramm

Trotz merklicher Schwankung der Gesamtenergie kann bestätigt werden, dass die Gesamtenergie bei diesem Versuch erhalten wird. Fehler ergeben sich hier nicht nur aus der Ungenauigkeit der Ortsmessung, sondern auch vor allem aus zwei Gründen:

Da die Kamera bei der Aufnahme nicht exakt vertikal ausgerichtet war, kommt es in den Umkehrpunkten zu unterschiedlichen Höhen der Pendelmasse. Dies erkennt man an den abwechselnd etwas höheren und tieferen Maxima der potentiellen Energie. Durch den Rolling-Shutter-Effekt erscheinen Objekte, die sich entgegen der Ausleserichtung bewegen, langsamer als Objekte, die sich in Ausleserichtung bewegen. Da die Geschwindigkeit bei der potentiellen Energie quadratisch eingeht, führt dies dort zu einer Verstärkung des Fehlers.

Darstellung im Videobild durch Energiesäulen

Neben einer Darstellung als Diagramm bietet es sich an, die Energien als dynamisch ikonische Repräsentation im Videobild als übereinander gestapelte Säulen anzuzeigen.⁴² Hierfür benötigt man mehrere Filter (*Anzeige* \rightarrow *Filter und Einblendungen*). Zunächst wird ein *Farb- und Helligkeits*-Filter erstellt, der folgendermaßen *konfiguriert* wird: Mit den Anfassern wird der Anwendungsbereich des Filters auf einen rechteckigen Bereich über der Pendelbewegung eingeschränkt. Eine Alphablende von 95% lässt den Bereich fast weiß erscheinen, während der Faden noch leicht hervorscheint (Abb. 3.51).

⁴²vgl. Michel (2010, S. 59)

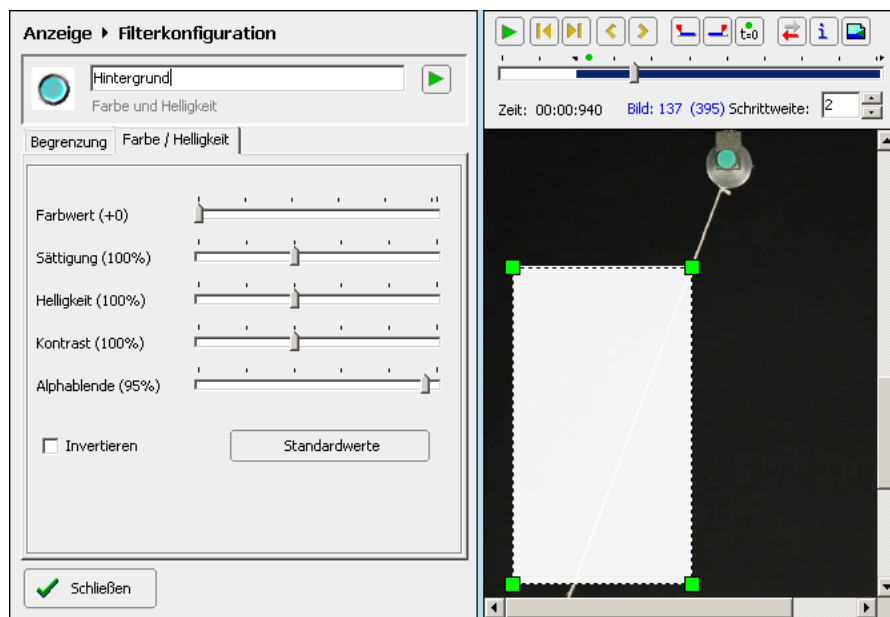


Abbildung 3.51: Erstellung eines Hintergrunds für Energiesäulen

Der zweite Filter soll eine Säule für die potentielle Energie sein. Hierzu eignet sich der Filter *Linie*, der nach dem Erstellen noch *konfiguriert* werden muss. Unter dem Reiter *Symbol* wird zunächst als *Spurlänge* die *Schrittweite* der Videoanalyse (hier: 2) gewählt. Dies stellt einerseits sicher, dass beim Abspielen auch bei nicht analysierten Videobildern eine Energiesäule angezeigt wird. Andererseits wird auch sichergestellt, dass nicht alle vorherigen Säulen übereinander gemalt werden (*Spurlänge* 0) (Abb. 3.52). Unter *Symbol ändern* → *Eigenschaften* wird anschließend die *Linienbreite* auf 40 erhöht.

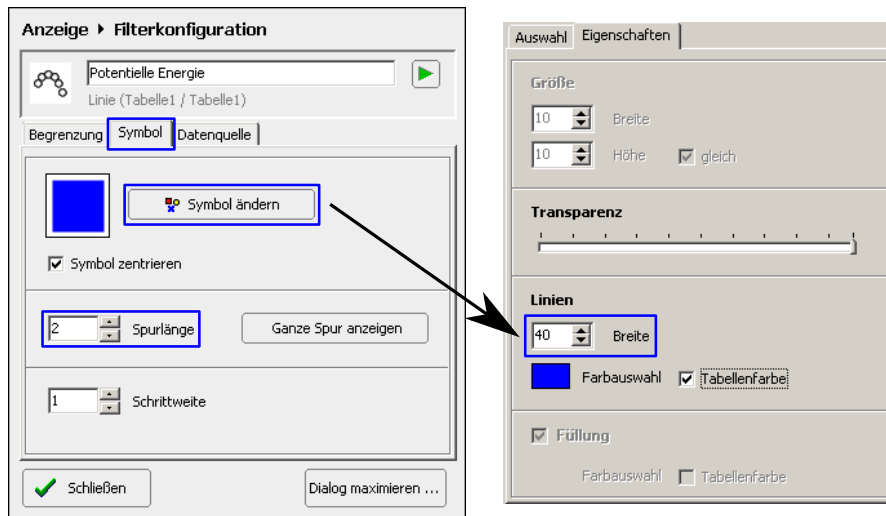


Abbildung 3.52: Hinzufügen einer Energiesäule - Teil I

Unter dem Reiter *Datenquelle* lassen sich *Startpunkt* und *Endpunkt* der zu erstellenden Energiesäule einstellen (Abb. 3.54). Hierzu wird das Zeitinkrement auf 0 gesetzt, die entsprechende Tabelle ausgewählt und die Optionen *Benutzerdefinierte Skalierung benutzen* und *Skript verwenden* aktiviert.

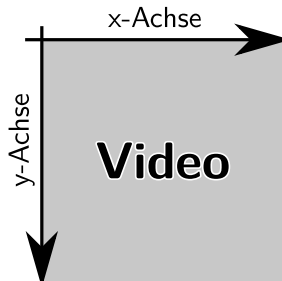


Abbildung 3.53: Pixelkoordinatensystem

Die erste Option stellt sicher, dass Koordinaten bezüglich des bei der *Skalierung* angegebenen Koordinatensystems interpretiert werden. Ist diese deaktiviert, wird stattdessen in einem Pixelkoordinatensystem gerechnet, bei dem der Ursprung sich in der linken oberen Ecke des Bildschirms befindet, wobei die x-Achse nach rechts und die y-Achse nach unten zeigt (Abb. 3.53). Durch die zweite Option kann der Startpunkt frei gewählt werden. Bewegt man die Maus in das Videofenster, erscheinen in der Statusleiste die Koordinaten, an denen sich der Mauszeiger befindet. So lassen sich leicht geeignete Koordinaten für die Positionierung der Energiesäulen bestimmen (hier $(-0,11; 0,14)$).

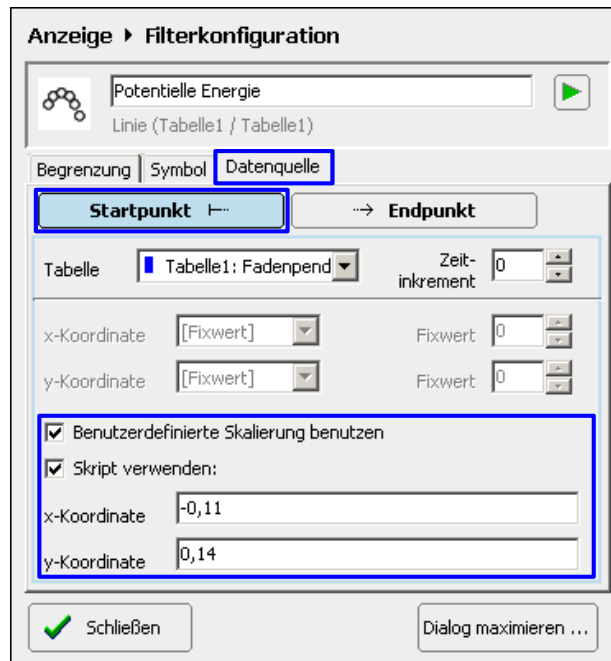


Abbildung 3.54: Hinzufügen einer Energiesäule - Teil II

Der Endpunkt wird genauso eingestellt, erhält aber eine Änderung: Da die Säulenhöhe der potentiellen Energie entsprechen soll, erhält die y-Koordinate zusätzlich ein Vielfaches der potentiellen Energie (hier $0,14 + E_{\text{pot}} \cdot 10$). Im Videobild ist nun eine Säule zu sehen, die beim Abspielen wächst und schrumpft. Für die Säule der kinetischen Energie bietet es sich an, den *Filter* für die potentielle Energie zu *klonen* und anschließend zu *konfigurieren*. Unter dem Reiter *Symbol* lässt sich nach Betätigen der Schaltfläche *Symbol ändern* im erscheinenden Fenster unter dem Reiter *Eigenschaften* die Farbe der Säule ändern (Abb. 3.52). Unter dem Reiter *Datenquelle* werden anschließend die Formeln für die x- und y-Koordinaten bearbeitet.

Um die Säulen nebeneinander zu positionieren, wird die x-Koordinate von *Start-* und *Endpunkt* etwas größer also zuvor eingestellt (hier $-0,08$). Bei der y-Koordinate wird anschließend noch die potentielle Energie durch die kinetische Energie ersetzt. Beim Abspielen des Videos fällt nun auf, dass die Säule der kinetischen Energie im Umkehrpunkt nicht verschwindet. Stattdessen erscheint ein etwas störender Kreis, dessen Durchmesser der Säulenbreite entspricht. Dagegen hilft ein einfacher

Trick: Zum *Endpunkt* wird ein kleiner Wert hinzuaddiert, sodass die Höhe der Säule nie einen Pixel unterschreitet. Bei der hier verwendeten Skalierung lautet die so angepasste Formel für die y-Koordinate $0,14 + E_{\text{kin}} * 10 + 0,0005$.

Bei der dritten Säule soll die Säule der kinetische Energie auf die Säule der potentiellen Energie gestapelt werden. Die beiden vorigen Säulen werden hierzu geklont und die x-Koordinate der jeweiligen *Start-* und *Endpunkte* auf 0,05 gesetzt. Um die Säule der kinetischen Energie genau um die Höhe der Säule der potentiellen Energie zu verschieben, wird bei der y-Koordinate der Summand $E_{\text{pot}} * 10$ hinzugefügt. Der *Startpunkt* hat also die x-Koordinate $0,14 + E_{\text{pot}} * 10$ und die y-Koordinate $0,14 + E_{\text{pot}} * 10 + E_{\text{kin}} * 10 + 0,0005$.

Abbildung 3.55 zeigt die erstellten Filter im Auswahlfenster und die im Videofenster entstandenen Energiesäulen.

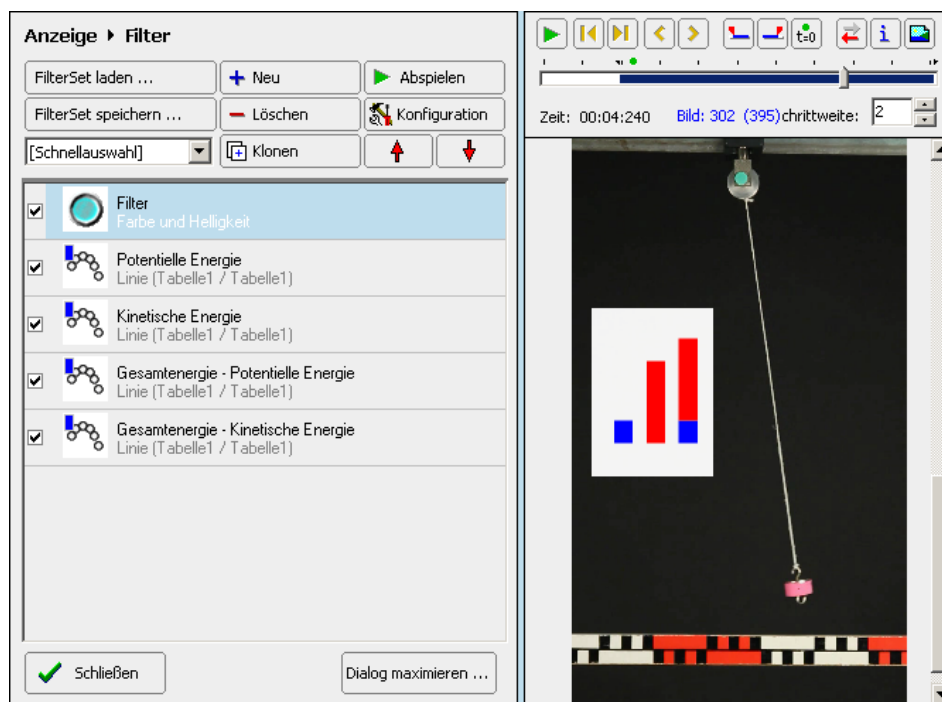


Abbildung 3.55: Säulen für potentielle, kinetische und Gesamtenergie im Videobild

Zur Beschriftung der Säulen werden unter *Anzeige* → *Zeichnen* drei Textobjekte erstellt, konfiguriert und mit der Maus unter die jeweiligen Säulen verschoben

(Abb. 3.56). Dabei wird als eigentlicher Text zunächst nur E eingegeben. Nach Doppelklick auf das entstandene Objekt im Aktionsfenster erscheint die *Konfiguration*. Unter dem Reiter *Text* wird hier der tiefgestellte Text (*pot*, *kin*, bzw. *ges*) eingegeben, sowie Schriftart und Farbe angepasst.

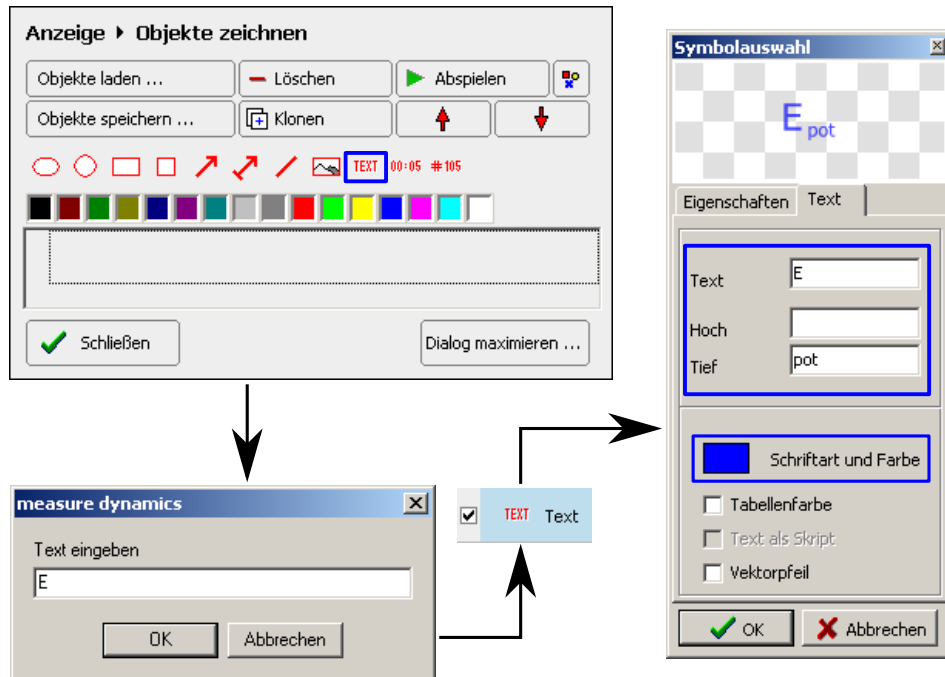


Abbildung 3.56: Erstellen der Beschriftung für die Energiebalken

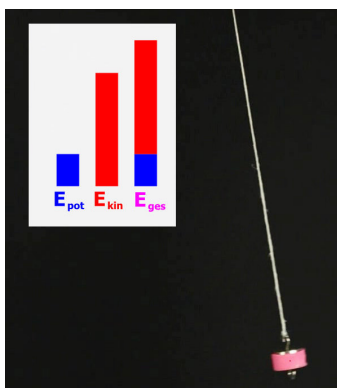


Abbildung 3.57: Fadenpendel mit Energiebalken

Abbildung 3.57 zeigt ein Standbild aus dem Versuchsvideo mit eingeblendeten Energiebalken. Während die Säule der potentiellen Energie mit steigender Auslenkung des Fadenpendels wächst, schrumpft die Säule der kinetischen Energie aufgrund der sinkenden Geschwindigkeit. Die Säule der Gesamtenergie ändert ihre Höhe nur kaum und zeigt die periodischen Umwandlungsprozesse der kinetischen und potentiellen Energie ineinander. Diese Visualisierung ist besonders deswegen eindrucksvoll, da es ziemlich schwer fällt, die kinetische Energie beim Betrachten der Bewegung

quantitativ abzuschätzen. Erst das Stapeln der Säulen macht die Energieerhaltung auf einer möglichst niedrigen Abstraktionsebene sichtbar.

3.4 Beschleunigungsvorgänge beim Auto

3.4.1 Versuch

Der nächste Versuch besteht aus zwei Teilen. Im ersten Versuchsteil beschleunigt ein Auto aus dem Stand bis zur Maximalgeschwindigkeit des ersten Ganges. Im zweiten Versuchsteil wird eine Vollbremsung durchgeführt.

Aufbau und Videodreh

Um den Beschleunigungsvorgang des Autos aufzunehmen, wird eine relativ lange Strecke von ca. 50 m benötigt, da das Fahrzeug nach Verlassen des Videobereichs noch abgebremst werden muss. Um einen möglichst großen Bereich aufzunehmen, muss sich die Kamera mindestens 20 m von der Fahrstrecke entfernt befinden. Aus Sicherheitsgründen sollte eine absperrbare oder zumindest wenig befahrene und gut einsehbare Strecke gewählt werden. Um Helligkeitswechsel zu vermeiden, sollte sich kein Teil der Fahrstrecke im Schatten befinden. Aus diesen Gründen wurde für die Versuchsvideos der Sportplatz hinter dem Sprachenzentrum der Universität Würzburg gewählt. Da es sich um eine Außenaufnahme handelt, kann eine kurze Belichtungszeit von $\leq 1/500$ s gewählt werden. Filmen gegen die Sonne und störende Reflexe, besonders am Auto, sollten vermieden werden. Hierfür ideale Bedingungen liefert ein bewölkter Himmel zur Mittagszeit. Um die automatische Analyse zu ermöglichen, wird ein farbiges Tonpapierquadrat mit einer Seitenlänge von ca. 10 cm, in der Mitte des Autos, an einer Seitentür befestigt. Im Projekt *Auto anfahren* war es die Aufgabe des Fahrers mit größtmöglicher Beschleunigung im ersten Gang loszufahren. Eine Vollbremsung zeigt das Projekt *Auto vollbremsung*.

3.4.2 Videoanalyse

Beim Anfahrvorgang des Autos gestaltet sich die Videoanalyse folgendermaßen: Zunächst wird der Maßstab des Koordinatensystems unter *Videoanalyse* \rightarrow *Skalierung* eingestellt. Dabei dient die schwarze Leiste an den Seitentüren mit einer Länge von

1,69 m als Maßstab. Unter *Ursprung und Richtung* wird das Koordinatensystem mit der linken Maustaste auf die Position der Markierung des Autos vor Beginn der Bewegung gelegt. Da es sich um eine eindimensionale Bewegung handelt, wird der Analysebereich bei der *automatischen Analyse* mittels der roten Anfasser auf einen schmalen horizontalen Streifen auf Höhe der Markierung eingeschränkt. Die Einstellung der *Analyse-Optionen* gestaltet sich schwieriger als zuvor: Da Markierung und Rücklicht rot sind, treten bei der Analyse je nach Einstellung Sprünge auf. Durch Ausprobieren findet man heraus, dass bei deaktivierter Option *Farbanalyse verfeinern* und einer *Empfindlichkeit* von ca. 30% die beste Analyseleistung erzielt wird. Vor der Analyse wird nun noch der Zeitnullpunkt auf den Beginn der Bewegung gelegt, die Schrittweite auf den Wert 5 erhöht und eine Startmarke auf wenige Schrittweiten vor Beginn der Bewegung gelegt. Die Endmarke wird auf einen Zeitpunkt, kurz bevor das Auto das Videobild verlässt, gesetzt. Zur Analyse wird die rote Markierung per Linksklick ausgewählt und die Analyse gestartet. Abbildung 3.58 zeigt einen Ausschnitt aus dem Versuchsvideo während der Analyse.

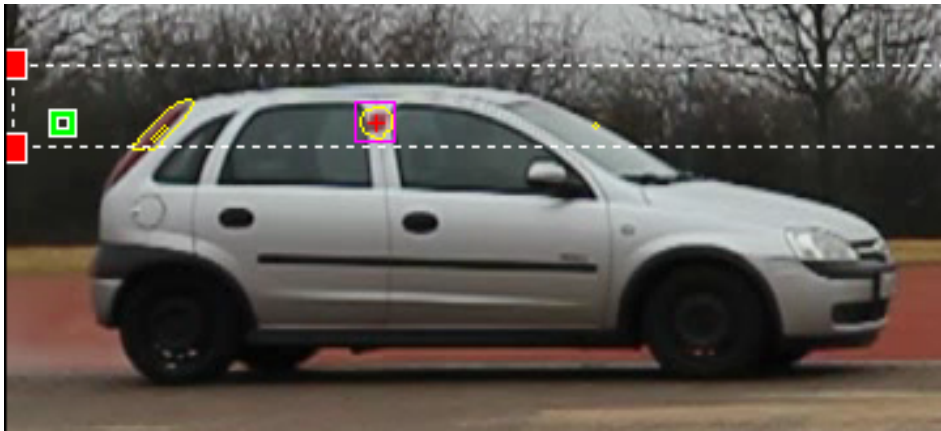


Abbildung 3.58: automatische Analyse beim Auto

Bei der Vollbremsung des Autos ergeben sich zu obigem Vorgehen nur kleine Änderungen. Hier ist es sinnvoll, den Beginn des Bremsvorgangs als Zeitnullpunkt zu wählen. Diesen findet man am einfachsten, indem man das Video zunächst mit einer Schrittweite mit dem Wert 1 analysiert und anschließend unter *Anzeige* → *Diagramm* ein Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm erstellt. Da das Diagramm

nur bis zur entsprechenden Stelle im Videobild gezeichnet wird, lässt sich der entsprechende Zeitpunkt unter Verwendung des Schiebereglers im Videofenster leicht finden. Zusätzlich kann der Ursprung des Koordinatensystems auf die Position der Markierung zu diesem Zeitpunkt gelegt werden. Da die Beschleunigung bei einer Schrittweite mit dem Wert 1 nur das Vielfache von $8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ betragen kann, sollte sie für eine zweite Analyse auf den Wert 5 erhöht werden.

3.4.3 Vom Vektorpfeil zum Graphen

Die Darstellung der Geschwindigkeit durch einen Graphen „ist (...) nur ein effizientes Vorgehen für diejenigen, die bereits über angemessene physikalische Konzepte verfügen und außerdem Erfahrung haben, mit Graphen umzugehen (...).“⁴³ „Die intuitivste Darstellung [einer vektoriellen Größe] ist, einen einzigen Pfeil für die zu betrachtende Größe direkt an das bewegte Objekt anzuhängen (...).“⁴⁴ Wie bei [Wilhelm \(2012\)](#) soll in diesem Kapitel durch geschickte Schritte ausgehend von einem angehefteten Beschleunigungspfeil in mehreren Schritten ein Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm entstehen.

Beschrifteter Geschwindigkeitspfeil am Objekt

Im ersten Schritt wird unter *Anzeige* → *Filter* ein Geschwindigkeitspfeil erstellt. Nachdem dessen Farbe und Linienbreite in der *Filterkonfiguration* unter dem Reiter *Symbol* angepasst wurden (hier **rot** bzw. **6**) wird die *y-Koordinate* des Pfeils unter *Datenquelle* → *Endpunkt* auf den **Fixwert** 0 gesetzt, da lediglich die Geschwindigkeit in x-Richtung betrachtet werden soll. Da bei vielen folgenden Filtern in Pixelkoordinaten gerechnet werden muss und alle Pfeile gleich skaliert werden sollen, wird die *benutzerdefinierte Skalierung* deaktiviert und ein Streckungsfaktor von 2500% eingestellt.

Durch Hinzufügen eines zusätzlichen *Filters* des Typs *Symbol* lassen sich Pfeile beschriften. In der *Konfiguration* wird unter *Symbol* → *Symbol ändern* als Art des

⁴³[Wilhelm \(2012\)](#)

⁴⁴[Wilhelm \(2012\)](#)

Symbols *Text* ausgewählt (Abb. 3.59). Anschließend wird unter dem entsprechenden Reiter *v* als *Text* angegeben, *Schriftart und Farbe* eingestellt und die Option *Vektorpfeil* aktiviert. Die Füllung des Hintergrunds wird unter *Eigenschaften* deaktiviert. Zurück in der Filterkonfiguration wird unter *Datenquelle* die Option *Skript verwenden* aktiviert und der Beschriftung des Vektors eine Position zugewiesen.

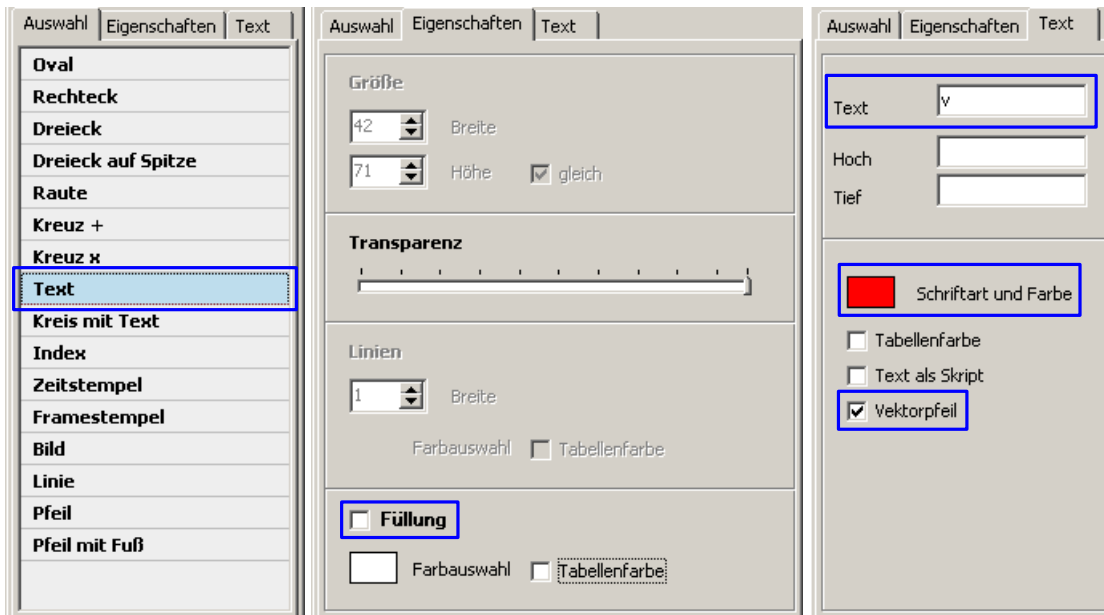


Abbildung 3.59: Beschriftung eines Pfeils

Um die Beschriftung genau über die Mitte des Pfeils zu setzen, muss zur Position des Autos in x-Richtung noch die Hälfte der Pfeillänge hinzuaddiert werden. Die Formel hierfür lautet $_x + v_x \cdot (25/2)$. Für die x-Koordinate im Pixelkoordinatensystem steht $_x$ und 25 für den *Streckungsfaktor* des Geschwindigkeitspfeils. Da die y-Achse nach unten zeigt, wird als y-Koordinate die Formel $_y - 30$ eingegeben. Die Beschriftung erscheint nun wie in Abbildung 3.60 mittig über dem Pfeil.



Abbildung 3.60: Geschwindigkeitspfeil an Auto mit Beschriftung

Stroboskopbild

Beim Abspielen des Videos lassen sich Längenänderungen von Pfeilen nur schwer abschätzen. Neben den in Kapitel 3.3.4 Möglichkeiten des Serienbildes und des Erzeugens einer Spur kann auch ein Stroboskopbild erzeugt werden, in dem auch das Objekt mehrfach angezeigt wird. Die Funktion wird über *Videoanalyse* → *Stroboskopbild* aufgerufen und über den Reiter *Optionen* eingestellt (Abb. 3.61).



Abbildung 3.61: Einstellen des Stroboskopbildes

Es gibt zwei Algorithmen, um Stroboskopbilder zu erstellen: Ist die Option *Stroboskopbild mittels Videoanalyse ermitteln* deaktiviert, werden die einzelnen Bilder einfach transparent übereinandergelegt, sodass der Hintergrund durchscheint. Bei aktivierter Option wird der Videoanalysealgorithmus genutzt, um bewegte Objekte über den unbewegten Hintergrund zu legen, ohne dass diese durchscheinen. Da der Analysebereich aus der *automatischen Analyse* übernommen wird, vergrößert man ihn mittels der farbigen Anfasser soweit, dass sich das Auto stets komplett innerhalb des Analysebereichs befindet. Um das Bild übersichtlich zu machen, wird die *Schrittweite* auf den Wert 25 erhöht. Um Pfeile an der richtigen Position einzublenden, muss sie ein Vielfaches der Schrittweite der automatischen Analyse betragen. Auf das Stroboskopbild lassen sich eigentlich nur *Filter* genau eines Bildes einblenden. Das Stempeln der Pfeile über den zeitlichen Verlauf stellt jedoch kein Problem dar, da man die Spurlänge der gewünschten Filter in der *Filterkonfiguration* unter dem Reiter *Symbol* auf *Ganze Spur anzeigen* setzen kann, wobei auch dort die Schrittweite auf 25 gesetzt werden sollte. Überlappungen der Beschriftung im linken Bereich des Bildes zu Beginn des Beschleunigungsvorgangs lassen sich dadurch vermeiden, dass man den Beschriftungsfilter unter dem Reiter *Begrenzung* zeitlich auf die Bilder zwischen Bildnummer 50 und 200 begrenzt (s. Abb. 3.62).

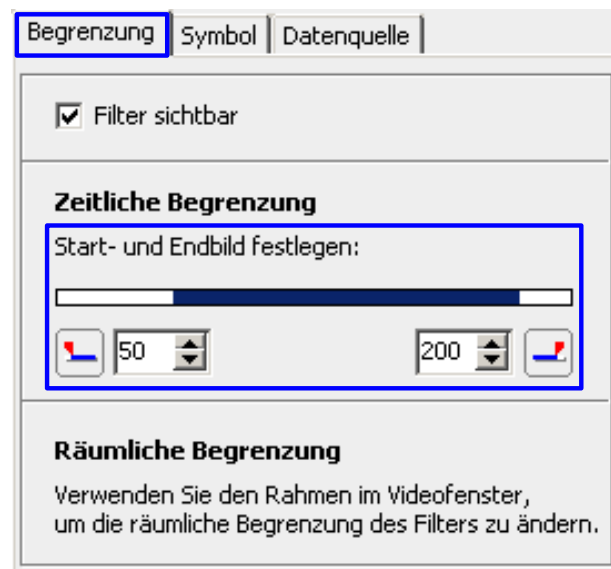


Abbildung 3.62: Begrenzung des Anzeigebereichs eines Filters

Sind all diese Einstellungen getroffen, kann es immer noch zu starken Grafikfehlern wie in Abbildung 3.63 kommen. Aufgrund der geringen Geschwindigkeit zu Beginn der Bewegung kommt es zu einer starken Überlappung des Autos in den unterschiedlichen Bildern. Deshalb wird im linken Teil des Bildes das Auto als Hintergrund erkannt und der eigentliche Hintergrund scheint durch. Grund hierfür ist die deaktivierte Option *Zeitweise ruhende Objekte vorhanden* im *Optionen*-Reiter der *automatischen Analyse*. Nachdem diese aktiviert wurde, muss die *Voruntersuchung wiederholt* werden. Weiterhin sind große Teile des Autos durchsichtig. Dieser Fehler lässt sich durch Einstellung einer niedrigeren *Empfindlichkeit* bei der Analyse beheben.



Abbildung 3.63: Grafikfehler beim Stroboskopbild

Abb. 3.64 zeigt ein Stroboskopbild bei dem die oben genannten Fehler so gut wie möglich vermieden sind. Die Geschwindigkeit ist hier nicht nur über die Vektorpfeile, sondern auch über die Verschiebung des Autos in den verschiedenen Bildteilen codiert.



Abbildung 3.64: Stroboskopbild des Anfahrvorgangs

Ortsfester Pfeil

Wird das Video mit angeheftetem Pfeil abgespielt, lassen sich Längenänderungen nur schwer erkennen. Um zusätzlich einen ortsfesten Geschwindigkeitspfeil einzublenden, wird der angeheftete Pfeil⁴⁵ geklont und der *Startpunkt* in der Filterkonfiguration auf einen *Fixwert* gesetzt (Abb. 3.65). Mit einer *x-Koordinate* von 600 und *y-Koordinate* von 500 erscheint der Vektorpfeil, dessen Fußpunkt sich im Verlauf des Videos nicht ändert und dessen Länge stetig zunimmt, in der Mitte des Videobilds, unterhalb des Autos.

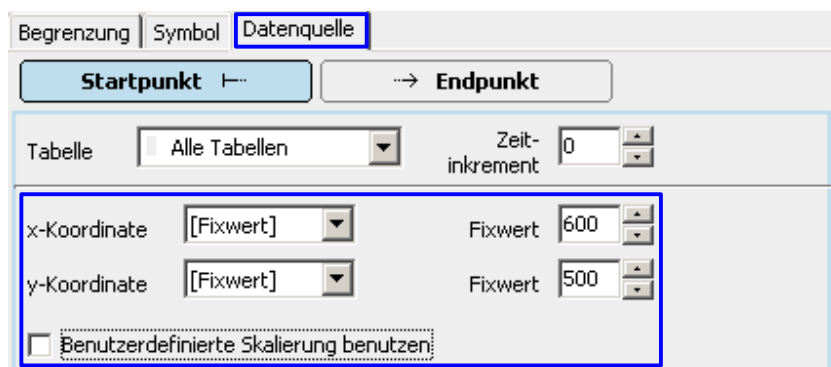


Abbildung 3.65: Fixieren des Geschwindigkeitsvektors

Im nächsten Schritt soll der fixierte Geschwindigkeitspfeil um 90° gedreht werden und in die linke untere Ecke des Videobildes verschoben werden. Hierzu wird ein *Symbol*-Filter erstellt, das Symbol *Pfeil* zugewiesen (s. Abb. 3.59) und die Einstellungen (Farbe, Linienbreite) angepasst. Bei Start- und Endpunkt wird *Skript verwenden* aktiviert und als Formel für die x- und y-Koordinaten werden 50 und 650 bzw. 50 und $650 - v_x \cdot 25$ angegeben.

Dieser feste Pfeil soll nun mit der Zeit nach rechts wandern. Dies erreicht man, indem als x-Koordinate von Start- und Endpunkt eine von der Zeit abhängige, lineare Funktion angegeben wird. Abbildung 3.66 zeigt den Filter mit *Spurlänge 0* (*Ganze Spur anzeigen*) und Formel $200 + t \cdot 250$. Hier wurde die untere Hälfte des Bildes zusätzlich wie in Kapitel 3.3.5 durch einen *Farb- und Helligkeitsfilter* mit einer *Alphablende* von 50% aufgehellt.

⁴⁵hier wieder mit der ursprünglichen Spurlänge



Abbildung 3.66: Pfeilspur als Vorstufe zum Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm

Fasst man die x-Achse des Videobilds als Zeitachse auf, erzeugen die Spitzen der Pfeile ein Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm. Mit drei weiteren Filtern kann ein solches durch einen wandernden Pfeil gezeichnet werden:

- Ein Klon der Pfeilspur mit einer der *Schrittweite* entsprechenden *Spurlänge*, der von links nach rechts wandert.
- Ein Linienfilter für den bei Start- und Endpunkt die Formeln der Pfeilspitze gelten, wobei beim Startpunkt ein *Zeitinkrement* von Minus einer Schrittweite eingestellt wird (Abb. 3.67), sodass bei *Spurlänge* 0 eine durchgezogene Linie entsteht. Da die Geschwindigkeit für das letzte analysierte Bild nicht berechnet wird, muss die Endmarke um eine Schrittweite nach vorne gesetzt, um zu verhindern, dass der Graph am Ende auf Null zurückfällt.
- Ein Linienfilter, der die x-Achse darstellen soll. Dieser lässt sich am einfachsten erstellen, indem man den Linienfilter des Graphen kloniert und die y-Koordinaten von Start- und Endpunkt fest auf 650 einstellt.

Begrenzung | Symbol | **Datenquelle**

Startpunkt | **Endpunkt**

Tabelle: Tabelle1 | Zeit-inkrement: -5

x-Koordinate: _x | Fixwert: 0

y-Koordinate: _y | Fixwert: 0

☐ Benutzerdefinierte Skalierung benutzen

☒ Skript verwenden:

x-Koordinate: 200+t*250

y-Koordinate: 650-v_x*25

Abbildung 3.67: Filterkonfiguration des Graphen

Abbildung 3.68 zeigt ein Standbild aus dem Versuchsvideo, in dem der wandernde Pfeil das Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm malt.

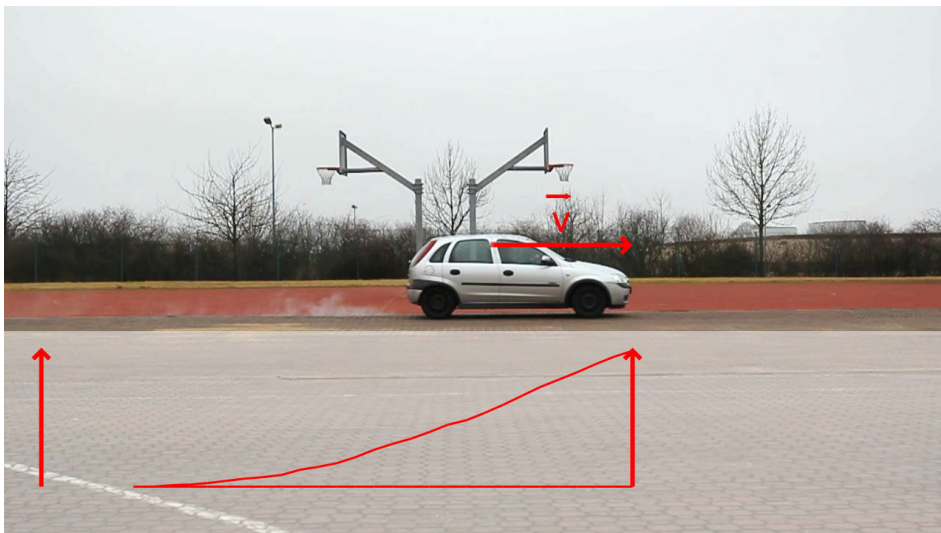


Abbildung 3.68: Ein wandernder Pfeil erstellt ein Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm

3.4.4 Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Leistung

Nachdem gerade gezeigt wurde, wie ein Diagramm entsteht, bietet es sich an dieser Stelle an, verschiedene Diagramme (*Anzeige* \rightarrow *Diagramm*) zu erstellen.

Wie in Kapitel 3.2.6 beschrieben, wird ein Diagramm erstellt, das die Beträge der x-Komponenten von Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung (x , v_x und a_x) zeigt. Zur besseren Übersichtlichkeit werden die Markierungen im Diagramm nach Tipp 5.6 auf 5 Pixel verkleinert und die Farbe der Graphen angepasst.

Abbildung 3.69 zeigt den Beschleunigungsvorgang. Gut zu erkennen ist die über die ersten zwei Sekunden ansteigende Beschleunigung. Nachdem in diesem Punkt das zur Beschleunigung proportionale Drehmoment des Motors sein Maximum erreicht wird, geht diese bis zum Erreichen der durch einen Drehzahlbegrenzer limitierten Maximaldrehzahl zurück.

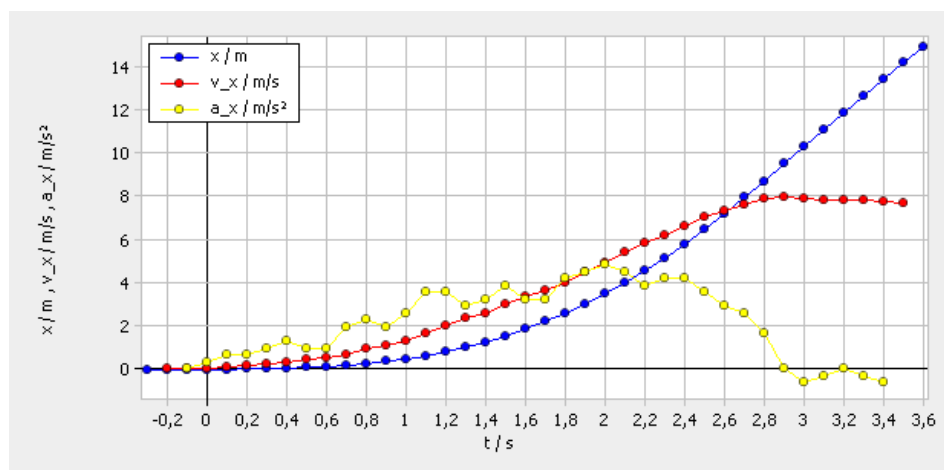


Abbildung 3.69: Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung in Abhängigkeit von der Zeit beim Anfahren des Autos

Mit den berechneten Werten für Geschwindigkeit und Beschleunigung und dem Gewicht des Autos ($m \approx 1200 \text{ kg}$) können die vom Motor abgegebene Leistung und die auf das Auto wirkende Kraft bestimmt werden. Hierzu werden mehrere zusätzliche Spalten erstellt.

- Die erste Spalte E mit der Einheit J erhält zum Berechnen der kinetischen Energie des Autos die Formel $m=1200; 0,5*m*v_x^2$.
- Die Leistung soll als numerische Ableitung der Energie berechnet werden. Hierzu benötigt man zwei Spalten die den Wert der Energie eine Schrittweite vor und nach dem derzeitigen Zeitpunkt enthalten. Zugriff auf eine andere andere Tabellenzeile erhält man durch voranstellen von $TIME+m$ vor die eigentliche Formel, wobei m für Anzahl der Tabellenzeilen relativ zum jeweiligen Zeitpunkt steht. Die entsprechenden Spalten E_alt und E_neu mit der Einheit J erhalten dementsprechend die Formeln $TIME-1:E$ bzw. $TIME+1:E$.
- Die Leistung P in kW kann nun in einer weiteren Spalte mit der Formel $dt0,1;(E_{neu}-E_{alt})/(2dt)/1000$ ($\Delta t = 5 \cdot 0,02s$ berechnet werden. Da die Geschwindigkeit für das letzte Bild nicht berechnet wird enthält die Spalte E_alt für die beiden letzten analysierten Bilder den Wert 0. Die Leistung erhält hier einen stark negativen Wert. Nach Doppelklick auf die entsprechenden Zellen kann der Inhalt entfernt werden. Da eine Änderung jeder Tabellenspalte eine Neuberechnung aller Spalten auslöst, sollten die falschen Werte erst nach allen Berechnungen gelöscht werden.
- Die auf das Auto in Fahrtrichtung wirkende Kraft F in kN lässt sich einfach mit der Formel $m=1200;a_x*m/(1000)$ berechnen. Da die y-Achse im Diagramm nur eine Skalierung zulässt, können Leistung und Kraft nicht gleichzeitig abgelesen werden. Als einfachste Lösung multipliziert man die Kraft mit dem Faktor 10, sodass sie zahlenmäßig dieselbe Größenordnung wie die Leistung besitzt, nun aber in 0,1 kN angegeben ist.

Da während des Beschleunigungsvorgangs kein Gangwechsel stattfindet, ist die Geschwindigkeit proportional zur Drehzahl. Trägt man Kraft und Leistung über die Geschwindigkeit auf und interpretiert den Kraftverlauf aus dem selben Grund als Drehmomentverlauf, ergeben sich zwei Kennlinien des Motors.

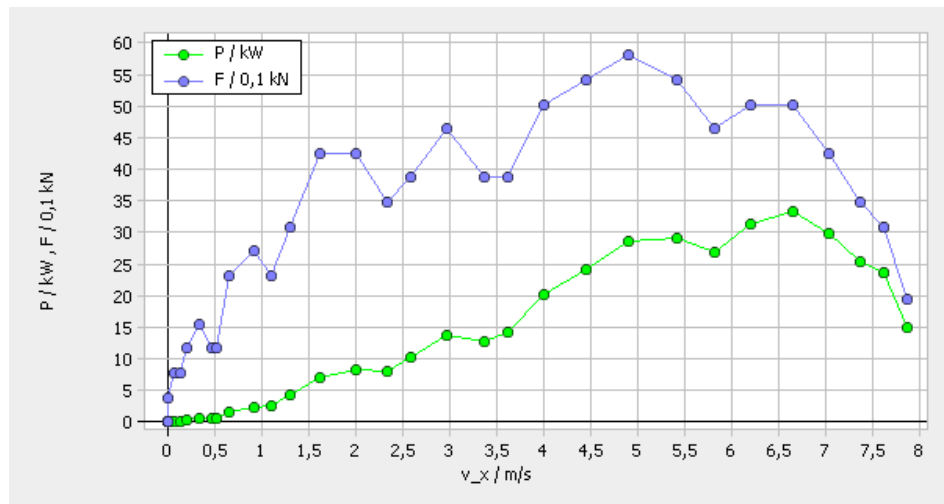


Abbildung 3.70: Drehmoment und Leistungskennlinie des Autos

3.4.5 Vollbremsung

Zur Untersuchung des Vollbremsvorgangs werden zunächst ein Geschwindigkeits- und ein Beschleunigungspfeil an das Auto angehängt. Dabei wird wie beim Anfahren des Autos vorgegangen. Abbildung 3.71 zeigt ein Serienbild eines Ausschnitts aus dem Vollbremsvorgang mit Schrittweite 15.

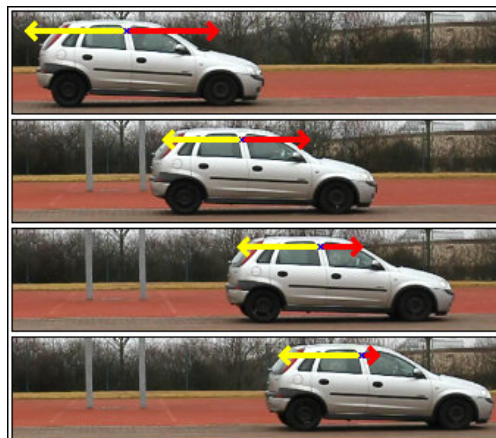


Abbildung 3.71: Serienbild der Vollbremsung

Beim Abspielen des Videos sowie im Serienbild erkennt man die konstante Be-

schleunigung, die im wesentlichen nur vom Haftreibungskoeffizienten zwischen gepflastertem Boden und Gummireifen abhängen sollte. Abbildung 3.72 zeigt den Verlauf von Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung über der Zeit aufgetragen.

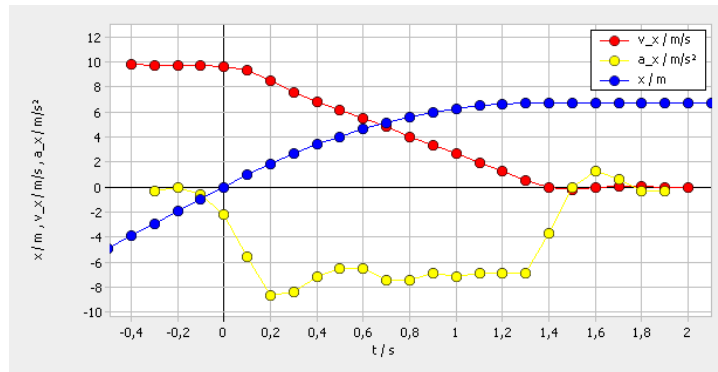


Abbildung 3.72: Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung bei der Vollbremsung

Um die Beschleunigung des Autos quantitativ exakt zu bestimmen gibt es mehrere Möglichkeiten: Man fittet eine Parabel an die Ortskurve, legt eine Regressionsgerade durch den Geschwindigkeitsverlauf oder mittelt die vom Programm bestimmten Beschleunigungen während des Bremsvorgangs.

Für die Parabel wird als Ortsfunktion $x(t) = v_0 \cdot t + 0,5 \cdot a \cdot t^2$ angesetzt. Die Startgeschwindigkeit v_0 liest man im Tabellenfenster ab. In den *Diagrammoptionen* trägt man unter *Funktionen* die Formel $9,75 \cdot x + 0,5 \cdot a; -10; 0; -7; 2 > x^2$ ein. Der Schieberegler für die Beschleunigung unter dem Reiter *Parameter* wird solange verschoben, bis Parabel und Ortsgraph bei einem Wert von $a = -7,01 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ während des ganzen Beschleunigungsvorgangs übereinstimmen. Da bereits kleine Änderungen in der Anfangsgeschwindigkeit zu einer stark abweichenden Beschleunigung führen, kann diese Methode jedoch nicht als genau gelten.

Um eine Regressionsgerade durch die Geschwindigkeitskurve zu legen, öffnet man die *Diagrammoptionen* und klickt dort auf die entsprechende Schaltfläche (Abb. 3.73).

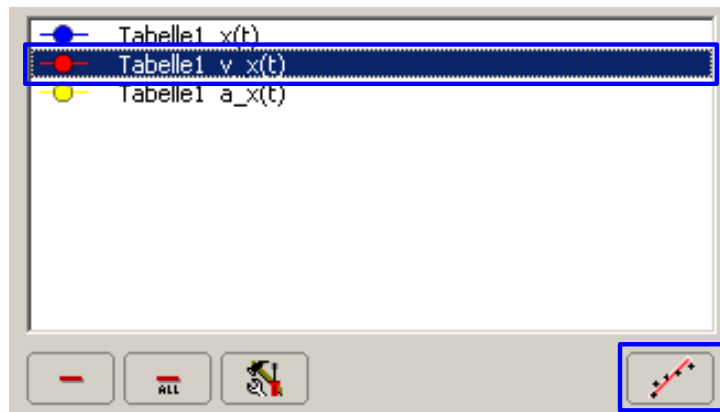


Abbildung 3.73: Erstellen einer Regressionsgerade durch die Geschwindigkeitskurve

Da die Geschwindigkeitswerte vor und nach dem Bremsvorgang nicht mit in die Berechnung der Regressionsgerade eingehen sollen, muss der Berechnungsbereich unter dem Reiter *Regressionsgerade* durch Angabe eines Bildintervalls eingeschränkt werden (Abb. 3.74). Im Beispielvideo lässt sich die Beschleunigung aus der Geradengleichung mit $a = -7,10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ablesen.

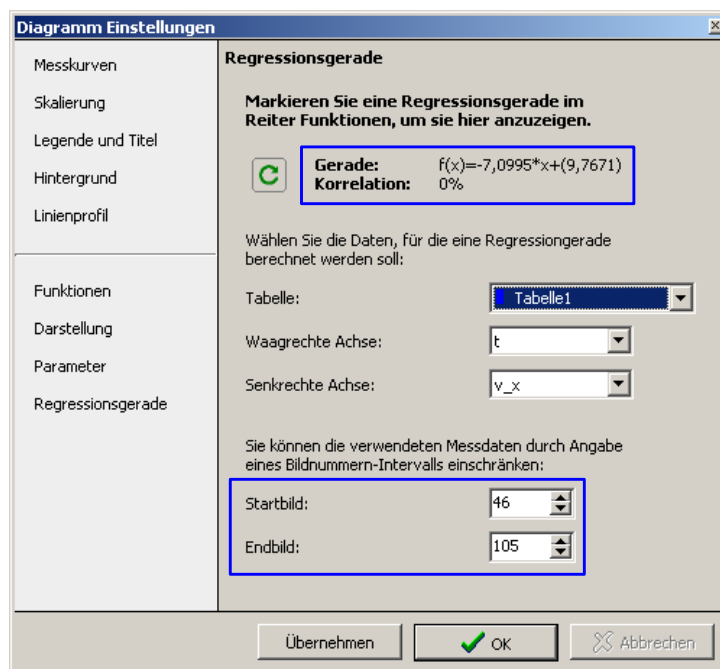


Abbildung 3.74: Einstellungen für die Regressionsgerade vornehmen

Berechnet man den Mittelwert der Beschleunigung aus den Tabellenwerten per Hand, ergibt sich eine Beschleunigung von $a = -7,10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

4 Fazit

Trotz der hohen Komplexität des Programms lohnt es sich, sich in *measure Dynamics* einzuarbeiten. Durch Einblendungen im Video kann man stets auf einer relativ niedrigen Abstraktionsebene arbeiten. Dabei können nicht nur Videoprojekte, sondern auch Serien- oder Stroboskopbilder für den Einsatz im Unterricht erstellt werden.

Die oben beschriebenen Versuche dieses Tutorials haben nicht nur die Möglichkeiten, sondern auch die Grenzen der Videoanalyse gezeigt. Am Ende angekommen, sollte der Leser nun in der Lage sein, eigene Experimente mit einer geeigneten Kamera aufzunehmen und mit Hilfe von *measure Dynamics* auszuwerten.

5 Tipps und Tricks


5.1 Filter und Einblendungen unsichtbar

Erscheinen beim Abspielen im Video keine grafischen Einblendungen, liegt dies meist daran, dass bei der Messung die Schrittweite größer als 1 gewählt wurde und die angezeigten Bilder nicht mit denen übereinstimmen, bei denen die Koordinate des Objekts bestimmt wurde. Als Abhilfe gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder man wählt als Schrittweite ein Vielfaches der Schrittweite bei der Messung und springt vor dem Abspielen zu einem Bild, für das es eine Messung gibt oder man erhöht in den Einstellungen der betroffenen Filter (*Anzeige* → *Filter und Einblendungen* → *Auswahl des Filters* → *Konfiguration* → *Symbol*) die Spurlänge auf die Schrittweite bei der Messung. Im zweiten Fall befinden sich die Fußpunkte der Vektoren jedoch nicht mehr genau an der Stelle des Objekts.

5.2 Mehrere Bildschirme

Ist ein zweiter Bildschirm an den PC angeschlossen, kann ein Teil der Fenster auf diesen ausgelagert werden. Hierzu aktiviert man zunächst unter *Datei* → *Einstellungen* unter dem Reiter *Fenster* die Option *Reiter ablösbar*. Anschließend kann man die Fenster an der Titelleiste aus dem Programm herausziehen.

5.3 Unsichtbare Verbindungslinien von Anfassern

Vor dunklen Hintergründen sind die schwarzen Verbindungslinien von Anfassern oft kaum zu sehen. Drückt man während des Verschiebens die  -Taste, wechseln sie ihre Farbe zu weiß und die Verbindungslinien sind wieder gut zu erkennen.

5.4 Darstellung vieler Filter langsam

Werden sehr viele Filter eingeblendet, kann das Video oft nur sehr langsam abgespielt werden, da bei vielen Filtern als *Datenquelle* standardmäßig **Alle Tabellen** ausgewählt ist. Wenn nur Daten aus einer Tabelle genutzt werden, kann eine entsprechende Wahl (ggf. bei Start- und Endpunkt) die Abspielgeschwindigkeit deutlich vergrößern.

5.5 Einstellen der Berechnungsgenauigkeit

Bei der Wahl der Einheit bei der Skalierung des Videos, sowie beim Eingeben von Formeln, muss darauf geachtet werden, dass in den Standardeinstellungen mit einer Genauigkeit von vier Nachkommastellen gerechnet wird. Sollen abgeleitete Größen wie Impuls oder Energie berechnet werden, liegt es zwar nahe, durchgehend die SI-Einheit Meter zu benutzen, jedoch sollte die Anzahl der Nachkommastellen erhöht werden, wenn durch eine entsprechend hohe Auflösung auch Abstände kleiner als 1 mm gemessen werden können.

Dazu öffnet man das Einstellungsfenster über *Datei* → *Einstellungen* und aktiviert den Reiter *Messen*. Dort lässt sich dann die gewünschte Anzahl an Nachkommastellen einstellen (s. Abb. 5.1). Die Anzahl der Nachkommastellen, die in der Tabelle angezeigt werden, lässt sich unter dem Reiter *Tabellen* bearbeiten.

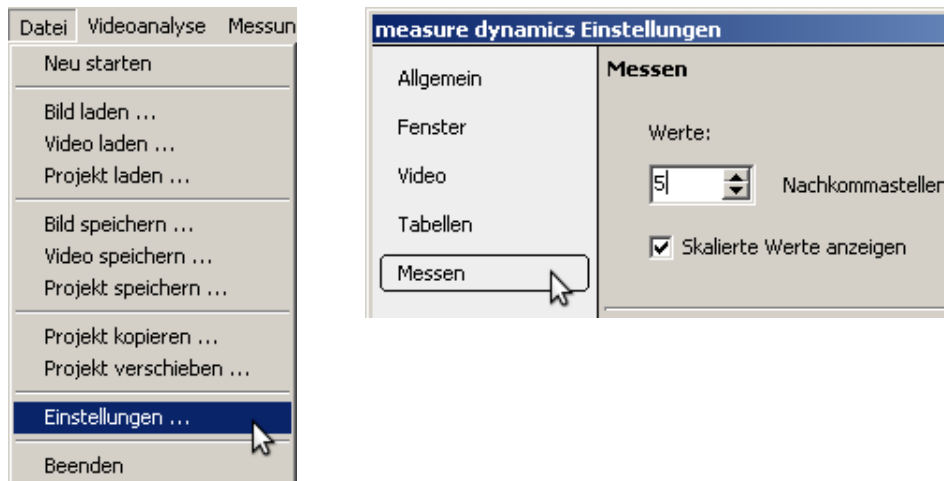


Abbildung 5.1: Einstellung der Nachkommastellen

5.6 Einstellung der Punktgröße im Diagramm

Werden sehr viele Messwerte aufgenommen, verringern sich gegenseitig überlappende Markierungen die Lesbarkeit eines Diagramms. Im Diagrammfenster lässt sich die Größe aller Markierungen unter *Optionen* → *Standardeinstellungen für Symbole* bearbeiten.

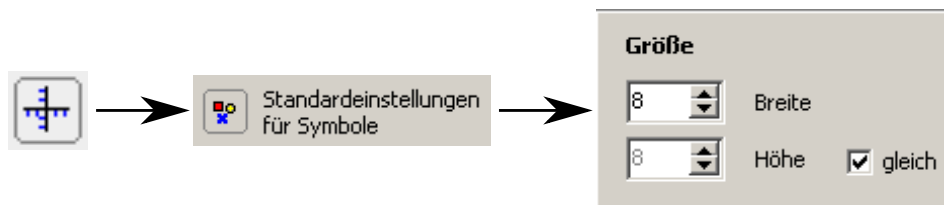


Abbildung 5.2: Einstellung der Größe der Markierungen

6 Verzeichnisse

Glossar

CCD-Sensor *eng. Charged Coupled Device* Ein Bildwandler, bei dem „elektrische Ladung wie Wasser in einer Eimerkette von einer Speicherzelle zur nächsten transportiert“⁴⁶ wird. 9

CMOS-Sensor *eng. Complementary Metal Oxide Semiconductor* Ein Bildwandler, bei dem einzelne Bildzellen unabhängig voneinander angesprochen werden können. 9

Codec Ein Codec (*eng. coder decoder*) ist ein Computerprogramm das Video- bzw. Audiosignale kodiert und dekodiert. 10

CSV-Datei Eine CSV-Datei (*engl Comma separated values bzw. Character-separated values*) speichert eine Tabelle in einer Textdatei. Dabei werden Spalten durch ein Zeichen (Komma, Strichpunkt, Tabulator) und Zeilen durch einen Zeilenbruch getrennt. 41

gop Mehrere Bilder eines Videos werden zu einer group of pictures zusammengefasst, um durch die Nutzung von P- und B-Frames Speicherplatz zu sparen. 11

Pixel Bei der Aufnahme von Videos werden die Videobilder diese in Zeilen und Spalten gerastert. Ein einzelnes Bildelement nennt man Pixel (*engl. Picture Element*)⁴⁷ 3

⁴⁶Schmidt (2009, S. 361)

⁴⁷vgl. Schmidt (2009, S. 32)

RGB-Farbraum Analog zur Farbwahrnehmung des Auges werden einem Bildpunkt drei verschiedene Farbwerte für die Primärfarben rot, grün und blau zugeordnet. Da in der digitalen Videotechnik meist mit einer 8bit-Quantisierung gespeichert wird, können die einzelnen Farbkanäle ganzzahlige Werte zwischen 0 und 255 annehmen. [6](#)

Literaturverzeichnis

- [Benz 2008] BENZ, Michael: *Digitale Videoanalyse von Bewegungen – Neue Möglichkeiten mit der Software „Measure Dynamics“*, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Schriftl. Hausarbeit, 2008
- [Bylund 2009] BYLUND, Anders: *From Cinepak to H.265: a brief history of video compression*. Version: Dezember 2009. <http://arstechnica.com/gadgets/2009/12/from-cinepak-to-h265-a-survey-of-video-compression/>, Abruf: 30. März 2013
- [Eastman Kodak Company 2011] EASTMAN KODAK COMPANY (Hrsg.): *Shutter operations for CCD and CMOS image sensors*. Version: Juli 2011. <http://www.kodak.com/ek/US/en/ShutterOperations.htm>, Abruf: 30. Juli 2012
- [Eberlein 2011] EBERLEIN, Andreas: *Lehr-Lern-Labor Videoanalyse zweidimensionaler Bewegungen. Konzeption und Durchführung*, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Schriftl. Hausarbeit, Juli 2011
- [Erhardt 2008] ERHARDT, Angelika: *Einführung in Die Digitale Bildverarbeitung: Grundlagen, Systeme und Anwendungen*. Vieweg+Teubner Verlag, 2008. – ISBN 9783519004783
- [Heuer 1996] HEUER, Dieter: Dynamische Repräsentationen. In: *Praxis der Naturwissenschaften. Physik* 45 (1996), Nr. 4, S. 12–18
- [Measure Dynamics Handbuch 2009] GRUMANN, Markus ; MICHEL, Christine ; PHYWE SYSTEME GMBH & CO. KG (Hrsg.): *measure Dynamics. Handbuch*. 2009

- [Michel 2007] MICHEL, Christine: *Videoanalyse zweidimensionaler Bewegungen mit dynamisch ikonischen Repräsentationen im Physikunterricht*, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Schriftl. Hausarbeit, 2007
- [Michel 2010] MICHEL, Maximilian: *Hochgeschwindigkeitskameras im Physikunterricht. Physik unter der (Zeit-)Lupe*, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Schriftl. Hausarbeit, Dezember 2010
- [Rühl 2012] RÜHL, Sebastian: *Casio EX-ZR200: Shutter Speed bei Videoaufnahmen nicht manuell einstellbar*. Version: März 2012. <http://www.sebastian-ruehl.com/?p=168>, Abruf: 24. September 2012
- [Schmidt 2009] SCHMIDT, Ulrich: *Professionelle Videotechnik*. 5., aktual. u. erw. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, 2009
- [Schüttler u. Wilhelm 2011] SCHÜTTLER, Manuel ; WILHELM, Thomas: Physik im Freizeitpark – Möglichkeiten und Vergleich von Videoanalyse, Beschleunigungsmessung und GPS. In: *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (2011)
- [Schüttler 2011] SCHÜTTLER, Manuel: *Physik im Freizeitpark. Möglichkeiten und Vergleich von Beschleunigungs- und GPS-Messung sowie Videoanalyse*, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Schriftl. Hausarbeit, Februar 2011
- [Suleder 2010] SULEDER, Michael: *Videoanalyse und Physikunterricht. Technik - Didaktik - Unterrichtspraxis*. Aulis Verlag in der STARK Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, 2010
- [Tipler 1994] TIPLER, Paul A.: *Physik*. 1. Spektrum Akademischer Verlag, 1994
- [Wilhelm u. a. 2003] WILHELM, Thomas ; GESSNER, Thomas ; SULEDER, Michael ; HEUER, Dieter: Sportaktivitäten vielseitig analysieren und modellieren – Video und Messdaten multimedial aufbereitet. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* 52 (2003), Nr. 2, S. 23–30
- [Wilhelm u. Heuer 2002] WILHELM, Thomas ; HEUER, Dieter: Fehlvorstellungen in der Kinematik vermeiden – durch Beginn mit der zweidimensionalen Bewegung.

In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* 51 (2002), Nr. 7, S. 29–34

[Wilhelm 2012] WILHELM, Thomas: Pfeile am Computer. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 62 (2012), Nr. 4, S. 05–11