

Möglichkeiten der Videoanalyse

Habilitationsschrift
zur Erlangung der Lehrbefähigung
der Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von
Thomas Wilhelm
aus Reichenberg

Würzburg 2011

Für Sara und Daniel

Inhaltsverzeichnis

0. Einleitung	4
1. Videoanalyse heute.....	7
1.1 Einsatz der Videoanalyse 2004 bei Gymnasiallehrern in Rheinland-Pfalz.....	7
1.2 Einsatz der Videoanalyse 2009 bei Gymnasiallehrern in Unterfranken	16
1.3 Die neue Videoanalysesoftware „measure dynamics“	26
2. Neue Möglichkeiten im Mechanikunterricht	36
2.1 Videoanalysen von Hochgeschwindigkeitsvideos	36
2.2 Videoanalysen von Sportbewegungen	45
2.3 Videoanalysen im Freizeitpark.....	64
2.4 Lehr-Lern-Labor „Zweidimensionale Bewegungen“	72
3. Neue Möglichkeiten außerhalb der Mechanik	77
3.1 Der Bierschaumzerfall als Analogon zum radioaktiven Zerfall?	77
3.2 Modellgase zur kinetischen Gastheorie.....	86
3.3 Videoanalysen bei einer Nebelkammer.....	97
3.4 Bildanalysen bei der Beugung am Gitter	104
4. Zweidimensionaler Mechanikunterricht mit Betonung der Richtung der Größen	108
4.1 Probleme mit gerichteten Größen	108
4.2 Lehrerkenntnisse von diesen Schülervorstellungen	116
4.3 Ein Unterrichtsgang in der Sekundarstufe II mit Videoanalyse.....	120
4.4 Ein Unterrichtsgang in der Sekundarstufe I mit Videoanalyse	128
4.5 Zweidimensionale Mechanik mit „measure dynamics“	133
4.6 Schulbücher zur Mechanik.....	140
4.6.1 <i>Mechanik in Realschulbüchern</i>	140
4.6.2 <i>Mechanik in Gymnasialbüchern</i>	146
4.7 Überprüfung eines Mechanikkonzeptes mit Videoanalyse in der Sekundarstufe I ...	154
4.7.1 <i>Konzeption der Studie</i>	154
4.7.2 <i>Konzeption des Mechanikkonzeptes</i>	158
4.7.3 <i>Quantitative Ergebnisse der Erprobungsgruppe</i>	173
4.7.4 <i>Qualitative Ergebnisse der Erprobungsgruppe</i>	188
4.7.5 <i>Ergebnisse der Vergleichsstudie</i>	197
5. Anhang	206
6. Zusammenfassung.....	226
7. Abstract.....	236
8. Danksagung	245

0. Einleitung

Der Computer ist längst ein selbstverständlicher Teil unseres Alltags geworden und auch ein Standardwerkzeug im Physikunterricht. Auch das Aufnehmen digitaler Videos ist für viele Schüler eine Selbstverständlichkeit, da dies ihr Handy ermöglicht. Solche Videos können am Computer im Physikunterricht analysiert werden. In dieser Arbeit sollen die unterrichtlichen Möglichkeiten des Werkzeugs „Videoanalyse“ aufgezeigt werden. Dabei wird in dieser Arbeit unter „Videoanalyse“ die „digitale Videoanalyse von Bewegungen“ verstanden, nicht die „Videoanalyse von Unterrichtssituationen“.

Grundidee ist, dass Videos aufgezeichneter Bewegungen Orts- und Zeitinformationen über diese Bewegung enthalten, da die Einzelbilder des Videos in der Regel in festen Zeitabständen aufgenommen werden. Ist eine Referenzlänge im Video bekannt, kann jeder Ort einer zur optischen Achse senkrechten zweidimensionalen Bewegung berechnet werden. Damit ist die Videoanalyse ein berührungsfreies Messwerterfassungssystem, das vor allem aber nicht nur für den Mechanikunterricht geeignet ist und bereits in einigen Lehrplänen vorgesehen ist (Bayern, Brandenburg, Hessen und Schleswig-Holstein).

Die Videoanalyse von Bewegungen begann im Physikunterricht bereits in den 1980er Jahren, als man auf dem Fernsehbildschirm eine Folie klebte und am VHS-Recorder schrittweise weiterschaltete, während man auf der Folie jeweils den Ort markierte und so die Bahnkurve der Bewegung erhielt. Seit der zweiten Hälfte der 1990er Jahre gibt es deutschsprachige Computersoftware, die Videoanalyseprogramme, mit denen der Ort erfasst und daraus weitere physikalische Größen berechnet und dargestellt werden können. Seitdem hat sich viel geändert, sodass es viele neue Möglichkeiten gibt. Die Veränderungen betreffen die Videoaufnahme, die Ortserfassung und die Darstellungsmöglichkeiten.

Die *Videoaufnahme* geschah in den 1990er Jahren mit analogen Videokameras. Diese analogen Videos mussten mit Hilfe einer Wandlerkarte und dazugehöriger Software zuerst digitalisiert werden, was vielen ein zu großer Aufwand war. Die digitalen Videokameras mit Magnetband (DV-Kamera und MiniDV-Kamera) erzeugten bereits digitale unkomprimierte Videos. Zur Reduzierung des Speicherbedarfs empfahl es sich, diese mit einer Videobearbeitungssoftware zu komprimieren. Die heutigen komprimierenden digitalen Videokameras, wie sie auch in digitalen Fotoapparaten und Handys integriert sind, liefern bereits komprimierte Videos, die direkt verwendet werden können, so dass das Erzeugen der Videos heute selbst für Schüler problemlos möglich ist. Zudem gibt es mittlerweile auch günstige komprimierende Hochgeschwindigkeitskameras, mit denen auch sehr schnelle Bewegungen erfasst werden können.

Die *Ortserfassung* in den Videoanalyseprogrammen geschah zunächst ausschließlich dadurch, dass in jedem Frame (Bild) des Videos das Objekt durch Mausklick markiert werden musste.

0. Einleitung

Mittlerweile gibt es Programme, die diese Ortserfassung bei vielen Bewegungen automatisch nach einmaligem Markieren des Objektes durchführen, was insbesondere bei längeren Videos eine erhebliche Zeitersparnis ist.

Die *Darstellungsmöglichkeiten* waren bei den ersten Videoanalyseprogrammen beschränkt. Die erfassten und daraus berechneten Größen konnten nur in der Form von Tabellen und Liniendiagrammen dargestellt werden. Insbesondere die Software „measure dynamics“ bietet hier vielfältige weitere Möglichkeiten. So können physikalische Größen in Form von Säulen, Pfeilen oder Linien, auch dynamisch ikonische Repräsentationen genannt, auf unterschiedliche Weise ins Video eingeblendet werden, sowie Serienbilder und Stroboskopbilder erzeugt werden. Die Multicodierung durch Videos, dynamisch ikonische Repräsentationen und Liniengraphen sowie die räumliche und zeitliche Kontiguität der verschiedenen Darstellungen werden als vorteilhaft angesehen. Da bei gerichteten Größen Pfeile leichter zu lesen sind als Liniengraphen, kann dadurch auch die kognitive Belastung des Lernenden verringert werden. Diese Software wurde von Michael Suleder programmiert, wobei er im Rahmen dieser Arbeit beraten wurde. Vom Autor dieser Arbeit wurde die Software an die Lehrmittelfirma Phywe vermittelt und steht seit 2007 zur Verfügung.

Kapitel 1 versucht den aktuellen Stand bei den Videoanalyseprogrammen darzustellen. Dazu dienen zwei empirische Erhebungen zum Computereinsatz bei Physikgymnasiallehrern (Kapitel 1.1 und 1.2) sowie Übersichten über die neuen Möglichkeiten der Videoanalysesoftware „measure dynamics“ (Kapitel 1.3).

Kapitel 2 zeigt neue, für Schüler interessante Möglichkeiten, die sich im Mechanikunterricht ergeben. Dazu gehören Hochgeschwindigkeitsvideos (Kapitel 2.1), die Analyse von Sportbewegungen, insbesondere Bewegungen des eigenen Körpers (Kapitel 2.2) sowie Bewegungen im Freizeitpark (Kapitel 2.3). Des Weiteren wird gezeigt, dass sich die Videoanalyse auch für Lehr-Lern-Labore an außerschulischen Lernorten eignet (Kapitel 2.4).

Kapitel 3 zeigt, dass die Videoanalyse auch außerhalb der Mechanik neue Möglichkeiten eröffnet. Die Messung des Bierschaumzerfalls, der traditionell als Analogon zum radioaktiven Zerfall verwendet wird, ist mit der Videoanalyse möglich. Dabei ist die Möglichkeit entscheidend, nur jeden n-ten Frame des langen Videos in die Messung aufzunehmen (Kapitel 3.1). Ein anderes nicht-mechanisches Beispiel sind Pucks auf einem Luftkissentisch, die ein Modellgas für die kinetische Gastheorie darstellen. Dabei ist die automatische Analyse entscheidend, da für die verwendete Statistik eine größere Anzahl von Frames berücksichtigt werden müssen (Kapitel 3.2). Des Weiteren ist es auch beim Zerfall von Radongas in einer kontinuierlichen Diffusionsnebelkammer von Vorteil, nur jeden n-ten Frame angezeigt zu bekommen (Kapitel 3.3). Auch das Ausmessen der Länge der Nebelspuren kann hier verwendet werden. Ein viertes nicht-mechanisches Beispiel ist die Beugung eines Laserstrahls an einem Gitter, die mit einer Nebelmaschine sichtbar gemacht wird. Dabei kann die Möglichkeit von Video-

0. Einleitung

analyseprogrammen genutzt werden, nur ein einzelnes Bild zu analysieren; in diesem Fall wurden Winkel gemessen (Kapitel 3.4).

In *Kapitel 4* geht es um die Richtung der physikalischen Größen im Mechanikunterricht. Die Videoanalyse ist insbesondere eine wichtige Hilfe in einem Mechanikunterricht, der die physikalischen Größen an Hand zweidimensionaler Bewegung einführt, um so Fehlvorstellungen bei den Schülern zu reduzieren oder zu verhindern. Eine Studie mit Studienanfängern zeigt zunächst, dass selbst diese große Probleme bei der Richtung der Beschleunigung und der Kraft haben (Kapitel 4.1). Eine Studie mit Gymnasiallehrern zeigt, dass diese aber kein Bewusstsein für dieses Problem haben (Kapitel 4.2). Ein Unterrichtsgang, der in der Sekundarstufe II über zweidimensionale Bewegungen in die Mechanik einsteigt und dabei die Videoanalyse als Messmöglichkeit verwendet, wurde erstmals mit der Videoanalysesoftware „Coach 5“ durchgeführt (Kapitel 4.3), wobei hier von Nachteil ist, dass die Software nur Diagramme aber keine Pfeile darstellen kann. Ein Unterrichtsgang, der für die Einführung in die Mechanik in der Sekundarstufe I über zweidimensionale Bewegungen konzipiert wurde, verwendete deshalb die Videoanalysesoftware „AVA“ zur Analyse und die Software „PAKMA“ zur Darstellung (Kapitel 4.4). Dies ist umständlich und erfordert Erfahrung mit der Software, so dass es vor dem Unterricht mit einigem Aufwand vorbereitet werden muss. Viel einfacher ist dies in „measure dynamics“, das die Einführung mechanischer Grundgrößen an Hand zweidimensionaler Bewegung durch das Einblenden von Ortsmarken und verschiedener Pfeile in das Video ermöglicht (Kapitel 4.5). Eine Analyse der Sachstruktur von Realschulbüchern und Gymnasialbüchern zeigt große Unterschiede bei der Betonung der Richtung von Größen (Kapitel 4.6). Wenn in den Schulbüchern die Richtungen betont werden, dann wird auch die Videoanalyse verwendet.

Schließlich wird in einer größeren Kooperationsstudie ein Mechanikkonzept überprüft, das in der Sekundarstufe I über allgemeine zweidimensionale Bewegungen und konsequent dynamisch in die Mechanik einführt und dabei u.a. die Videoanalyse verwendet (Kapitel 4.7). Es wird zunächst die Konzeption der Studie (Kapitel 4.7.1) und die Konzeption des Mechanikkonzeptes (Kapitel 4.7.2) vorgestellt. Dann werden quantitative und qualitative Ergebnisse der Würzburger Erprobungsgruppe vorgestellt (Kapitel 4.7.3 und 4.7.4), bevor letztlich die Ergebnisse der eigentlichen Vergleichsstudie dargelegt werden (Kapitel 4.7.5). Im Anhang (Kapitel 5) findet man auch das Schulbuch, das für dieses Konzept bzw. für diese Studie geschrieben wurde.

1. Videoanalyse heute

1.1 Einsatz der Videoanalyse 2004 bei Gymnasiallehrern in Rheinland-Pfalz

Quelle:

GRÖBER, S.; WILHELM, T.: *Empirische Erhebung zum Einsatz Neuer Medien bei Physik-Gymnasiallehrern in Rheinland-Pfalz: Arbeitsplatzausstattung und Mediennutzung* – In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A. (Hrsg.): *Didaktik der Physik - Kassel 2006*, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2006, ISBN 3-86541-190-8, ISBN-13: 9783865411907

Inhalt und Bezug zum Thema:

Durch eine Befragung wurden 2004 an allen staatlichen Gymnasien von Rheinland-Pfalz Daten zur digitalen medialen Arbeitsplatzausstattung und zur Physikmediennutzung der Physiklehrkräfte an Gymnasien erhoben. Bei der Arbeitsplatzausstattung werden Befragungsergebnisse zur privaten Computerausstattung und –nutzung der Lehrkräfte und zur Schulausstattung mit Lehrerarbeitsräumen, PC-Räumen und Physikräumen vorgestellt und bei der Physikmediennutzung werden Befragungsergebnisse zum Unterrichtseinsatz von Physiksoft- und -hardware und zu den Medien „Videoanalyse“, „Simulationen“ und „Modellbildung“ vorgestellt.

Das unbekannteste und am wenigsten eingesetzte Medium war damals trotz der Verfügbarkeit kostenloser Videoanalyseprogramme und Videos die Videoanalyse; Simulationen wurden am häufigsten genutzt. Das Interesse am Einsatz der genannten Medien war aber hoch.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Ich habe die Masterarbeit von Sebastian Gröber, die dieser im weiterbildenden Fernstudien-gang „Medien & Bildung“ zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Arts“ anfertigte, als alleiniger Betreuer betreut. Titel der Arbeit ist: „Konzeption einer Fortbildung mittels Blended Learning zu Neuen Medien im Physikunterricht“ (2005). Ein Teil dieser Arbeit war die Entwicklung, Durchführung und Auswertung dieser empirischen Erhebung. Da sich die Auswertung von Herrn Gröber aus Zeitgründen auf Häufigkeiten beschränkte, wiederholte ich für diese Veröffentlichung die Auswertung mit SPSS und führte alle Signifikanztests durch.

Empirische Erhebung zum Einsatz Neuer Medien bei Physik-Gymnasiallehrern in Rheinland-Pfalz: Arbeitsplatzausstattung und Mediennutzung

Sebastian Gröber¹, Thomas Wilhelm²

¹Landesmedienzentrum Rheinland-Pfalz, Hofstraße 257 c, 56077 Koblenz

²Lehrstuhl Didaktik der Physik, Am Hubland, 97074 Würzburg

Kurzfassung

Durch eine Befragung wurden an allen staatlichen Gymnasien von Rheinland-Pfalz im Herbst 2004 Daten zur digitalen medialen Arbeitsplatzausstattung und zur Physikmediennutzung der Physiklehrkräfte an Gymnasien erhoben. Bei der Arbeitsplatzausstattung werden Befragungsergebnisse zur privaten Computerausstattung und –nutzung der Lehrkräfte, zur Schulausstattung mit Lehrerarbeitsräumen, PC-Räumen und Physikräumen, bei der Physikmediennutzung werden Befragungsergebnisse zum Unterrichtseinsatz von Physiksoft- und -hardware und zu den Medien „Videoanalyse“, „Simulationen“ und „Modellbildung“ vorgestellt.

Das unbekannteste und am wenigsten eingesetzte Medium ist trotz der Verfügbarkeit kostenloser Videoanalyseprogramme und Videos die Videoanalyse; Simulationen werden am häufigsten genutzt. Das Interesse am Einsatz der genannten Medien ist hoch. Erschwert wird der Einsatz dadurch, dass es in 60 % der Schulen keinem Physikraum mit eigenem Beamer gibt.

1. Einführung

Seit den Anfängen des Lehrens und Lernens mit dem Computer in den 70er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts wird der Computereinsatz im naturwissenschaftlichen Unterricht unter lern- und medienpsychologischer Perspektive erforscht [1]. Die Forschungen stehen in ständiger Wechselwirkung mit der voranschreitenden Digitaltechnologie und in der fachdidaktischen Literatur stehen zahlreiche Forschungsergebnisse und Praxisberichte von Fachdidaktikern und Lehrern zum Physikmedieneinsatz zur Verfügung.

Ein Beispiel für die unzureichende Umsetzung dieses fachdidaktischen Wissens im Physikunterricht an deutschen Schulen ist die Nutzung des Kommunikations- und Informationsmediums Internet: *„Etwa zwei Jahre nach der Förderung von Internetanschlüssen an Schulen [...] ist die konsequente Nutzung von Internetanwendungen in der Schule noch eher die Ausnahme und wird nur von einer Minderheit von Lehrern in den Unterricht einbezogen“* [2].

Die Verfügbarkeit einer Technologie ist nur eine notwendige Voraussetzung für die Technologienutzung. Weitere Faktoren sind der Ausbildungsstand der Lehrkräfte und wie umfangreich die Technologie an der Schule bereits implementiert ist [3].

Bei der Konzeption einer Gymnasiallehrerfortbildung zum Lernen mit Neuen Physikmedien wurde angenommen, dass der Ausbildungsstand der Lehrkräfte hinsichtlich der Physikmedien durch formelle Bildung eher gering ist, da zwar in den letzten Jahren der Einsatz von Physikmedien immer mehr zum festen Bestandteil von Studium und Referendariat geworden ist [4], aber vergleichsweise wenige Lehr-

kräfte neu eingestellt wurden. Da keine aktuellen Daten zum Physikmedieneinsatz der Lehrkräfte vorlagen, wurden diese im Herbst 2004 in einer kaum voneinander zu trennenden Adressaten-, Arbeitsplatz- und Bedarfsanalyse [5] mit Hilfe einer indirekten schriftlichen Befragung erhoben. Aufgrund von Erfahrungen aus der Berufspraxis und der Lehrerfortbildung zu Physikmedien konnten mehrheitlich geschlossene Fragen formuliert werden, die eine quantitative und bei hohen Rücklaufquoten auch relativ zeitsparende Auswertung erlaubten.

Zwei Fragebögen wurden 1½ Wochen vor den Herbstferien an die Physikfachkonferenzleiter der 117 staatlichen Gymnasien in Rheinland-Pfalz mit einer einwöchigen Antwortfrist versandt: ein einseitiger an die Physikfachkonferenzleiter gerichteter Fragebogen zur Physik- und Schulmedienausstattung und ein dreiseitiger an die Physiklehrkräfte gerichteter Fragebogen zu Fortbildungsstand, Physikmedieneinsatz, Physikmedieninteressen, Medienkompetenz und privater Computerausstattung. Bezogen auf alle staatlichen Schulen in Rheinland-Pfalz betrugen die Rücklaufquoten $75/117 = 65\%$ für die Schulen, $64/117 = 55\%$ für den Fragebogen zur Schul- und Physikmedienausstattung und $293/796 = 37\%$ für die Physiklehrkräfte. Die vergleichsweise hohen Rücklaufquoten nach nur einer Woche Antwortzeit zeigen, dass die Befragung trotz des großen Umfangs des Fragebogens für die Physiklehrkräfte ernst genommen wurde, Interesse an Physikmedien-Fortbildungen besteht und die Physikfachbereichsleiter die Befragung in verantwortungsvoller Weise mitgetragen haben.

2. Informationen zu den Lehrkräften

2.1 Fächerkombinationen

Bei den Lehrkräften (Angaben von N = 287) ergibt sich fast unabhängig vom Geschlecht folgende Verteilung der Fächerkombinationen: 57 % Ph/M, 30 % Ph/M/Inf und 2 % Ph/M/Ch. Weitere 4 % unterrichten die naturwissenschaftlichen Fächerkombinationen Ph/Ch oder Ph/Ch/Inf und 4 % unterrichten Physik zusammen mit einer Nicht-Naturwissenschaft. 89 % der Physik-Gymnasiallehrer in Rheinland-Pfalz unterrichten damit die Fächerkombination M/Ph.

2.2 Altersverteilung

Die Stichprobe (233 m, 54 w, 6 keine Angabe) setzt sich zusammen aus 81 % männlichen und 19 % weiblichen Lehrkräften. Die Altersverteilung der männlichen Lehrkräfte steigt von 4 % der 20-29-Jährigen bis zu einem Maximum von 41 % der 50-59-Jährigen an. 5 % sind zwischen 60 und 69 Jahre alt. Demgegenüber ist der Anteil der weiblichen Lehrkräfte in den Altersgruppen 30 – 39, 40 – 49 und 50 – 59 mit ca. 30 % fast konstant. Mit 11 % Anteil der Altersgruppe 20 – 29 gibt es relativ gesehen mehr jüngere weibliche wie männliche Lehrkräfte, aber keine weibliche Lehrkraft ist über 60 Jahre alt. Der Median liegt bei beiden Geschlechtern in der Altersgruppe 40 - 49 Jahre.

2.3 Private Computerausstattung

Von den Lehrkräften (Angaben von N = 290) besitzen alle außer zwei Lehrkräften einen PC. Lediglich 2 % besitzen keinen Internetzugang (N = 288), 29 % einen über Modem, 31 % einen über ISDN und 38 % einen über DSL.

Von den Lehrkräften mit Internetzugang (N = 255) haben 49 % keine Flatrate, 16 % eine Flatrate nach Volumen, 6 % eine nach Zeit und 29 % eine ohne Begrenzung. Weiterhin verwenden 6 % der Lehrkräfte (N = 258) einen Monitor mit 800·600 Pixel Auflösung, 74 % einen mit 1024·768 Pixel und 20 % einen mit noch höherer Auflösung.

2.4 Lernerfahrungen mit elektronischen Medien

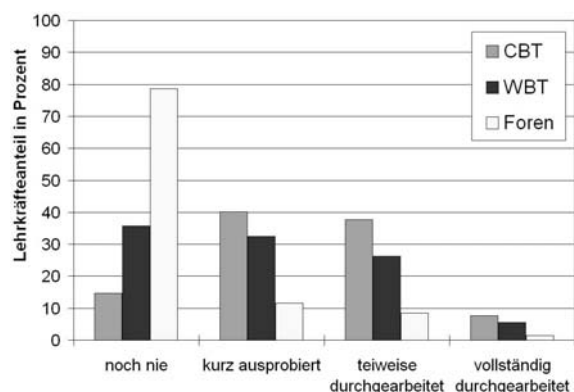


Abb. 1: Lernerfahrungen mit CBT (N = 287), WBT (N = 286) und Foren (N = 285)

Die Nutzung der Informationsmedien Computer Based Training (CBT) über CD-ROM und Web Based Training (WBT) über das Internet sowie des Kommunikationsmediums Forum sind unterschiedlich (siehe Abb. 1). Mit einer Codierung von „1 = noch nie“ bis „4 = vollständig durchgearbeitet“ (in Klammern: Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, ordinalskalierte Skala ist näherungsweise intervallskaliert) ist der Nutzungsgrad beim CBT ($2,4 \pm 0,8$) am höchsten, gefolgt vom WBT ($2,0 \pm 0,9$) und dem Forum ($1,3 \pm 0,7$). Von den Lehrkräften (N = 286) haben 12 % weder mit einem CBT noch mit einem WBT gearbeitet, diese Medien nicht einmal kurz ausprobiert. Gut die Hälfte hat nach eigenen Angaben wenigstens eines der Medien mehr als nur kurz ausprobiert, knapp die Hälfte der Lehrkräfte hat sie nicht oder nur kurz ausprobiert. Die Geschlechter unterscheiden sich bei allen Medien nicht signifikant (0,05-Niveau).

2.5 Private Mediennutzung

Von den Lehrkräften (Angaben von N = 289) nutzen 58 % ihren Computer zur Notenverwaltung, 84 % zum Erstellen oder Bearbeiten von Graphiken, 80 % um Text- oder Bildinformationen aus dem Internet zu beziehen, 96 % zum Erstellen von Arbeitsblättern und 68 % zur Kommunikation über E-Mail. 70 % der Befragten haben mindestens vier der fünf Tätigkeiten angegeben. Signifikant mehr männliche Lehrer nutzen den Computer zum Erstellen und Bearbeiten von Graphiken, während bei den anderen Tätigkeiten kein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern besteht (0,05-Niveau, χ^2 -Test).

2.6 Schulische Mediennutzung

Von den Lehrkräften (N = 289) betreuen 16 % das Schulnetz, 11 % erstellen Stundenpläne, 30 % erstellen Zeugnisse und 38 % unterrichten informationstechnische Grundbildung in der Mittelstufe. Der Anteil männlicher Lehrer ist bei jeder Tätigkeit größer, aber nur bei Schulnetz und informationstechnische Grundbildung ist der Unterschied signifikant (0,05-Niveau, χ^2 -Test).

2.7 Fortbildungsmotive

Es gab vier Antwortmöglichkeiten zwischen „1 = wichtig“ und „4 = unwichtig“ (in Klammern: Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, ordinalskalierte Skala ist näherungsweise intervallskaliert). Von elf möglichen vorgegebenen Fortbildungsmotiven sind die vier wichtigsten „Anregungen für den eigenen Unterricht bekommen“ (Angaben von N = 290, $\mu = 1,3 \pm 0,6$), „einen besseren und attraktiveren Unterricht machen“ (N = 286, $\mu = 1,5 \pm 0,6$), „die eigenen Fachkenntnisse erweitern“ (N = 289, $\mu = 1,5 \pm 0,8$) und „die eigenen Fachdidaktikkenntnisse erweitern“ (N = 288, $\mu = 1,7 \pm 0,8$). Die drei unwichtigsten Fortbildungsmotive sind „bessere Chancen auf Beförderung“ (N = 283, $\mu = 3,5 \pm 0,8$), „Nutzung der

Fortbildungstage“ ($N = 268$, $\mu = 3,1 \pm 1,0$) und „Unzufriedenheit mit dem eigenen Unterricht“ ($N = 267$, $\mu = 3,0 \pm 0,8$).

2.8 Folgerungen

Bei den Physiklehrkräften handelt es sich um eine fächerhomogene Gruppe mit hohem Durchschnittsalter, hohem Männeranteil und fast durchgängigem Internetzugang.

Die Kompetenzen im Umgang mit gängigen Medien im Privatbereich und denen in der Schule sind als hoch einzuschätzen. Die durchweg geringeren Prozentsätze weiblicher Lehrkräfte beim schulischen Medieneinsatz erklären sich teilweise durch ihren geringeren Anteil in Schulleitungen.

Bedenkt man, dass in 44 von 117 Schulen das Schulnetz von Physiklehrkräften meist ohne einen adäquaten Stundenausgleich betreut wird, so kann man diese Fachgruppe gegenüber anderen Fachgruppen zu den Avantgardisten oder Tüftlern unter den Lehrkräften zählen [6].

Wichtigstes Fortbildungsmotiv der Physiklehrkräfte an Gymnasien ist wie das aller Gymnasiallehrkräfte das Fach und sein Bezug zum Unterricht [7].

3. Fächerübergreifende Medienausstattung

3.1 Schulvernetzung

Von den Gymnasien ($N = 60$) verfügen 95 % über ein Schulnetz. Die Schulen ($N = 58$) verfügen alle über einen Internetzugang, davon 17 % über ISDN, 64 % über DSL und 22 % über eine Standleitung.

3.2 Ausstattung mit Lehrer-PCs

Von den Gymnasien ($N = 63$) haben 22 % keinen PC im Lehrerzimmer oder in einem Lehrerarbeitsraum, 17 % einen, 14 % zwei, 11 % drei, 14 % vier und 21 % mehr als vier. Von diesen Schulen haben 30 % keinen PC mit Internetzugang im Lehrerzimmer- oder in einem Lehrerarbeitsraum, 22 % einen, 19 % zwei, 13 % drei, 10 % vier und 6 % mehr als vier. 70 % der Schulen besitzen damit mindestens einen Lehrer-PC mit Internetzugang.

3.3 Ausstattungen der PC-Räume

Von den Gymnasien (Angaben von $N = 49$) besitzen 74 % zwei PC-Räume. Von diesen 87 PC-Räumen besitzen alle außer drei einen Internetzugang (einmal der einzige PC-Raum, zweimal der zweite PC-Raum). Die Anzahl der PCs pro Raum schwankt zwischen 7 und 35 um einen Mittelwert von 16.

52 % der PC-Räume haben einen Beamer und 83 % mindestens einen Drucker. 71 % der Schulen haben in mindestens einem PC-Raum einen Beamer, 29 % besitzen keinen PC-Raum mit Beamer, dafür aber meistens portable Beamer. Zwei Schulen besitzen weder im PC-Raum einen Beamer noch einen portablen Beamer.

Ein paar Schulen besitzen außerdem einen Satz Notebooks, zum größten Teil mit WLAN.

3.4 Portable Beamer

75 % der Schulen ($N = 50$) besitzen einen portablen Beamer, der auch für die Physik nutzbar ist, 29 % sogar mehr als einen (maximal sechs).

3.5 Folgerungen

Die Ausstattung mit Lehrer-PCs von Schulen mit durchschnittlich 900 Schülern und ca. 70 Lehrkräften/Schule ist sehr gering. Über einzelne Lehrkräfte hinausgehendes mediales Lernen am Arbeitsplatz ist nicht möglich und bleibt dem medial gut ausgestatteten Privatbereich vorbehalten.

Im Zuge der Initiative „Schulen ans Netz“ und der gewachsenen Bedeutung des Internets für das Lernen und Arbeiten verfügen fast alle Schulen über einen Internetzugang, ein Schulnetz und mindestens einen PC-Raum. In welchem Umfang und mit welcher Intensität diese mit erheblichen finanziellen Mitteln aufgebaute Infrastruktur für das Lernen der Schüler genutzt wird, bedarf einer differenzierteren eigenen Untersuchung. Faktoren wie der Grad des Schulnetzausbaus, organisatorische Zugriffsregelungen für das Internet sowie Nutzungsformen und Auslastung der PC-Räume wären zu betrachten.

4. Physikeigene Medienausstattung

Die Nutzung eventuell vorhandener physikexterner Medien ist im Schulalltag besonders für Physiklehrkräfte mit mehrheitlich vollem Unterrichtsdeputat neben den zeitaufwendigen experimentellen Unterrichtsvorbereitungen sehr belastend. Sie kann für einen überwiegend von Physikmedien getragenen Unterricht gelegentlich additiv, aber nie die physikeigene Medienausstattung über längere Zeit substituierend stattfinden.

4.1 Ausstattungen der Physikräume

Von den 110 Physikräumen aus 57 Schulen sind 47 % ohne PC, 28 % mit PC ohne Internet und 25 % mit PC und Internet. Vier Schulen haben zusammen fünf Physikräume mit jeweils mehr als 12 PCs.

Eine differenziertere und für den Physikmedieneinsatz relevante Betrachtung der Physikraumausstattung ist Tab. 1 zu entnehmen. Es wurde jeweils der bestausgestattete Physikraum jeder Schule betrachtet. Im Hinblick auf die Physikmediennutzung wurden dabei die Schulen in drei Gruppen mit abnehmenden Unterrichtsmöglichkeiten eingeteilt:

Ausstattung	Schulanteil		Unterricht mit Physikmedien
S-Laptops + WLAN	1,8 %	≈ 10 %	Schülerarbeit
S-PCs	7,0 %		
L-PC + Beamer + Drucker	22,8 %	≈ 30 %	Lehrerdemonstration
L-PC + Beamer	7,0 %		
L-PC ohne Beamer	33,3 %	≈ 60 %	sehr schwierig
keine PCs	28,0 %		

Tab. 1: Ausstattung des bestausgestatteten Physikraums (Internetzugang unberücksichtigt) ($N = 57$).

Lässt man die Nutzung physikexterner Medien wie portable Beamer außer Acht, dann kann in 60 % der Schulen nicht mit Physikmedien unterrichtet werden. In 30 % ist ein Demonstrationsunterricht mit physikeigenem Beamer möglich und nur in 10 % der Schulen können Schüler eigenständig mit Physikmedien arbeiten. Bei der letzten Anzahl blieb ein physikeigener Beamer wegen der geringen Anzahl unberücksichtigt (außerdem muss in einem schülerorientierten Unterricht weniger demonstriert werden). Der geringe letzte Anteil erklärt ferner, warum nur wenige Lehrkräfte im Fragebogen ihren Physikmedieneinsatz nach Demonstration oder Schülernutzung differenzieren konnten.

4.2 Finanzmittel der Physik

Das Fach Physik verfügt an 34 % der Schulen (N = 61) über Finanzmittel zwischen 0 und 500 €/a, an 31 % über 500 – 1000 €/a, an 23 % über 1000 – 1500 €/a und an 12 % der Schulen über mehr als 1500 €/a. Der Median liegt bei 500 – 1000 €/a. Ein Zusammenhang zwischen der durch die Schülerzahl gemessenen Schulgröße und den Physikfinanzmitteln besteht nicht (Korrelationskoeffizient -0.05).

Von den Physikfachschaften (N = 64) planen 81 % keine Anschaffungen von Physiksoftware oder -hardware. Geplante Anschaffungen der restlichen 19 % sind: Erweiterungen zu Cassy (4), Messwerterfassung mit Digitalmultimeter (1), Beamer (1), Laptop (2), drahtlose Kamera (1), Upgrade zu Crocodile Clips (1), Messwerterfassung, Drucker (1) und Accesspoint (1).

4.3 Folgerungen

Für die unterste Gruppe von Schulen in Tab. 1 ist der Kauf eines physikeigenen Beamers, der fest an der Decke installiert wird, bzw. eines PCs mit Beamer im Vergleich zu den gewonnenen Unterrichtsmöglichkeiten und der Verbreitung von Physikmedien in der Physikfachschaft eine sehr lohnende und unter Nutzung weiterer physikexterner Finanzquellen finanzierbare Investition. Es würde die Lehrer entlasten, wenn sie nicht auf portable Beamer angewiesen wären.

Für die mittlere Gruppe können die Unterrichtsmöglichkeiten durch die Nutzung physikexterner Medienausstattung wie die der schulischen PC-Räume und der meist mit Internetzugang ausgestatteten privaten Schüler-PCs an die der obersten Gruppe angenähert werden. Im PC-Raum können Physikmedien wie z.B. die Videoanalyse mit einem kostenlosen Freeware-Programm im Kurs eingeführt und Videos von den Schülern zu Hause als Hausaufgabe ausgewertet werden [8]. Mit dem Lehrer-PC im Physikraum können Schüler ihre zu Hause erarbeiteten Ergebnisse präsentieren oder leistungsfähige Schüler die Gruppe anleiten.

5. Einsatz von Physiksoft- und -hardware durch die Lehrkräfte

Mit experimentellen Physikmedien wie der Videoanalyse, der PC-Messung über Sensoren und interaktiven Bildschirmexperimenten (IBEs) können Daten aus Realexperimenten gewonnen werden (Messwerterfassung und Messwertreproduktion). Über das Internet ferngesteuerte Realexperimente (Remote Controlled Laboratory – RCL) blieben wegen ihrer noch zu geringen Verfügbarkeit unberücksichtigt. Mit theoretischen Physikmedien wie Simulationen und Modellbildung können aus bekannten Gesetzmäßigkeiten Erkenntnisse deduktiv gewonnen werden. Mit dem Internet als Informations- und Kommunikationsmedium kann physikalisches Wissen in Text, Bild und Sprache genutzt werden.

5.1 Unterrichtseinsatz experimenteller und theoretischer Physikmedien

Die Physiklehrer haben angegeben, ob und wenn ja wie umfangreich sie experimentelle und theoretische Physikmedien einsetzen (siehe Abb. 2 und Abb. 3).

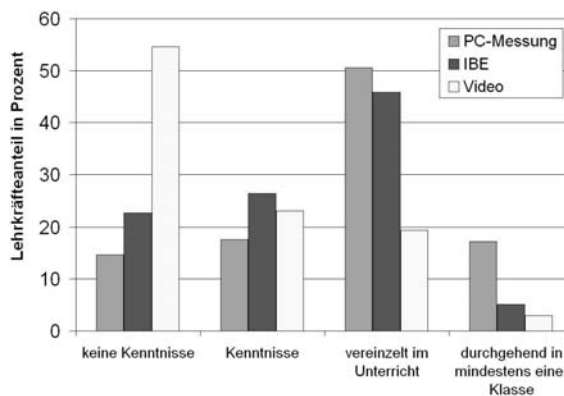


Abb. 2: Unterrichtseinsatz der experimentellen Physikmedien PC-Messwerterfassung (N = 279), Interaktive Bildschirmexperimente (N = 273) und Videoanalyse (N = 273)

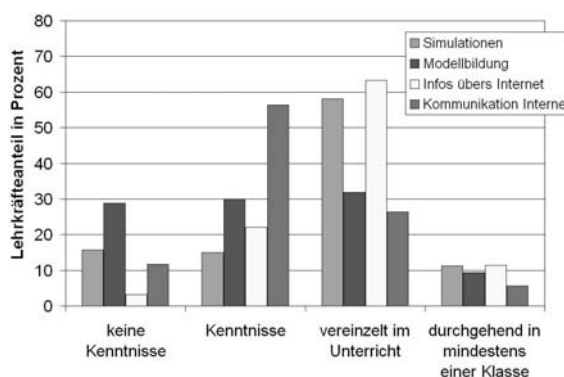


Abb. 3: Unterrichtseinsatz der theoretischen Physikmedien Simulationen (N = 274), Modellbildung (N = 257), Informationsmedium Internet (N = 281) und Kommunikationsmedium Internet (N = 266)

Physikmedien werden nur von einem kleinen Lehrkräfteanteil durchgehend in mindestens einer Klasse oder Kurs eingesetzt. Mit Abstand am häufigsten in dieser Kategorie wird die PC-Messung (17 % der Lehrer) genannt; sie hat sich längerfristig über die Lehrmittelfirmen etabliert.

Am häufigsten vereinzelt im Unterricht eingesetzt werden das Internet als Informationsmedium (63 % der Lehrer) und Simulationen (58 % der Lehrer), weil dazu ein kostenloses und breites themenspezifisches Angebot offline oder online übers Internet verfügbar ist und Simulationen anscheinend ohne großen Vorbereitungsaufwand im Unterricht eingesetzt werden können.

Betrachtet man den Unterrichtseinsatz insgesamt (vereinzelt oder durchgehend) so werden das Informationsmedium Internet (75 % der Lehrkräfte), Simulationen (69 %) und die PC-Messung (68 %) am häufigsten im Unterricht eingesetzt. Es folgen IBEs (51 %), Modellbildung (41 %), Kommunikationsmedium Internet (32 %) und Videoanalyse (22 %). Der geringe Unterrichtseinsatz der Videoanalyse ist auf die mit Abstand geringsten Mediumkenntnisse (55 % haben keine Kenntnisse) und auf den sehr themenspezifischen Einsatz in der Mechanik zurückzuführen. Dass bei Modellbildung häufiger als bei den anderen Medien keine Angaben gemacht werden (12 %), liegt wahrscheinlich daran, dass nicht alle Lehrer diesen Begriff kennen.

Auffällig ist, dass nur beim Kommunikationsmedium Internet sehr viele Lehrkräfte (56 %) angeben, Kenntnisse zu besitzen, es aber nicht im Unterricht einzusetzen. Erklärungen hierfür sind ein subjektiv hohes Kompetenzgefühl der Lehrkräfte aus der privaten Internetkommunikation, noch fehlende Einsatzmöglichkeiten für dieses Physikmedium oder das Fehlen von Physikräumen mit Internetanschluss. Herauszuheben ist auch, dass 29 % der Lehrkräfte keine Kenntnisse über die Modellbildung haben.

81 % der Lehrkräfte haben bereits mindestens ein experimentelles Physikmedium mindestens vereinzelt eingesetzt, 20 % durchgehend in mindestens einer Klasse. 89 % der Lehrkräfte haben bereits mindestens ein theoretisches Physikmedium mindestens vereinzelt eingesetzt, 24 % der Lehrkräfte durchgehend in mindestens einer Klasse.

5.2 Unterrichtseinsatz konkreter experimenteller Physikmedien

Die Physiklehrkräfte wurden gefragt, welche Physiksoft- und -hardware sie bereits im Unterricht eingesetzt haben, wobei die Intensität des Einsatzes nicht berücksichtigt wurde. Wie Tab. 2 zeigt, werden bei der Messwerterfassung und Videoanalyse viele verschiedene Produkte eingesetzt.

Mehr als die Hälfte der Lehrer setzte bereits Cassy [9] ein, was nur durch die Marktmacht der Herstellerfirma in Deutschland zu erklären ist. Sehr gute Produkte wie Pasco, das in den USA die Standardsoftware zur Messwerterfassung ist, und Coach 5,

die in den Niederlanden die Standardsoftware zur Messwerterfassung ist, liegen unter 1%.

Das Beispiel des an der Universität Mainz entwickelten Videoanalyse-Programms ViMPS [10] zeigt eine starke Abhängigkeit der Verteilung vom Bundesland. In anderen Bundesländern liegen sicher andere Videoanalyseprogramme vorne.

Messwerterfassung	Videoanalyse
Cassy 52,6 %	ViMPS 6,1 %
Cobra 3 4,1 %	Galileo 5,5 %
Lap Pro 2,4 %	Viana 1,7 %
PAKMA 1,7 %	DiVA 1,0 %
DiBox 1,7 %	David 1,0 %
Logger Pro 1,4 %	Coach 5 0,3 %
CBL 1,0 %	AVA 0,3 %
Corex 1,0 %	
Eigenbau 1,0 %	

Tab. 2: Soft- bzw. Hardwareeinsatz der Lehrkräfte (N = 293) für Messwerterfassung (gelistet, wenn $\geq 1\%$) und Videoanalyse

5.3 Unterrichtseinsatz konkreter theoretischer Physikmedien

Insbesondere bei den Simulationen wird eine sehr große Spanne von Produkten genutzt (siehe Tab. 3).

Modellbildung	Simulationen
Dynasys 18,4 %	Applets 32,8 %
Modus 5,1 %	Albert 18,8 %
STELLA 4,1 %	DOS-Programme 17,4 %
Moebius 3,4 %	Crocodile Clips 13,3 %
Powersim 3,1 %	PAKMA 7,5 %
VisEdit/PAKMA 2,0 %	CliXX Physik 6,1 %
Tabellenkalk. 1,7 %	Crocodil Physics 4,8 %
Coach5 1,0 %	Interactive Phys. 2,7 %

Tab. 3: Softwareeinsatz der Lehrkräfte (N = 293) für Modellbildung und Simulationen (gelistet, wenn $> 2\%$)

In der Modellbildung wird Dynasys [11] am häufigsten verwendet. Applets haben sich als browserbasierte Simulations-Programme gegenüber älteren über CD-ROM vertriebenen Programmen wie Albert durchgesetzt.

5.4 Interesse am Unterrichtseinsatz experimenteller und theoretischer Physikmedien

Die Physiklehrer sollten ihr Interesse am Unterrichtseinsatz experimenteller und theoretischer Physikmedien auf einer vierstufigen Skala (von „gering“ bis „hoch“ einschätzen) (siehe Abb. 4 und Abb. 5). Die PC-Messung ist das einzige Medium, dessen Maximum bei „hoch“, das Kommunikationsmedium Internet das einzige, dessen Maximum bei „gering“ liegt.

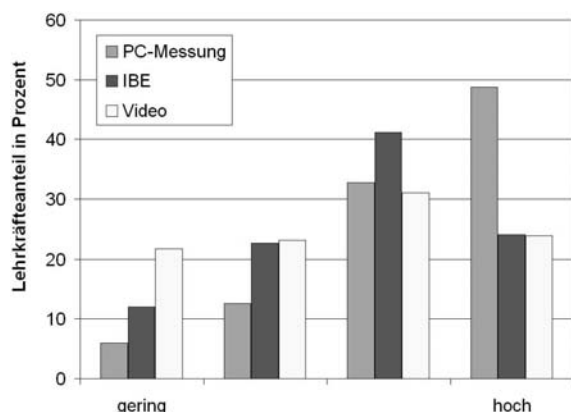


Abb. 4: Interesse am Unterrichtseinsatz der experimentellen Physikmedien PC-Messwerterfassung (N = 287), Interaktive Bildschirmexperimente (N = 282) und Videoanalyse (N = 280)

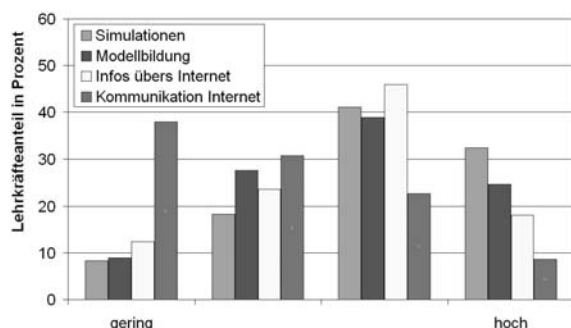


Abb. 5: Interesse am Unterrichtseinsatz der theoretischen Physikmedien Simulationen (N = 290), Modellbildung (N = 280), Informationsmedium Internet (N = 283) und Kommunikationsmedium Internet (N = 277)

Hohes und noch hohes Interesse besteht bei den Lehrkräften in absteigender Reihenfolge bei der PC-Messung (82 %), den Simulationen (73 %), IBEs (65 %), der Modellbildung (64 %), dem Internet als Informationsmedium (64 %), der Videoanalyse (55 %) und dem Internet als Kommunikationsmedium (31 %).

5.5 Teilnahme und Interesse an Physikmedien-Fortbildungen

Innerhalb der letzten drei Jahre haben von den Lehrkräften (N = 293) 89 % keine Physikmedien-Fortbildung in Rheinland-Pfalz besucht, 9 % haben eine, 2 % zwei besucht.

Ein bevorzugter Besuch der Fortbildungen einer bestimmten Altersgruppe konnte nicht nachgewiesen werden. Die Lehrkräfte, die mindestens eine Physikmedien-Fortbildung besucht haben (N = 31), unterscheiden sich im Alter nicht signifikant von den anderen Lehrern (0,05-Niveau, unabhängiger t-Test). Von den Lehrkräften (N = 293) geben 67 % an, sich bereits Wissen über Physikmedien im Selbststudium angeeignet zu haben. Trotzdem würden sich 39 % zu einer Physikmedien-Fortbildung anmelden, 33 % nicht und 28 % machten keine Angabe. Motive für

eine Anmeldung sind eine erhoffte Veränderung des Physikunterrichts (17 Nennungen), Interesse an Physikmedien (13) und ein subjektiv empfundener Fortbildungsbedarf (12). Hauptmotiv für eine Nichtanmeldung ist mit Abstand Zeitmangel und Überlastung (24).

5.6 Folgerungen

Die Vielzahl eingesetzter Soft- und -hardwareprodukte - sowohl über alle Schulen hinweg als auch innerhalb der einzelnen Schulen - behindert eine systematische Physikmediennutzung. Physikmedien-Programme wie Coach 5 [12] und PAKMA [13] vereinen mehrere Physikmedien unter einer Programmoberfläche. Hier können experimentelle und theoretische Daten miteinander verglichen werden. Bekannt sind aber die Programme, die nur für eine spezielle Anwendung geschrieben sind.

Je nach Physikmedium gibt es einen großen Lehrkräfteanteil, die das Physikmedium überhaupt nicht einsetzt. Dieser Anteil geht von 25 % beim Informationsmedium Internet und 31 % bei Simulationen bis zu 78 % bei der Videoanalyse.

Das Interesse dieser „Physikmedien-Laien“ sollte durch eine ansprechend gestaltete praxisnahe Fortbildungsausschreibung geweckt werden und auf schulinternen oder zentralen Physikmedien-Fortbildungen sollten sie für den Physikmedieneinsatz und eine Verbreitung von Physikmedien qualifiziert werden.

Beim Physikmedieneinsatz und -interesse stimmt die Reihenfolge der Physikmedien mit abnehmendem Einsatz mit dem abnehmenden Interesses überein: PC-Messung und Simulationen, dann IBEs, Modellbildung und Internet als Informationsmedium und schließlich Videoanalyse und Internet als Kommunikationsmedium. Das kann unterschiedlich gedeutet werden: Entweder erhöht sich durch Interesse an einem Physikmedium dessen Einsatzwahrscheinlichkeit oder die Lehrkräfte zeigen nur an den Physikmedien Interesse, die sie bereits im Unterricht einsetzen, und wagen sich zu selten auf Neuland.

Der hohe Lehrkräfteanteil mit informeller Fortbildung ist glaubwürdig, da der Physiklehrkräfteanteil mit Physikmedieneinsatz nicht allein mit der in den letzten Jahren geringen Anzahl von angebotenen Physikmedien-Fortbildungen erklärt werden kann.

6. Physikmedien im Fach Physik erfolgreich implementieren

Die Implementierung von Physikmedien an einer Schule kann nicht - wie eingangs am Beispiel des Internets erwähnt - Sache einzelner engagierter Lehrer bleiben und ist auch auf diesem Wege nicht zu erreichen. Zu viele der angeführten Faktoren wie Aus- und Fortbildungsstand sowie Fortbildungsbereitschaft der Lehrkräfte, Finanzmittel der Physik und der Schule, Interesse am Unterrichtseinsatz von Physikmedien, aktueller Stand des Physikmedieneinsatzes, der Physikraumausstattung und Physik-

medienhard- und -software stehen untereinander in Wechselwirkung und bestimmen die Erfolgchancen für das Erreichen des Ziels, dass Schüler mit Hilfe von Physikmedien Physik eigenständiger lernen und verstehen sollen.

Die Ausführung und Koordination der damit verbundenen Aufgaben kann nur durch die Gemeinschaft der Physiklehrer an einer Schule in Absprache mit der Schulleitung erfolgen. Solche Aufgaben sind:

- Fachkonferenzbeschluss, innerhalb eines festgelegten Zeitraums einen bestimmten Grad an Physikmedienimplementierung zu erreichen,
- Klarheit darüber, welche Physiklehrkräfte mitarbeiten und welche nicht,
- Entwicklung eines Ausstattungs- und Nutzungskonzepts der Physikräume,
- Entwicklung eines Finanzierungsplans unter Nutzung aller Finanzierungsquellen wie Physiketat, Schuletat, Förderverein, Sponsoren,
- Sichtung und Entrümpelung vorhandener Physikmedienhard- und -software, Planung von Neuanschaffungen,
- Organisation und Pflege der Physikmedienhard- und -software (Datenorganisation, Austausch von Physikmedienmaterialien),
- Planung der Teilnahme an externen Physikmedien-Fortbildungen (Einholen externen Wissens) und schulinternen Physikmedien-Fortbildungen (Austausch schulinternen Wissens).

Faktoren, die ein solches Vorgehen behindern, sind:

- zeitliche und inhaltliche Überlastung gerade der engagierten Physiklehrkräfte,
- insgesamt zu geringe Finanzmittel, aber zu viele schulgebundene und zu geringe physikeigene Finanzmittel, über die in Eigenverantwortung verfügt werden kann,
- zu geringe Entscheidungsspielräume und zu wenig Führungskompetenz des Physikfachbereichsleiters/in.

Die Untersuchung zeigt, dass fachdidaktisch bedeutsame Entwicklungen die Schule mit einer Verzögerungszeit von fast 10 Jahren und auch nur zum Teil erreicht haben. Es stellt sich die Frage, wie Schule und Schulverwaltung organisiert werden müssen und wie der Kontakt zwischen Hochschule und Schule gestaltet sein muss, damit fachdidaktische Neuentwicklungen, wie z. B. der Einsatz Neuer Medien, schneller in der Schule umgesetzt werden und umgekehrt mehr Praxiswissen aus der Schule die Hochschule erreicht.

7. Literatur

- [1] Urhahne, D., Prenzel, M., von Davier, M., Senkbeil, M. & Bleschke, M. (2000): Computereinsatz im naturwissenschaftlichen Unterricht – Ein Überblick über die pädagogisch-psychologischen Grundlagen und ihre Anwendung. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 6, S. 157 –186
- [2] Scholl, W. & Prasse, D. (2001): Was hemmt und was fördert die schulische Internet-Nutzung? - Ergebnisse einer Evaluation der Initiative „Schulen ans Netz“ - Probleme und Lösungsmöglichkeiten. Computer und Unterricht, 41(11), S. 21-32
- [3] Ehmke, T., Senkbeil, M. & Bleschke, M. (2003): Neue Medien in der Schule – Erfahrungen zu unterschiedlichen Nutzungstypen bei Lehrkräften. In Prenzel, M., Senkbeil, M. & Bleschke, M. (Hrsg.): Leitfaden zum didaktischen Einsatz von Computeranwendungen – Neue Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht. Kiel: Leibnitz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, S. 72
- [4] Mandl, H., Reinmann-Rothmeier, G. & Gräsel, C. (1998): Gutachten zur Vorbereitung des Programms „Systematische Einbeziehung von Medien, Informations- und Kommunikationstechnologien in Lehr-Lernprozesse“, S. 33
- [5] Niegemann, H. M., Hessel, S., Hochscheid-Mauel, D., Aslanski, K., Deimann, M. & Kreuzberger, G. (2004): Kompendium E-Learning. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 55.
- [6] Meister, D. (2003): Medienkompetenz – Schlüsselqualifikation in der Informationsgesellschaft. Rostock: Universität, Zentrum für Qualitätssicherung in Studium und Weiterbildung, S. 24
- [7] Hahn, H. (2003): Zur Wirkung von Fortbildung im Prozess der Schulentwicklung – Evaluation des Projektes „Fortbildungsbudget für die Einzelschule“ am Thüringer Institut für Lehrerfortbildung, Lehrplanentwicklung und Medien Bad Berka. Baltmannsweiler: Schneider Hohengehren, S. 17
- [8] Gröber, S.; Poth, T.; Wilhelm, T.: Zweidimensional-vektorielle Kinematik mit Videoanalyse - Vorstellung eines Unterrichtsganges im Multi-Mechanics Project - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 54, Nr. 8, 2005, S. 41 - 47
- [9] CASSY: Leybold Didaktik GmbH, <http://www.leybold-didactic.de/software/index.html?cassy-s.html>
- [10] VIMPS: Universität Mainz, Didaktik der Physik, <http://www.physik.uni-mainz.de/lehramt/VIMPS>
- [11] DYNASYS: Hupfeld, W., <http://www.hupfeld-software.de>
- [12] COACH 5: Universität Amsterdam, Centre for Microcomputer Applications (CMA), <http://www.cma.science.uva.nl/english/products/coach5/coach5.html>
- [13] PAKMA: Universität Würzburg, Didaktik der Physik, <http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/software/pakindex.htm>

8. Adressen

OStR Sebastian Gröber, Landesmedienzentrum
Rheinland-Pfalz, Hofstraße 257 c, 56077 Koblenz,
groeber@lmz.bildung-rp.de.

StR Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Didaktik
der Physik, Physikalisches Institut der Universität
Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, Tel.
0931/888-5788, wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de.

1.2 Einsatz der Videoanalyse 2009 bei Gymnasiallehrern in Unterfranken

Quelle:

WILHELM, T.; TREFZGER, T.: *Erhebung zum Computereinsatz bei Physik-Gymnasiallehrern in Unterfranken* - In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Hannover 2010, 2010, www.phydid.de

Inhalt und Bezug zum Thema:

Mit Hilfe einer Fragebogenerhebung an den Gymnasien von Unterfranken (in Bayern) im Jahr 2009 wurde der Computereinsatz im Physikunterricht erfragt. Es wurde ermittelt, wie die Lehrkräfte den Computer im Physikunterricht einsetzen, welche Art von Software und welche konkreten Softwareprodukte sie bereits eingesetzt haben. Dazu findet ein Vergleich mit Daten aus Rheinland-Pfalz aus dem Jahr 2004 statt. Ein Schwerpunkt bildet die Videoanalyse, bei der die Bekanntheit verschiedener Programme, die Lehrervorstellungen vom Einsatz sowie die Wirkung verschiedener Informationsquellen erhoben wurden. Insgesamt kann gezeigt werden, dass regionale Lehrerfortbildungen eine große Rolle spielen, ob und welche Software im Physikunterricht eingesetzt wird.

Erhebung zum Computereinsatz bei Physik-Gymnasiallehrern

Thomas Wilhelm, Thomas Trefzger

Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Am Hubland, 97074 Würzburg,
wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de, trefzger@physik.uni-wuerzburg.de

Kurzfassung

Mit Hilfe einer Fragebogenerhebung an den Gymnasien von Unterfranken (in Bayern) im Jahr 2009 wurde der Computereinsatz im Physikunterricht erfragt. Es wurde ermittelt, wie die Lehrkräfte den Computer im Physikunterricht einsetzen, welche Art von Software und welche konkreten Softwareprodukte sie bereits eingesetzt haben. Dazu findet ein Vergleich mit Daten aus Rheinland-Pfalz aus dem Jahr 2004 statt. Ein Schwerpunkt bildet die Videoanalyse, bei der die Bekanntheit verschiedener Programme, die Lehrervorstellungen vom Einsatz sowie die Wirkung verschiedener Informationsquellen erhoben wurden. Insgesamt kann gezeigt werden, dass regionale Lehrerfortbildungen eine große Rolle spielen, ob und welche Software im Physikunterricht eingesetzt wird.

1. Einführung

Der Computer ist heute in gewissem Sinne zu einem Standardmedium im Physikunterricht geworden. Der Computereinsatz ist ein (kleines) Thema in Physikdidaktik-Lehrbüchern und aus der Lern- und Medienpsychologie liegen Überblicksartikel über den Computereinsatz im naturwissenschaftlichen Unterricht vor [1]. Die Physikdidaktik hat sich dagegen weitgehend neueren Fragestellungen zugewandt und die Softwareentwicklung liegt nicht mehr so stark bei den Physikdidaktikern der Hochschulen, sondern zum Teil bei Lehrmittelfirmen und Schulbuchverlagen.

Es stellt sich jedoch die Frage, inwieweit diese Möglichkeiten auch im Unterricht angekommen sind. Kennen die Lehrer überhaupt die vielen vorliegenden Softwareprogramme? Haben Lehrer ein Interesse an entsprechender Fortbildung?

In Deutschland wurden bisher wenige Daten zum Computereinsatz im Unterricht allgemein erhoben (z.B. [2]). Speziell für den Physikunterricht liegen nur wenige Daten vor [3, 4]. Ebenso ist unklar, wie intensiv die Lehrer in dieser Hinsicht ausgebildet werden, obwohl Ideen für sinnvollen Computereinsatz und eine subjektiv wahrgenommene Kompetenz wichtige Voraussetzungen für den Computereinsatz sind [3].

Die Möglichkeit zu einer kleinen Erhebung entstand dadurch, dass für eine Lehrerfortbildung im Oktober 2009 das Interesse der Lehrkräfte an verschiedenen Themen vorab erhoben werden sollte. Die Umfrage konnte deshalb damit begründet werden, dass die Fortbildung den Bedürfnissen der Physiklehrer gerecht werden soll, wozu die Umfrage wichtige Informationen liefern soll. Dazu wurde eine Unterstützung des Ministerialbeauftragten von Unterfranken

erzielt, über den ein kurzer Fragebogen im Mai 2009 auf offiziellem Weg an alle 44 Gymnasien in Unterfranken geschickt wurde mit der Bitte, dass alle Physik-Lehrkräfte der Schule ihn innerhalb weniger Wochen ausfüllen. Die Lehrkräfte hatten die Möglichkeit, auf einem Papierausdruck zu antworten oder digital am Computer. Auf diese Weise antworteten 98 unterfränkische Physik-Gymnasiallehrer, was aufgrund des ungünstigen Zeitpunktes kurz vor den Pfingstferien zufrieden stellend ist.

Ein Schwerpunkt lag bei der Erhebung bei der Videoanalyse, da diese im Vergleich zu anderen Möglichkeiten des Computereinsatzes am Neuesten ist. Der Fragebogen ähnelte in Teilen dem Fragebogen aus [4], der im Herbst 2004 an allen staatlichen Gymnasien von Rheinland-Pfalz durchgeführt wurde, so dass hier Vergleiche möglich sind. Dabei bleibt jedoch offen, inwieweit die Unterschiede durch die vergangenen 4,5 Jahre zustande kamen oder an Unterschieden zwischen den Bundesländern liegen. In Deutschland gibt es große Unterschiede zwischen den Bildungssystemen der einzelnen Länder und zwischen deren Aus- und Fortbildung. Außerdem wird vom Staat – anders als z.B. in den Niederlanden – keine spezielle Software gefördert.

2. Informationen zu den Lehrkräften

2.1 Fächerkombinationen

Bei den 98 Lehrkräften haben alle bis auf zwei als weiteres Fach Mathematik, was daran liegt, dass in Bayern Physik jahrzehntelang nur mit Mathematik kombiniert werden konnte (nur eine Lehrkraft hat Informatik, eine Geographie). Zehn Lehrkräfte haben noch als drittes Unterrichtsfach Informatik angegeben, was ein geringerer Anteil als in Rheinland-Pfalz ist (57 % Ph/M, 30 % Ph/M/Inf) [4].

2.2 Geschlecht und Altersverteilung

Die Stichprobe setzt sich zusammen aus 84 % männlichen und 16 % weiblichen Lehrkräften, wie es auch bei [4] der Fall war. Bei der Altersverteilung gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen den männlichen und weiblichen Lehrkräften. Die größte Altersgruppe sind mit 38 % die 30- bis 39-Jährigen, während 5 % in der Altersgruppe 20 – 29 liegen, 20 % in der Altersgruppe 40 – 49, 27 % in der Altersgruppen 50 – 59 und 10 % darüber. Der Median liegt in der Altersgruppe 40 bis 49 Jahre.

Da die meisten mit fast 30 Jahren als Lehrkraft anfangen, ergibt sich eine entsprechende Verteilung der Dienstjahre: Zwei Lehrkräfte waren Anfänger, 37 % hatten unter zehn Dienstjahre, 24 % 10 bis 20 Dienstjahre, 11 % 20 bis 30 Dienstjahre und 24 % schon über 30 Dienstjahre.

2.3 Studienabschluss

Da der Bedarf an Physiklehrkräften in Bayern wie in anderen Bundesländern seit mehreren Jahren nicht gedeckt werden konnte, gibt es seit 2002 ein Quereinsteigerprogramm für Gymnasiallehrer [5]. Für den Zeitraum 2002 bis 2007 wurden in Bayern insgesamt 284 Diplom-Physiker im Referendariat eingestellt, was einer Quereinsteigerquote von 46 % entspricht [5]. In den 1970er Jahren und Anfang der 1990er Jahre gab es auch schon einmal ein wenige Jahre umfassendes Einstellungsfenster für Diplomphysiker, bei dem aber nicht so viele eingestellt wurden.

Von den 97 Lehrern, die hierzu eine Angabe machten, hatten 86 % ein Erstes Staatsexamen, während 14 % ein Physikdiplom hatten. Verständlicherweise unterscheiden sich diese beiden Gruppen signifikant ($p = 0,01$) in ihrem Dienstalster: 71 % der Diplomphysiker haben unter zehn Dienstjahre.

3. Umfang des Einsatzes des Computers durch die Lehrkräfte

Um den Lehrkräften eine einfache, schnelle Beantwortung zu ermöglichen, wurden lediglich vier Antwortmöglichkeiten zur Wahl gestellt: „keine Kenntnisse“, „kein Unterrichtseinsatz, aber Kenntnisse“, „vereinzelt im Unterricht“, „durchgehend in mindestens einer Klasse“, was allerdings keine Aussagen darüber ermöglicht, wie oft die Lehrer den Computer pro Woche oder Monat einsetzen.

3.1 Umfang des Unterrichtseinsatzes von Computern zur Messwerterfassung und Messwertreproduktion

Mit der PC-Messung über Sensoren, interaktiven Bildschirmexperimenten (IBEs) und der Videoanalyse können Daten aus Realexperimenten gewonnen werden (Messwerterfassung und Messwertreproduktion). Angaben zum Umfang des Einsatzes finden sich in Abb. 1.

Auf den ersten Blick sieht diese Verteilung zwar ähnlich aus, wie bei der Erhebung 2004 in Rheinland-Pfalz [4]. Auf den zweiten Blick kann man aber feststellen, dass bei allen drei Medien, der Anteil derer, die es im Unterricht einsetzen, in Unterfranken 2009 signifikant größer ist als 2004 in Rheinland-Pfalz (siehe Tab. 1). Man kann hier vermuten, dass sich der Computereinsatz im Laufe der Zeit immer mehr durchsetzt, wenn auch nur langsam.

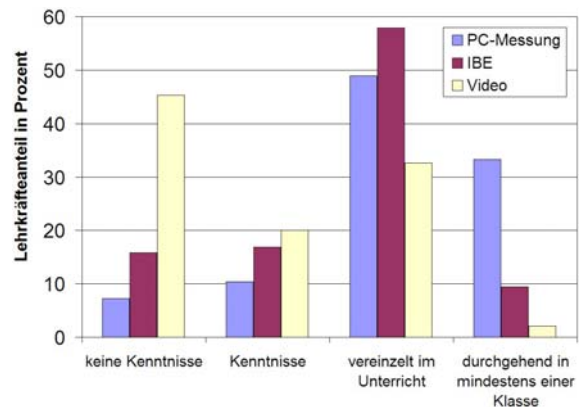


Abb. 1: Unterrichtseinsatz von PC-Messwerterfassung (N = 96), Interaktive Bildschirmexperimente (N = 95) und Videoanalyse (N = 95)

Bereits eingesetzt (vereinzelt oder durchgehend)		
Umfrage \ Medium	Unterfranken 2009, N=98	Rheinland-Pfalz 2004, N=293
Infos übers Internet	94 % ***	75 %
PC-Messung	82 % **	68 %
Simulationen	83 % **	69 %
IBEs	67 % **	51 %
Modellbildung	56 % **	41 %
Kommunikation Internet	46 % *	32 %
Videoanalyse	35 % *	22 %

Tab. 1: Anteil von Lehrern, die die Medien schon im Unterricht eingesetzt haben (Signifikante Unterschiede gemäß χ^2 -Test, *: $p=0,05$, **: $p=0,01$, ***: $p=0,001$)

Einen durchgehenden Einsatz von PC-Messwerterfassung in mindestens einer Klasse wurde in Unterfranken von 33 % der Lehrkräfte angegeben, während es in Rheinland-Pfalz 2004 nur 17 % waren (höchst signifikant). Einen durchgehenden Einsatz von IBEs in mindestens einer Klasse wurde in Unterfranken von 9,5 % der Lehrkräfte angegeben, während es in Rheinland-Pfalz nur 5,1 % waren. Beim durchgehenden Einsatz der Videoanalyse ist kein Unterschied zwischen den beiden Erhebungen feststellbar.

3.2 Umfang des Unterrichtseinsatzes von Simulation und Modellbildung und des Internets

Bei Simulationen und Modellbildung werden physikalische Abläufe vom Computer berechnet. Mit dem Internet als Informations- und Kommunikationsmedium kann physikalisches Wissen in Text, Bild und Sprache genutzt werden.

Auch hier ist die Verteilung der einzelnen Medien (siehe Abb. 2) ähnlich der bei der Erhebung 2004 in Rheinland-Pfalz [4]. Auch hier hat sich der Anteil derer, die die Medien nutzen, signifikant erhöht (siehe Tab. 1).

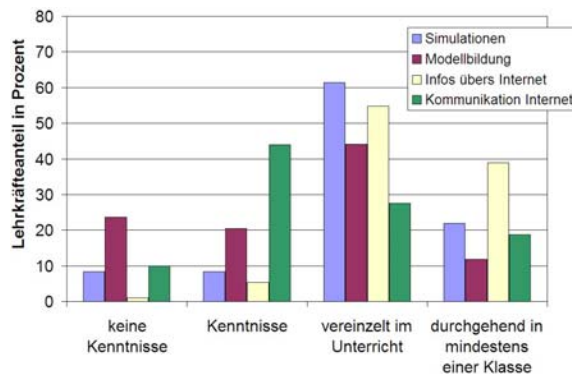


Abb. 2: Unterrichtseinsatz von Simulationen (N = 96), Modellbildung (N = 93), Informationsmedium Internet (N = 95) und Kommunikationsmedium Internet (N = 91)

Einen durchgehenden Einsatz von Simulationen in mindestens einer Klasse wurde in Unterfranken von 22 % der Lehrkräfte angegeben, während es in Rheinland-Pfalz 2004 nur 11 % waren (hoch signifikant). Beim durchgehenden Einsatz des Internets als Kommunikationsmedium sind es 19 % in Unterfranken 2009 im Vergleich zu 5,6 % in Rheinland-Pfalz 2004 und beim Internet als Informationsmedium sind es 39 % im Vergleich zu 11 % (jeweils höchst signifikant).

Auffällig ist, dass nur beim Kommunikationsmedium Internet sehr viele Lehrkräfte (44 %) angeben, Kenntnisse zu besitzen, es aber nicht im Unterricht einsetzen. Erklärungen hierfür sind ein subjektiv hohes Kompetenzgefühl der Lehrkräfte aus der privaten Internetkommunikation, noch fehlende Einsatzmöglichkeiten für dieses Physikmedium oder das Fehlen von Physikräumen mit Internetanschluss. Herauszuheben ist auch, dass 24 % der Lehrkräfte keine Kenntnisse über die Modellbildung haben.

Schaut man, wie viele Lehrer was einsetzen (vereinzelt oder durchgehend) (siehe Tab. 1), so werden das Informationsmedium Internet, die PC-Messung und Simulationen am häufigsten im Unterricht eingesetzt. Es folgen IBEs, Modellbildung, Kommunikationsmedium Internet und an letzter Stelle die Videoanalyse. Der geringe Unterrichtseinsatz der Videoanalyse ist auf die mit Abstand geringsten Medienkenntnisse (45 % haben keine Kenntnisse) und

auf den sehr themenspezifischen Einsatz in der Mechanik zurückzuführen. Während 2004 noch 6,5 % angaben, noch nie den Computer im Physikunterricht eingesetzt zu haben, waren das 2009 nur noch 1 %.

3.3 Methodischer Einsatz

Die Lehrkräfte sollten auch noch angeben, ob sie die Software jeweils zur Demonstration durch die Lehrkraft einsetzen oder ob die Schüler sie selbst nutzen oder beides. Bei dieser Frage haben viele Lehrer auf eine Angabe verzichtet, obwohl sie sonst detailliert angaben, was sie wie intensiv nutzen. Dennoch zeigen die Daten (siehe Tab. 2), dass der Computer meist ein Werkzeug in der Hand des Lehrers für Demonstrationszwecke ist. Nur das Internet wird häufiger so benutzt, dass die Schüler selbst Informationen suchen oder mit dessen Hilfe kommunizieren.

Medium \ Einsatzart	Demonstration	Schüler-nutzung	kein Einsatz oder keine Angaben
PC-Messung	37 %	7 %	56 %
IBEs	26 %	16 %	58 %
Videoanalyse	16 %	8 %	76 %
Simulationen	40 %	12 %	48 %
Modellbildung	18 %	7 %	75 %
Infos übers Internet	27 %	37 %	36 %
Kommunikation Internet	5 %	13 %	82 %

Tab. 2: Einsatzart Unterfranken 2009 (N=98)

3.4 Interesse am Computereinsatz im Unterricht

Die Physiklehrer sollten außerdem ihr Interesse am Unterrichtseinsatz des Computers auf einer vierstufigen Skala (von „gering“ bis „hoch“ einschätzen) (siehe Abb. 3 und Abb. 4) angeben. Hohes und noch hohes Interesse besteht bei den Lehrkräften in absteigender Reihenfolge bei den Simulationen (82 %), der PC-Messung (72 %), IBEs (66 %), dem Internet als Informationsmedium (63 %), der Modellbildung (61 %), der Videoanalyse (48 %) und dem Internet als Kommunikationsmedium (29 %). Bei diesen Verteilungen gibt es kaum Unterschiede zwischen Unterfranken 2009 und Rheinland-Pfalz 2004.

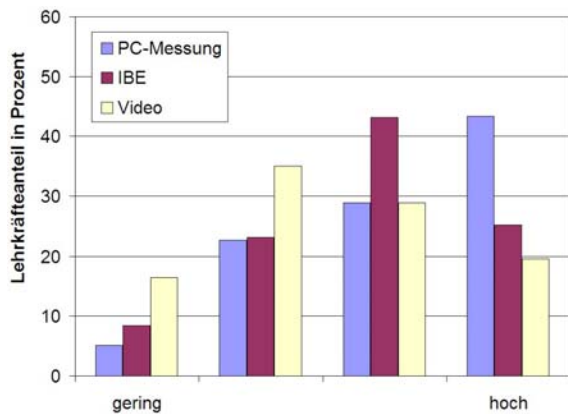


Abb. 3: Interesse am Unterrichtseinsatz von PC-Messwerterfassung (N = 97), Interaktive Bildschirmexperimente (N = 95) und Videoanalyse (N = 97)

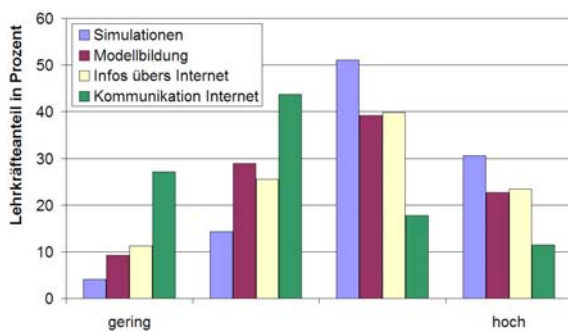


Abb. 4: Interesse am Unterrichtseinsatz von Simulationen (N = 98), Modellbildung (N = 97), Informationsmedium Internet (N = 98) und Kommunikation (N = 96)

4. Verwendete Produkte

Die Lehrkräfte sollten angeben, welche Soft- bzw. Hardware sie schon im Unterricht eingesetzt haben, wobei nicht zwischen früherem und aktuellem Einsatz unterschieden wurde. Auch die Intensität des Einsatzes wurde hier nicht berücksichtigt. Zu den angegebenen Softwareprodukten sind im Anhang Bezugsadressen für einen Download bzw. für weitere Informationen aufgelistet.

4.1 Verwendete Messwerterfassungssysteme

Die Messwerterfassung ist der älteste Einsatzbereich des Computers im Physikunterricht und auch typisch für den Physikunterricht [3].

Wie Tabelle 3 zeigt, haben zwei Drittel der Lehrer bereits „Cassy“ eingesetzt, was nur durch die Marktmacht der Herstellerfirma in Deutschland zu erklären ist.

Ein Viertel der unterfränkischen Lehrkräfte gibt an, schon „PAKMA“ zum Messen genutzt zu haben, wobei nicht sicher ist, dass alle auch wirklich damit gemessen haben. Hier handelt es sich sicher um einen regionalen Effekt, da „PAKMA“ an der Universität Würzburg entwickelt wurde, und hier handelt es sich wahrscheinlich meist um früheren, nicht aktuellen Einsatz.

Messwerterfassungssysteme		
Umfrage	Unterfranken 2009, N=98	Rheinland-Pfalz 2004, N=293
Name (Firma)		
Cassy (Leybold)	63 %	53 %
PAKMA (Uni Würzburg)	24 % ***	2 %
DataStudio (Pasco)	17 % ***	0 %
Cobra/measure (Phywe)	2 %	4 %
Coach (CMA)	1 %	0 %
Lab Pro (Vernier)	0 %	2 %
DiBox	0 %	2 %
CBL (Texas Instruments)	0 %	1 %
CorEx (Cornelsen)	0 %	1 %
Eigenbau	0 %	1 %

Tab. 3: Von Lehrkräften eingesetzte Messwerterfassungssysteme (Signifikante Unterschiede gemäß χ^2 -Test, *: p=0,05, **: p=0,01, ***: p=0,001)

Von der sehr guten Software „DataStudio“ von Pasco, das in den USA eine Standardsoftware zur Messwerterfassung ist, gibt es erst seit wenigen Jahren eine deutschsprachige Version für Windows-Rechner, so dass sich hier der Unterschied in den beiden Erhebungen durch den Erhebungszeitpunkt erklärt.

4.2 Verwendete Videoanalyseprogramme

Die digitale Videoanalyse von Bewegungen ist im Vergleich zu den Messwerterfassungssystemen eine relativ neue Möglichkeit des Computereinsatzes, die sich aber auf die Erfassung von Bewegungen aller Art beschränkt. So ist es auch verständlich, dass dies bisher von deutlich weniger Lehrern im Unterricht eingesetzt wurde.

Videoanalyseprogramme		
Umfrage	Unterfranken 2009, N=98	Rheinland-Pf. 2004, N=293
Name (Quelle)		
AVA (Uni Würzburg)	13 % ***	0,3 %
Galileo (klett-Verlag)	11 %	5,5 %
measure Dynamics (Phywe)	7 % ***	0,0 %
Viana (Uni Essen)	7 % **	1,7 %
VideoAnalyzer (Schroedel)	4 % ***	0,0 %
DiVA (Uni Augsburg)	3 %	1,0 %
Coach (CMA)	1 %	0,3 %
Easyvid (Heinrichs)	1 %	0,0 %
ViMPS (Uni Mainz)	0 % *	6,1 %
David (Uni München)	0 %	1,0 %

Tab. 4: Von Lehrkräften eingesetzte Videoanalyseprogramme (Signifikante Unterschiede gemäß χ^2 -Test, *: p=0,05, **: p=0,01, ***: p=0,001)

Gerade bei der Videoanalyse zeigen sich sehr stark regionale Effekte (siehe Tab. 4). Das Videoanalyse-Programms „ViMPS“ wurde an der Universität Mainz entwickelt und in Lehrerfortbildungen in Rheinland-Pfalz bekannt gemacht, so dass es dort häufiger als alle anderen Programme benutzt wurde. „AVA“ und „Galileo“ wurden in Unterfranken entwickelt und dort in Lehrerfortbildungen bekannt gemacht, so dass diese dort mehr als alle anderen Programme benutzt wurden. Auch das recht neue Programm „measure Dynamics“ wurde in Unterfranken im Rahmen eines Forschungsprojektes bekannt gemacht [6]. „measure Dynamics“ und „VideoAnalyzer“ sind außerdem neue Programme, die es 2004 noch nicht gab.

4.3 Verwendete Simulationen

Bei den Simulationen wird eine sehr große Spanne von Produkten genutzt (siehe Tab. 5), wobei Applets von den meisten Lehrkräften eingesetzt wurden. Die stärkere Verwendung in Unterfranken 2009 gegenüber Rheinland-Pfalz könnte daran liegen, dass sich in den 4,5 Jahren die Computer-Kompetenzen der Lehrer verbessert haben bzw. jüngere Lehrer nachrückten, die dem Computer gegenüber aufgeschlossener sind. Die Unterschiede bei „PAKMA“ und „JPAKMA“ liegen wieder daran, dass diese Programme in Unterfranken an der Universität Würzburg entwickelt wurden.

Simulationen		
Umfrage Name	Unterfranken 2009, N=98	Rheinland-Pfalz 2004, N=293
Applets	55 % ***	33 %
PAKMA	29 % ***	8 %
Crocodile Physics/Clips	24 % **	13 %
DOS-Programme	19 %	17 %
JPAKMA	8 % ***	0 %
Interactive Physics	7 % *	3 %
CliXX Physik	7 %	6 %
Albert	6 % **	19 %

Tab. 5: Von Lehrkräften eingesetzte Simulationsumgebungen (Signifikante Unterschiede gemäß χ^2 -Test, *: $p=0,05$, **: $p=0,01$, ***: $p=0,001$)

4.4 Verwendete Modellbildungssysteme

Man kann die Vielfalt von Modellbildungssystemen nach der Art der Eingabe unterscheiden und erhält so drei Arten von Modellbildungsprogrammen:

1. Tabellenkalkulationsprogramme haben den Vorteil großer Verbreitung (Beispiel: Excel).
2. Gleichungsorientierte Programme fordern nur die Eingabe der wesentlichen Gleichung (Beispiele: Newton-II, Modellus 4).
3. Graphische Modellbildungsprogramme fordern alle Eingaben auf einer graphischen Oberfläche

(Beispiele: STELLA, Dynasys, Powersim, Coach, VisEdit/PAKMA, JPAKMA).

Des Weiteren kann man noch nach der Art der Ausgabe unterscheiden und erhält so zwei Arten von Modellbildungsprogrammen:

- a) Programme, die nur Diagramme ausgeben (Beispiele: Excel, Newton-II, STELLA, Dynasys, Powersim, Coach)
- b) Programme, die auch Animationen ausgeben können (Beispiele: VisEdit/PAKMA, JPAKMA, Modellus 4).

In Unterfranken wird von den meisten Lehrern angegeben, dass sie bereits „Excel“ genutzt haben (siehe Tab. 6). Hier liegt die Vermutung nahe, dass nicht alle wirklich Modellbildung mit „Excel“ betrieben haben, sondern „Excel“ anders einsetzen, z.B. zur Datenauswertung. Der hohe Anteil von „Excel“ liegt sicher auch an der seit dem Jahr 2000 in Bayern intensiv durchgeführten Lehrer-Fortbildungsinitiative "Intel Lehren für die Zukunft" (mit Unterstützung von Microsoft) [7], in der die Lehrer günstig die Microsoftprodukte sowie eine intensive, schulinterne Fortbildung in deren Bedienung bekamen.

Für die Verwendung eines Tabellenkalkulationsprogramms zur numerischen Berechnung spricht zwar neben der Verfügbarkeit der Software die Tatsache, dass diese aus dem Informatikunterricht bekannt ist, der in Bayern ab der sechsten Jahrgangsstufe Pflicht ist. Es besteht aber dabei die Gefahr, dass die Zusammenhänge nicht deutlich werden, da weder die Gleichungen noch Wirkungsgefüge sichtbar sind, und die Gefahr, dass durch eine große Betonung der mathematischen Vorgehensweise die qualitativen Betrachtungen und die physikalische Argumentation in den Hintergrund rücken.

Modellbildungssysteme		
Umfrage Name	Unterfranken 2009, N=98	Rheinland-Pfalz 2004, N=293
Tabellenkalkulation	63 % ***	2 %
VisEdit/PAKMA	17 % ***	2 %
Newton-II	15 % ***	0 %
JPAKMA	12 % ***	0 %
Dynasys	4 % ***	18 %
STELLA	1 %	4 %
Modus	0 % *	5 %
Moebius	0 %	3 %
Powersim	0 %	3 %
Coach	0 %	1 %

Tab. 6: Von Lehrkräften eingesetzte Modellbildungssysteme (Signifikante Unterschiede gemäß χ^2 -Test, *: $p=0,05$, **: $p=0,01$, ***: $p=0,001$)

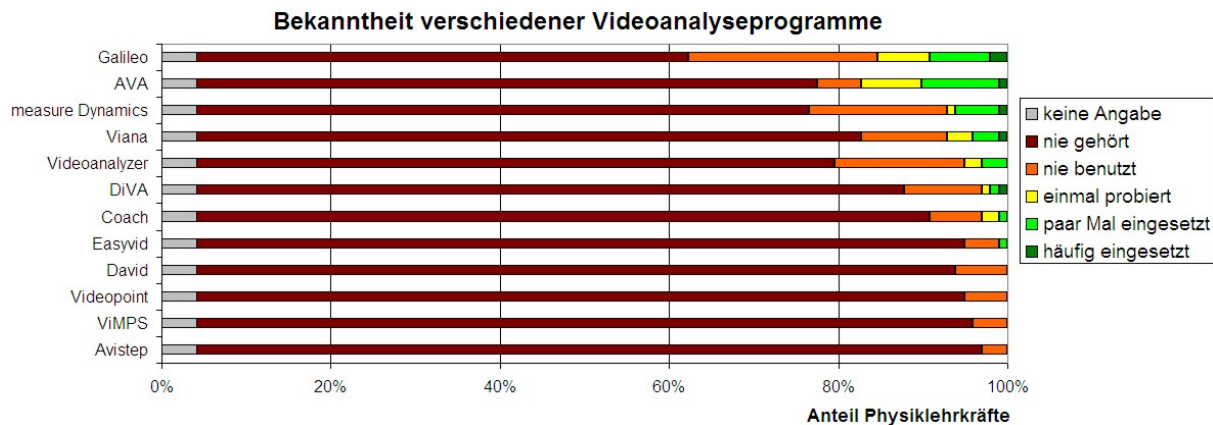


Abb. 5: Bekanntheit verschiedener Videoanalyseprogrammen bei unterfränkischen Physiklehrern (N = 98)

Auch bei den Modellbildungssystemen zeigen sich wieder sehr stark regionale Effekte (siehe Tab. 6). Die Software „VisEdit“ zu „PAKMA“ sowie die Software „JPAKMA“ wurden wie gesagt an der Universität Würzburg entwickelt, während „Newton-II“ von einem unterfränkischen Lehrer entwickelt wurde, so dass beides in Unterfranken über Lehrerfortbildungen bekannt gemacht wurde. In Rheinland-Pfalz wurde dagegen Dynasys in Lehrerfortbildungen bekannt gemacht. Positiv formuliert bedeutet dies, dass die in Lehrerfortbildungen vorgestellten Programme auch im Unterricht eingesetzt werden, wobei hier keine Aussage über die Intensität getroffen ist.

5. Weiteres zur Videoanalyse

Das unbekannteste und am wenigsten eingesetzte Medium ist die Videoanalyse - trotz der Verfügbarkeit kostenloser Videoanalyseprogramme und Videos. Deshalb sollte der Einsatz der Videoanalyse genauer untersucht werden.

5.1 Bekanntheitsgrad verschiedener Programme

Bei den Videoanalyseprogrammen haben die meisten Lehrkräfte von den meisten Programmen noch nie etwas gehört (siehe Abb. 5). Der Produktname „Galileo“ ist in Unterfranken am bekanntesten (38 %). Am meisten probiert oder eingesetzt wurde aber „AVA“ (insgesamt 17 %), das Freeware war und in Würzburg in Lehrerfortbildungen bekannt gemacht wurde. Der Nutzungszeitraum der Software ist aber abgelaufen, so dass es nicht mehr nutzbar ist,

denn der Programmierer hat es weiterentwickelt zu „measure Dynamics“. Softwareprodukte, die bekannt sind, aber nie probiert wurden, sind die, hinter denen deutsche Firmen stehen, wie „Galileo“ (Klett), „measure Dynamics“ (Phywe) und „Videoanalyzer“ (Schroedel).

5.2 Vorstellungen zur Einsatzweise

Nun kann man die Videoanalyse recht unterschiedlich im Unterricht einsetzen. Deshalb sollten die Lehrkräfte ihren Einsatz auf einer fünfstufigen Skala zwischen zwei Extremen einschätzen. Interessanterweise gab auch gut die Hälfte der Lehrkräfte, die noch nie Videoanalyse eingesetzt haben, hier ihre Vorstellung an, die sich meist kaum von den Nutzern unterscheidet. In Abb. 6 sind die Angaben der 30 Lehrer, die Videoanalyse einsetzen und diese Items beantworteten.

Es geht die Tendenz dahin, dass nur der Lehrer an einem Rechner mit Beamer die Videoanalyse vorführt und die Schüler dies weder im Unterricht noch zu Hause selbst machen können. Die Mehrheit ist dabei der Meinung, dass das Video im Unterricht aufgenommen werden sollte und man kein vorhandenes nehmen sollte. Ausgeglichenheit herrscht zwischen den beiden Meinungen, dass man mit der Videoanalyse eher die wichtigen grundlegenden Versuche analysiert oder sie für spezielle vertiefende Themen nutzt.

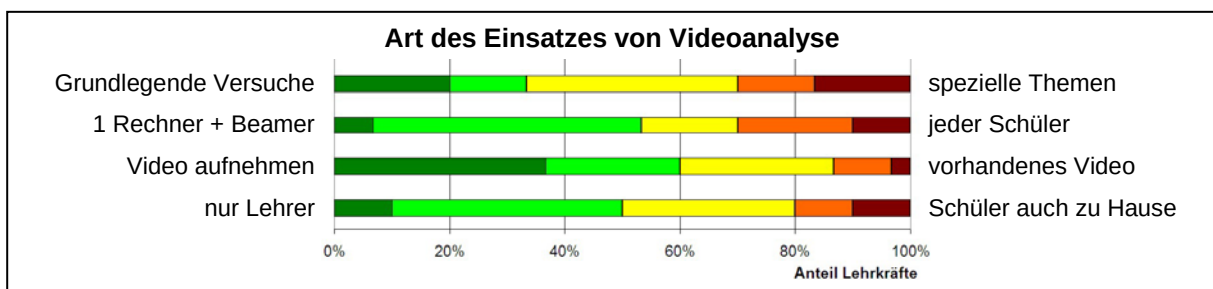


Abb. 6: Art des Einsatzes von Videoanalyse (N = 30)

5.3 Informationsquellen

Nach [3] sind Gründe für einen mangelnden Computereinsatz eine schlechte Hard- und Software-Ausstattung, mangelnde Ideen für einen sinnvollen Einsatz und eine subjektiv wahrgenommene Kompetenz. So muss man fragen, woher die Lehrkräfte Softwarehinweise, Unterrichtsideen und Bedienungskompetenzen bekommen. In Tab. 7 ist aufgelistet, welche Informationsquellen von Nutzern bzw. Nicht-Nutzern wie häufig genannt wurden (Mehrfachnennungen möglich). Überraschenderweise gibt es beim Studium, beim Lesen und bei Informationen von Kollegen keinen signifikanten Unterschied zwischen beiden Gruppen. Diesen gibt es nur beim Referendariat und vor allem bei Fortbildungen, was die Bedeutung von Fortbildungen unterstreicht.

Informationsquellen für Videoanalyse		
Quelle \ Gruppe	Nutzer, N=33	Nicht-Nutzer, N=62
Studium	39 %	21 %
Referendariat	48 % *	24 %
etwas gelesen	27 %	26 %
von Kollegen gehört	33 %	31 %
aus Fortbildungen	45 % ***	11 %

Tab. 7: Wo haben die Lehrkräfte etwas über Videoanalyse erfahren? (Signifikante Unterschiede gemäß χ^2 -Test, *: $p=0,05$, **: $p=0,01$, ***: $p=0,001$)

So ist es auch verständlich, dass 15 % der Lehrkräfte angeben, dass sie an einer angebotenen Fortbildung zu Videoanalyse auf jeden Fall teilnehmen würden und weitere 51 % angeben, dass sie daran vielleicht teilnehmen werden.

Nur bei der Videoanalyse findet man signifikante Abhängigkeiten vom Dienstalter. So haben von denen, die dazu etwas in ihrem Studium gehört haben, 59 % weniger als zehn Dienstjahre. Und von denen, die im Referendariat etwas zur Videoanalyse gehört haben, haben 74 % unter zehn Dienstjahre. Entsprechend haben auch von dem Drittel der Lehrer, die schon Videoanalyse einsetzen, 45 % unter zehn Dienstjahren.

6. Fazit

Es zeigt sich, dass der Computer heute ein Standardmedium im Physikunterricht ist, obwohl es große Unterschiede bei den verschiedenen Einsatzarten gibt. Es zeigt sich außerdem, dass es viele regionale Unterschiede gibt – insbesondere bei den konkret verwendeten Softwareprodukten. Die noch relativ junge Einsatzart der Videoanalyse zeigt eine signifikante Abhängigkeit von Erfahrungen in Fortbildungen, im Referendariat und vom Dienstalter.

Bekannt ist die Klage, die Effekte von Lehrerfortbildungen seien oft gering, d.h. das in einer Fortbildung

Kennengelernte werde im konkreten Unterricht kaum umgesetzt („träges Wissen“) [8+9]. Die Ergebnisse der Umfrage lassen jedoch darauf schließen, dass Fortbildungen entscheidend dafür sind, ob der Computer im Physikunterricht eingesetzt wird und vor allem dafür, welche Software eingesetzt wird. In diesem Bereich sind Fortbildungen nötig und haben Einfluss auf den Unterricht.

7. Literatur

- [1] Urhahne, D., Prenzel, M., von Davier, M., Senkbeil, M. & Bleschke, M. (2000): Computereinsatz im naturwissenschaftlichen Unterricht – Ein Überblick über die pädagogisch-psychologischen Grundlagen und ihre Anwendung – In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 6, S. 157 – 186
- [2] Schulz-Zander, R. (2003): Nationale Ergebnisse der internationalen IEA-Studie SITES Modul 2 - Second Information Technology in Education Study – In: www.ifs-dortmund.de/files/Projekte/sitesm2/sitesm2_Kurzfassungsschlussbericht4.pdf
- [3] Pietzner, V. (2009): Computernutzung bei Naturwissenschaftslehrkräften – In: Höttecke, D. (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDCP in Schwäbisch Gmünd 2008, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 29, Lit-Verlag, Münster, S. 185 – 187
- [4] Gröber, S.; Wilhelm, T. (2006): Empirische Erhebung zum Einsatz Neuer Medien bei Physik-Gymnasiallehrern in Rheinland-Pfalz: Arbeitsplatzausstattung und Mediennutzung – In: Nordmeier, V.; Oberländer, A. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Kassel 2006, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [5] Korneck, F.; Lamprecht, J. (2009): Quer- und Seiteneinsteiger in das Lehramt Physik – In: Höttecke, D. (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDCP in Schwäbisch Gmünd 2008, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 29, Lit-Verlag, Münster, S. 22 - 37
- [6] Wilhelm, T.; Waltner, C.; Hopf, M.; Tobias, V.; Wiesner, H. (2009): Der Einfluss der Sachstruktur im Mechanikunterricht - quantitative Ergebnisse zur Verständnis- und Interessenentwicklung – In: Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Bochum 2009, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [7] http://www.intel.com/cd/corporate/education/mea/deu/elem_sec/program/329744.htm
- [8] Mutzeck, W. (1988): Von der Absicht zum Handeln. Rekonstruktion und Analyse Subjektiver Theorien zum Transfer von Fortbildungsinhalten in den Berufsalltag, Weinheim

- [9] Haenisch, H. (1994): „Wie Lehrerfortbildung Schule und Unterricht verändern kann“, Nr. 26, Landesinstitut für Schule und Weiterbildung, Soest, www.lfs.nrw.de/lfb_schule_veraendern.pdf

8. Anhang: Bezugsadressen für die Softwareprodukte

1. Messwerterfassungssysteme:

Cassy-S: <http://www.leybold-didactic.de/software/index.html?cassy-s.html>
 PAKMA: <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/Mausfortbildung/software.htm> und <http://www.schroedel.de/suche/artikelansicht.xtp?id=3-507-10729-5>
 DataStudio: <http://store.pasco.com/forms/download.cfm?DID=9&downloadtype=DataStudio>
 Cobra4: <http://www.phywe.de/174/Schule/Loesungssysteme/Cobra4.htm>
 Coach: <http://www.cma.science.uva.nl/english/Software/index.html>
 Lab Pro: <http://www.dynatech.de/produkte/produkt.php?prod=907>
 DiBox: http://www.exphys.uni-linz.ac.at/didaktik/AHS_BHS/Dibox.htm
 CBL: http://education.ti.com/educationportal/sites/DEUTSCHLAND/productDetail/de_cbl_2.html
 CorEx: http://shop.corex.de/Sekundarstufe/Messen_mit_Sensoren/Software

2. Videoanalyseprogramme:

AVA: Das Freeware-Videoanalyseprogramm AVA wird nicht mehr weiterentwickelt. Inzwischen gibt es die Nachfolgesoftware mit dem Namen "measure Dynamics", weshalb AVA nicht mehr downloadbar ist.
 Galileo: <http://www.klett.de/sixcms/detail.php?id=196888&suche=Galileo&stat=faq&back=2>
 measure Dynamics: <http://www.phywe.de/141n110/Service/Downloads/Software.htm> und <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/mD.htm>
 Viana: <http://didaktik.physik.uni-essen.de/viana/>
 VideoAnalyzer: <http://www.schroedel.de/suche/reihenansicht.xtp?id=VIDANALY>
 DiVA: http://www.physik.uni-augsburg.de/did/content_german/software/diva.htm
 Coach: <http://www.cma.science.uva.nl/english/Software/index.html> und <http://www.klett.de/sixcms/list.php?page=suche&modul=produktdetail&isbn=3-12-772607-4>
 Easyvid: <http://www.g-heinrichs.de/software/physik.htm>
 ViMPS: <http://www.physik.uni-mainz.de/lehramt/vimps>
 David: Das Videoanalyseprogramm David wird nicht weiterentwickelt und ist nicht mehr downloadbar.

3. Simulationsprogramme:

PAKMA: <http://www.schroedel.de/suche/artikelansicht.xtp?id=3-507-10729-5> und <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/Mausfortbildung/software.htm>
 Crocodile Physics: http://www.crocodile-clips.com/de/Demos_deutsch
 JPAKMA: Für Offline-Versionen und die Vollversion des Programms wenden Sie sich bitte direkt an den Lizenzinhaber, das [FIZ CHEMIE Berlin](http://www.fiz-chemie-berlin.de) (Kontakt: info@chemistry.de).
 Interactive Physics: <http://www.design-simulation.com/ip/index.php>
 CliXX Physik: http://www.harri-deutsch.de/verlag/titel/treitz/s_1805.htm?clixx, http://www.harri-deutsch.de/verlag/titel/junglas/s_1808.htm?clixx und http://www.harri-deutsch.de/verlag/titel/bauerben/s_1719.htm
 Albert: <http://www.uni-online.de/artikel.php?link=3980>

4. Modellbildungsprogramme:

VisEdit/PAKMA: <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/Mausfortbildung/software.htm> und
<http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/modell/inhalt.htm>

Newton-II: <http://www.newton2.slueck.de>

JPAKMA: Für Offline-Versionen und die Vollversion des Programms wenden Sie sich bitte direkt an den Lizenzinhaber, das [FIZ CHEMIE Berlin](#) (Kontakt: info@chemistry.de).

Dynasys: <http://www.hupfeld-software.de/pmwiki/pmwiki.php?n=Main.Dynasys>

STELLA: <http://www.iseesystems.com>

Moebius: <http://www.mintext.de/moebius>

Powersim: <http://www.powersim.com/download>, Downloadmöglichkeit einer alten kostenfreien Light-Version unter <http://www.uni-klu.ac.at/~gossimit/pap.php?uk=7>

Coach: <http://www.cma.science.uva.nl/english/Software/index.html> und
<http://www.klett.de/sixcms/list.php?page=suche&modul=produktdetail&isbn=3-12-772607-4>

1.3 Die neue Videoanalysesoftware „measure dynamics“

Quelle:

WILHELM, T.: *Videoanalyse mit unterschiedlichen Darstellungsformen* - In: HÖTTECKE, D. (Hrsg.): *Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung*, Jahrestagung der GDGP in Schwäbisch Gmünd 2008, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 29, Lit-Verlag, Münster, 2009, ISBN 978-3-643-10010-8, S. 289 – 291

Und:

BENZ, M.; WILHELM, T.: *measure Dynamics – Ein Quantensprung in der digitalen Videoanalyse* – In: NORDMEIER, V.; GRÖTZEBAUCH, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik - Berlin 2008*, Lehmanns Media, Berlin, 2008, ISBN 978-3-86541-317-8

Inhalt und Bezug zum Thema:

Die digitale Videoanalyse von Bewegungen ist ein interessantes Werkzeug im Mechanikunterricht, wobei viele Programme in der Darstellung der Ergebnisse noch zu wünschen übrig lassen. Das neue Videoanalyse-Programm „measure dynamics“ kann nicht nur die Bewegungen mehrerer Objekte sehr einfach und automatisch erfassen, sondern viele verschiedene Darstellungsmöglichkeiten nutzen. Dazu gehören neben Liniendiagrammen in Echtzeit z.B. die automatische Erstellung von Stroboskopbildern, Serienbildern und Streifenbildern. Außerdem können Flächen, Linien und Pfeile etc. gemäß den physikalischen Größen dynamisch in das Video selbst eingeblendet werden (dynamisch ikonischen Repräsentationen). So können z.B. bei zweidimensionalen Bewegungen der vektorielle Charakter der Größen „Geschwindigkeit“, „Beschleunigung“ und „Kraft“ durch die Darstellung von bewegten Pfeilen betont werden. Das Video selbst kann sogar noch bearbeitet werden kann oder mit den Darstellungen exportiert werden. Es werden verschiedene Möglichkeiten der Software an ausgewählten Beispielen aufgezeigt.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Bei der Entwicklung und Verbesserung der Videoanalysesoftware „measure dynamics“ habe ich den Programmierer Dipl.-Phys. StR Michael Suleder beraten und viele Vorstellungen eingebracht. Schließlich habe ich die Software an die Lehrmittelfirma PHYWE vermittelt, die sie nun vertreibt. Als dies soweit war, habe ich mir Inhalt und Konzept einer Staatsexamensarbeit überlegt, in der verschiedene Versuche gefilmt und an Hand dieser Beispiele die neuen Möglichkeiten dieser Software aufgezeigt werden sollen. Für diese Staatsexamensarbeit habe ich per Aushang einen Studierenden gesucht und Herrn Benz gefunden. Schließlich habe ich dann mit Herrn Benz zusammen gearbeitet und ihn intensiv bei der Umsetzung der Ideen betreut.

Videoanalyse mit unterschiedlichen Darstellungsformen

Neue Möglichkeiten mit measure Dynamics:

Der Einsatz der digitalen Videoanalyse von Bewegungen ist heute in vielen Lehrplänen vorgesehen. Die gängigen deutschen Programme lassen aber bzgl. den Features der Software noch zu wünschen übrig. Mit „measure Dynamics“ ist ein neues Programm verfügbar, das eine deutliche Verbesserung darstellt und eine Vielzahl neuer Möglichkeiten bietet.

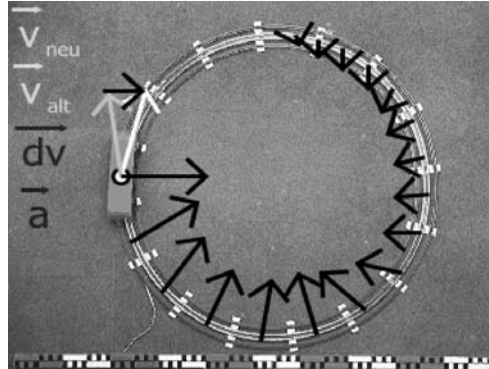
Exportiermöglichkeiten: Die bei der Analyse bestimmten Werte werden zunächst in einer Tabelle dargestellt. Aus den Pixel-Koordinaten werden über einen definierten Maßstab und über die aus der Frame-Rate des Videos bestimmten Zeiteinteilung die Größen Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung jeweils in x- und y-Richtung berechnet und ebenfalls in der Tabelle angezeigt. In weiteren Tabellenspalten können weitere Größen, wie z.B. der Geschwindigkeitsbetrag oder die kinetische Energie, berechnet werden. Alle Daten und Einstellungen, die in der Tabelle oder am Video vorgenommen werden, können als so genanntes „Projekt“ gespeichert werden. Diese Dateiensammlung kann dann über eine entsprechende Datei mit der Endung „prj“ aufgerufen werden. Die Tabellen, Bilder und sogar die bearbeiteten Videos können exportiert werden, so dass die Videos z.B. mit Vektoreinblendungen unabhängig von dieser Software auf einem PC gezeigt werden können.

Automatische Analyse: Eine deutliche Verbesserung gegenüber den bisherigen Programmen stellt die automatische Analyse dar, die neben der manuellen Analyse möglich ist. Diese automatische Analyse war bei den deutschen Videoanalyseprogrammen für den Physikunterricht bisher nur bei AVA und Viana möglich, dort aber nicht zufrieden stellend. Die automatische Analyse bei „measure Dynamics“ arbeitet mit Farb- und Bewegungsanalyse. Die Software erkennt dabei die geometrische Form und die Größe des zu analysierenden Objektes, auch wenn dieses rotiert. Diese automatische Analyse stellt besonders bei längeren Videos eine erhebliche Zeitersparnis dar. Eine große Bildanzahl ist z.B. nötig, um die Maxwell-Verteilung als statistische Verteilung zu zeigen. Dazu wurden z.B. mehrere Pucks auf verschiedenen Luftkissentischen gesetzt und die Bewegung eines einzigen rot markierten Pucks verfolgt, was als Modell eines zweidimensionalen Gases dienen kann. Die Geschwindigkeitsverteilung erfüllt dabei stets recht gut die Erwartungen. Ein Video mit über 2.000 Einzelbildern wurde in gut drei Minuten fehlerfrei analysiert.

Diagramme in Echtzeit: Von Vorteil ist es, dass von der Software Graphen synchron mit dem ablaufenden Video erstellt werden. Z.B. entstehen die Ortspunkte im Diagramm gleichzeitig mit der Bewegung des Objektes im Video und auch die Diagramme für Geschwindigkeit und Beschleunigung werden parallel zum Video erzeugt. So ist es einfacher zu erkennen, welche Phase im Video welchem Grafenteilstück entspricht und somit ist die Kluft zwischen der konkreten visuellen Darstellung des Bewegungsablaufes und seiner abstrakten grafischen Darstellung für den Lernenden leichter zu überbrücken. Zusätzlich zu diesen gemessenen Kurven können berechnete Kurven zum Vergleich eingeblendet werden. Jeder Zeitpunkt kann schnell angesprungen werden und man kann das Video mit den Darstellungen auch schrittweise ablaufen lassen.

Analyse mehrerer Objekte: Bei der Auswertung der Bewegungen mehrerer Objekte ist zunächst die Analyse für jedes Objekt einzeln durchzuführen. Sind alle Objekte von der Software erkannt und analysiert, kann die eigentliche Auswertung für alle Objekte gleichzeitig durchgeführt werden. Ein Beispiel wäre der Stoß zweier Wagen, deren Bewegungen nun gleichzeitig ausgewertet werden kann.

Dynamisch ikonische Repräsentation: Das Programm „measure Dynamics“ erlaubt außerdem mit wenig Aufwand die Darstellung dynamisch ikonischer Repräsentation von physikalischen Größen in Form von Säulen oder Vektorpfeilen (siehe Abb.). Zunächst ist es sinnvoll, Geschwindigkeits- und Beschleunigungspfeile jeweils an das bewegte Objekt anzuheften. Die einzelnen Darstellungen lassen sich dabei schnell zu oder wegschalten. Alternativ könnte man in das Video die Pfeile für die Größen Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung ortsfest einfügen, die sich entsprechend der Bewegung ändern. Die Darstellung der Größen als ortsfeste Pfeile ermöglicht leichter ein Erkennen des Zusammenhangs zwischen der Bewegung und der durch die Pfeile repräsentierten Größen. Zusätzlich wird der Vergleich der dargestellten Größen untereinander erleichtert.



Serienbilder: Des Weiteren können mit der Software Serienbilder erstellt werden. Dabei werden die verschiedenen Bilder eines Videos bzw. Ausschnitte automatisch nacheinander in eine Tabelle gesetzt und insgesamt als ein einziges Bild ausgegeben. So kann man leicht Arbeitsblätter für Schüler erstellen, mit denen diese eine Videoanalyse auf dem Papier durchführen können. Man braucht dazu nur die Zeitdifferenz zwischen zwei Teilbildern und eine Referenzlänge. Somit lässt sich das Serienbild nicht nur qualitativ nutzen, sondern auch quantitativ auswerten. Wählt man beim Serienbild zusätzlich den für die Erstellung verwendeten Bildausschnitt geschickt, nämlich als schmalen Streifen, kann damit auch ein Zeit-Ort-Diagramm erzeugt werden. Macht man ein Serienbild nur von den ortsfesten Pfeilen, z.B. von den Geschwindigkeitspfeilen, erhält man sogar ein t-v-Diagramm.

Stroboskopbilder: In zahlreichen Schulbüchern zum Physikunterricht sind Stroboskopbilder zu finden. Sie dienen zur Veranschaulichung von Bewegungsabläufen oder zur Darstellung beschleunigter Bewegungen. Aus einem in „measure Dynamics“ geladenen Video kann in wenigen Schritten ein Stroboskopbild erstellt werden. Zusätzlich können zahlreiche Einstellungen vorgenommen werden. Da das Programm das ganze Objekt vom Hintergrund trennt, ist es z.B. möglich, einen einfarbigen Hintergrund zu wählen. Um die Entstehung des Stroboskopbildes aus den einzelnen Frames des Videos besser erklären zu können, ist es zudem möglich, farbige Blitzlichter zu verwenden. Dabei können bis zu 64 verschiedene Farben genutzt werden. Während solche Stroboskopbilder früher nur aufwändig zu erstellen waren, geht es hier mit wenigen Mausklicks.

Auswertung von Bildern: Weniger wichtig ist die Möglichkeit, einzelne Bilder auszuwerten. Dazu gehört z.B., dass man die Anzahl von Ereignissen in einem Bild oder eine Länge oder einen Winkel messen kann.

Weitere didaktische Vorteile der Software:

Aufbereitete Videos von Versuchsvorgängen können dem Lehrer dabei helfen, Fehlkonzepte der Schüler durch die Konfrontation in Frage zu stellen und in Richtung der physikalischen Konzepte zu verändern. Sie können es erleichtern, das Phänomen und die zugrunde liegende physikalische Struktur eines Vorgangs miteinander zu verbinden. Dadurch wird die kognitive Belastung der Schüler gemäß der Cognitive Load Theorie verringert und der Lernprozess erleichtert. Die Kombination von Experiment mit dynamisch ikonischen Repräsentationen und Graphen (Multicodierung) ermöglicht es zudem, den Schülern das Lesen von Graphen zu vermitteln. Diese zeitliche und räumliche Kontiguität von Experiment und Graph hilft ihnen, an jedem Zeitpunkt des Versuchverlaufs die Verbindung zwischen den

beiden Darstellungsformen herzustellen. Ein weiterer Vorteil der Software ist die Möglichkeit, Größen zu visualisieren, die normalerweise mit dem Auge nicht sichtbar sind. Dabei handelt es sich um Größen wie „Energie“, „Geschwindigkeit“ oder „Beschleunigung“. Der vektorieller Charakter von Größen wird durch die Darstellung von bewegten Pfeilen betont und das Verständnis der Schüler bewusst in diese Richtung geschult.

Es ist sinnvoll, dass die Schüler auch selbst Videos analysieren. Bisherige Erfahrungen zeigen, dass dies gut funktioniert, da die Grundfunktionen einfach zu bedienen sind. Die Schüler haben dadurch die Chance, selbstständig und entdeckend zu lernen. Das Wissen wird für sie dadurch lebendiger und „persönlicher“. Im Unterricht kann ein Video mit der Software manuell oder automatisch analysiert werden, was in Gruppenarbeit im Computerraum oder von einer Person im Fachraum geschehen kann. Anschließend können die gewünschten Darstellungen erstellt oder einfacher aus einer Liste zugeschaltet werden. Da alle Einstellungen mit allen Darstellungen und Daten als ein „Projekt“ abgespeichert werden können, kann für weitere Beispiele auch einfach ein solches Projekt geöffnet werden. Dann kann die Software ohne erneute Analyse das Video gleich mit allen voreingestellten Repräsentationen darstellen. Schließlich kann das Video auch mit den dynamisch ikonischen Repräsentationen als avi-Datei exportiert werden und so ohne die Originalsoftware verwendet und als Lehrvideo gezeigt werden.

Anwendung bei der Einführung kinematischer Größen:

Es ist sinnvoll, die Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung im Mechanikunterricht an zweidimensionalen Bewegungen einzuführen. Zunächst kann die Bahnkurve gezeigt werden, z.B. indem man die Ortsmarken stempelt und dann die Geschwindigkeit als gerichtete Größe einführt. Zur Erarbeitung der Beschleunigung über die Geschwindigkeitsänderung kann der aktuelle Geschwindigkeitsvektor und der vorhergehende dargestellt werden (siehe Abb.). Ein Pfeil zeigt dann die Geschwindigkeitsänderung an, aus dem der Beschleunigungsvektor durch Division durch Δt entsteht. Durch diese Visualisierung kann der Schüler erkennen, dass die Beschleunigung immer in Richtung der Geschwindigkeitsänderung zeigt. Die Beschleunigung wird dadurch von Beginn an als Vektor gesehen. So kann man erkennen, dass die Beschleunigung bei konstantem Tempo immer nach innen in den Kreis Richtung Kreismittelpunkt zeigt. Ein Stempeln des Beschleunigungsvektors ist ganz besonders dann interessant, wenn das Tempo des Wagens variiert und die Beschleunigung neben der radialen Komponente noch eine tangentielle Komponente besitzt (in der Abb. in Vorwärtsrichtung). Erfahrungen mit der Software werden nun in einem Forschungsprojekt zur Mechanik in der Jahrgangsstufe 7 gemacht, in dem u.a. mit dieser Software gearbeitet wird. Auch hier sollen von Anfang an zweidimensionale Bewegungen betrachtet werden und die Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$ und deren vektorieller Charakter betont werden (Hopf et al., 2009). Bereits 2008 unterrichteten Lehrer die Mechanik in der siebten Jahrgangsstufe in ihrer gewohnten Form und im kommenden Jahr unterrichten dieselben Lehrer zur gleichen Jahreszeit nach dem veränderten Konzept. Um das eigens erstellte Schülerbuch vorher auf Unterrichtstauglichkeit zu testen, unterrichtet eine Erprobungsgruppe von 15 Lehrern in 20 Klassen ab Herbst 2008 im Raum Würzburg danach.

Literatur

- Benz, M.; Wilhelm, T. (2008): measure Dynamics – Ein Quantensprung in der digitalen Videoanalyse, DPG Berlin 2008
- Geßner, T.; Benz, M.; Wilhelm, T.: Maxwellverteilung im Modellgas mit der Videoanalyse – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58, Nr. 1, 2009
- Hopf, M.; Waltner, C.; Wilhelm, T.; Wiesner, H. (2009): Konzeption einer Vergleichsstudie zur Mechanik in der Jahrgangsstufe 7, GDGP Schwäbisch Gmünd 2008
- Michel, C.; Wilhelm, T. (2008): Lehrvideos mit dynamisch ikonischen Repräsentationen zu zweidimensionalen Bewegungen, DPG Berlin 2008

measure Dynamics – Ein Quantensprung in der digitalen Videoanalyse

Michael Benz, Thomas Wilhelm

Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Am Hubland, 97074 Würzburg

Kurzfassung

Die digitale Videoanalyse von Bewegungen ist mittlerweile ein verbreitetes Werkzeug im Mechanikunterricht, obwohl die gängigen Programme noch zu wünschen übrig lassen. Das neue Videoanalyse-Programm „measure Dynamics“ bietet demgegenüber eine Vielzahl neuer Möglichkeiten. So können die Bewegungen mehrerer Objekte sehr einfach und automatisch vom Programm erfasst werden und es können viele verschiedene Darstellungsmöglichkeiten genutzt werden. Dazu gehören z.B. die automatische Erstellung von Serienbildern, Stroboskopbildern sowie das Einblenden von Bildern, Linien und Pfeilen in das Video selbst, das sogar noch bearbeitet werden kann oder mit den Darstellungen exportiert werden kann.

In einer Staatsexamensarbeit wurden verschiedene Versuche gefilmt und an Hand dieser Beispiele die neuen Möglichkeiten dieser Software aufgezeigt. Es werden ausgewählte Beispiele aus dieser Arbeit präsentiert, deren Verwendung im Unterricht erläutert und die Vorteile dieser Möglichkeiten vorgestellt.

1. Digitale Videoanalyse mit „measure Dynamics“

Der Einsatz der digitalen Videoanalyse ist heute in vielen Lehrplänen vorgesehen. Als Messwerterfassungssystem eignet sie sich besonders für den Kinematik- und Dynamikunterricht. Insbesondere ermöglicht sie die Auswertung zweidimensionaler Bewegungen, durch deren Betrachtung sich nach WILHELM Fehlvorstellungen der Schüler im Bereich der Kinematik vermeiden lassen [4]. Die gängigen Programme, die in Deutschland verfügbar sind, lassen leider sowohl bezüglich der Qualität der Videoanalyse als auch bezüglich der Features der Software noch zu wünschen übrig. Mit „measure Dynamics“ ist ein neues Programm verfügbar, das diesbezüglich eine deutliche Verbesserung darstellt. Die Software bietet eine Vielzahl neuer Möglichkeiten.

Die bei der Analyse bestimmten Werte werden zunächst wie bei anderer Software auch in einer Tabelle dargestellt. Aus den Koordinaten, die das Programm in Pixeln angibt, werden über einen vorher definierten Maßstab die Größen Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung jeweils in x- und y-Richtung berechnet. Diese Größen werden gemeinsam mit einer über die Frame-Rate des Videos bestimmten Zeiteinteilung ebenfalls in der Tabelle angezeigt. Weitere Tabellenspalten können angelegt werden. Darin können weitere Werte, wie z.B. das Geschwindigkeitsquadrat berechnet werden.

Alle Daten und Einstellungen, die in der Tabelle oder, wie im Folgenden erläutert, am Video vorgenommen wurden, können als so genanntes „Projekt“ gespeichert werden. Diese Dateisammlung kann

dann über eine entsprechende Datei mit der Endung „prj“ aufgerufen werden.

Die Videos können auch mit allen Einstellungen und Veränderungen exportiert werden. So können z.B. Videos mit Vektoreinblendungen, wie sie von MICHEL gezeigt werden, unabhängig von der Software „measure Dynamics“ auf einem PC gezeigt werden [2].

2. Automatische Analyse bewegter Objekte

Eine deutliche Verbesserung gegenüber den bisherigen Programmen stellt die automatische Analyse dar. Diese war bei den deutschen Videoanalyseprogrammen für den Physikunterricht bisher nur bei AVA und Viana möglich. Die reine Farbanalyse von Viana führte oft zu schlechten Ergebnissen und erforderte eine manuelle Nachbearbeitung oder sogar eine komplette manuelle Analyse. Bei AVA wurde zwar das Objekt erkannt, es durfte aber nicht rotieren, was ebenfalls zu Problemen führte. Die automatische Analyse bei „measure Dynamics“ arbeitet mit Farb- und Bewegungsanalyse, wobei entweder je eine der beiden Analysearten oder eine gleichzeitige Analyse nach beiden Arten möglich ist. Die Software erkennt dabei die geometrische Form und die Größe des zu analysierenden Objektes, auch wenn dieses rotiert. Die automatische Analyse stellt besonders bei längeren Videos eine erhebliche Zeitersparnis dar.

Im Rahmen der Staatsexamensarbeit wurde ein Video mit über 2.000 Einzelbildern in gut drei Minuten fehlerfrei analysiert. Die große Bildanzahl war nötig, um die Maxwell-Verteilung als statistische Verteilung zu zeigen. Dazu wurden mehrere Pucks auf einem Luftkissentisch durch einen bewegten Rah-

men in ständiger Bewegung gehalten und die Bewegung eines einzigen rot markierten Pucks verfolgt, was als Modell eines zweidimensionalen Gases dienen kann. Die Geschwindigkeitsverteilung (Häufigkeit über Geschwindigkeitsbetrag) erfüllt dabei recht gut die Erwartungen (siehe Abb. 1).

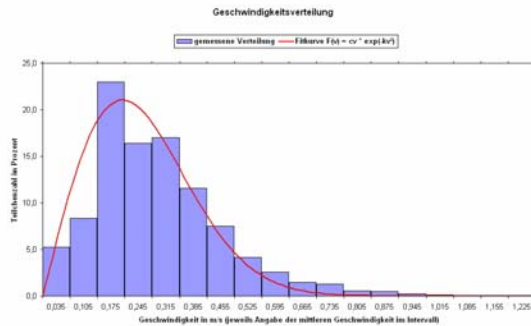


Abb. 1: Mit dem Luftkissentisch bestimmte Geschwindigkeitsverteilung

3. Analyse mehrerer bewegter Objekte

Bei der Auswertung der Bewegungen mehrerer Objekte mit „measure Dynamics“ ist zunächst die Analyse für jedes Objekt einzeln durchzuführen. Dazu wird jeweils ein eigenes Tabellenblatt angelegt. Sind alle Objekte von der Software erkannt und analysiert, kann die Auswertung für alle Objekte gleichzeitig durchgeführt werden. Die Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt aus einem Video mit der Rollenfahrbahn.

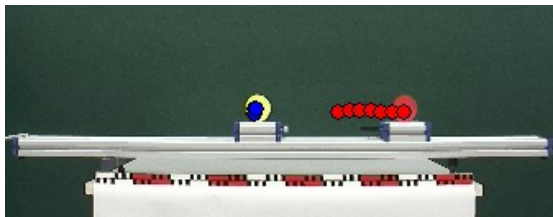


Abb. 2: Elastischer Stoß zweier Wagen

Im Versuch wurde dabei durch eine Feder am zweiten Wagen ein elastischer Stoß erreicht. Der abgebildete Videoausschnitt zeigt die Wagen gleicher Masse nach dem Stoß, was an der gestempelten Spur des zweiten Wagens zu erkennen ist. Die Bewegungen der beiden Wagen können nun gleichzeitig ausgewertet werden.

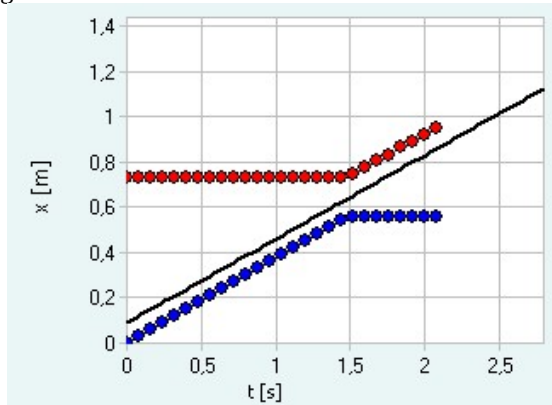


Abb. 3: t-x-Diagramm zum Versuch in Abb. 2

Als Beispiel für eine solche Auswertung ist in Abbildung 3 das Zeit-Ort-Diagramm der beiden Wagen gezeigt. Die schwarze Hilfsgerade wurde in „measure Dynamics“ eingefügt. Sie dient zur Verdeutlichung der Steigung, die für beide Wagen vor bzw. nach dem Stoß gleich ist. Somit lässt sich auf gleiche Geschwindigkeiten vor und nach dem Stoß schließen. Natürlich kann auch direkt das Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm betrachtet werden. Es ist in Abbildung 4 zu sehen. Man erkennt darin Sprünge in den Bereichen der eigentlich konstanten Geschwindigkeiten nach dem Stoß. Diese Sprünge entstehen durch das Differenzieren zur Bestimmung der Geschwindigkeiten aus den gemessenen Ortspunkten. Bereits kleine Abweichungen im Ort werden beim Differenzieren deutlich sichtbar. Daher sind diese scheinbaren Fehler erklärbar. In dem t-v-Diagramm ist der Stoßprozess klar erkennbar. Im Unterricht könnten solche Diagramme zur Erklärung der Vorgänge bei elastischen Stößen verwendet werden.

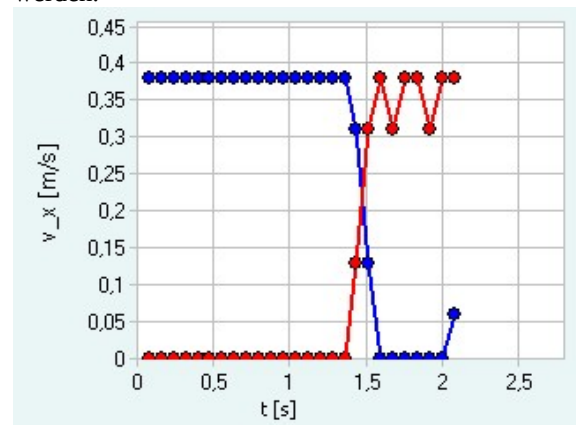


Abb. 4: t-v-Diagramm zum Versuch in Abb. 2

4. Diagramme in Echtzeit

Von Vorteil ist es, wenn Graphen synchron mit dem ablaufenden Experiment oder Video entstehen. „Dann ist es einfacher zu erkennen, welche Phase im Video welchem Grafenteilstück entspricht und somit ist die Kluft zwischen der konkreten visuellen Darstellung des Bewegungsablaufes und seiner abstrakten grafischen Darstellung für den Lernenden leichter zu überbrücken.“ [3]. Die Software „measure Dynamics“ bietet diese Möglichkeit der Erstellung von Diagrammen in Echtzeit. Im Folgenden wird dies an Hand eines Beispiels erläutert. In Abbildung 5 ist ein Schnappschuss aus einem Video zum Federpendel zu sehen. Zur Verdeutlichung der Bewegungsrichtung wurde eingestellt, dass die blaue Ortsmarkierung der letzten vier Einzelbilder zu sehen ist. In Abbildung 6 ist das parallel dazu entstehende t-y-Diagramm zu sehen.

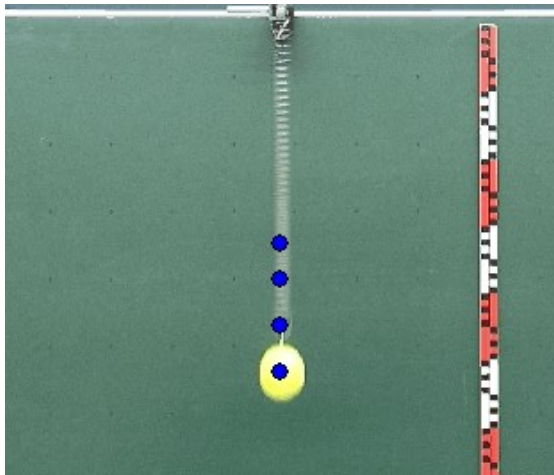
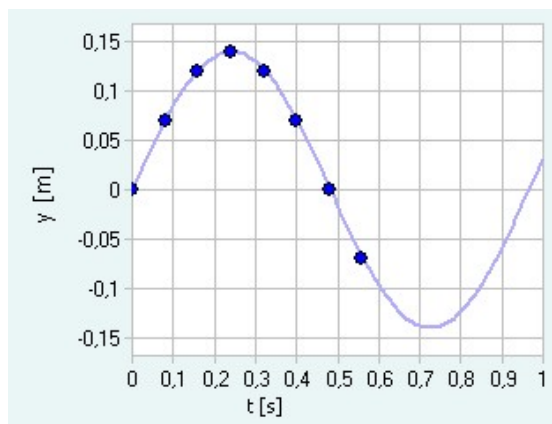


Abb. 5: Video zum Federpendel

Abb. 6: t-y-Diagramm passend zu Abb. 5
(Punkte werden mit Video gezeichnet,
zusätzlich ausblendbare Fitkurve)

Die dunkelblauen Messpunkte zeigen die y-Koordinate des Pendelkörpers zur Zeit t. Die hellblaue Sinuskurve ist eine Fitkurve, die mit wenigen Mausklicks ein- bzw. ausgeblendet werden kann. Sie dient zur Verdeutlichung der Sinusschwingung. Entscheidend ist bei diesem Diagramm, dass die Ortspunkte des Pendelkörpers im Diagramm synchron mit der Bewegung des Pendels im Video entstehen. Zum Zeitpunkt des Schnappschusses lief das Video also etwa 0,55 Sekunden, was man aus dem Diagramm in Abbildung 6 ablesen kann.

Weiterführend können dann Diagramme für Geschwindigkeit und Beschleunigung ebenfalls in Echtzeit parallel zum Video erzeugt werden (mit oder ohne Fitkurve). Diese beiden Diagramme sind in den Abbildung 7 bzw. Abbildung 8 gezeigt. Für das t-v-Diagramm wurde die alleinige Darstellung der Messpunkte gewählt. In dem t-a-Diagramm in Abbildung 8 wurden die Messpunkte gezeichnet und miteinander zum Liniendiagramm verbunden (ohne Fitkurve).

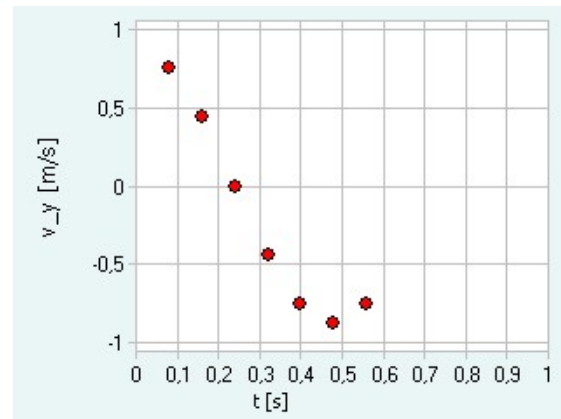
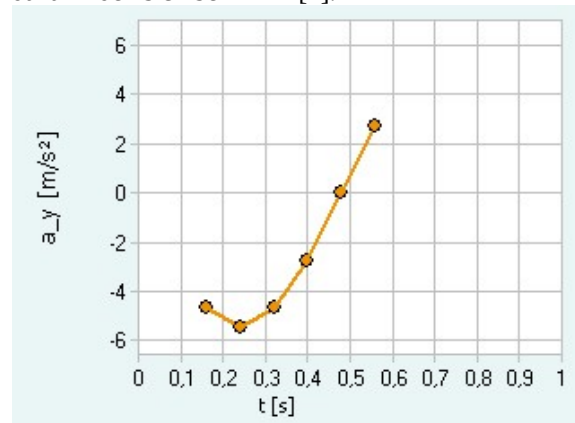


Abb. 7: t-v-Diagramm in Echtzeit (nur Punkte)

Die Erzeugung der Diagramme synchron zu dem parallel ablaufenden Video ermöglicht die Verwendung der Videoanalyse zur Einführung des Prinzips der graphischen Darstellung im Unterricht. Ideen dazu finden sich bei BENZ [1].

Abb. 8: t-a-Diagramm in Echtzeit
(Punkte mit Linie, ohne Fitkurve)

5. Dynamisch ikonische Repräsentationen

Das Programm „measure Dynamics“ erlaubt mit wenig Aufwand die Darstellung dynamisch ikonischer Repräsentation von physikalischen Größen in Form von Vektorpfeilen. Eine genaue Beschreibung dieser Art der Darstellung und zahlreiche Beispiele für den Einsatz im Unterricht, die mit „measure Dynamics“ erstellt wurden, finden sich bei MICHEL [2]. Dort sind Geschwindigkeits- und Beschleunigungspfeile jeweils an das bewegte Objekt geheftet. Ein weiteres Beispiel zeigt Abbildung 9 [1]. In das Video zum Federpendel wurden ortsfeste Vektoren für die Größen Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung eingefügt, die sich entsprechend der Pendelbewegung ändern. Die Darstellung der Größen als ortsfeste Vektoren erlaubt ein einfaches Erkennen des Zusammenhangs zwischen der Bewegung des Pendels und der durch die Vektoren dynamisch repräsentierten physikalischen Größen. Zusätzlich wird der Vergleich der dargestellten Größen untereinander erleichtert [6].

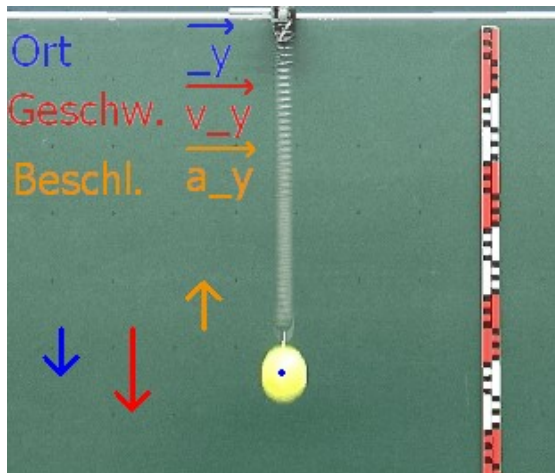


Abb. 9: Video mit ortsfesten Vektoren

6. Serienbilder

Unter dem Menüpunkt „Export“ können mit der Software Serienbilder erstellt werden. Dabei werden die verschiedenen Bilder eines Videos nacheinander in eine Tabelle gesetzt und insgesamt als ein einziges Bild ausgegeben, mit dem z.B. eine Videoanalyse auf dem Papier möglich ist.

Bei zusätzlich geschickter Wahl des für die Erstellung verwendeten Bildausschnittes kann damit auch ein Zeit-Ort-Diagramm erzeugt werden. In der Abbildung 10 ist ein solches Serienbild (als „Streifenbild“) zu sehen, das aus einem Video zu Bahrdtschen Fallkegeln erstellt wurde.

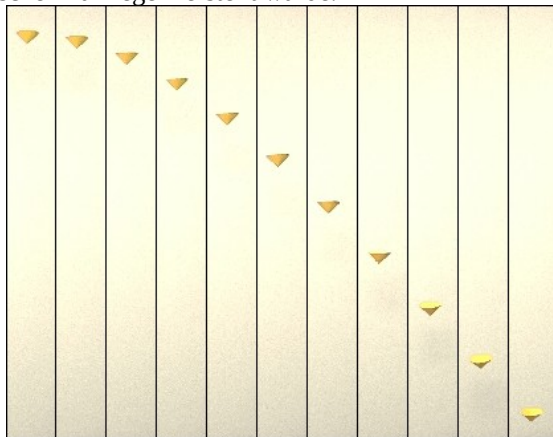


Abb. 10: Serienbild eines Bahrdtschen Fallkegels aus measure Dynamics

Die Fallkegel wurden nach der Anleitung aus [5] gebaut. Aus der Tabelle kann die Zeitdifferenz zwischen zwei Streifen abgelesen werden. Über die Option „Messen“ kann der Höhenunterschied zwischen dem ersten und dem letzten Streifen bestimmt werden. Somit lässt sich das Serienbild nicht nur qualitativ nutzen, sondern auch quantitativ auswerten. Dabei bietet sich bei einer Verwendung des Bildes auf einem Arbeitsblatt eine Nachbearbeitung des exportierten Serienbildes an, wie sie in Abbildung 11 zu sehen ist. Durch die Skalierung des Bildes wird dem Schüler die Auswertung, z.B. die Bestimmung der Durchschnittsgeschwindigkeit aus der

Steigung der sich im Verlauf bildenden Geraden, erleichtert. Eine solche Auswertung ergibt hier für die zweite Bewegungsphase eine Durchschnittsgeschwindigkeit von $v = 2,50 \text{ m/s}$.

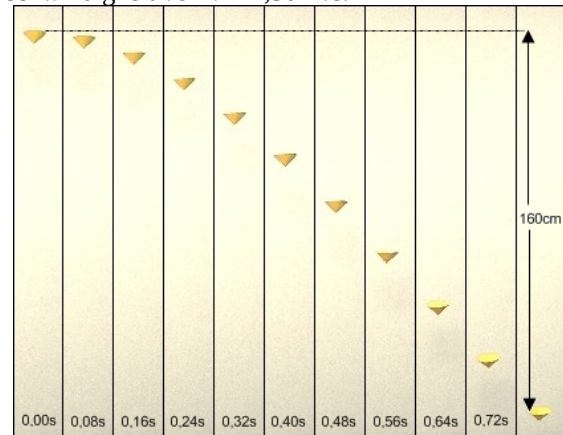


Abb. 11: Nachträglich bearbeitetes Serienbild als Arbeitsblatt

In Abbildung 12 ist ein anderes Serienbild einer horizontalen Bewegung zu sehen. Es zeigt die Fahrt eines Wagens auf einer reibungsarmen Demo-Rollenfahrbahn. In der Mitte der Fahrbahn stößt der Wagen inelastisch mit einem zweiten Wagen gleicher Masse. Nach dem Stoß bewegt sich der so entstandenen Wagen mit der halben Anfangsgeschwindigkeit weiter. Bei der Betrachtung ist zu beachten, dass die Zeitachse nun von oben nach unten verläuft.

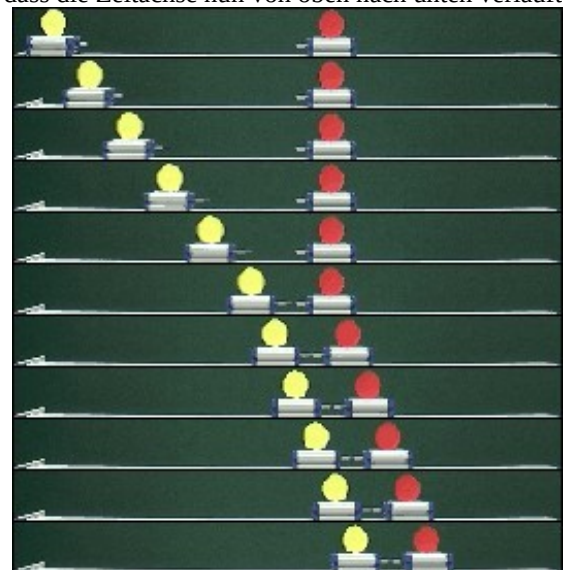


Abb. 12: Serienbild einer horizontalen Bewegung

7. Stroboskopbilder

In zahlreichen Schulbüchern zum Physikunterricht sind Stroboskopbilder zu finden. Sie dienen zur Veranschaulichung von Bewegungsabläufen oder zur Darstellung beschleunigter Bewegungen. Aus einem in „measure Dynamics“ geladenen Video kann in wenigen Schritten ein Stroboskopbild erstellt werden. Ein solches Stroboskopbild eines aufspringenden Tennisballes zeigt Abbildung 13.

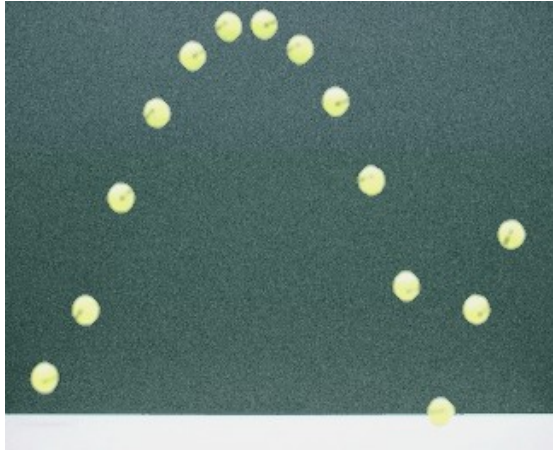


Abb. 13: Stroboskopbild eines aufspringenden Balles

Zusätzlich können zahlreiche Einstellungen vorgenommen werden. So ist es z.B. möglich, einen einfarbigen Hintergrund zu wählen. In Abbildung 14 wurde beim gleichen Video ein blauer Hintergrund gewählt, um einen guten Kontrast zu dem gelben Tennisball zu erreichen.

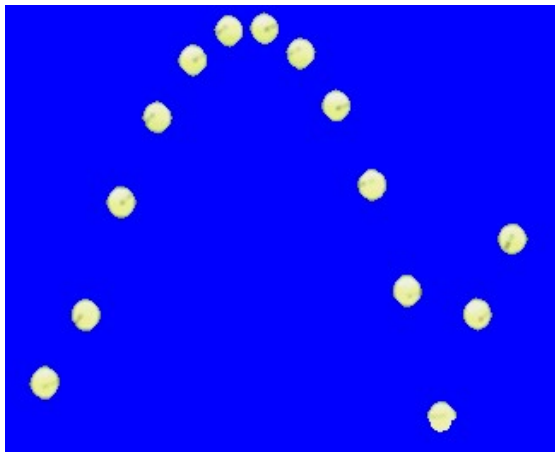


Abb. 14: Einfarbiger Hintergrund bei einem Stroboskopbildern

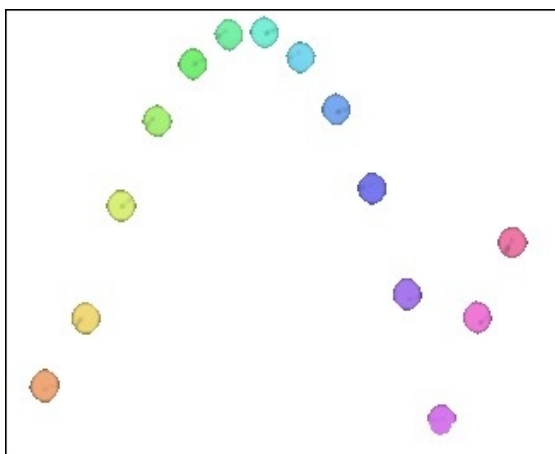


Abb. 15: Stroboskopbild mit farbigen Blitzlichtern

Um die Entstehung des Stroboskopbildes aus den einzelnen Frames des Videos besser erklären zu

können, ist es zudem möglich, farbige Blitzlichter zu verwenden. Dabei können bis zu 64 verschiedene Farben genutzt werden. Eine solche Darstellung ist in Abbildung 15 zu sehen. Dabei wurde ein einfarbig weißer Hintergrund gewählt. So kann ein guter Kontrast zu allen verwendeten Farben erzielt werden.

8. Weitere Beispiele auf der Tagungs-CD

Auf der Tagungs-CD befindet sich die vollständige Staatsexamensarbeit mit weiteren Beispielen und Anwendungsmöglichkeiten der digitalen Videoanalyse im Physikunterricht [1]. In der Arbeit ist u.a. die quantitative Betrachtung der Bahrdtschen Fallkegel vorgestellt. In einem weiteren Kapitel ist ein Versuch zur Erzeugung der Maxwellschen Geschwindigkeitsverteilung mit einem Luftkissentisch gezeigt. Zudem bietet sie Hinweise und Empfehlungen zum Erstellen eigener Videos für die digitale Analyse.

Außerdem befinden sich auf dieser Tagungs-CD drei exportierte Videos als avi-Dateien. Ein Video zum Federpendel zeigt die ortsfesten Vektoren, wie sie in Abbildung 9 zu sehen sind. Ein Video zur Rollenfahrbahn kann zur Einführung von Diagrammen genutzt werden. In einer weiteren avi-Datei ist ein Ausschnitt aus dem Video zur Bestimmung der Maxwellschen Geschwindigkeitsverteilung beigelegt.

9. Literatur

- [1] BENZ, Michael (2008): Digitale Videoanalyse von Bewegungen – Neue Möglichkeiten mit der Software „measure Dynamics“. In: Nordmeier, V.; Oberländer, A.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, auf dieser Tagungs-CD
- [2] MICHEL, Christine; WILHELM, Thomas (2008): Lehrvideos mit dynamisch ikonischen Repräsentationen zu zweidimensionalen Bewegungen, In: Nordmeier, V.; Oberländer, A.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [3] WILHELM, Thomas; GEßNER, Thomas; SULEDER, Michael; HEUER, Dieter (2003): Sportaktivitäten vielseitig analysieren und modellieren. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 52, 2, S. 23-30
- [4] WILHELM, Thomas; HEUER, Dieter (2002): Fehlvorstellungen in der Kinematik vermeiden. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 51, 7, S. 29-34
- [5] WILHELM, Thomas (2000): Der alte Fallkegel – modern behandelt. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik 49, 6, S. 28-31
- [6] WILHELM, Thomas (2005): Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung, Studien

zum Physik- und Chemielernen, Band 46, Berlin, Logos Verlag

10. Danksagung

Besonderer Dank gilt der Firma Phywe und insbesondere Herrn Dr. Markus Grumann für die Bereitstellung der Software „measure Dynamics“ und zahlreicher Versuchsaufbauten, sowie Dipl.-Phys. StR z.A. Herrn Michael Suleder, dem Programmierer der Software, für die Unterstützung bei technischen Fragen und Problemen.

11. Adresse

Michael Benz, AR Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut der Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, Tel. 0931/888-5788,
wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de
michael.benz@stud-mail.uni-wuerzburg.de
www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm

2. Neue Möglichkeiten im Mechanikunterricht

2.1 Videoanalysen von Hochgeschwindigkeitsvideos

Quelle:

MICHEL, M.; WILHELM, T.: Dynamik mit Hochgeschwindigkeitsvideos - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 59, Nr. 7, 2010, S. 23 - 30

Inhalt und Bezug zum Thema:

Anfang 2008 wurde von Casio mit der EX F1 die erste auch für Schulen bezahlbare Hochgeschwindigkeitskamera vorgestellt. Weitere Modelle folgten kurz darauf, sodass inzwischen digitale Kameras mit Hochgeschwindigkeitsfunktion bereits für ca. 100 € erhältlich sind. Bei schnell ablaufenden Vorgängen oder Vorgängen mit kurzen großen Beschleunigungen ist damit im Gegensatz zu normalen Videos eine quantitative Videoanalyse möglich, da wesentlich mehr Daten zu Verfügung stehen. Kann die Videoanalysesoftware auch Pfeile für physikalische Größen ins Video einzeichnen, ermöglicht es zusätzlich qualitative Betrachtungen und eine zweidimensionale Behandlung der Mechanik. Betrachtete Vorgänge sind der Kugelstoß, der waagrechte Wurf, Stöße, die Fallbewegung und der Looping.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Ich habe mir Inhalt und Konzept einer Staatsexamensarbeit überlegt, in der Versuche für die Schule überlegt, gefilmt und mit measure dynamics ausgewertet werden sollten. Für diese Staatsexamensarbeit habe ich per Aushang einen Studierenden gesucht. Schließlich habe ich dann mit Herrn Michel zusammen gearbeitet und ihn intensiv bei der Umsetzung der Ideen betreut. Für den Artikel hat Herr Michel die Videos gedreht und ich habe die Bilder erstellt und den größten Teil der Texte geschrieben.

Weitere Veröffentlichung:

Teile dieses Artikel, der in der Fachzeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule“ erschien, ist (z.T. ausführlicher) auch erschienen in:

MICHEL, M.; WILHELM, T.: *Einsatzmöglichkeiten von Hochgeschwindigkeitskameras im Physikunterricht* - In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Hannover 2010, 2010, www.phydid.de

Dynamik mit Hochgeschwindigkeitsvideos

M. Michel u. T. Wilhelm

1. Hochgeschwindigkeitskameras

Unter einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme versteht man Aufnahmegeschwindigkeiten von mehr als 30 Bildern pro Sekunde. Digitale Hochgeschwindigkeitskameras gibt es schon seit längerem und sie wurden vor allem im wissenschaftlichen Rahmen eingesetzt. Die „Pixelmanie“ und der High-Definition-Boom, die großen Fortschritte in der Entwicklung der Sensoren und vor allem die Verbesserung der CMOS-Sensoren haben letztendlich ermöglicht, dass kompakte Foto- und Videokameras „Slow-Motion“ und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zu einem bezahlbaren Preis machen können. Einige wenige Camcorder bieten so genannte „Slow-Motion“-Aufnahmen an, das heißt, ihre Bildrate wird von etwa 25 auf ca. 100 fps¹ erhöht. Dies ist aber in der Regel nur für eine sehr kurze Zeit möglich.

Casio hat 2008 mit der „Casio EX-F1“ eine völlig neue Art von Bridge-Kamera geschaffen. Sie schlägt nicht nur die Brücke zwischen kompakter Kamera und Spiegelreflexkamera, sondern auch die Brücke zwischen Fotoapparat und Videokamera sowie zwischen HD-Videokamera und Highspeed-Kamera. Durch den schnellen Prozessor und dem Einschränken der Bildauflösung kann sie mit fast unbegrenzter Aufnahmezeit 30 fps, 300 fps, 600 fps oder sogar 1200 fps aufnehmen. Das alles bei einem Preis von 799 € UVP. Der EX-F1 folgten weitere Modelle. Aktuell gibt es fünf weitere, verschiedene Kameratypen von Casio, die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit bis zu 1000 fps machen können [1]. Die günstigsten Modelle, z. B. die EX-FS10, werden neu für nur ca. 100 € im Internet gehandelt.

Die Kameras sind sehr vielseitig und können neben den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen auch normale Videos und Fotos aufnehmen. Damit sind solche Kameras prädestiniert für den Einsatz im zeitgemäßen Physikunterricht [2], für den z. B. der Lehrplan in Bayern u. a. auch die

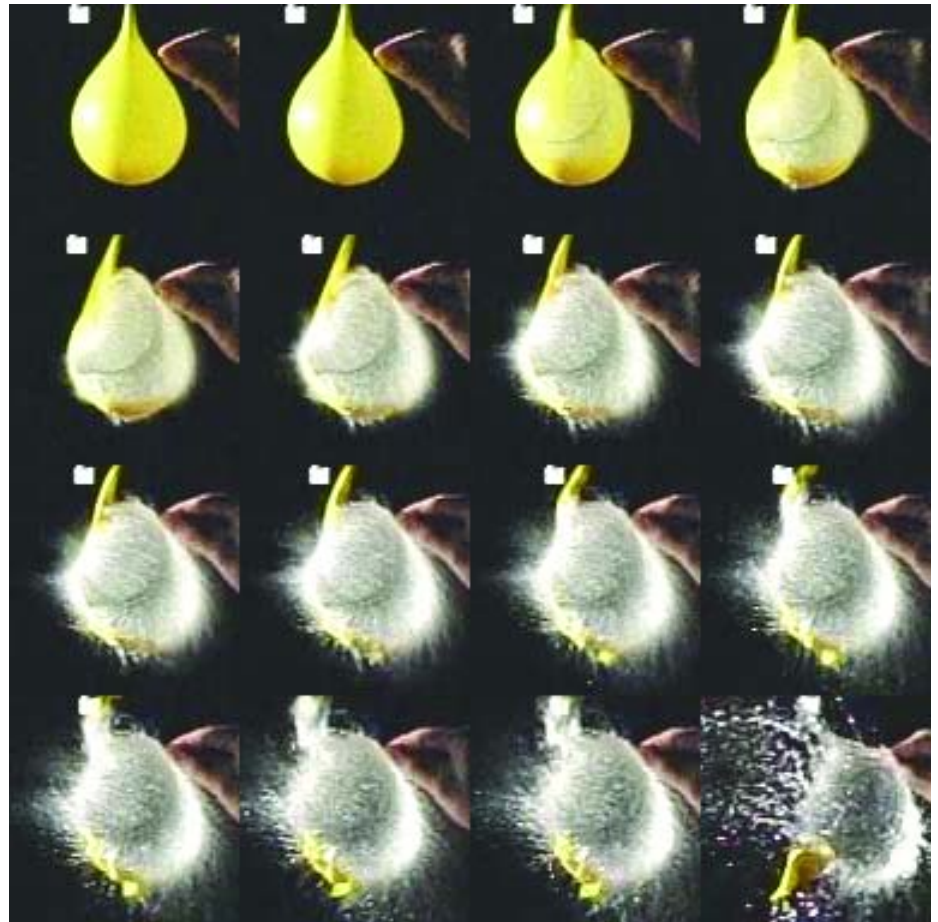


Abb. 1: Zeitlicher Verlauf eines platzenden Luftballons aus einem Video (zwischen den einzelnen Bildern vergehen jeweils $1/1200 \text{ s} = 0,8 \text{ ms}$; nur zwischen vorletztem und letztem Bild liegen $1/40 \text{ s} = 25 \text{ ms}$)

Videoanalyse empfiehlt. Der Preis der Kameras, die flexiblen Einsatzmöglichkeiten, die relativ einfache Bedienung, die umfangreiche Softwareausstattung und die kompakte Bauweise machen diese Kameras nicht nur für Schulen attraktiv. Beispielsweise sind für Verhaltensbiologen der „Pre-record“-Modus² und die kaum eingeschränkte Aufnahmezeit (beides auch für Hochgeschwindigkeitsvideos möglich) durchaus interessant. Beides wird bei „herkömmlichen“ Hochgeschwindigkeitskameras bisher nicht angeboten.

Die in den Kameras verwendeten CMOS-Sensoren haben gegenüber CCD-Sensoren den entscheidenden Vorteil, dass sie per-

manent ausgelesen werden können. Dabei wird nur die durch den Photoeffekt erzeugte Spannung jedes Pixels ausgelesen, abgebaut und interpretiert. In Folge höherer Bildfolgezahlen wird die Belichtungszeit des einzelnen Frames kürzer. Dies ist bei schnellen Bewegungen von großem Vorteil, da man nicht so leicht eine Bewegungsunschärfe im Bild erhält. Allerdings ist auch ein entsprechend stärkerer Lichteinfall nötig (siehe Abschnitt 7: Hinweise zur Beleuchtung).

Um die Möglichkeiten der Kamera zu illustrieren, sei hier ein platzender, wassergefüllter Luftballon gezeigt, bei dem die höchste Framerate eingestellt werden muss, um ausreichend viele Bilder für die Auswertung zu erhalten. In Abb. 1 ist der Vorgang des Platzens auf 16 Bildern festge-

¹ „fps“ ist die offizielle Abkürzung für „Frames pro Sekunde“, wobei ein Frame ein Einzelbild des Videos ist.

² Die (oft entscheidende) Sekunde vor dem eigentlichen Start der Aufnahme wird mit gespeichert.

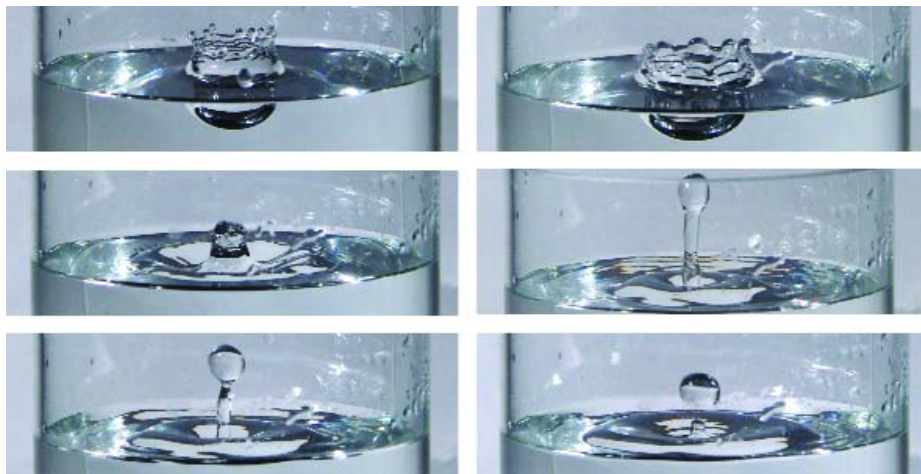


Abb. 2: Fotoserie: Ein Wassertropfen fällt in ein Wasserglas (Aufnahmegeschwindigkeit 60 fps, es wurden zwischen dem dritten und dem vierten Bild Bilder ausgelassen)

halten. Die Framerate des Videos, aus dem die Bilder entnommen sind, beträgt 1200 fps (40-fache Zeitlupe). Die ersten 15 Bilder sind direkt aufeinander folgende Frames und decken einen Zeitraum von $1/80$ s ab. Zwischen dem 15. und dem letzten Bild sind 30 Frames, also $1/40$ s vergangen. Im ersten und zweiten Bild ist die Gummihaut noch vollständig, im dritten und vierten reißt sie gerade auf und ab dem fünften Bild ist nur noch links oben und unten ein klein wenig von der Gummihaut zu sehen, da sie zuerst vorne aufreißt und sich dann erst auf der Rückseite zusammenzieht. Man erkennt also im Zeitlupenvideo, dass sich die Gummihaut des Ballons schlagartig zusammenzieht und dabei einzelne Wassermoleküle herausgerissen werden. Die Grundform des Wasserballons bleibt aber aufgrund der Trägheit des Wassers erhalten.

Die Kamera kann auch eine Sekunde lang bis zu 60 Fotos bei voller Auflösung aufnehmen, die dann eine höhere Auflösung als das Video haben. Dies wurde bei den Fotos der Abb. 2 genutzt, bei der ein Wassertropfen auf eine ruhende Wasseroberfläche trifft.

2. Videoanalyse von Hochgeschwindigkeitsvideos

Ein großer Vorteil der Videoanalyse ist, dass damit zweidimensionale Bewegungen erfasst werden können, was in modernen Unterrichtskonzepten zentral ist [3]. Dafür gibt es kaum Messalternativen zur Videoanalyse [4]. Besonders günstig ist hier das Videoanalyseprogramm „measure dynamics“, da es die vektoriellen Größen Geschwindigkeit, Zusatzgeschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft oder Impuls als Pfeil ins Video einzeichnen kann [5] (verwendet wurde für diesen Beitrag Version 1.4f build 377).

Ein weiterer Vorteil der Videoanalyse ist, dass die Experimente ungestört und uneinflusst ablaufen. Der Nachteil lag bisher darin, dass die Framerate („Abtastrate“) von Videoaufnahmen bei 25 bzw. 30 Bildern (Messwerten) pro Sekunde fest war und bei einigen Experimenten nicht ausreichte. Dies ist bei Bewegungen mit hohem Tempo oder kurzen großen Beschleunigungsbeträgen problematisch. An dieser Stelle setzt die Hochgeschwindigkeitskamera an, da sie dank der einstellbaren Bildrate eine höhere und – wenn auch eingeschränkt – einstellbare Abtastrate hat. Damit werden Experimente wie das Stoßvorgänge, Schwingungsanalysen, Loopingfahrten, schräge Würfe und fallende Gegenstände exakter auswertbar.

Damit der Computer die Videos abspielen kann, braucht er den verwendeten Codec, z. B. den „H.264“-Codec bei der EX-F1. Damit das Video auf jedem Computer (auch ohne diesen Codec) läuft, ist daher ein Recodieren der entstehenden mov-Videos mit einem älteren Codec sinnvoll. Bei den hier vorgestellten Videos wurde zum Ändern des Codes, zum Schneiden und Bearbeiten das kostenlose Windows-kompatible Apple-Programm „MPEG-Streamclip“ verwendet und so eine avi-Datei mit einem weit verbreiteten Codec (Motion JPEG) erzeugt. Die EX-FS10 gibt dagegen avi-Videos bereits im Motion-jpg-Codec aus.

Die Casio EX-F1 nimmt die Videos mit 300, 600 bzw. 1200 fps auf, die Casio EX-FS10 mit 210 fps, 420 fps oder 1.000 fps. In jedem Fall werden sie allerdings so abgespeichert, dass sie beim Abspielen mit 30 Bildern pro Sekunde ablaufen. Dadurch entsteht der Zeitlupeneffekt, der den Prozess 10-, 20- oder sogar 40-fach bzw. 7-, 14- oder 33-fach langsamer anzeigt, als er in Wirklichkeit war. Das kann bei der quantitativen Video-

analyse ein Problem sein, bei der man den echten Wert der betrachteten physikalischen Größe wissen will, wenn das Videoprogramm die Framerate automatisch aus dem Video ausliest. Mit dem kostenlosen Programm AVIFrate kann man jedoch die Framerate sehr einfach auf den korrekten Wert ändern, ohne dass sich an der Codierung des Videos etwas ändert. Die Korrektur der Framerate ist nicht notwendig, wenn man nur die Richtung und die Veränderung einer physikalischen Größe betrachtet, nicht aber ihre genauen Werte.

3. Die Zusatzgeschwindigkeit bei zweidimensionalen Bewegungen

Bei den folgenden zwei Videos ist nur die Richtung der Geschwindigkeit und der Zusatzgeschwindigkeit von Interesse, nicht aber das Tempo. Damit man die wesentlichen Effekte wirklich beobachten kann, ist der Zeitlupeneffekt sogar von Vorteil, da die Bewegungen in Wirklichkeit zu schnell ablaufen.

3.1 Zusatzgeschwindigkeit beim Kugelstoß

Im ersten Video kommen zwei Kugeln von links mit ungefähr gleicher und konstanter Anfangsgeschwindigkeit angerollt, die mit $\vec{v}_A$ bezeichnet wird und von „measure dynamics“ als dynamisch mitbewegter Pfeil ins Video an die Kugeln eingezeichnet [5]. Dann gibt es einen kurzen senkrechten Stoß auf eine Kugel und es ergibt eine neue konstante Endgeschwindigkeit $\vec{v}_E$, die zusätzlich ins Video eingeblendet wird (siehe Abb. 3). Das Zustandekommen dieser Endgeschwindigkeit lässt sich wie folgt erklären: Die Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ in x-Richtung bleibt bestehen und in Stoßrichtung, der y-Richtung, kommt eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ dazu. Die Endgeschwindigkeit $\vec{v}_E$ ergibt sich durch Aneinanderhängen der Pfeile für die Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ und die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$.

Um auch nach Ablauf des Videos den Bewegungsablauf noch sichtbar zu haben, werden die Schwerpunkte der Kugel in stets gleichen Zeitintervallen ins Video gestempelt. Damit die Darstellung wie in der Stoßsimulation aussieht, die in [3, Abb. 6b] vorgestellt wird, werden dazwischen noch kleinere Punkte gesetzt.

Alle diese Einblendungen kann man in „measure dynamics“ über die Funktion „Anzeige / Filter“ erstellen. Hiermit ist es nicht nur möglich, Symbole, Linien und Pfeile nach individuellen Wünschen nach beliebigen berechneten Größen in das aktuelle Videobild einzublenden, sondern man kann auch festlegen, ob und in welchem Abstand diese sichtbar bleiben sollen.

3.2 Zusatzgeschwindigkeit beim waagrechten Wurf

Beim Kugelstoß hatten wir nur eine kurze Einwirkung. Beim waagrechten Wurf dagegen haben wir eine längere, konstante Einwirkung, die ebenfalls senkrecht zur ursprünglichen Bewegungsrichtung ist. Auch hier kommt zur Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ in x-Richtung eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ in Einwirkungsrichtung, der y-Richtung, dazu (siehe Abb. 4). Die Endgeschwindigkeit $\vec{v}_E$ ergibt sich wieder durch Aneinanderhängen der Pfeile für die Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ und die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$. Der Unterschied ist hier nur, dass die Zusatzgeschwindigkeit während der gesamten Fallzeit zunimmt.

Dieses Video wurde mit 300 fps gefilmt (10-fache Zeitlupe) und es wird der Ort in jedem vierten Frame gestempelt (alle $4/300\text{ s} = 13\text{ ms}$). Damit die Bewegung schön langsam abläuft, sollte man in „measure dynamics“ nochmals das halbe Abspieltempo einstellen.

4. Kräfte bei Stößen auf der Luftkissenbahn

Die Videoanalyse hat das grundlegende Problem, dass die momentanen Beschleunigungen und damit die momentanen Kräfte sehr ungenau berechnet werden. In „measure dynamics“ gibt es daher zusätzlich zum üblichen Berechnungsmodus die Möglichkeit, dass zur Glättung über mehrere Frames gerechnet wird (siehe [6, Abb. 20] und Abschnitt 5.1: Fallbeschleunigung bei der Metallkugel). Wählt man zusätzlich bei der Analyse eine Schrittweite n , wird nur jedes n -te Bild analysiert und damit nochmals über ein größeres Intervall gemittelt. Bei manchen Vorgängen genügt es jedoch, die Geschwindigkeit $\vec{v}_A$ vor einer Einwirkung und die Geschwindigkeit $\vec{v}_E$ nach einer Einwirkung zu berechnen und mit der Masse m und der Einwirkzeit Δt die Durchschnittskraft während der Einwirkung gemäß $\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$ zu berechnen, wobei $\Delta\vec{v} = \vec{v}_E - \vec{v}_A$ ist.

In dem Mechanikkonzept, das in diesem Heft vorgestellt wird [3], spielen Stöße eine wichtige Rolle. Stöße sind in der allgemeinen Vorstellung ein sehr kurzer Vorgang, so dass man hier für eine quantitative Behandlung sehr kurze Zeiten messen muss. Will man eine Videoanalyse machen, braucht man unbedingt Hochgeschwindigkeitsvideos des Stoßprozesses, mit denen man die Stoßzeiten aus dem Video bestimmen kann.

Im Folgenden werden Stöße zwischen zwei gleich schweren Luftkissengleitern

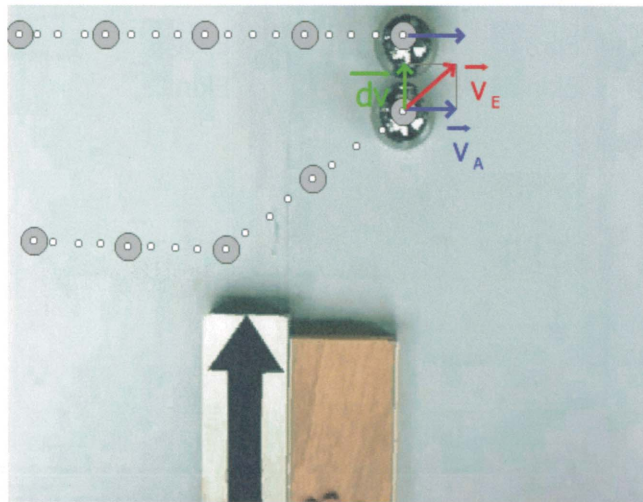


Abb. 3: Bild aus dem Video zum senkrechten Stoß (kleine Punkte alle 43 ms)

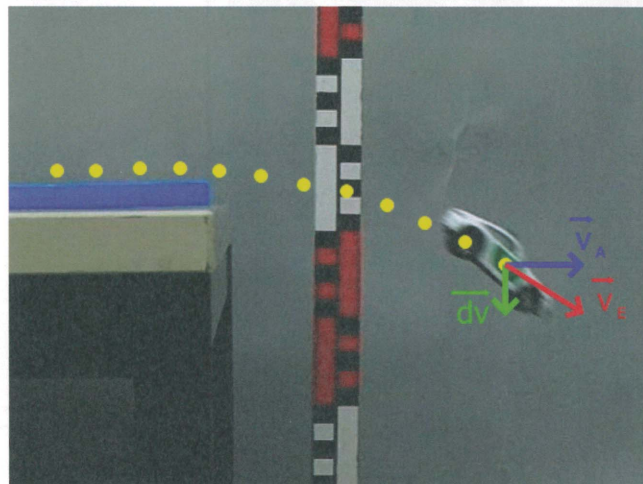


Abb. 4: Bild aus dem Video zum waagrechten Wurf (Ortsmarken alle 13 ms)

Bildnr.	t in s	x_1 in m	v_1 in m/s	$F_{1,\text{mittel}}$ in N	x_2 in m	v_2 in m/s	$F_{2,\text{mittel}}$ in N
70	0,000	0,000			0,420		
220	0,500	0,233	0,466		0,426	0,013	
296	0,753	0,293		-0,564	0,486		
323	0,843	0,292	-0,012		0,528	0,465	0,534

Tabelle 1: Stoß zweier Luftkissengleiter mit weichen Federn

Bildnr.	t in s	x_1 in m	v_1 in m/s	$F_{1,\text{mittel}}$ in N	x_2 in m	v_2 in m/s	$F_{2,\text{mittel}}$ in N
0	0,000	0,000			0,201		
39	0,130	0,125	0,961		0,200	-0,007	
44	0,147	0,132		-16,30	0,211		
104	0,347	0,145	0,064		0,385	0,871	15,95

Tabelle 2: Stoß zweier Luftkissengleiter mit harten Federn

auf der Luftkissenfahrbahn betrachtet, wobei an beiden Gleitern eine Feder befestigt ist. Ist die Feder sehr hart, dann ist die Kontaktzeit der beiden Luftkissenwagen extrem kurz. Statt die durchschnittliche Beschleunigung $\vec{a} = \Delta\vec{v}/\Delta t$ während des Stoßprozesses zu bestimmen und die durchschnittliche Kraft gemäß $\vec{F} = m\vec{a}$ zu berechnen, kann man auch auf die Beschleunigung verzichten und die durchschnittliche Kraft gemäß der Kraftstoßgleichung $\vec{F}\Delta t =$

$m\Delta\vec{v}$ bestimmen. Dazu genügt es, Zeit und Ort jeden Wagens zu vier Zeitpunkten zu kennen: Am Anfang, zu Beginn des Stoßes, am Ende des Stoßes und am Ende des Videos.

Die Wagen haben in diesem Versuch beide eine Masse von $m_{\text{Wagen}} = 0,303\text{ kg}$ und eine weiche Feder. Die Zeit wurde bei Frame 70 auf Null gesetzt. Der Stoßprozess für Wagen 1 beginnt im Beispieldvideo bei Frame 220 und endet bei Frame 296, das Video

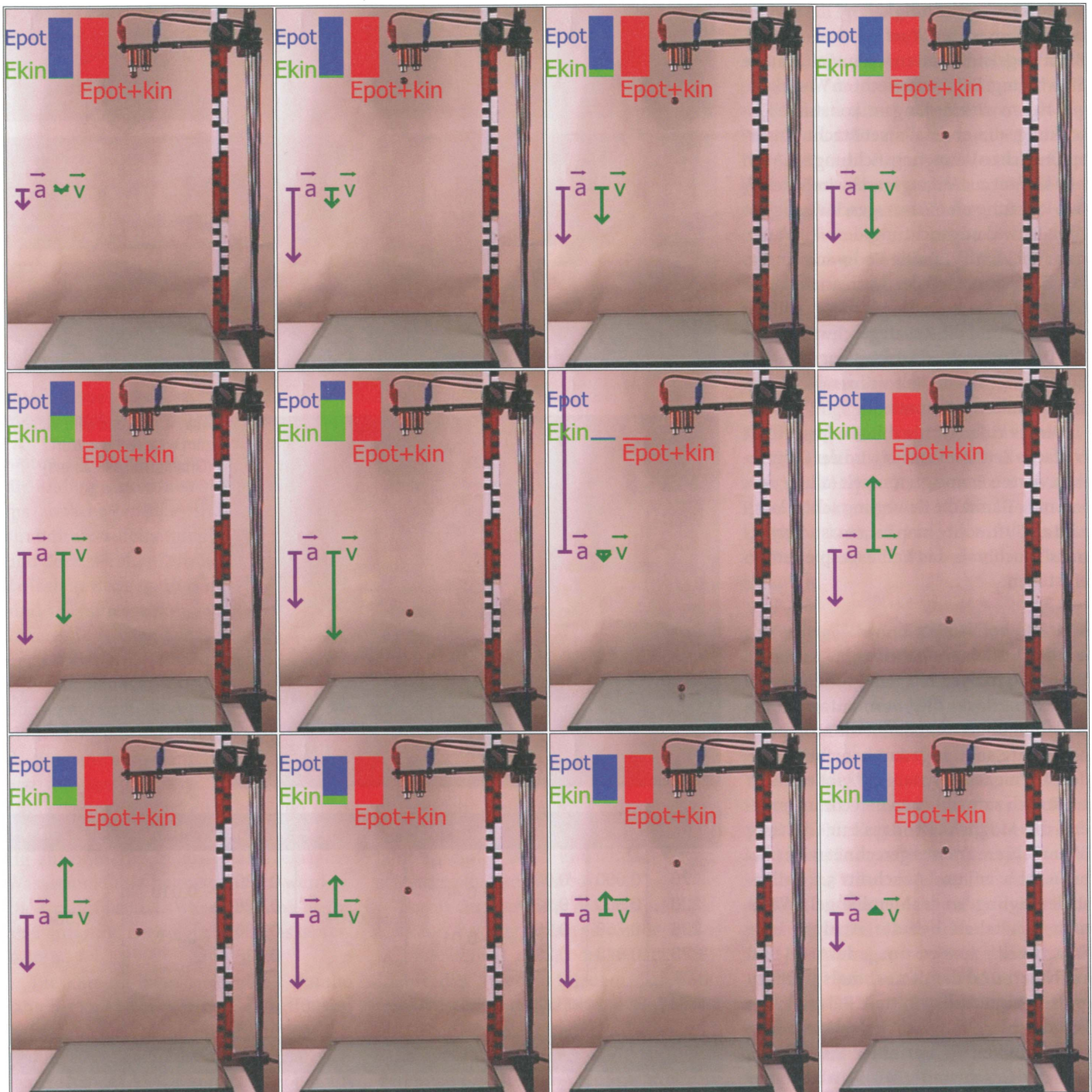


Abb. 5: Serienbild: Ausgabe jedes 15. Frames des Originalvideos mit Einblendung der Energien (links oben) und der wesentlichen kinetischen Größen (links mittig). Der Zeitabstand zwischen den Bildern ist $15/300 \text{ s} \approx 50 \text{ ms}$.

bei frame 323 (siehe Tab. 1). Man kann nun mit den entsprechenden Zeiten und Orten die Anfangsgeschwindigkeit $v_A = 0,466 \text{ m/s}$ und die Endgeschwindigkeit $v_E = -0,012 \text{ m/s}$ berechnen. Somit erhielt der Wagen 1 die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta v = v_E - v_A = -0,478 \text{ m/s}$. Mit der Zeitdauer $\Delta t = 76/300 \text{ s} = 0,253 \text{ s}$ und der Masse $m = 0,303 \text{ kg}$ ergibt sich aus

$$\vec{F} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

eine durchschnittliche Kraft von $F_{\text{auf Wagen 1}} \approx -0,564 \text{ N}$. Für den zweiten Wagen ergibt

die gleiche Berechnung eine praktisch gleich große entgegengerichtete Kraft von $0,534 \text{ N}$.

Im zweiten Versuchsdurchgang bekamen beide Wagen statt den weichen Federn harte Federn ($m_{\text{Wagen}} = 0,299 \text{ kg}$). Nun ergibt sich ein wesentlich kleineres $\Delta t = 5/300 \text{ s} = 0,017 \text{ s}$ und deshalb eine wesentlich größere durchschnittliche Kraft von ca. 16 N . Dass das Anfangstempo und damit die Zusatzgeschwindigkeit ungefähr doppelt so groß war, trägt zwar auch zu einer größeren Kraft bei, ist aber von geringerer Bedeutung als die Stoßzeit.

5. Die fallende Metallkugel

Eine fallende und evtl. wieder hochspringende Kugel ist ein klassisches Experiment, welches dazu dient, die Erdbeschleunigung oder die Energieerhaltung zu zeigen. Dieses Experiment mittels Videoanalyse auszuwerten, bereitete bisher große Schwierigkeiten, da bei 30 fps nur wenige Bilder vom Fallvorgang aufgenommen werden und insbesondere der Moment, in dem die Metallkugel die Unterlage berührt, in der Regel nicht im Video enthalten ist. Dadurch entstehen große Messfehler bei der Bestimmung der Beschleuni-

gung. Typischerweise gibt es zwischen der Kugelposition in dem Frame vor dem Stoß und dem nach dem Stoß nur geringe Positionsänderungen, obwohl die Kugel einen großen Abstand zur Unterlage hat. Glaubt man den daraus resultierenden Messwerten, so wird die Kugel scheinbar in der Luft weit vor der Unterlage abgebremst und fliegt dann wieder nach oben.

Schon bei Hochgeschwindigkeitsvideos mit 300 fps sieht man deutlich, dass die Kugel die Unterlage, hier eine Glasplatte, berührt. In dem durchgeführten Experiment mit einer Fallhöhe von ca. 50 cm sind aber 300 fps schon zu viel, da der Ortsunterschied des Objektes zwischen zwei Bildern zu gering ist. Es zeigte sich, dass es günstig ist, jedes dritte Bild analysieren zu lassen, was einer effektiven Framerate von 100 fps entspricht. In dem verwendeten Videoanalyseprogramm „measure dynamics“ wählt man dazu nur die Einstellung „Schrittweite 3“ (siehe [7, S. 23]). Wählt man den Startpunkt der Analyse geschickt, ist der Frame, in dem die Kugel die Glasplatte zum ersten Mal berührt, in der Analyse enthalten, so dass hier realistische Werte gemessen und ausgegeben werden.

5.1 Die Fallbeschleunigung bei der Metallkugel

Das Serienbild in Abb. 5 zeigt eine Fallbewegung mit Stoß und anschließendem Aufsteigen. Das Bild besteht aus jedem fünfzehnten Frame des Originalvideos (300 fps). Die Geschwindigkeit und die Beschleunigung sind im Video ortsfest links mittig als Pfeile dargestellt [8, S. 3]. Statt der Beschleunigung (oder zusätzlich) könnte man auch einen Pfeil für die Kraft einzeichnen, die sich ja nur um einen konstanten Faktor unterscheidet.

Man sieht, dass das Tempo bis Bild sechs zunimmt, dann im Bild sieben, in dem die Kugel unten aufschlägt, Null ist und anschließend bei umgekehrter Bewegungsrichtung wieder abnimmt. Die Beschleunigungen sind annähernd, aber nicht ganz konstant. Gut erkennbar ist aber, dass im siebten Bild beim Stoß eine starke Beschleunigung nach oben auf die Kugel wirkt.

Diese Streuungen bei der während der Fallbewegung in Wirklichkeit konstanten Beschleunigung ist typisch für die Videoanalyse. Dass sie im Videoanalyseprogramm „measure dynamics“ nicht so groß ist, hängt mit der glättenden Berechnung der Beschleunigung zusammen, die standardmäßig eingestellt ist, aber auch abgeschaltet werden kann. Für die Berechnung der Geschwindigkeit gehen dabei

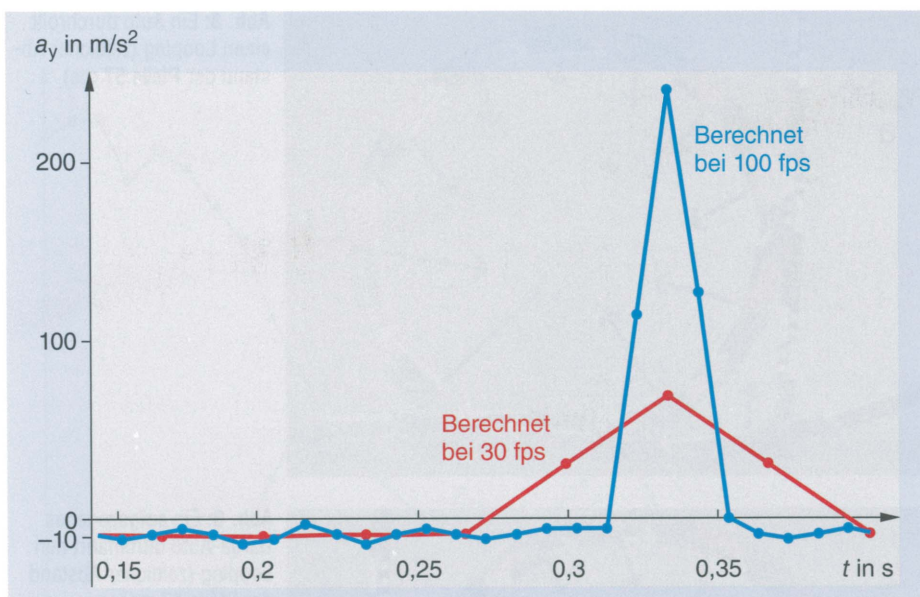


Abb. 6: Auftragung der Beschleunigung bei 100 fps und bei 30 fps gegen die Zeit

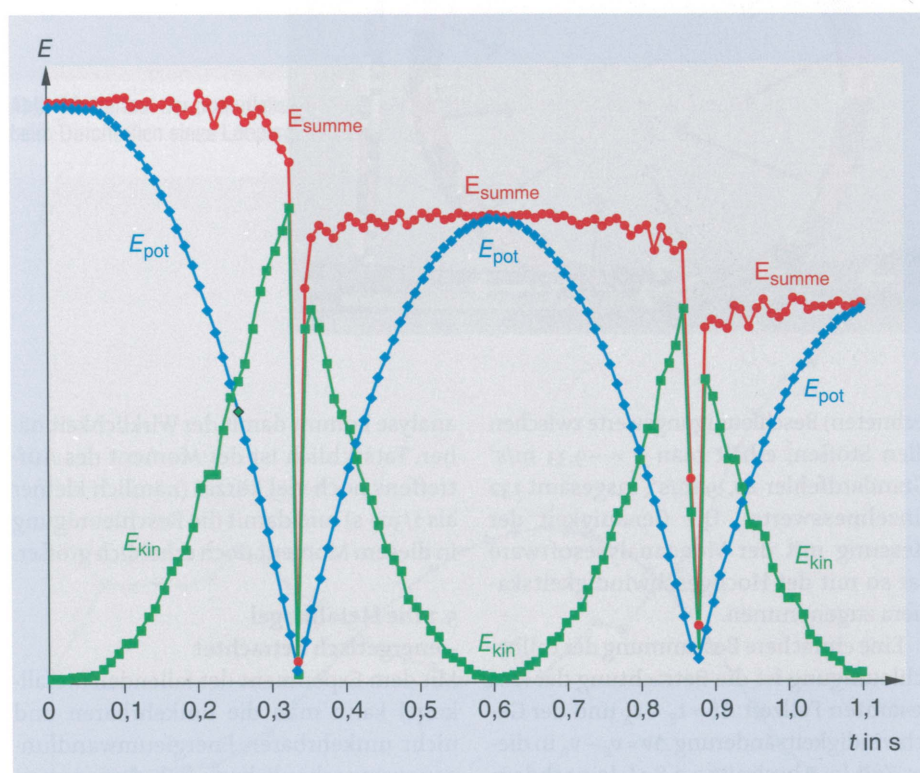


Abb. 7: Energiedarstellung der potentiellen und der kinetischen Energie sowie der Summe beider Energien

drei, bei der Berechnung der Beschleunigung fünf Ortspunkte ein (siehe [6, S. 24 und Abb. 20]) (ohne Glättung: zwei bzw. drei Ortspunkte). Der Vorteil bei dieser glättenden Methode ist, dass die Zuordnung der Geschwindigkeiten bzw. der Beschleunigungen zum richtigen Zeitpunkt bzw. Frame korrekt ist. Der Nachteil ist jedoch, dass ein bzw. zwei Messframes vor und nach dem jeweiligen Frame mit in die Werteberechnung einfließen und damit Geschwindigkeit und Beschleunigung auch von der „Zukunft“ beeinflusst werden.

Um einen Wert für die Fallbeschleunigung zu erhalten, kann man eine Mittelwertbildung durchführen. Dazu berücksichtigt man, dass die Beschleunigungswerte um die Stoßvorgänge herum sowie die während des Stoßvorgangs selbst und die zu Beginn des Fallens der Kugel fehlerbehaftet sind und berechnet mit den restlichen Messwerten die mittlere Erdbeschleunigung mittels Tabellenkalkulation. Vor dem ersten Auftreffen auf die Glasplatte ergibt sich ein Mittelwert von $g = -9,89 \text{ m/s}^2$ (24 in die Berechnung eingehende Werte). Bestimmt man den Mittelwert aller (korrekt be-

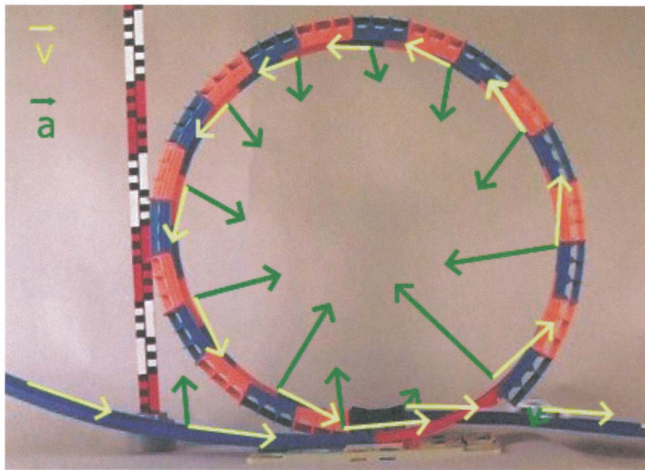


Abb. 8: Ein Auto durchrollt einen Looping (zeitlicher Abstand der Pfeile 57 ms)

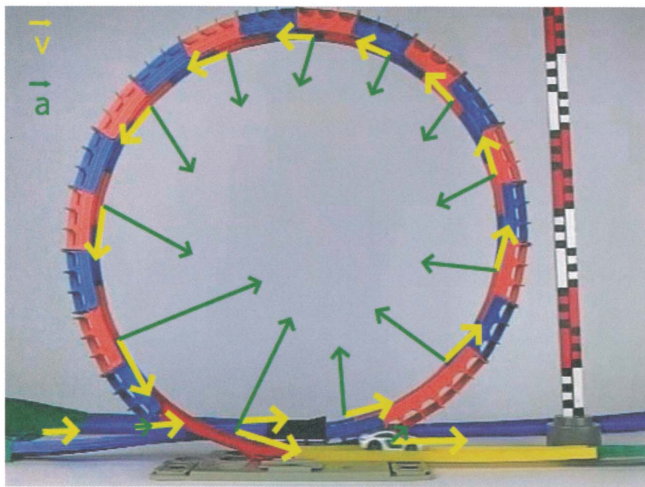


Abb. 9: Ein aufgezogenes Darda-Auto durchfährt den Looping (zeitlicher Abstand der Pfeile 47 ms)

rechneten) Beschleunigungswerte zwischen allen Stößen, erhält man $g = -9,33 \text{ m/s}^2$ (Standardfehler $\pm 0,39 \text{ m/s}^2$, insgesamt 132 Einzelmesswerte). Die Genauigkeit der Messung mit der Videoanalysesoftware hat so mit der Hochgeschwindigkeitskamera zugenommen.

Eine einfachere Bestimmung der Fallbeschleunigung ist die Betrachtung der fast gesamten Fallzeit $\Delta t = t_E - t_A$ und der Geschwindigkeitsänderung $\Delta v = v_E - v_A$ in dieser Zeit [3, Abschnitt 2.2.8.1]. Je nachdem welches Intervall man wählt, bekommt man ein $g = \Delta v / \Delta t$ von 9,2 bis $10,7 \text{ m/s}^2$, die aber im Mittel gut um den gewünschten Wert liegen.

Eine weitere Bereicherung stellt die realistischere Darstellung der Beschleunigung im Moment des Auftreffens dar (vgl. Abb. 6). Bei 30 fps ist der Peak der Beschleunigung beim Aufschlag (bei $t = 0,333 \text{ s}$) wesentlich flacher (etwa 70 m/s^2 statt 250 m/s^2) und deutlich breiter als bei 100 fps. Betrachtet man die Werte ohne die oben erwähnte Glättung, so werden die Unterschiede noch größer (140 m/s^2 bei 30 fps und 400 m/s^2 bei 100 fps), da weniger Frames in die Berechnung der Werte einfließen. Die Hochgeschwindigkeitsvideo-

analyse kommt damit der Wirklichkeit näher. Tatsächlich ist der Moment des Auftreffens noch viel kürzer (nämlich kleiner als $1/300 \text{ s}$) und damit die Beschleunigung in diesem Moment noch erheblich größer.

5.2 Die Metallkugel – energetisch betrachtet

Mit dem Experiment der fallenden Metallkugel kann man die umkehrbaren und nicht umkehrbaren Energieumwandlungen veranschaulichen. Vor dem ersten Stoß wird die potentielle Energie der Kugel (blau in Abb. 5) in kinetische Energie (grün in Abb. 5) umgewandelt, wobei die Summe beider Energien gleich bleibt (Abb. 5 und 7). Nach dem Stoßvorgang wird umgekehrt die kinetische Energie zurück in potentielle Energie umgewandelt.

Beim Auftreffen auf die Glasplatte ist die potentielle Energie vollständig in kinetische Energie umgewandelt, doch diese „verschwindet“ laut Berechnung scheinbar für den Moment des Auftreffens. Das ist auch sinnvoll, da die Metallkugel und das Glas beim Aufprall der Kugel wie eine extrem harte Feder wirken. Die kinetische Energie der Kugel wird in Spannenergie der Feder und wieder zu-

rück in kinetische Energie der Kugel umgewandelt. Ein Teil der Energie des Systems wird in die Auflösung der Kristallstruktur des Glases irreversibel umgewandelt, was an den kleinen Sprungstellen im Glas erkennbar ist.

6. Der Looping mit der Darda-Bahn

Die Achterbahnen mit Looping sind auf Jahrmärkten eine Attraktion. Beim Einfahren in einen kreisförmigen Looping wirken schlagartig Zwangskräfte auf das Fahrzeug [9]. Selbst im günstigsten Fall ohne Reibung und bei minimaler potentieller Energie erfährt der Wagen (samt Insassen) am Übergang von der Geraden in die Kreisbahn eine Beschleunigung von $6g$ senkrecht zum Verlauf der Bahn, was für den Menschen lebensgefährlich ist. Daher werden die Loopings von Achterbahnen nicht mehr kreisförmig, sondern klothoidenförmig gebaut, was dazu führt, dass die radiale Zwangskraft durch die Bahn gemächlicher zunimmt. Da Klothoidenkurven im Schulunterricht schwer zu behandeln und noch schwerer im Experiment zu realisieren sind, bleibt man bei der Betrachtung des Kreisloopings wie es auch in Spielzeughbahnen realisiert wird. Spielzeuge in den Physikunterricht mit einzubeziehen, fördert in der Regel das Interesse der Schülerinnen und Schüler an der Thematik.

Damit ein Fahrzeug ohne zusätzlichen Antrieb durch den Looping fahren kann, muss es im reibungsfreien Fall beim $2,5$ -fachen Radius starten. Aufgebaut wurde ein großer Darda-Looping ($2r = 0,51 \text{ m}$), an dem auf einer Seite eine lange Schiene an Stativen angebaut wurde. Da in diesem Experiment die Reibung des Fahrzeuges an den seitlichen Führungsschienen der Bahn und der Energieverlust durch das Durchbiegen der Schiene nicht mehr vernachlässigbar sind, muss von einer wesentlich größeren Höhe als dem $2,5$ -fachen Radius gestartet werden. Im konkreten Beispiel beträgt die Starthöhe $h = 1 \text{ m}$. Das Experiment wird mit der Casio EX-FS10 bei 210 fps aufgenommen und jeder sechste Frame in die Analyse einbezogen.

Das Darda-Auto schafft den Looping aber auch, indem man das Auto „aufzieht“ und vor dem Looping eine gewisse ebene Strecke fahren lässt. Dieses zweite Video wurde mit 300 fps aufgenommen und jeder siebte Frame analysiert.

6.1 Der Looping – dynamisch betrachtet

Da hier eine zweidimensionale Bewegung vorliegt, werden die jeweiligen von der Videoanalysesoftware ermittelten und im Video dargestellten Geschwindigkeiten (gel-

be Pfeile) und Beschleunigungen (grüne Pfeile) an den zugehörigen Ort „gestempelt“ [5]. Um ein Überschneiden der Vektorpfeile zu verhindern und damit die Übersichtlichkeit zu bewahren, wird nur jeder sechste Frame in die Analyse mit einbezogen und nur in jedem zwölften Frame die Pfeile eingezeichnet.

In Abb. 8, in der ein Auto durch den Looping rollt, ist gut erkennbar, dass die Geschwindigkeit auch beim Durchfahren des Loopings tangential zur Bahn verläuft. Die Beschleunigung zeigt ins Innere des Kreises, denn im Looping wirkt auf das Auto eine radiale Zwangskraft in Richtung des Kreismittelpunktes durch die Fahrbahn. Zusätzlich wirkt die Gewichtskraft beim Hochfahren entgegen der Fahrtrichtung, so dass sich das Tempo des Wagens verringert, was an der Neigung des Beschleunigungsvektors erkennbar ist. Beim Herunterfahren wird das Auto wieder etwas schneller, was man an der Neigung des Beschleunigungsvektors in Fahrtrichtung erkennt. Im Scheitelpunkt ist die Beschleunigung aufgrund der Reibung gegen die Fahrtrichtung gerichtet.

In Abb. 9 ist gut erkennbar, dass die Geschwindigkeit beim Durchfahren des Loopings wieder tangential zur Bahn verläuft (eingezeichnet wurden die Pfeile jedes vierzehnten Frames bei 300 fps). Allerdings ist offensichtlich, dass noch eine andere Kraft im Spiel sein muss, da sich der Beschleunigungsvektor schon im oberen Bereich beim Scheitelpunkt des Loopings deutlich sichtbar in Fahrtrichtung neigt. Das Tempo des Wagens erhöht sich, noch bevor der Wagen den höchsten Punkt durchfahren hat. Das liegt an der noch nicht ganz entspannten Feder des Fahrzeugs, die hier noch immer eine Kraft in Fahrtrichtung bewirkt.

6.2. Der Looping – energetisch betrachtet

Anfangs hat das nur rollende Fahrzeug kinetische Energie, die in potentielle umgewandelt wird und dann wieder zurück in kinetische. Die potentielle Energie nimmt bis zum Scheitel des Loopings zu und schließlich wieder ab. Die kinetische Energie ist bei der Einfahrt in den Looping am größten, nimmt dann bis etwa zum Scheitel des Loopings ab und danach wieder zu.

Betrachtet man zusätzlich die Summe beider Energien, fällt auf, dass diese gleichmäßig abnimmt (siehe Abb. 10), was an der Reibung im rollenden Auto liegt, das keinen Antrieb hat. Durch die seitliche Führung des Wagens in der Bahn und die sichtbare Verformung der Bahn wird kinetische Energie in innere Energie umgewandelt.

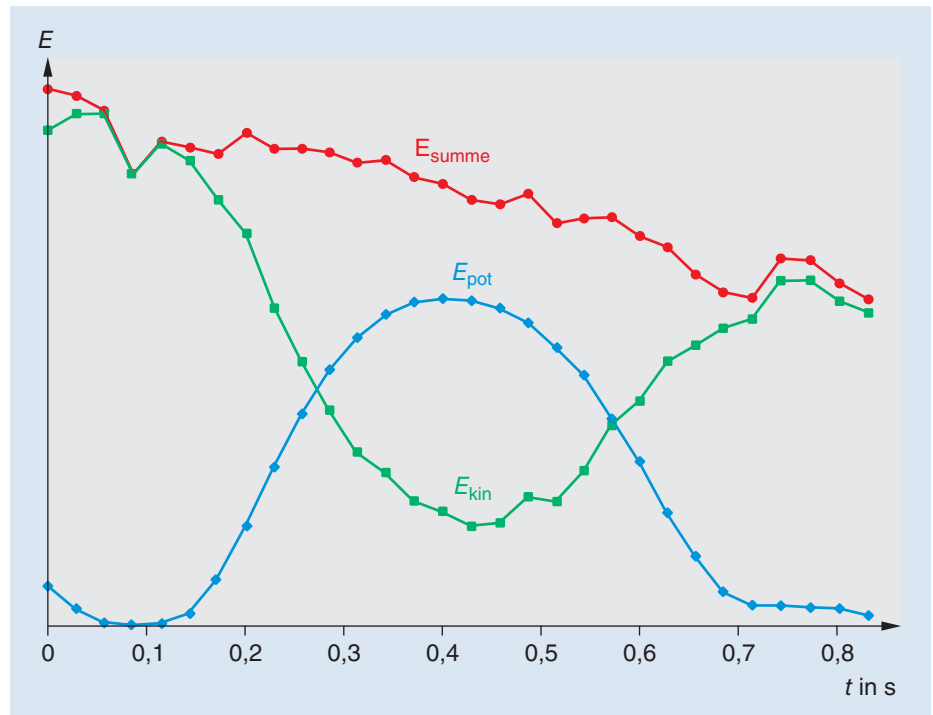


Abb. 10: Verlauf der potentiellen Energie und kinetischen Energie sowie der Summe beider Energien beim Durchrollen eines Loopings mit Reibung

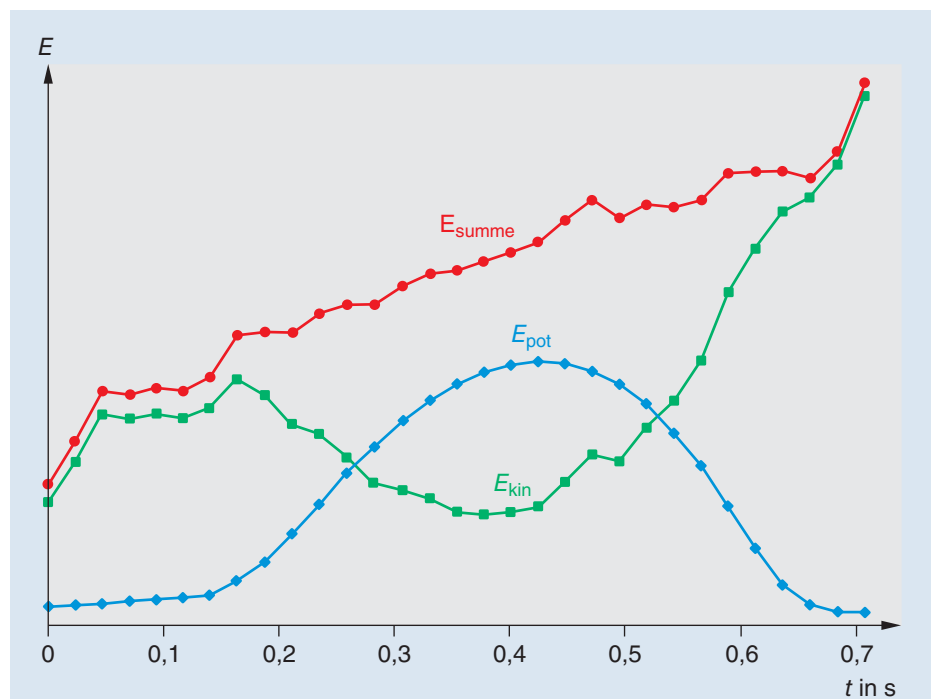


Abb. 11: Verlauf der potentiellen Energie und kinetischen Energie sowie der Summe beider Energien beim Durchfahren eines Loopings mit Antrieb

Abb. 12: Beleuchtung eines Stoßversuches mit zwei selbstgebaute Scheinwerfern mit diffusem Licht





Abb. 13: Baustrahler mit vorgehängter Diffusorfolie

Bei der zweiten Fahrt ist auffällig, dass die Summe beider Energien im Verlauf des Experimentes zunimmt (Abb. 10). Das liegt daran, dass die Spannenergie mit der Videoanalyse nicht erfasst wird bzw. erfasst werden kann. Beim Aufziehen der Feder des Motors wird Energie in das Spannen der Feder gesteckt. Entspannt sich die Feder, wandelt sie nach und nach ihre Spannenergie in kinetische Energie um.

7. Hinweise zur Beleuchtung

Aus der Fotografie ist bekannt: Bei kürzeren Verschlusszeiten oder kleineren Blenden wird mehr Licht für ein gut belichtetes Bild benötigt. Gleiches gilt auch bei Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Es steht eine maximale Belichtungszeit von $t = 1/\text{Frame-rate}$ zur Verfügung, daher muss das Licht gezielt und mit Bedacht eingesetzt werden.

Dank der hohen Empfindlichkeit des Sensors und der ausreichend guten kamerainternen Nachbearbeitung des Videos reicht für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen inzwischen meist das natürliche Sonnenlicht aus. Nicht alle künstlichen Lichtquellen sind geeignet; so fallen bei Betrieb mit Wechselstrom sowohl LEDs als auch Leuchtstoffröhren weg, da diese „flackern“ und damit die automatische Videoanalyse erschwert oder gar unmöglich wird (eine manuelle Analyse ist aber möglich). Thermische Lichtquellen eignen sich am Besten, da diese (insbesondere bei hohen Stromstärken) extrem gleichmäßig und flackerfrei leuchten. Um die Analyse zu erleichtern, kann man außerdem weiches (diffuses) Licht einsetzen. Setzt man zwei Scheinwerfer mit diffusem Licht ein (vgl.

Abb. 12), ist einerseits das Objekt gut ausgeleuchtet, andererseits wirft es keine störenden Schatten, da diese vom jeweils anderen Scheinwerfer überstrahlt werden. In manchen Fällen, wie beispielsweise bei dem Experiment mit dem Luftballon aus Abb. 1, ist ein einzelner gerichteter, seitlicher Lichteinfall mit nur einem Scheinwerfer gut geeignet [2]. Dann empfiehlt es sich auch, einen schwarzen Hintergrund zu wählen, damit die Tropfen deutlicher sichtbar werden.

Zur Beleuchtung muss es keine teure 5.000 W Studiobeleuchtung mit Softboxen sein. Bereits für ca. 60 € sind ähnliche Ergebnisse möglich. Es werden benötigt: zwei 500 W Bauscheinwerfer (am Besten mit Stativ) für je etwa 20 € aus dem Baumarkt, eine Diffusorfolie (ca. 70 x 70 cm²) aus dem Internet [10] für ebenfalls etwa 20 € (inkl. Porto) sowie etwas Stativmaterial aus der Physiksammlung. Für die Bauscheinwerfer reicht als Folie jeweils ein ca. 25 cm mal 25 cm großes Quadrat aus. Der Abstand zwischen Diffusorfolie und Bauscheinwerfer sollte wegen der Hitzeentwicklung ca. 15 - 20 cm betragen. In Abb. 13 ist ein solcher „umgebauter“ Bauscheinwerfer zu sehen. Abb. 12 zeigt den Einsatz von zwei Scheinwerfern in einem Stoßexperiment.

8. Fazit

Fast alle Jugendliche haben schon Erfahrungen mit Slow-Motion und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sammeln können. Sie werden sehr häufig in Kinofilmen, in der Werbung und in einigen (pseudo-) wissenschaftlichen Fernsehsendungen eingesetzt. Mit der Verwendung von Zeitlupenaufnahmen knüpft man an Alltagserfahrungen der Schülerinnen und Schüler an. Geschickt eingesetzt kann man mit Hochgeschwindigkeitsvideos die Schülerinnen und Schüler für ein Themengebiet motivieren oder es als Höhepunkt der Unterrichtseinheit aufnehmen und analysieren.

Bei schnell ablaufenden Vorgängen oder Vorgängen mit kurzen großen Beschleunigungen ist mit Hochgeschwindigkeitsvideos im Gegensatz zu normalen Videos eine quantitative Videoanalyse möglich, da wesentlich mehr Daten zu Verfügung stehen, wobei auf das Experiment selbst kein Einfluss durch Messapparaturen genommen wird. So können neue Vorgänge analysiert werden, bei denen die Videoanalyse bisher nur unzureichende Ergebnisse lieferte. Kann die Videoanalyse-Software Pfeile für physikalische Größen ins Video einzeichnen, sind auch qualitative Betrachtungen der Pfeile möglich und

sinnvoll. Dies ermöglicht eine zweidimensionale Behandlung der Mechanik und die Betrachtung attraktiver schneller Bewegungen. ■

Literatur

- [1] <http://de.exilim.eu/de/exilimhighspeed/>
- [2] Michel, Maximilian: Die Hochgeschwindigkeitskamera im Physikunterricht – Physik unter der (Zeit-) Lupe, Staatsexamensarbeit Universität Würzburg (2010), <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Hochgeschwindigkeit.htm>
- [3] Waltner, C; Tobias, V.; Wiesner, H.; Hopf, M.; T. Wilhelm: Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Dynamik in der Mittelstufe, in: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 59 (2010), Nr. 7
- [4] Wilhelm, Thomas (2006): Zweidimensionale Bewegungen - Vergleich von vier verschiedenen Möglichkeiten der Messwerterfassung und Evaluationsergebnisse eines Unterrichtseinsatzes – In: Nordmeier, V.; Oberländer, A. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Kassel 2006, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [5] Michel, Christine; Wilhelm, Thomas (2008): Lehrvideos mit dynamisch ikonischen Repräsentationen zu zweidimensionalen Bewegungen – In: Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin
- [6] Mück, Tobias; Wilhelm, Thomas: Neue Möglichkeiten der Videoanalyse am Beispiel von Sportbewegungen, in: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58 (2009), Nr. 7, S. 19 v- 27
- [7] Wilhelm, Thomas; Ossau, Wolfgang: Bier-schaumzerfall – Modelle und Realität im Vergleich – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58 (2009), Nr. 8, S. 19-26
- [8] Benz, Michael; Wilhelm, Thomas (2008): measurement Dynamics – Ein Quantensprung in der digitalen Videoanalyse – In: Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik – Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin 2008
- [9] Müller, Rainer (2009): Klassische Mechanik: Vom Weitsprung zum Marsflug, de Gruyter, Berlin 2009
- [10] www.fotobrenner.de

Anmerkung

Auf der Webseite der Zeitschrift können hier vorgestellte Videos mit den beschriebenen Einblendungen downgeloadet werden.

Anschrift der Verfasser

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

2.2 Videoanalysen von Sportbewegungen

ERSTER TEIL

Quelle:

MÜCK, T.; WILHELM, T.: *Neue Möglichkeiten der Videoanalyse am Beispiel von Sportbewegungen* – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58, Nr. 7, 2009, S. 19 – 27

Inhalt und Bezug zum Thema:

Mithilfe des neuartigen Videoanalyseprogramms „measure dynamics“ werden Möglichkeiten für fächerverbindenden Unterricht zwischen Physik und Sport aufgezeigt. Die Beispiele umfassen den Stabhochsprung, den Weitsprung, Fußball sowie Drehwurfbewegungen. Die auf Kontrast und Bewegung basierende automatische Analyse der Software trägt dabei zu einer leichteren Umsetzung im Unterricht bei. Durch verschiedene neuartige Darstellungsmöglichkeiten wie Einblenden von Vektoren, Serienbilder oder Stroboskopbilder werden manche Betrachtungen erst möglich. Mithilfe berechneter Fitfunktionen kann die real gemessene Bewegung außerdem mit dem zugrunde gelegten physikalischen Modell verglichen werden.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Ich habe mir Inhalt und Konzept einer Staatsexamensarbeit überlegt, in der verschiedene Sportbewegungen für den Physikunterricht aufgearbeitet werden sollten, wobei die fachlichen Grundlagen aus Sicht der Sportwissenschaft und aus Sicht der Physik dargelegt werden sollten und eine Messwerterfassung mit Hilfe der Videoanalyse erfolgen sollte. Für diese Staatsexamensarbeit habe ich per Aushang einen Studierenden gesucht. Schließlich habe ich dann mit Herrn Mück zusammen gearbeitet und ihn intensiv bei der Umsetzung der Ideen betreut sowie Teile des Artikels geschrieben.

Weitere Veröffentlichung:

Dieser Artikel, der in der Fachzeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule“ erschien, ist mit ähnlichem Inhalt auch erschienen in:

MÜCK, T.; WILHELM, T.: *Physik und Sport - Fächerverbindender Unterricht mit moderner Videoanalyse* - In: NORDMEIER, V.; GRÖTZEBAUCH, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik - Bochum 2009*, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2009, ISBN 978-3-86541-371-0

ZWEITER TEIL

Quelle:

WEIDT, M.; WILHELM, T.: *Bewegungen des eigenen Körpers – Möglichkeiten der Messwerterfassung im Vergleich* – Erscheint in: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Münster 2011

Inhalt und Bezug zum Thema:

Um dem sinkenden Interesse vieler Schüler am Fach Physik entgegen zu wirken, wurde immer wieder gefordert, im Unterricht stärker an Alltagserfahrungen von Schülern anzuknüpfen und einen Bezug zum menschlichen Körper herzustellen. Durch das Behandeln von alltäglichen Bewegungen, wie z.B. Gehen, Laufen, Treppensteigen oder einfachen Sprüngen, kann diesen Forderungen Rechnung getragen werden. Die Erfassung der physikalisch relevanten Größen entsprechender Bewegungen der Schüler kann heute durch verschiedene computerbasierte Messwerterfassungsmöglichkeiten erfolgen, wie Kraftmessplatte, Funk-3D-Beschleunigungssensoren oder Videoanalyse. Es werden Vor- und Nachteile der verschiedenen Messwerterfassungsmöglichkeiten bei diesem Thema herausgearbeitet sowie Beispiele solcher Messungen vorgestellt.

Eine hier aufgezeigte besondere Möglichkeit ist die Darstellung von Sensordaten in Videos mit Hilfe des Videoanalyseprogramms *measure dynamics*. Durch den einfachen Import von Datentabellen können die Daten von Beschleunigungssensoren oder der Bodenreaktionskraftmessung in einem Video mit dynamisch ikonischen Repräsentationen angezeigt werden. Dazu muss man eine Bewegung filmen und gleichzeitig mit einem entsprechenden Sensor messen und danach die Messdaten in das Videoanalyseprogramm importieren, wo sie im Video auf vielfältige Weise dargestellt werden können. Das heißt, hier wird das Videoanalyseprogramm nur als Darstellungsprogramm von Sensor-Messwerten verwendet.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Ich habe mir Inhalt und Konzept einer Staatsexamensarbeit überlegt, in der verschiedene Sportbewegungen, wie Gehen, Laufen, Springen, Treppen Steigen, für den Physikunterricht aufgearbeitet werden sollten, wobei die fachlichen Grundlagen aus Sicht der Sportwissenschaft und aus Sicht der Physik dargelegt werden sollten. Die Messwerterfassung sollte auf drei Weisen geschehen, die miteinander verglichen werden sollten: Videoanalyse, Funk-3D-Beschleunigungssensoren und Kraftmessplatte. Für diese Staatsexamensarbeit habe ich per Aushang einen Studierenden gesucht. Schließlich habe ich dann mit Herrn Weidt zusammen gearbeitet und ihn intensiv bei der Umsetzung der Ideen betreut sowie Teile des Artikels geschrieben.

Neue Möglichkeiten der Videoanalyse am Beispiel von Sportbewegungen

T. Mück u. T. Wilhelm

1 Videoanalyse von Sportbewegungen

Der Einsatz der digitalen Videoanalyse von Bewegungen ist heute in Lehrplänen vorgesehen. Als Messwerterfassungssystem eignet sie sich besonders, aber nicht nur für den Kinematik- und Dynamikunterricht. Immer wieder erscheinen neue Programme, die teilweise auch neue Funktionen bieten. Im Folgenden soll eine Vielzahl neuerer Möglichkeiten aufgezeigt werden. Sie sind alle mit dem Softwareprogramm „measure Dynamics“ [1-3] möglich und mit der Version 1.3f built 336 erstellt worden. Im ersten Teil werden Beispiele aus dem Sportbereich gezeigt [4+5]. Der zweite Teil gibt einen Überblick über neue Möglichkeiten der Videoanalyse.

1.1 Stabhochsprung

Der Stabhochsprung stellt ein Beispiel eines Energieerhaltungsprozesses dar, bei dem versucht wird, die im Anlaufvorgang erworbene kinetische Energie mithilfe eines elastischen Stabes im Idealfall komplett in potentielle Energie umzuwandeln. Eine entscheidende Bedeutung kommt dabei dem verwendeten elastischen Glasfaserstab zu. Denn dadurch, dass die Bewegungsenergie in Form von Spannenergie im Stab zwischengespeichert werden kann, kann diese wesentlich effektiver zur Überwindung einer Höhendifferenz eingesetzt werden als dies beispielsweise beim Hochsprung der Fall ist.

Analysiert wurde die Bewegung eines Markierungsklebpunktes auf Hüfthöhe, welcher vereinfachend den Körperschwerpunkt der Athletin darstellen sollte. Zunächst kann die komplette Bahnkurve des Objektes z. B. in Form von farbigen Punkten ins Video eingeblendet werden (siehe Abb. 1). Alternativ bietet das Programm die Erstellung eines Stroboskopbildes an, welches den Bewegungsablauf des Athleten zusätzlich verdeutlicht (siehe Abb. 2). Die Darstellungsmöglichkeit des Stroboskopbildes hilft oftmals bei technisch sehr anspruchsvollen Sportarten, wie eben dem

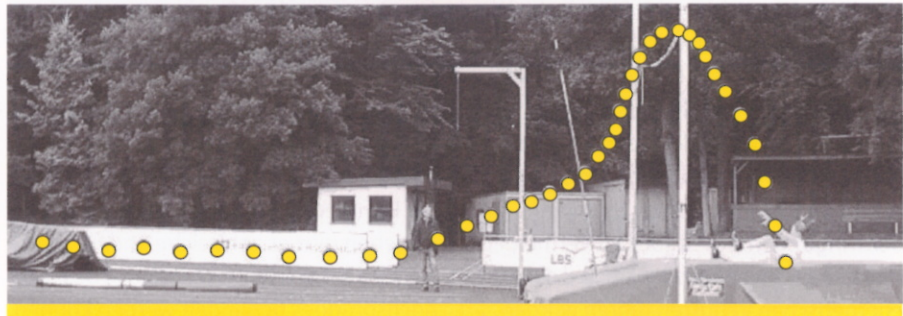


Abb. 1: Bahnkurve eines Stabhochsprunges



Abb. 2: Stroboskopbild des Sprungvorganges

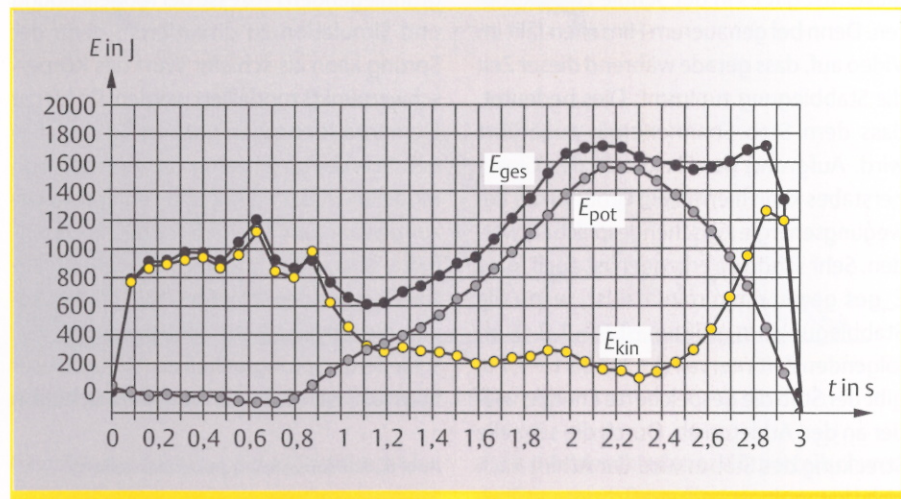


Abb. 3: Energiebeiträge beim Stabhochsprung

Stabhochsprung, den Bewegungsablauf einzelner Körperteile vor allem aus sportwissenschaftlicher Sicht genauer studieren zu können. Auf diese Weise ist es möglich, technische Defizite wie etwa falsche Körperhaltungen oder Schrittfehler beim Anlaufvorgang zu minimieren, um somit den Bewegungsablauf zu optimieren.

Nach erfolgreicher Analyse werden die ermittelten Daten ausgewertet. In Abb. 3

werden die Verläufe der kinetischen Energie (E_{kin}), der potentiellen Energie (E_{pot}) sowie der Summe beider Energieformen (E_{ges}) als Funktion der Zeit veranschaulicht. Der Athlet erwirbt während des Anlaufvorganges ($t = 0,0 \text{ s}$ bis $t = 0,8 \text{ s}$) zunächst kinetische Energie (E_{kin}). Wird die geringe vertikale Bewegung des Körperschwerpunktes vernachlässigt, so besteht die Gesamtenergie während dieser Zeit

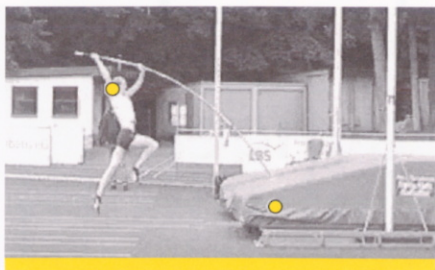


Abb. 4: Springer-Stab als Doppelpendel

ausschließlich aus kinetischer Energie. Um beim Absprung einen hohen Energiebetrag aufzuweisen, versucht der Sportler sein Tempo bis zum Einstich konstant hoch zu halten. Daher ist es wichtig, den Stab während des Laufens ruhig zu halten, um Schwingungen des Stabes zu vermeiden, da diese zu einer Abbremsung und damit zu energetischen Verlusten führen würden.

Die Zusammensetzung der Gesamtenergie (E_{ges}) aus beiden Energieformen ändert sich nach dem Einstich des Stabes ($t = 0,8 \text{ s}$) grundlegend. Der Springer benutzt nun den Stab, um einen möglichst großen Teil seiner vorher erworbenen Energie (E_{kin}) in Höhenenergie (E_{pot}) umzuwandeln. Dies erscheint auf den ersten Blick nicht der Fall zu sein, denn die Summe beider Energien $E_{\text{ges}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$ nimmt von knapp 1000 J auf ungefähr 600 J ab ($t = 0,8 \text{ s}$ bis $t = 1,2 \text{ s}$). Genau jenen scheinbaren Energieverlust gilt es in der Schule zu diskutieren. Denn bei genauerem Hinsehen fällt im Video auf, dass gerade während dieser Zeit die Stabbiegung zunimmt. Dies bedeutet, dass dem Stab Spannenergie zugeführt wird. Aufgrund der Elastizität des Glasfibrstabs kann hiermit ein Großteil der Bewegungsenergie zwischengespeichert werden. Sehr schön zu erkennen ist auch, dass E_{ges} genau dann minimal ist, wenn die Stabbiegung am größten ist ($t = 1,2 \text{ s}$). Im folgenden Zeitintervall ($t = 1,2 \text{ s}$ bis $t = 1,7 \text{ s}$) gibt der Stab die gespeicherte Energie wieder an den Athleten ab. Durch die schnelle Streckung des Stabes wird der Athlet nach oben katapultiert und verzeichnet somit einen Höhengewinn. Bei vollkommen gestrecktem Stab ($t = 1,7 \text{ s}$) ist E_{ges} wieder auf den anfänglichen Wert von 1000 J angestiegen.

Erstaunlich ist jedoch, dass die Summe beider Energiekomponenten $E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$ im nächsten Zeitabschnitt weiter ansteigt ($t = 1,7 \text{ s}$ bis $t = 2,2 \text{ s}$), was dem Energieerhaltungssatz zu widersprechen scheint. Für die beobachtete Energiezunahme ist eine nicht visualisierbare Energiezufuhr verantwortlich; dazu verrichtet der Springer mit seinen



Abb. 5: Stroboskopaufnahme des Weitsprungs

Muskeln Hubarbeit. Aus dem Diagramm kann entnommen werden, dass dieser Beitrag mit ungefähr 700 J in Wirklichkeit einen beträchtlichen Teil der Gesamtenergie ausmacht. Die Schüler lernen so das Prinzip der Energieerhaltung kritisch anzuwenden. Daneben gibt es zahlreiche andere physikalische Sachverhalte, die anhand des Stabhochsprunges behandelt werden können. Das System Sportler-Stab kann z. B. als Doppelpendel modelliert werden. Wie in Abb. 4 ersichtlich, stellen die Einstichstelle des Stabes (gelb) sowie die Schulter des Sportlers (gelb) die Drehachsen der beiden Pendel dar. Durch geschickte Variation von Trägheitsmomenten einzelner Körperteile wird nach dem Einstich der Sprung optimiert.

1.2 Weitsprung

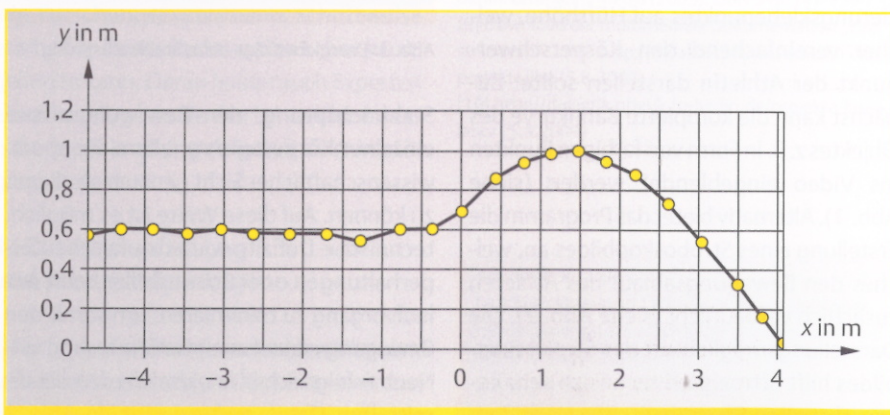
Der Weitsprung eignet sich gut dazu, die grundlegenden Prozesse der Modellbildung und Simulation zu diskutieren, denn der Sprung kann als schiefer Wurf des Körperschwerpunktes modelliert werden. Da hierzu Elementarisierungen notwendig sind, lernen Schüler gleichzeitig die Grenzen von Modellen in der Physik und Fehlerabschätzungen kennen. Weitere mögliche Lerninhalte sind unter anderem vektorielle Betrachtungen der Anlaufgeschwindigkeit sowie die physikalische Interpretation verschiedener Sprungtechniken. Vorteil dieser Sportart ist, dass sie von den Schülern

selbstständig ausgeführt werden kann, was beim Stabhochsprung nicht der Fall war. Die Messungen am eigenen Körper machen den Lernstoff dabei lebendiger und persönlicher, was positive Lerneffekte erhoffen lässt.

Um den schiefen Wurf des Körperschwerpunktes (KSP) zu verfolgen, werden den Schülern Klebepunkte etwa auf Hüfthöhe angebracht, die vereinfacht den KSP darstellen sollen. Abb. 5 zeigt ein Stroboskopbild eines derartigen Sprunges. Zur besseren Übersicht wurde ein einfarbiger Hintergrund gewählt. Zudem kann die Bahnkurve des KSP komplett als Diagramm eingeblendet werden (siehe Abb. 6) oder vom Videoanalyseprogramm simultan mit dem Ablauf des Videos entwickelt werden.

Die Fragestellungen rund um ein Weitsprungprojekt können sich von Messung von Anlauftempo und Sprungweite für eine Modellierung bis hin zu Auswirkungen von Variationen der Modellparameter im entwickelten Modell erstrecken. So kann z. B. in „measure Dynamics“ ein aufgenommener Sprung mit einer zugeschalteten Simulationskurve verglichen werden. Die Parameter der Simulationskurve werden dem Video mittels Messfunktionen entnommen. In diesem Fall werden Absprungtempo, Absprungwinkel und die Absprunghöhe benötigt. Daraus ergibt sich schließlich eine Simulationskurve, welche die gemessene Bahnkurve möglichst gut approximieren sollte. Im vorliegenden Fall ergeben

Abb. 6: Bahnkurve in Diagrammdarstellung



sich tatsächlich trotz des sehr simplen Modells des schiefen Wurfes erstaunlich gute Approximationen, wie in Abb. 7 in einem x - y -Diagramm gezeigt wird. Zu erkennen ist dabei, dass sich erst kurz vor der Landung des Springers signifikante Abweichungen von Modellkurve zur real gemessenen Bewegung ergeben. Dies liegt an der Sprungtechnik des Athleten, welche später noch behandelt wird.

Sollen Aussagen über den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Sprungweite gemacht werden, so bietet sich die so genannte Schiebereglerfunktion an, über welche „measure Dynamics“ verfügt. Bei spezieller Eingabe der verwendeten Fitfunktionen der Simulation lassen sich sämtliche Einflussgrößen manuell regeln. Die Veränderungen der Simulationskurve, die aus der Variation der Parameter resultieren, werden instantan angezeigt. Auf diese Weise kann die Bedeutung wesentlicher Einflussfaktoren des Modells verständlich erläutert werden. Im vorliegenden Fall wurde der Einfluss des Absprungtempos auf die Sprungweite analysiert (siehe Abb. 8). Die einzelnen Simulationskurven in Abb. 8 unterscheiden sich im Absprungtempo jeweils um 1 m/s . Deutlich sichtbar ist, dass ein hohes Absprungtempo einen entscheidenden Faktor für einen erfolgreichen Sprung darstellt. Analoge Variationen können natürlich auch für den Absprungwinkel sowie die Absprunghöhe gemacht werden.

Aber nicht nur für den Physiker ist die Auswertung des Weitsprungs per Videoanalyse sinnvoll. Gerade Sportwissenschaftler verwenden vielfach diese Arbeitsmethode zur Optimierung verschiedener technischer Details, um dadurch größere Sprungweiten zu erzielen. Alle Techniken nutzen physikalische Gesetzmäßigkeiten aus, was kurz anhand der Hangsprungtechnik, deren Bezeichnung sich aus der Haltung des Athleten während der Flugphase ableitet, diskutiert wird. Der beim Hangsprung erzielte Weitengewinn kann mithilfe der Newton'schen Axiomatik begründet werden. Betrachtet wird das Gesamtdrehmoment des Springers nach dem Absprung. Auf den Sportler wirkt unter Vernachlässigung von Reibungskräften während des Fluges lediglich die Gewichtskraft in Folge der Erdbeschleunigung, wodurch jedoch keine zusätzlichen Drehmomente erzeugt werden. Es gilt damit Drehimpulserhaltung. Trotzdem ist es möglich, durch Änderung von Massenträgheitsmomenten einzelner Körperteile dort Drehmomente zu induzieren.

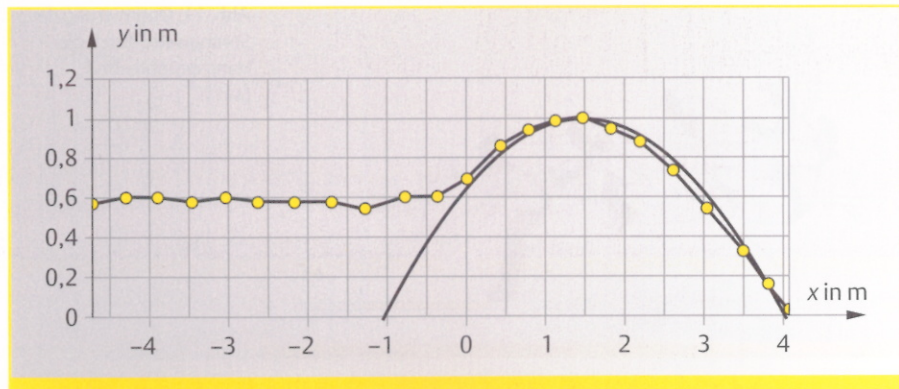


Abb. 7: Vergleich Modell - reale Bewegung

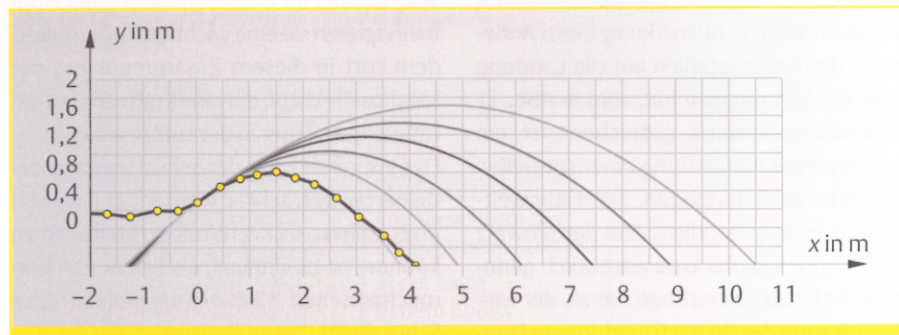


Abb. 8: Variation des Absprungtempos



Abb. 9: Stroboskopbild eines Hangsprungs

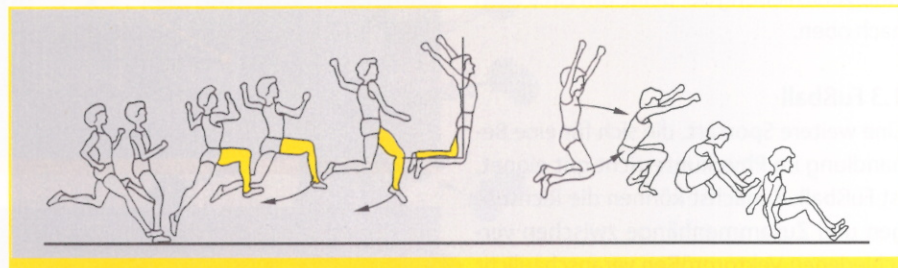


Abb. 10: Schematischer Ablauf des Hangsprungs (aus [6])

Gemäß der Erhaltung des Drehimpulses muss dabei jedes so erzeugte Drehmoment ein gegenläufiges hervorrufen. Genau dieser Sachverhalt tritt beim Hangsprung auf. Nachstehende Abbildungen zeigen einerseits ein mit „measure Dynamics“ erstelltes Stroboskopbild eines Hangsprungs (siehe Abb. 9), andererseits zum Vergleich einen technisch korrekten Sprungablauf nach sportwissenschaftlichen Überlegungen (siehe Abb. 10).

Der Athlet kann zwar nach Absprung die Flugbahn seines Gesamtkörperschwerpunktes nicht mehr beeinflussen, jedoch

die Bahn verschiedener Körperteilschwerpunkte schon. Beim Hangsprung wird dies in Form einer Art „Klappbewegung“, die der eines Klappmessers ähnelt, realisiert. Dazu streckt der Sportler den Kopf samt Oberkörper nach vorne. Die Arme rotieren gleichzeitig dazu im Uhrzeigersinn nach unten, wodurch ein Drehmoment bezüglich der Hüfte als Drehachse erzeugt wird. Dieses Drehmoment muss durch ein gegenläufiges egalisiert werden, damit der Gesamtdrehimpuls erhalten bleibt. Jene Ausgleichsbewegung wird durch die Beine vollzogen. Diese bewegen sich in entgegenge-

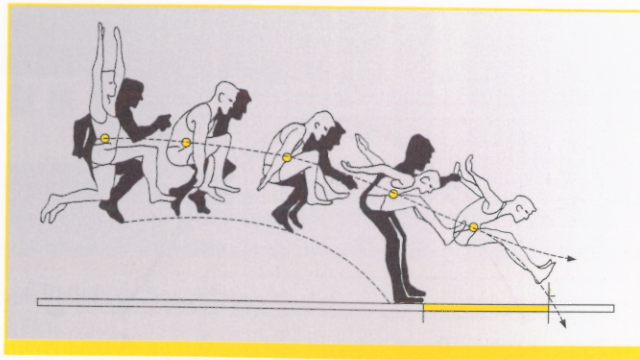


Abb. 11: Optimierung der Sprungweite durch die Hangsprungtechnik (aus [7])

setzter Drehrichtung, also nach vorne oben. Der Anfangsdrehimpuls bleibt somit erhalten. Welche Auswirkung diese Anhebung der Beine letztlich auf die Landung bzw. die Sprungweite hat, wird in Abb. 11 ersichtlich. Schwarz gezeichnet ist ein Sprung ohne Anwendung einer speziellen Technik, weiß hingegen der Hangweitsprung. Es wird deutlich, dass der schwarz hinterlegte Sportler eine wesentlich geringere Weite zu verzeichnen hat als der weiße aufgrund der deutlich niedrigeren Flugbahn der Beine.

Im Einzelnen wird der Körperschwerpunkt der Arme um etwa 60 cm nach unten verschoben. Damit ergibt sich gemäß der Definition des Gesamtkörperschwerpunkts, dessen Bahnkurve nach dem Absprung nicht mehr beeinflusst werden kann, eine Verschiebung der anderen Körperteile nach oben, sodass sich der Gesamtschwerpunkt nicht ändert. Insgesamt resultiert durch eine Verschiebung der Beine um circa 8 cm nach oben.

1.3 Fußball

Eine weitere Sportart, die sich für eine Behandlung im Physikunterricht gut eignet, ist Fußball. Zunächst können die Richtungen und Zusammenhänge zwischen verschiedenen Vektorgößen veranschaulicht werden. Auswertungsgrundlage bildet eine Fußballflanke. Im folgenden Beispiel (siehe auch Abb. 12) sind manuell Geschwindigkeitsvektoren für die Einzelkomponenten in x- bzw. y-Richtung sowie für die Gesamtgeschwindigkeit zugeschaltet, um einerseits den Vektorcharakter der Geschwindigkeit zu unterstreichen, andererseits aber auch das Unabhängigkeitsprinzip von überlagerten Bewegungen zu thematisieren. In gleicher Art kann die Beschleunigung komponentenweise eingeblendet werden. Natürlich besteht auch die Möglichkeit, den schiefen Wurf anhand einer Flanke zu behandeln. Dabei ist jedoch zu beachten, dass ab einem gewissen Schusstempo die Rei-

bungskräfte nicht mehr zu vernachlässigen sind. Gerade für die Beschreibung der Flugbahn spielen sie eine wichtige Rolle. Außerdem tritt in diesem Zusammenhang der Magnuseffekt auf, der eine Kraftwirkung auf rotierende Körper in der Luft beschreibt. Des Weiteren kann der Schussvorgang detaillierter betrachtet werden. Um diesen physikalisch als Kraftstoß modellieren zu können, ist es sinnvoll, als Erstes den biomechanischen Bewegungsablauf des Schussbeines zu analysieren. Dazu werden verschiedene Partien des Beines verfolgt. Im Einzelnen werden die Hüfte (grau), das Knie (schwarz), der Fußspann (gelb) sowie

der Ball (hellgelb) ausgewertet, was die Abb. 13 veranschaulicht.

Um eine möglichst große Beschleunigung des Balls zu erreichen, ist es nach biomechanischen Vorstellungen besonders wichtig, die einzelnen Teile des Beines in ihrer Bewegung aufeinander abzustimmen. Ziel ist ein möglichst hoher Impulsübertrag vom Fuß auf den Ball. Dies ist nur möglich, wenn die Teilimpulse der einzelnen Körperteile in optimaler Weise koordiniert werden, was durch zeitlich kurz versetzte maximale Beschleunigungen von Hüfte, Oberschenkel und Unterschenkel umgesetzt wird. Deshalb erreichen die Beinpartien auch erst nacheinander Maximalgeschwindigkeit. Diesen Sachverhalt zeigt Abb. 14. Man hätte vermuten können, dass es am geschicktesten ist, die Beschleunigung des Beines gleichzeitig zu maximieren und das Tempo bis unmittelbar zum Stoß zu erhöhen, um somit einen möglichst hohen Impulsübertrag des Fußes auf den Ball zu gewährleisten. Diese Vorstellungen sind eben nur teils richtig, da zwar ein hohes Fußtempo angestrebt wird, der gesamte Beinapparat jedoch bereits Sekundenbruchteile vor

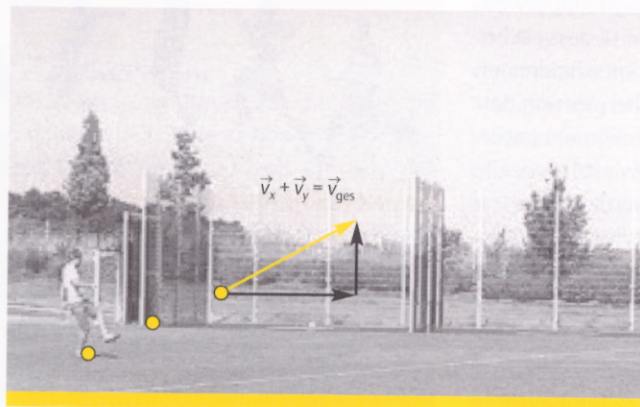


Abb. 12: Vektoraddition am Beispiel Fußballflanke

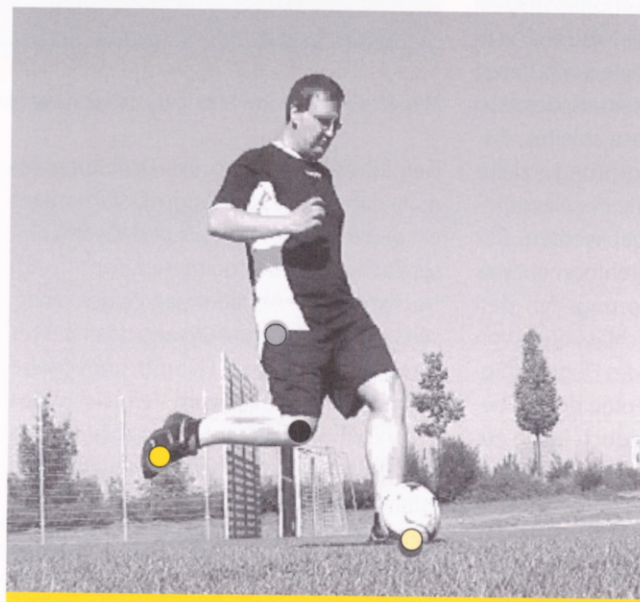


Abb. 13: Bewegungsanalyse einzelner Komponenten des Schussbeines

dem eigentlichen Ballkontakt abgebremst wird. Das liegt daran, dass durch Muskelkraft alle Beinpartien angespannt werden, wodurch der Fuß insgesamt steifer und damit stabiler wird. Bei diesem Anspannvorgang wird das Bein schon vor dem Zusammenstoß abgebremst und bündelt auf diese Weise Tempo ein. Dieser bewusste Tempoverlust wird jedoch dadurch überkompensiert, dass auf den Fußball letztlich eine sehr viel höhere Stoßmasse wirkt, welche einen größeren Impulsübertrag impliziert. Aufbauend auf diesen Überlegungen ist es denkbar, beispielsweise den Verlauf der beim Stoßvorgang erworbenen kinetischen Energie zu untersuchen. Am Beispiel eines gewöhnlichen Schusses oder einer Flanke können so Reibungseffekte quantisiert werden. Faszinierender ist aber der Verlauf der Bewegungsenergie eines Lattentreffers. Der Ball erfährt wie beim gewöhnlichen Schuss einen Kraftstoß durch das Schussbein. Des Weiteren kommt es beim Aufprall auf die Latte zu einem weiteren Stoßvorgang, durch welchen der Ball stark deformiert wird und daher Energie an die Metalllatte abgibt. Wie sich dieser Energieübertrag im Diagramm bemerkbar macht, veranschaulicht Abb. 15. Die Energieverluste des Balls sind also bei derart inelastischen Stößen enorm hoch.

1.4 Drehwurfbewegungen

Drehbewegungen finden sich in vielen leichtathletischen Grunddisziplinen wie z. B. Hammerwurf, Diskuswurf oder auch Schleuderball wieder. Generell dienen die Drehbewegungen bei all diesen Sportarten dazu, das jeweilige Sportgerät auf begrenztem Raum auf möglichst hohes Tempo zu bringen. Im Schulunterricht können nachfolgende Beispielsportarten zur Einführung von Drehbewegung und der damit verbundenen physikalischen Größen eingesetzt werden. Aber auch vertiefende Betrachtungen zu auftretenden Kräften und damit verbundenen Energien bilden Problemstellungen einer Unterrichtseinheit. Viele Schüler sehen bekanntermaßen Kreisbewegungen als ungezwungene, natürliche Bewegung und damit als kräftefrei an. Der Bewegungsablauf beim Schleuderballwurf lässt sich mit der Stroboskopbildfunktion veranschaulichen, wobei wieder ein einfarbiger Hintergrund verwendet wurde (siehe Abb. 16). Auffallend ist die elliptische Abweichung von einer Kreisbewegung, die auch in der Bahnkurve im x-y-Diagramm zusätzlich deutlich wird (siehe Abb. 17). Die-

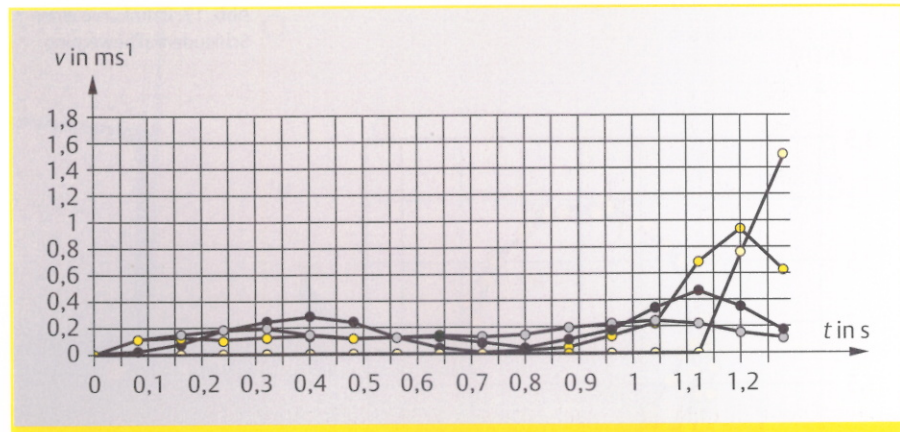


Abb. 14: Geschwindigkeitsverläufe einzelner Beinpartien (grau: Hüfte, schwarz: Knie, gelb: Fußspann, hellgelb: Fußball)

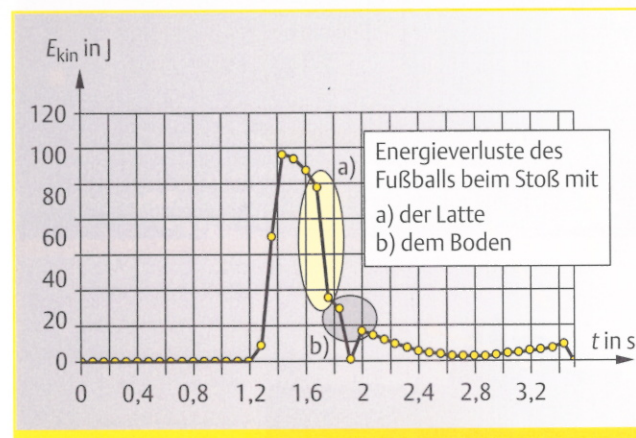


Abb. 15: Energieverluste des Fußballs beim Stoß mit a) der Latte b) dem Boden

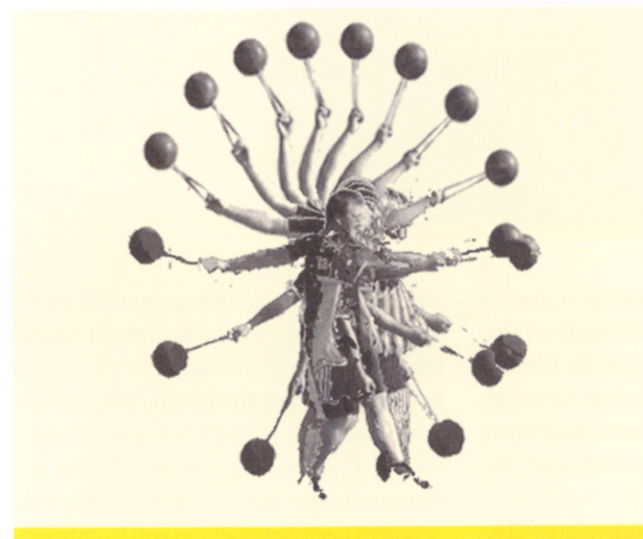


Abb. 16: Stroboskopbild zur Visualisierung der Bewegung beim Schleuderball

se entsteht durch die Auf- und Abwärtsbewegung der Schulter.

Zur Diskussion der bei der Drehung wirkenden Kräfte können Vektoren ins Video zuschaltet werden. Durch Einblendung der Beschleunigung wird diese beim Werfen des Schleuderballes sichtbar (siehe Abb. 18). Aus der Messtabelle des Videoanalyseprogramms können quantitative Informationen gewonnen werden. So werden verschiedene Überschlagsrechnungen und Abschätzungen hinsichtlich der Wurfweite des

Schleuderballs möglich, die allesamt ähnlich denen eines schiefen Wurfes durchgeführt werden können.

Thema einer vertiefenden Einheit zu Drehbewegungen bietet der Vergleich der Weltrekorde von Kugelstoß und Hammerwurf. Trotz gleicher Wurfmassen unterscheiden sich beide Rekorde mit 23,12 m (Kugelstoß) und 86,74 m (Hammerwurf) doch beträchtlich. Wie der Schleuderballwurf eignet sich auch der Hammerwurf, um physikalische Modellbildung zu betreiben. Zu-

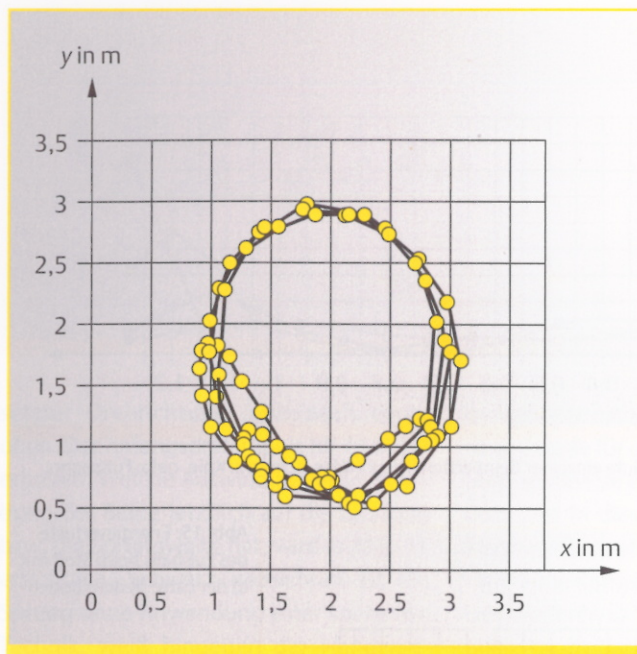


Abb. 17: Bahnkurve einer Schleuderballbewegung

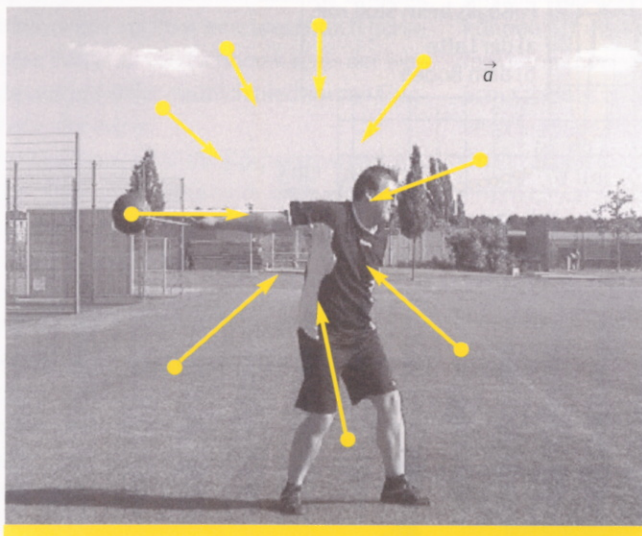


Abb. 18: Darstellung der Zentripetalbeschleunigung

nächst wird die Bahnkurve eines Hammerwurfes sowohl im Video als auch im Diagramm (siehe Abb. 19) dargestellt. Die Auswertung kann nach ähnlichen Gesichtspunkten wie beim Schleuderball erfolgen, da sich die Sportarten hinsichtlich des Bewegungsablaufes ähneln.

Der Unterschied zum Schleuderball ist, dass der Hammer aufgrund seiner Masse idealer Weise schräg zum Boden beschleunigt werden muss. Der Grund hierfür ist, dass bei anderer Orientierung der Drehbewegung der Sportler nicht mehr in der Lage wäre, den Hammer durch Einsatz seiner Gewichtskraft festzuhalten bzw. festen Bodenkontakt zu behalten. Bei der Berechnung der auftretenden Zentripetalkräfte wird dies schließlich bestätigt. So treten bei Spitzensportlern betragsmäßig Kräfte von bis zu 3000 N auf, was bedeutet, dass der Hammer kurz vor Abwurf am Athleten

zieht, als hätte er eine Masse von 300 kg. Erstaunlich ist hier, welche enorme Kraft also letztlich auf den Hammer wirken muss, um ihn auf seine kreisähnliche Bahn zu „zwingen“. Dass die enorme Wurfweite mit dem Hammer nur durch die hinzugeführte Rotationsenergie erreicht wird, sollte den Schülern nach Behandlung von Drehbewegungen klar geworden sein.

2 | Neue Möglichkeiten mit „measure Dynamics“

2.1 Automatische Analyse

Eine deutliche Verbesserung gegenüber den bisherigen Programmen stellt die automatische Analyse dar, die neben der manuellen Analyse möglich ist. Diese automatische Analyse war bei den deutschen Videoanalyseprogrammen für den Physikunterricht bisher nur bei „AVA“ [8], „Viana“

[9] und „Coach 6“ möglich. Die reine Farbanalyse von „Viana“ und „Coach 6“ führt z. T. zu schlechten Ergebnissen und erforderte eine manuelle Nachbearbeitung oder sogar eine komplette manuelle Analyse. Bei „AVA“ wurde zwar das Objekt erkannt, es durfte aber nicht rotieren, was ebenfalls zu Problemen führte. Die automatische Analyse bei „measure Dynamics“ arbeitet mit Farb- und Bewegungsanalyse. Die Software erkennt dabei die geometrische Form und die Größe des zu analysierenden Objektes, auch wenn dieses rotiert. Diese automatische Analyse stellt besonders bei längeren Videos eine erhebliche Zeitersparnis dar. Eine große Bildanzahl ist z. B. nötig, um die Maxwellverteilung als statistische Verteilung zu zeigen [10].

2.2 Berechnungen in Tabellen

Die bei der Analyse bestimmten Werte werden zunächst wie bei den meisten Programmen in einer Tabelle dargestellt. Aus den Koordinaten, die zunächst in Pixeln bestimmt werden, werden über einen vorher definierten Maßstab die Größen Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung mithilfe der bekannten Zeitintervalle jeweils in x- und y-Richtung berechnet. Sinnvollerweise können zusätzlich Tabellenspalten angelegt werden. Darin können wie in einem Tabellenkalkulationsprogramm weitere Werte, wie z. B. der Geschwindigkeitsbetrag oder die kinetische Energie berechnet werden. Darüber hinaus ist es auch sinnvoll, dass die Tabelle leicht in Excel importiert werden kann, um dort weiterführende komplexere Berechnungen, wie z. B. statistische Analysen durchzuführen [10].

Die meisten Videoanalyseprogramme berechnen aus zwei Ortswerten x_1 und x_2 mittels $v = \Delta x / \Delta t$ die Geschwindigkeit eines Intervalls und ordnen sie (fälschlich) dem zweiten Ortswert, also dem Ende statt der Mitte des Intervalls zu. Dann wird aus zwei Geschwindigkeiten analog die Beschleunigung $a = \Delta v / \Delta t$ berechnet und diese wieder dem Intervall-Ende zugeordnet, also wieder $\Delta t / 2$ zu spät. Insgesamt ist damit die Beschleunigung um Δt versetzt zugeordnet (siehe Abb. 20). Die Videoanalysesoftware DiVA macht dagegen intern einen Fit an die Ortswerte und bildet davon die Ableitungen. Dann sind die Werte zwar schön, aber deren Berechnung nicht mehr nachvollziehbar. „measure Dynamics“ berechnet dagegen die Geschwindigkeit aus einem Ortswert x_1 und dem übernächsten x_3 und ordnet das Ergebnis dem mittleren Ortswert x_2

zu, entsprechend bei der Beschleunigung. So ergibt sich eine nachvollziehbare Berechnung mit korrekter Zeituordnung. Allerdings bedeutet das auch eine Mittlung über ein größeres Intervall, was häufig, aber nicht immer wünschenswert ist.

Manchmal ist es auch von Vorteil, dass man in „Coach 6“ und in „measure Dynamics“ nicht nur den Koordinatennullpunkt beliebig wählen kann, sondern auch die Orientierung des Koordinatensystems. Das heißt, man kann das Koordinatensystem drehen. So kann es beispielsweise so gelegt werden, dass eine Bewegung auf einer schiefen Ebene als eindimensionale Bewegung erscheint.

2.3 Darstellung von Diagrammen

Von Vorteil ist es, wenn Grafen synchron mit dem ablaufenden Experiment oder Video entstehen und nicht als Ganzes eingeblendet werden. Die Software „measure Dynamics“ bietet diese Möglichkeit der Erstellung von Diagrammen in Echtzeit (siehe Abb. 21). Entscheidend ist, dass die Ortspunkte im Diagramm synchron mit der Bewegung des Pendels im Video entstehen und auch die Diagramme für Geschwindigkeit und Beschleunigung in Echtzeit parallel zum Video erzeugt werden. So ist es einfacher zu erkennen, welche Phase im Video welchem Grafenteilstück entspricht und somit ist die Kluft zwischen der konkreten visuellen Darstellung des Bewegungsablaufes und seiner abstrakten grafischen Darstellung für den Lernenden leichter zu überbrücken.

2.4 Abspielfunktionen

Beim Abspielen eines Videos in „measure Dynamics“ kann mit der Funktion „Schrittweite“ eingestellt werden, dass nur jedes n -te Bild des Videos gezeigt wird. Damit erhält man eine Zeitrasterfunktion; das Video läuft in der n -fachen Geschwindigkeit ab. Dies ist insbesondere bei langsam ablaufenden Vorgängen von Nutzen. In Diagrammen werden trotzdem alle Daten der Analyse eingezeichnet, so dass man so auch schneller das gewünschte Diagramm erhalten kann. Möglich ist auch, bereits für die Analyse langsam ablaufender Vorgänge eine Schrittweite einstellen, so dass nur jedes n -te Bild analysiert wird und damit Analysezeit eingespart wird.

Für die Analyse des Bewegungsvorgangs im Klassengespräch ist es ein großer Vorteil, dass jeder Zeitpunkt schnell angesprungen werden kann, indem man in der Tabelle auf die entsprechende Zeile klickt. Dann wird



Abb. 19: Bahnkurven im Video und im Diagramm

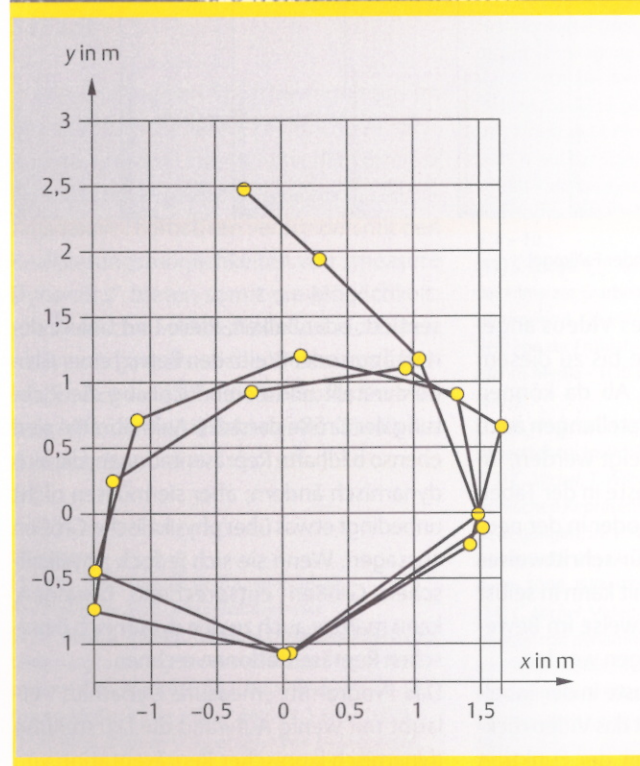
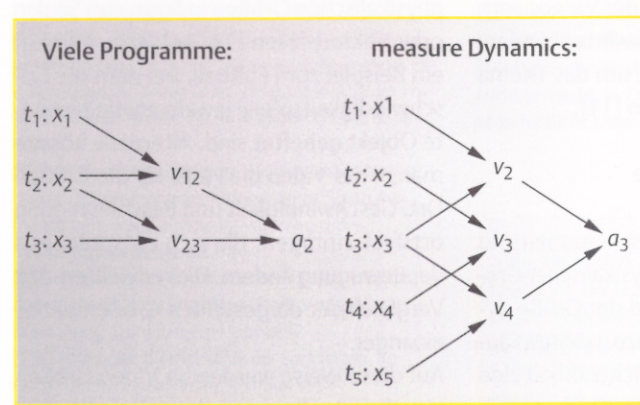


Abb. 20: Berechnung von Geschwindigkeit und Beschleunigung durch Differenzbildung



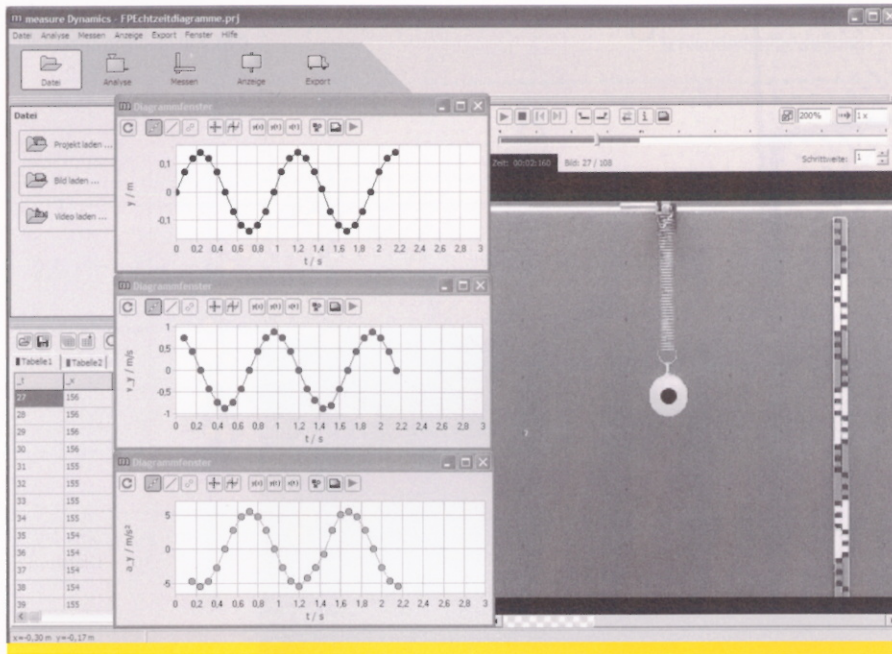


Abb. 21: Simultanes Entstehen der Diagramme mit dem Ablauf des Videos



Abb. 22: Serienbild zweier fallender Fallkegel

das entsprechende Bild des Videos angezeigt und alle Diagramme bis zu diesem Zeitpunkt eingezeichnet. Ab da können nun das Video und alle Darstellungen auch schrittweise weiter angezeigt werden, indem man mit der Cursortaste in der Tabelle weiter nach unten läuft oder in der neueren Version den Knopf für schrittweises Weiterschalten nutzt. Damit kann in selbst gewähltem Tempo schrittweise im Bewegungsablauf weiter gegangen werden. Läuft man mit der Cursortaste in der Tabelle dagegen nach oben, läuft das Video rückwärts ab. Dies ist auch mit der Funktion „Rückwärts“ möglich, bei der Videos vom letzten zum ersten Bild rückwärts ablaufen, was genutzt werden kann, um das Thema Irreversibilität zu erarbeiten [11].

2.5 Dynamisch ikonische Repräsentationen

Dynamisch ikonische Repräsentationen sind bildhafte Darstellungen physikalischer Größen, die sich entsprechend der Größe dynamisch verändern [12]. Dazu gehören Säulen und Flächen, deren Flächeninhalt den Betrag einer physikalischen Größe reprä-

sentiert, oder Balken, Pfeile und Linien, deren Länge oder Breite den Betrag einer Größe darstellt und deren Richtung die Richtung der Größe darstellt. Animationen sind ebenso bildhafte Repräsentationen, die sich dynamisch ändern; aber sie müssen nicht unbedingt etwas über physikalische Größen aussagen. Wenn sie sich jedoch physikalischen Größen entsprechend bewegen, kann man sie auch zu den dynamisch ikonischen Repräsentationen rechnen.

Das Programm „measure Dynamics“ erlaubt mit wenig Aufwand die Darstellung dynamisch ikonischer Repräsentation von physikalischen Größen in Form von Säulen oder Vektorpfeilen [13, 14]. Abb. 12 zeigt ein Beispiel zum Fußball, bei dem die Geschwindigkeitspfeile jeweils an das bewegte Objekt geheftet sind. Alternativ könnte man in das Video die Pfeile für die Größen Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung ortsfest einfügen, die sich entsprechend der Bewegung ändern. Dies erleichtert den Vergleich der dargestellten Größen untereinander.

Auf diese Weise werden im Video Größen visualisiert, die normalerweise mit dem

Auge nicht sichtbar sind, wie z.B. Geschwindigkeit, Impuls, Beschleunigung oder Kraft und ihr vektorieller Charakter wird durch die Darstellung von bewegten Pfeilen betont. Viele Studien haben bereits gezeigt, dass es für ein Verständnis der Mechanik nötig ist, die Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung als gerichtete Größen an zweidimensionalen Bewegungen einzuführen [15]. Dieser zweidimensionale Einstieg in die Mechanik kann durch den Einsatz von Videoanalyse erleichtert und veranschaulicht werden.

2.6 Serienbilder und Streifenbilder

Des Weiteren können mit der Software Serienbilder erstellt werden. Dabei werden die verschiedenen Bilder eines Videos bzw. Ausschnitte automatisch nacheinander in eine Tabelle gesetzt und insgesamt als ein einziges Bild ausgegeben (siehe Abb. 22). So kann man leicht Arbeitsblätter für Schüler erstellen, mit denen diese eine Videoanalyse auf dem Papier durchführen. Man braucht dazu nur die Zeitdifferenz zwischen zwei Bildern und eine Referenzlänge. Somit lässt sich das Serienbild nicht nur qualitativ nutzen, sondern auch quantitativ auswerten.

Wählt man beim Serienbild zusätzlich den für die Erstellung verwendeten Bildausschnitt geschickt, nämlich als schmalen Streifen, kann damit auch ein Zeit-Ort-Diagramm erzeugt werden. In der Abb. 23 ist ein solches Serienbild als „Streifenbild“ zu sehen, das aus einem Video zu Bahrdtschen Fallkegeln erstellt wurde. Macht man ein Serienbild nur von den ortsfesten Pfeilen, z.B. von den Geschwindigkeitspfeilen, erhält man sogar ein t - v -Diagramm (siehe Abb. 24).

2.7 Stroboskopbilder

In zahlreichen Schulbüchern zum Physikunterricht sind Stroboskopbilder zu finden. Sie dienen zur Veranschaulichung von Bewegungsabläufen oder zur Darstellung beschleunigter Bewegungen. Bisher gab es aber keine einfache Möglichkeit für Lehrer, ein Stroboskopbild eines Versuchsablaufs zu erstellen. Aus einem in „measure Dynamics“ geladenen Video kann aber leicht mit wenigen Mausklicks ein Stroboskopbild erstellt werden (siehe Abb. 2) [16].

Zusätzlich können zahlreiche Einstellungen vorgenommen werden. Da das Programm das ganze Objekt vom Hintergrund trennt, ist es z.B. möglich, einen einfarbigen Hintergrund zu wählen (siehe Abb. 5, 9, 16).

Um die Entstehung des Stroboskopbildes aus den einzelnen Frames (=Einzelbilder) des Videos besser erklären zu können, ist es zudem möglich, farbige Blitzlichter zu verwenden (bis zu 64 verschiedene Farben).

2.8 Fitkurven

Zusätzlich zu den gemessenen Kurven können berechnete Kurven zum Vergleich eingeblendet werden (siehe Abb. 7). Solche berechneten Kurven werden immer als Ganzes für alle Zeiten eingeblendet, während die Messkurven mit dem Ablauf des Videos entstehen. Dabei kann man dann vergleichen, inwieweit die gemessene Kurve der erwarteten Kurve entspricht.

Möglich ist auch, in der Funktionsgleichung Variablen und jeweils mögliche Bereiche anzugeben. Mithilfe von Schieberegler können dann verschiedene Werte für die Variablen eingestellt werden und so die berechnete Kurve so lange verändert werden, bis sie der Messkurve entspricht (siehe Abb. 8). Auf diese Weise kann ein Kurvenfit durchgeführt werden.

2.9 Unterschiedlicher methodischer Einsatz

Alle Daten, Darstellungen und Einstellungen, die in der Tabelle oder am Video vorgenommen werden, können in „measure Dynamics“ als so genanntes „Projekt“ gespeichert werden. Diese Dateisammlung kann dann über eine entsprechende Datei mit der Endung „prj“ aufgerufen werden. Dann kann die Software ohne erneute Analyse das Video gleich mit allen voreingestellten Darstellungen präsentieren.

Die Tabellen, Bilder und sogar die bearbeiteten Videos können aber auch exportiert werden und dann unabhängig von der Software verwendet werden. Besonders interessant ist, das Video mit den dynamisch ikonischen Repräsentationen wie z. B. Vektorpfeilen als avi-Datei zu exportieren, so dass es ohne die Originalsoftware verwendet und als Lehrvideo gezeigt werden kann. Die Videos mit den dynamischen Darstellungen können also mit der Software recht unterschiedlich in Unterricht eingesetzt werden. Ein Video kann im Unterricht mit der Software manuell oder automatisch analysiert werden. Anschließend können die gewünschten Darstellungen („Filter“) selbst erstellt oder einfacher aus einer geladenen Liste zugeschaltet werden. Für weitere Beispielen kann im Unterricht auch einfach ein abgespeichertes Projekt geöffnet oder ein exportiertes Video gezeigt werden.



Abb. 23: Serienbild mit sehr schmalen Streifen (Streifenbild) ergibt ein t-y-Diagramm

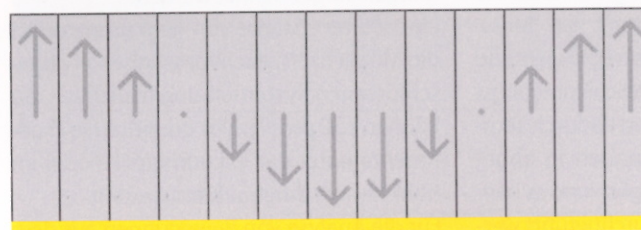


Abb. 24: Ein Streifenbild eines Geschwindigkeitsvektors ergibt ein t-v-Diagramm

3 Fazit

Die Analyse von Sportbewegungen im Physikunterricht liefert zahlreiche Ansatzpunkte, um den Unterrichtsverlauf interessant und motivierend zu gestalten. Die alltagsnahen Thematiken verbunden mit den Realisierungsmöglichkeiten von „measure Dynamics“ bieten somit die Möglichkeit, physikalische Sachverhalte auf eine alternative und anschauliche Weise darzustellen, wobei vor allem die bildhafte Darstellung hilft, die Physik dahinter verständlicher zu machen.

Literatur

- [1] <http://www.phywe.de/framenav.php?nav1=60&nav2=7&csscol=son&ref=nav>
- [2] M. Benz, T. Wilhelm: measure Dynamics – Ein Quantensprung in der digitalen Videoanalyse – in: V. Nordmeier, H. Grötzebach (Hrsg.): Didaktik der Physik, Lehmanns Media, Berlin 2008, ISBN 978-3-86541-317-8
- [3] M. Benz: Digitale Videoanalyse von Bewegungen, Staatsexamensarbeit, www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/Videoanalyse2.htm
- [4] T. Mück, T. Wilhelm: Physik und Sport – Fächerverbindender Unterricht mit moderner Videoanalyse, in: V. Nordmeier, H. Grötzebach (Hrsg.): Didaktik der Physik, Lehmanns Media, Bochum 2009, LOB.de, Berlin 2009
- [5] T. Mück: Physik und Sport – Fächerverbindender Unterricht mit moderner Videoanalyse, Staatsexamensarbeit, www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/sport.htm
- [6] C. Haberkorn, R. Plab, H. Baumann (Hrsg.): Leichtathletik Band 2: Sprung, Wurf, Stoß, Verlag Moritz Diesterweg, Frankfurt am Main 1992
- [7] K. Willimczik: Biomechanik der Sportarten, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek 1989
- [8] M. Suleder, D. Heuer: Automatische Videoanalyse,

- in: V. Nordmeier (Hrsg.): Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG Leipzig 2002, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin 2002, ISBN 3-936427-11-9
- [9] <http://didaktik.physik.uni-essen.de/viana/>
- [10] T. Geßner, M. Benz, T. Wilhelm: Einstein, Maxwell und Co. auf der Spur – Auswertung von Modellgasen mittels Videoanalyse, in: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule PhyDid 1/8, www.phydid.de, 2009, S. 1 – 10
- [11] S. Langsch, T. Kersting: Nutzung rückwärts laufender Filme zur Erarbeitung von Irreversibilität, in: V. Nordmeier, A. Oberländer (Hrsg.): Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung Düsseldorf 2004, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin 2004, ISBN 3-86541-066-9
- [12] D. Heuer: Konzepte für Systemsoftware zum Physikverstehen, in: PdN-Ph 4/45 (1996) S. 2–11
- [13] C. Michel, T. Wilhelm: Lehrvideos mit dynamisch ikonischen Repräsentationen zu zweidimensionalen Bewegungen, in: V. Nordmeier, H. Grötzebach (Hrsg.): Didaktik der Physik – Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin 2008, ISBN 978-3-86541-317-8
- [14] C. Michel: Videoanalyse zweidimensionaler Bewegungen mit dynamisch ikonischen Repräsentationen im Physikunterricht, Staatsexamensarbeit, www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/Videoanalyse1.htm
- [15] T. Wilhelm: Mechanik – Zweidimensional und multimedial, in: V. Nordmeier, H. Grötzebach (Hrsg.): Didaktik der Physik – Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin 2008, ISBN 978-3-86541-317-8
- [16] M. Suleder: Stroboskopbilder – lehrreich und leicht gemacht, in: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 62, Nr. 5, 2009, S. 285 – 287

Anschrift der Verfasser

Tobias Mück, AR Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, E-Mail: Tobias.Mueck@gmx.net
E-Mail: wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de, www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm

**Bewegungen des eigenen Körpers –
Möglichkeiten der Messwerterfassung im Vergleich****Martin Weidt, Thomas Wilhelm**Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Am Hubland, 97074 Würzburg
martin.weidt@physik.uni-wuerzburg.de, thomas.wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de**Kurzfassung**

Um dem sinkenden Interesse vieler Schüler am Fach Physik entgegen zu wirken, wurde immer wieder gefordert, im Unterricht stärker an Alltagserfahrungen von Schülern anzuknüpfen und einen Bezug zum menschlichen Körper herzustellen. Durch das Behandeln von alltäglichen Bewegungen, wie z.B. Gehen, Laufen, Treppensteigen oder einfachen Sprüngen, kann diesen Forderungen Rechnung getragen werden. Die Erfassung der physikalisch relevanten Größen entsprechender Bewegungen der Schüler kann heute durch verschieden computerbasierte Messwerterfassungsmöglichkeiten erfolgen, wie Kraftmessplatte, Funk-3D-Beschleunigungssensoren oder Videoanalyse. Es werden Vor- und Nachteile der verschiedenen Messwerterfassungsmöglichkeiten bei diesem Thema herausgearbeitet sowie Beispiele solcher Messungen vorgestellt.

1. Gründe für die Behandlung von Bewegungen des eigenen Körpers

Die IPN-Interessenstudie [1] zeigt, dass das Interesse am Fach Physik (Fachinteresse) bei Jungen und Mädchen sehr unterschiedlich ausfällt. Vergleicht man das Fachinteresse von Physik, Deutsch, Kunst und Fremdsprachen, so stufen die Mädchen Physik am uninteressantesten, die Jungen Physik am interessantesten ein. Bei der Suche nach den Gründen muss das Interesse an den Inhalten (Sachinteresse) analysiert werden. Neben weiteren Punkten wird dabei der „Bezug zum menschlichen Körper“ und die „Anbindung an alltägliche Erfahrungen“ als sehr förderlich für das Interesse der Mädchen angegeben. Beides ist bei der Betrachtung von Bewegungen des eigenen Körpers, wie z.B. Gehen, Laufen, Treppensteigen oder einfachen Sprüngen gegeben. Die einseitige Fokussierung auf das Interesse der Mädchen wirkt sich dabei aber nicht negativ auf die Jungen aus, da für diese das Fach und seine Inhalte genauso interessant bleiben, auch wenn sich die behandelten Beispiele ändern.

Da die Schüler diese Bewegungen aus ihrem Alltag kennen und sie selbst ohne Probleme ausführen können, eröffnet sich mit diesen Versuchen auch eine Möglichkeit, die Schüler eigenständig experimentieren zu lassen. Zwar benötigen die Schüler zu Beginn eine Einführung in die verwendeten Messgeräte und Programme, im Anschluss kann dann aber jeder selbstständig eigene Aufnahmen analysieren.

Auch der häufigen Forderung von Seiten der Pädagogik oder den Fachdidaktiken [2] sowie von der Bildungspolitik (Bund-Länder-Kommission 1997) nach mehr fächerübergreifendem Unterricht kann in diesem Themenfeld sehr gut Rechnung getragen

werden. So ist alleine aufgrund des Themas „Bewegungen des eigenen Körpers“ ein übergreifender Unterricht mit den Fächern Biologie und Sport sinnvoll. Fragen zum Aufbau des menschlichen Körpers, zur Funktionsweise und Energiebereitstellung der Muskulatur, zur Gestaltung des „richtigen“ Laufstils sowie zu den Grenzen der menschlichen Leistungsfähigkeit ergeben sich aus der Themenstellung und erfordern entweder die gute Vorbereitung einer Lehrkraft oder eine funktionierende Zusammenarbeit des Lehrerkollegiums. Die Nutzung neuer computergestützter Messsysteme schult zudem den zweckgebundenen Umgang mit dem PC. Auch hier wäre ein fächerübergreifender Unterricht mit der Informatik wünschenswert, wenn z.B. Fragen bzgl. der Funktionsweise der Datenerhebung und -verarbeitung aufkommen.

Im Folgenden werden drei verschiedene computergestützte Messmöglichkeiten vorgestellt und einige Vor- und Nachteile erläutert. Es handelt sich hierbei um eine kleine Auswahl aus den vielfältigen Analysemethoden der Biomechanik. Auch die gewählten Geräte und Programme stellen nur eine Stichprobe aus der Vielzahl von Möglichkeiten dar.

2. Videoanalyse**2.1. Möglichkeiten der Videoanalyse**

Da die gewonnenen Daten bei der Videoanalyse gleichzeitig mit dem Video der Bewegung gezeigt werden können, eignet sich diese Methode besonders gut für die Schule. Auch Schüler, die Schwierigkeiten bei der Deutung von Graphen haben, können aufgrund der Darstellungsmöglichkeiten im Video qualitative Aussagen über Größen - wie Geschwindigkeit und Beschleunigung - abgeben.

Aus den vielen Analyseprogrammen wurde das Programm *measure dynamics* von PHYWE (Version 1.4 f build 390) [3] exemplarisch ausgewählt, um die Möglichkeiten dieser Messwerterfassung aufzuzeigen. Hiermit können auch „größere“ Videos – z.B. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit 210 Bildern pro Sekunde, welche sich vor allem bei schnelleren Bewegungen anbieten – zeitsparend anhand der „automatischen Analyse“ ausgewertet werden [4]. Dabei ermittelt das Programm die Ortskoordinaten zweidimensional von Punkten, welche zuvor im Video markiert wurden und berechnet daraus weitere Größen, wie z.B. Geschwindigkeit und Beschleunigung. Diese Daten können anschließend auf vielfältige Weise dargestellt werden:

- Mittels „**Filter**“ können - direkt ins Video - Punkte, Linien, Säulen oder Vektoren eingezeichnet werden, welche die physikalischen Größen darstellen (vgl. Abb. 1) [5]. Auch nachträgliche Bearbeitungen des Videos (wie z.B. Spiegeln oder Änderungen der Helligkeit) sind möglich.

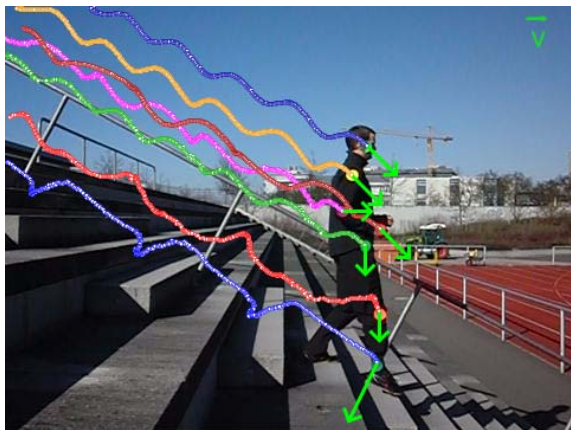


Abb. 1: Treppensteigen mit Ortslinie und Geschwindigkeitspfeilen

- Parallel zum Abspielen des Videos, d.h. gleichzeitig, kann ein **Diagramm** (z.B. t-x-, t-v- oder t-a-Diagramm) erstellt werden, wobei der neu hinzugefügte Diagrammpunkt stets der momentanen Situation im Video entspricht.
- **Serien-** (vgl. Abb. 8) oder **Stroboskopbilder** (vgl. Abb. 2) des Bewegungsablaufes können erstellt werden, um den zeitlichen Verlauf „auf einen Blick“ erfassen zu können.

Trotz einer relativ genauen Ortsbestimmung der Körperpunkte bei der „automatischen Analyse“ kommt es bei der Berechnung von Geschwindigkeits- und vor allem bei den Beschleunigungswerten zu problematischen Fehlern. Vor allem bei der Analyse von Hochgeschwindigkeitsvideos ist der Zeitabstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern sehr gering, was den Fehler in die Höhe treibt. Zwar kann die Schrittweite (und damit die Zeit zwischen zwei Videobildern) in der Videoanalysesoftware beliebig erhöht werden; dies hat aber zur Folge, dass nicht mehr alle Videobilder analysiert werden, was

dazu führt, dass die Feinheit der Bewegung nicht mehr vollständig erfasst wird (weil über zu große Zeitabstände gemittelt wird). Auch ist es für Schüler schwer nachvollziehbar, warum die Schrittweite erhöht werden muss bzw. warum dadurch „richtigere“ Beschleunigungswerte ermittelt werden.



Abb. 2: Stroboskopbild zum Joggen mit Verbindungslinien und Pfeilen (in *measure dynamics* aus einem Video erzeugt)

2.2. Beispiele für Videoanalysen von Körperbewegungen

Abb. 1 zeigt ein Bild aus einem Video, in dem eine Person eine Treppe hinabsteigt. An die Person wurden sieben farbige Punkte befestigt, die dann im Videoanalyseprogramm verfolgt werden können. Die Bahnkurve dieser Punkte wurde farblich ins Video eingezeichnet. Außerdem wird am aktuellen Punkt die Geschwindigkeit als Pfeil eingezeichnet. Man sieht in diesem Video zum Treppensteigen (als Zusatzdatei anbei), dass sich die Geschwindigkeit des Kopfes in Betrag und Richtung nur wenig ändert, während die Geschwindigkeit des Fußes in Betrag und Richtung stark variiert. Von der Hüfte aufwärts bewegen sich die Körperpunkte mit annähernd gleicher Geschwindigkeit. Sie werden von den Beinen mittransportiert, wobei diese aber einen ganz anderen Geschwindigkeitsverlauf besitzen.

Abb. 2 und Abb. 3 zeigen eine joggende Person, an die ebenfalls farbige Punkte angebracht wurden. In Abb. 2 wurden die neun verfolgten Punkte durch Linien miteinander verbunden, so dass ein Strichmännchen entsteht, welches sich im Video bewegt. Das Video wurde mit einem Filter aufgehellt und daraus das Stroboskopbild erzeugt.

Man sieht in diesem Video, dass die horizontale Komponente der Geschwindigkeit des Kopfes fast konstant ist, während der Kopf in vertikaler Richtung eine Schwingung vollführt. Man könnte deshalb eine eindimensionale Schwingung auch an der Höhe des Kopfes statt an einem Federpendel betrachten.

Die Füße haben dagegen beim Bodenkontakt für kurze Zeit die Geschwindigkeit null und dazwischen eine größere Geschwindigkeit als der Kopf. Das

bedeutet, sie müssen langsamer und schneller werden. Man sieht, dass beim Langsamerwerden die Beschleunigung eine Komponente gegen die Geschwindigkeit hat und beim Schnellerwerden eine Komponente in Geschwindigkeitsrichtung (Abb. 3). Hieran kann das Verständnis für die Richtung der Größen behandelt werden.

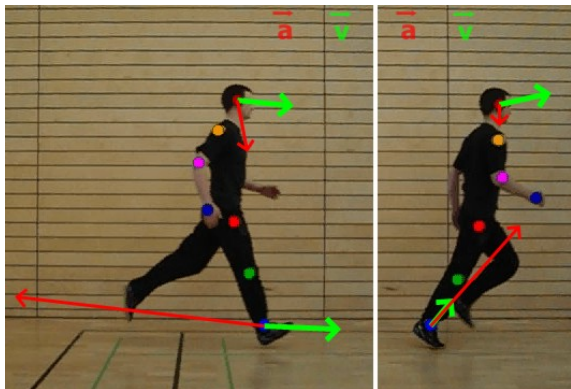


Abb. 3: Joggen mit Geschwindigkeits- und Beschleunigungspfeilen

2.3. Darstellung von Sensordaten in Videos

Durch den einfachen Ex- und Import von Datentabellen in *measure dynamics* kann man das Problem der relativ großen Fehler bei der Ermittlung der Beschleunigungswerte umgehen. Die Daten der folgenden beiden Messmöglichkeiten, gewonnen mit 3D Beschleunigungssensoren oder einer Kraftmessplatte, können in einem Video über die *measure dynamics*-Filter angezeigt werden. Dazu muss man eine Bewegung gleichzeitig filmen und mit einem entsprechenden Sensor messen und danach die Messdaten in das Videoanalyseprogramm importieren, wo sie im Video auf vielfältige Weise dargestellt werden können. Das heißt, hier wird das Videoanalyseprogramm nur als Darstellungsprogramm der Messwerte verwendet. Dies erfordert zwar etwas Zeit, führt aber auch zu einer didaktisch geeigneteren Darstellung der Messdaten der Sensoren.

3. Beschleunigungssensoren

3.1. Möglichkeiten von Beschleunigungssensoren

Mittels Beschleunigungssensoren kann die Beschleunigung einzelner Körperteile bei einer Bewegung auch direkt und nicht über den Umweg der zweifachen Ableitung des Ortes (wie bei der Videoanalyse) bestimmt werden [6]. Am weitesten verbreitet sind dabei die seismischen Beschleunigungssensoren, bei denen die Auslenkung einer Probemasse bestimmt wird, was als Beschleunigung bzw. Kraft interpretiert wird. D.h. es wird die Trägheitskraft ermittelt, welche die bewegliche Probemasse im mitbewegten Bezugssystem des Sensors auslenkt. Die Auslenkung dieser Probemasse kann dabei auf verschiedene Weise ermittelt und in ein elektrisches Signal umgewandelt werden.

Der exemplarisch gewählte Sensor *Cobra4 Sensor-Unit Acceleration: 3D-Beschleunigung* [7] der Lehrmittelfirma PHYWE verwendet hierzu die kapazitive Methode, bei welcher durch die Auslenkung der Probemasse die Kapazität eines Kondensators geändert wird [8]. Um die Beschleunigungskomponente aller drei Raumrichtungen zu erhalten, sind dabei drei Probmassen paarweise orthogonal zueinander anzuordnen. Die Änderung der Kapazität des jeweiligen (Platten-)Kondensators ergibt nämlich nur eine eindimensionale Größe, welche der jeweiligen Auslenkung der Probemasse in diese Raumrichtung entspricht. Somit lässt sich nur in eine Dimension ein Zusammenhang zwischen der Beschleunigung in diese Raumrichtung und der Kapazität des Kondensators angeben. Der Sensor *Cobra4 Sensor-Unit Acceleration: 3D-Beschleunigung* kann mit dem *Cobra4 Wireless-Link* [9] (ebenfalls von PHYWE) gekoppelt werden, so dass die Messdaten des Sensors – ohne störende Kabel – an einen PC übertragen werden können, an welchen der *Cobra4 Wireless Manager* [10] zum Empfang der Daten angeschlossen ist. Insgesamt kann so mit bis zu 99 Sensoren gleichzeitig gemessen werden. Zur Messwerterfassung wird der Sensor an der jeweiligen Körperstelle befestigt (vgl. Abb. 4). Vor allem bei schnelleren Bewegungen ist die Funkübertragung von großer Bedeutung, da keine störenden Kabel auftreten.



Abb. 4: Befestigung des Sensors am Unterschenkel beim Gehen und Koordinatenachsen des Sensors

Am PC erfolgt die Aufnahme der Daten mit der Software *measure Cobra4* [11], in welcher sie als Tabelle oder Diagramm visualisiert werden können. Mathematische Auswertungsmöglichkeiten, wie z.B. Nullstellen, Extrema und Äquivalenzpunkte bestimmen, Integralberechnung, Steigung in einem Punkt ermitteln oder den Mittelwert angeben, stehen ebenso zur Verfügung wie die funktionale Weiterverrechnung der Daten zu neuen Größen. Auch ein Glätten der aufgezeichneten Messkurven ist möglich.

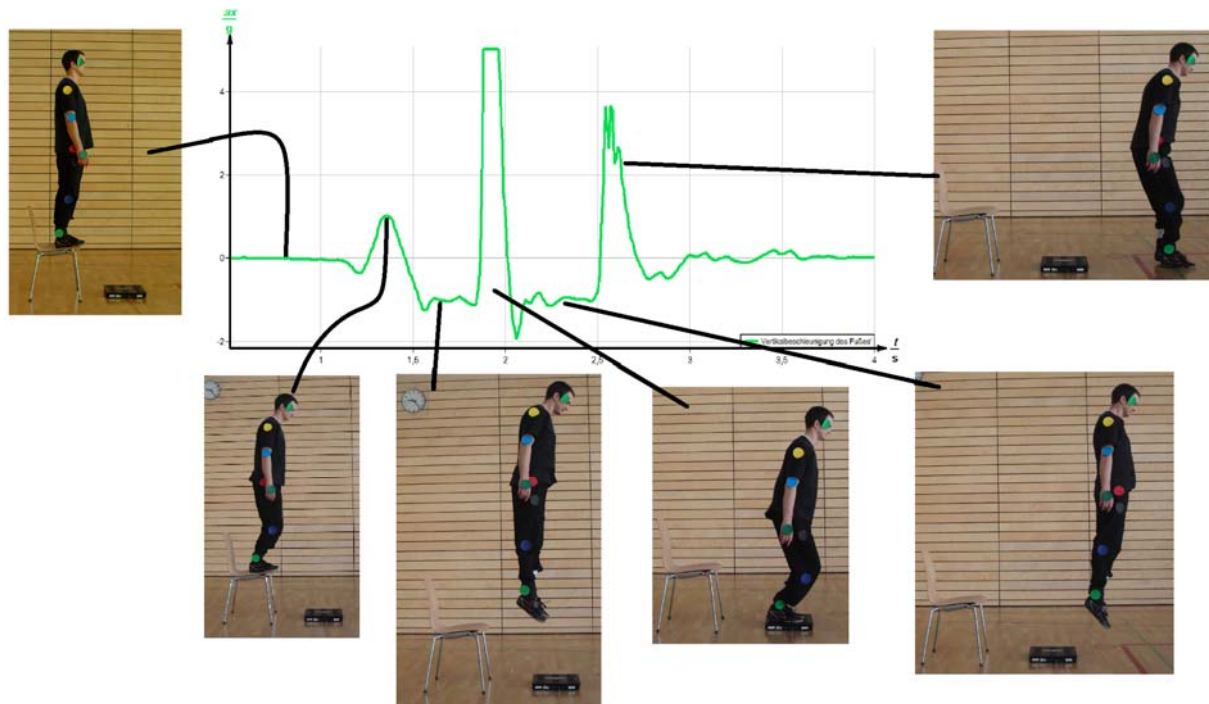


Abb. 5: Zuordnung bestimmter Kurvenabschnitte einer Beschleunigungsmessung mittels Bewegungsbilder beim Sprung vom Stuhl (Beginn in Ruhe, Werte über den Startwert sind Beschleunigungen des Körperschwerpunktes nach oben, Werte unter dem Startwert sind Beschleunigungen des Körperschwerpunktes nach unten).

Damit die aufgezeichneten Messwerte den verschiedenen Bewegungsphasen zugeordnet werden können, ist es sinnvoll, die Messkurven mit Bildern des Bewegungsablaufes zu versehen (vgl. Abb. 5). Auch ein Export der Tabellen in das Programm *measure dynamics* ist mit etwas Aufwand möglich. Hierzu muss neben dem Erstellen des Videos überlegt werden, welche Beschleunigungskomponente wegfällt (Reduzierung auf zwei Dimensionen), wie die Vorzeichen geändert werden müssen (je nach Ausrichtung des Sensors bei der Datenerhebung) und wie die Zeitachsen der beiden Messungen aufeinander abgestimmt werden können.

Bei der Aufnahme der Messdaten für das beigefügte Video zum Gehen mit einem Beschleunigungssensor gab der Sensor am Fuß die Beschleunigungskomponenten so aus, wie in Abb. 4 dargestellt. Bei der Reduzierung auf zwei Dimensionen fallen somit die y-Werte der Sensordaten weg, da dies die Bewegungsrichtung ist, die im Video bei einer seitlichen Aufnahme nicht analysiert werden kann. Bei der Übernahme der Beschleunigungsdaten in *measure dynamics* muss beachtet werden, dass die x-Werte der Beschleunigungsdaten, im Video in die y-Richtung zeigen und die z-Werte des Sensors der x-Komponente des Videoanalyseprogrammes entsprechen. Da die Aufnahme des Videos zu einem späteren Zeitpunkt gestartet wurde als die Datenaufzeichnung mit dem Funksensor, müssen die beiden Zeitachsen angeglichen werden. Da der Fußaufsatz im t-a-Diagramm einen besonders markanten Punkt darstellt und auch im Video gut zu erkennen ist, eignet er sich sehr gut zum Abgleich der Achsen. Beim

Kopieren der Beschleunigungswerte in die *measure dynamics* Tabelle wurde also darauf geachtet, dass der Fußaufsatz, welcher zum Zeitpunkt $t = 2,35$ s mit einem Beschleunigungswert von ca. 2 g erfolgte (vgl. Abb. 6) mit dem Zeitpunkt des Fußaufsatzes im Video überein stimmt.

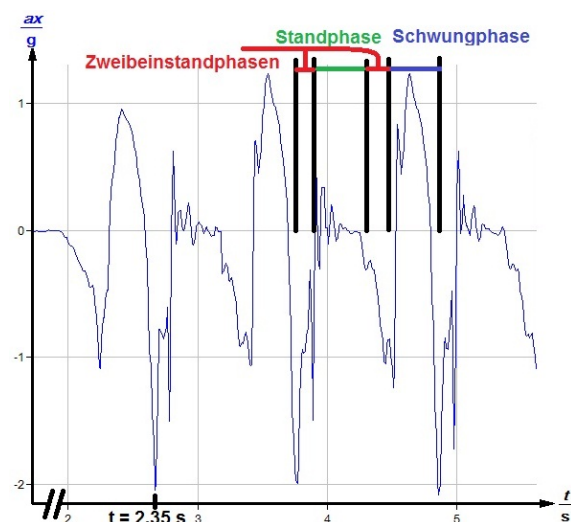


Abb. 6: t- a_x -Kurve des Fußes beim Gehen

Obwohl man mit Hilfe der Sensoren viel genauere Beschleunigungswerte als bei der Videoanalyse erhält, hat diese Methode einen Schwachpunkt. Neben den Beschleunigungen, die aufgrund der Muskelaktivität auftreten, wird auch immer die Erdbeschleunigung mit gemessen. Je nach Neigung des Sensors ist diese unterschiedlich auf die drei Komponenten des Beschleunigungsvektors verteilt.

Zwar ist es möglich, den Sensor in einer frei wählbaren Position auf null zu stellen und somit die Erdbeschleunigung zu unterdrücken. Wird jedoch der Sensor aus dieser Position verkippt, so erhält man doppelt falsche Werte, weil dann die Erdbeschleunigung in den anderen Komponenten gemessen wird, zugleich aber auch das Fehlen dieses Anteils in der Ursprungsposition mit umgekehrten Vorzeichen angezeigt wird.

Je nach Befestigung des Sensors am Körper kann es darüber hinaus noch zu Überlagerungsschwingungen des Sensors kommen. Vor allem beim Anbringen des Sensors in nicht-enganliegender Kleidung sind die Messdaten nur schwer reproduzierbar. Aber auch beim Befestigen des Sensors direkt auf der Haut mit Klebeband kann es vorkommen, dass diese beim Laufen (vor allem beim Fußaufsatz) mitschwingt, was bei der Betrachtung der Daten zu Verwirrung und sehr individuellen Messkurven führen kann. Vollkommen lassen sich diese Schwingungen allerdings nicht vermeiden.

3.2. Beispiel für Beschleunigungsmessung bei Körperbewegungen

Abb. 5 zeigt das Beispiel eines Prellsprunges, bei dem eine Person von einem Stuhl auf eine Kraftmessplatte springt und anschließend sofort einen zweiten Sprung auf den Boden ausführt. Am Fuß der Person wurde ein Beschleunigungssensor befestigt. Welches Vorzeichen seine Messwerte haben, hängt von der Orientierung des Sensors und von Einstellungen in der Software ab. In Abb. 5 ergeben Beschleunigungen nach oben positive Werte.

Zu Beginn ist die Person in Ruhe (Teilfoto 1). Da der Sensor zu Beginn sinnvollerweise auf null gestellt wurde, erhält man auch den Beschleunigungswert Null. Um vom Stuhl abspringen zu können, muss der Körper (nach leichtem in die Knie gehen) nach oben beschleunigt werden (Teilfoto 2, ca. 1 g). Dann erfolgt die Flugphase mit konstanter Erdbeschleunigung nach unten (Teilfoto 3). Beim Auftreffen und sofortigem, erneutem Abspringen gibt es eine sehr große Beschleunigung nach oben, die den Messbereich des Sensors übersteigt (Teilfoto 4, Messwert 5 g). Es folgt wieder eine Flugphase (Teilfoto 5, ca. 1 g) sowie ein erneutes Abbremsen beim Auftreffen (Teilfoto 6, ca. 4,5 g). Zu sehen ist dabei nicht nur die konstante Erdbeschleunigung während den Flugphasen, sondern auch, wie stark die Beschleunigungen bzw. Kräfte beim Aufkommen auf dem Boden sind, die letztlich die Gelenke belasten.

4. Bodenreaktionskraftmessung

4.1. Möglichkeiten von Kraftmessplatten

Kraftmessplatten ermöglichen die Aufzeichnung der – während der Standphase – wirkenden Kraft zwischen Fuß und Boden, d.h. sie messen die Kraft, die der Körper auf den Boden ausübt, die betragsgleich zur Kraft ist, die der Boden auf den Fuß ausübt.

Prinzipiell ist es möglich, sich ein Kraftmessplatte mit Piezokristallen für wenige Euro selbst zu bauen [12].

Exemplarisch für Kraftmessplatten von Lehrmittelfirmen wird hier die *2-Axis Force Platform* der Lehrmittelfirma Pasco betrachtet [13]. Neben der Normalkraft kann damit auch die Kraftkomponente in Bewegungsrichtung aufgezeichnet werden. Die Kraftsensoren nutzen dabei den piezoelektrischen Effekt. Aufgrund des Drucks auf einen Kristall im Sensor, kommt es zu einer Ladungsverschiebung, so dass eine Spannung abgegriffen werden kann [14]. Die Daten der fünf Kraftsensoren können mittels eines USB-Adapters direkt an den PC übertragen und mit der Software *DataStudio* [15] ausgewertet werden. Dieses Programm stellt neben den Darstellungsmöglichkeiten der Daten als Diagramm oder Tabelle noch vielfältige Auswertungsoptionen zur Verfügung. So können unter anderem Mittelwert, Standardabweichung, Maximum und Minimum oder auch das Integral der Messwerte angegeben werden. Auch Glätten oder die Steigungsbestimmung in einem Messpunkt sowie die funktionale Weiterverrechnung der Daten zu neuen Größen ist möglich. Ebenso sind die Messwerte als Tabelle exportierbar, was eine Visualisierungsmöglichkeit der Daten mittels *measure dynamics* direkt in einem Video ermöglicht (vgl. Abb. 8).

Auch wenn man mit dieser Messvorrichtung keine Daten erhält, welche die gesamte (Gang-, Lauf- oder Sprung-) Bewegung begleiten, so wird doch der Fokus auf den entscheidenden Bewegungsabschnitt gelegt. Obwohl die einzelnen Gliedmaßen des Körpers bei Bewegungen unterschiedlich, sogar gegenläufig bewegt und beschleunigt werden, erfolgt die Gesamtbeschleunigung des Systems über die Wechselwirkung mit dem Boden. Somit ist gerade dieser Bewegungsabschnitt entscheidend für den Verlauf der Gesamtbewegung.

Problematisch beim Einsatz in der Schule ist die Tatsache, dass die Normalkraft Rückschlüsse auf das Gewicht eines Schülers zulässt. Vor allem beim Vergleich der Kraftverläufe zweier Schüler sollte deshalb unbedingt darauf geachtet werden, dass es nicht zu Hänseleien kommt, wenn Daten vor dem Klassenverband demonstriert werden. Auch eine Normierung der verschiedenen Kurven (z.B. auf den Maximalausschlag) wäre denkbar und beim Vergleich mit Literaturwerten üblich.

Da der normale Bewegungsablauf unter Umständen verändert wird, sobald eine Versuchsperson die Platte (z.B. beim Laufen) treffen muss, empfiehlt es sich, Markierungen für die Schrittlänge aufzustellen (vgl. Abb. 7). Somit kann die Versuchsperson leichter abschätzen, wo die Füße bei den Anlaufschritten aufgesetzt werden sollten, um einen möglichst natürlichen Bewegungsablauf zu gewährleisten. Des Weiteren sollten vor und nach der Platte mindestens vier Schritte gemacht werden, wenn der gewöhnli-

che Bewegungsablauf (ohne zusätzlich Beschleunigungs- oder Abbremsseffekte) aufgezeichnet werden soll. Häufig wird auch empfohlen, die Kraftmessplatte, wie in Abb. 7, ebenerdig in den Boden zu versenken [16]. Dies ist zwar durchaus sinnvoll, weil ein Anheben des Fußes auf die Kraftmessplatte den Bewegungsablauf noch zusätzlich verändert, muss aber nicht unbedingt sein. Nach unseren Erfahrungen beschränken sich die Abweichungen beim Gehen, Joggen oder auch beim Hopperlauf lediglich auf leichte Schwankungen in der Peakhöhe, welche aber auch beim zweimaligen Wiederholen eines identischen Versuches auftreten können.



Abb. 7: Schrittlängenmarkierung beim Gehen

4.2. Beispiele für Messungen mit der Kraftmessplatte

Die aufgezeichneten Messwerte beim Gehen über eine Kraftmessplatte, wurden in *measure dynamics*, zusammen mit dem gleichzeitig aufgenommenen Video importiert. Schließlich wurde die Kraft vom Boden auf die gehende Person als Pfeil in das Video eingeblendet. Abb. 8 zeigt eine Serienbild dieses Videos und Abb. 9 und Abb. 10 einen Graphen der Kraftkomponente in Bewegungsrichtung bzw. in senkrechter Richtung.



Abb. 8: Serienbild der Darstellung der Bodenreaktionskraft im Video beim Gehen

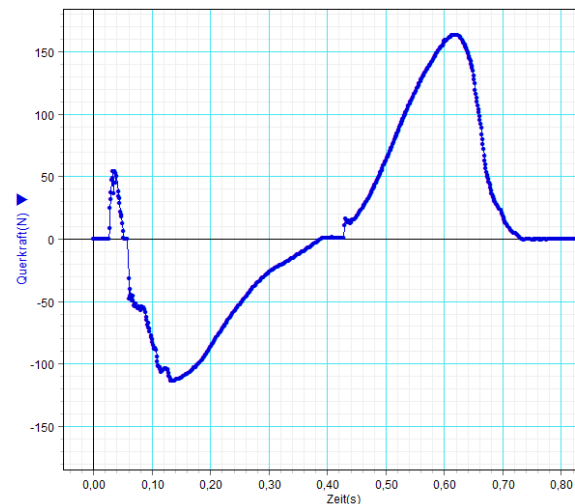


Abb. 9: Horizontaler Kraftanteil beim Gehen über eine Kraftmessplatte (Positive Werte sind Kräfte in Bewegungsrichtung, negative Werte sind Kräfte dagegen)

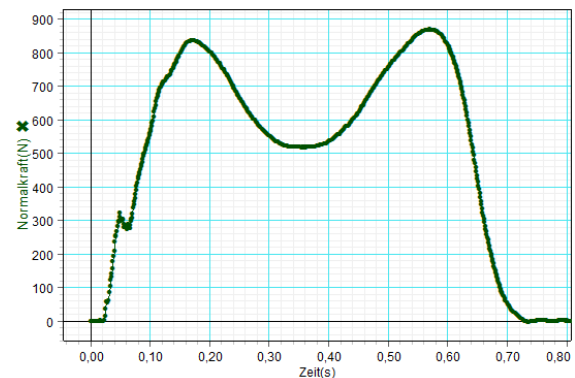


Abb. 10: Vertikaler Kraftanteil (Normalkraft) beim Gehen über eine Kraftmessplatte

In horizontaler Richtung, parallel zum Boden, sieht man zunächst einen Kraftanteil gegen die Bewegungsrichtung auf den Fuß, in welcher der Fuß abgebremst wird (Einzelbilder 3 bis 6 in Abb. 8 und Abb. 9) [16]. Dann folgt eine Phase fast ohne horizontalen Kraftanteil, in der ein Bein auf dem Boden steht und das andere vorgezogen wird (Einzelbilder 7 bis 10 in Abb. 8). Danach übt der Boden eine horizontale Kraft in Bewegungsrichtung auf den Körper aus, in der der Oberkörper nach vorne geschoben wird (Einzelbilder 11 bis 15 in Abb. 8).

In senkrechter Richtung hat die Kraft vom Boden auf die gehende Person zwei Maxima (Bild 5 und Bild 13 in Abb. 8 bzw. Abb. 10): beim Abheben des zweiten Fußes vom Boden und beim Abstoßen des ersten Fußes von der Kraftmessplatte kurz vor dem Verlassen der Platte. Dazwischen gibt es ein Minimum (Bild 8 und 9 in Abb. 8). Da der Körperschwerpunkt vorher einen Geschwindigkeitsanteil nach oben bekommen hat, drückt der Körper während dieser Zeit nicht so fest auf den Boden, so dass auch der Boden nicht so fest auf die Person drücken muss.

Hat man eine Kraftmessplatte, welche wie eine Waage nur die Normalkomponente der Bodenreaktionskraft anzeigt, so kann man z.B. den Kraftverlauf beim Seilspringen einer Person aufzeichnen. Abb. 11 zeigt den Verlauf der Normalkraft, wenn eine Person 20-mal auf der Kraftmessplatte springt. Hierbei kann man erkennen, dass die Flugzeiten abwechselnd einmal länger (ca. 0,3s) und dann wieder kürzer (ca. 0,2s) sind.

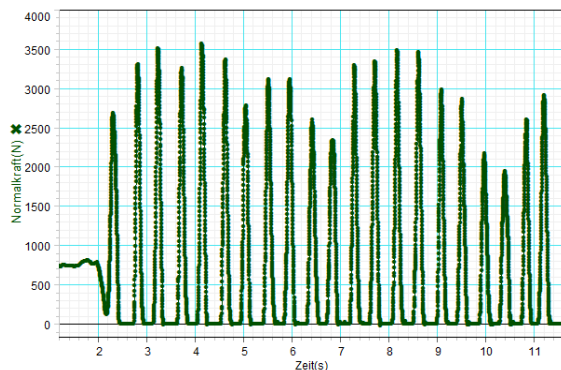


Abb. 11: Normalkraft einer Person beim Seilspringen. 10 Seildurchschläge und 10 Zwischensprünge ergeben 20 Flugabschnitte, welche bei der Anzeige 0 N gut zu erkennen sind.

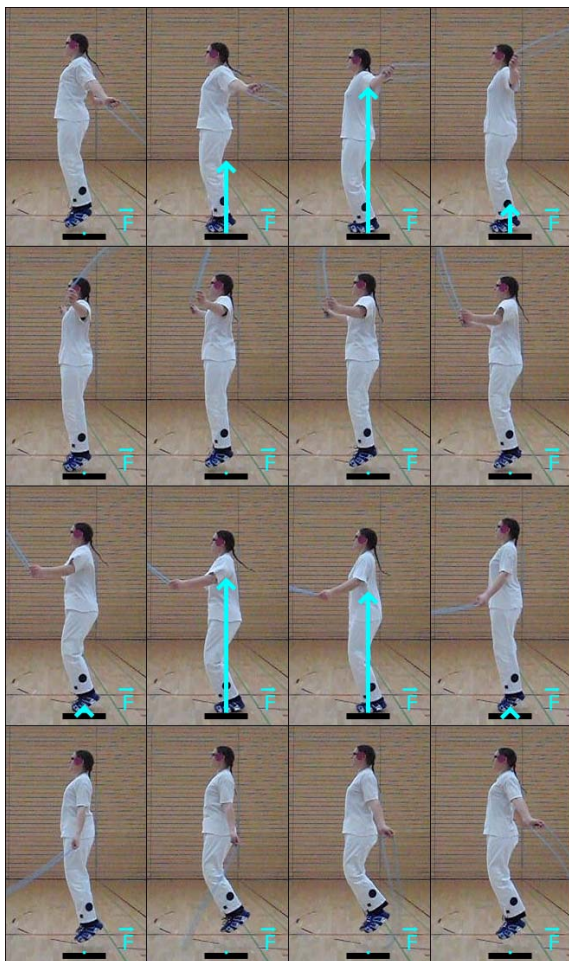


Abb. 12: Serienbild eines Seildurchschlages mit Zwischensprung

Dies kommt daher, dass nur jede zweite Flugzeit einem Seildurchschlag entspricht (vgl. Abb. 12, Teilbilder 13 bis 16) und die darauf folgende, kürzere Flugzeit nur ein Zwischensprung ist (vgl. Abb. 12, Teilbilder 5 bis 8). Aus der so gemessenen Sprungdauer t kann dann z.B. die Sprunghöhe errechnet werden. Die hierfür benötigte Gleichung $h = 1/8 \cdot g \cdot t^2$ lässt sich aus der Energieerhaltung und $g = (v_0 - 0) / (t_{\text{Flug}}/2)$ herleiten. Setzt man die Flugdauer von $t = 0,3 \text{ s}$ ein, so erhält man eine Sprunghöhe $h = 11 \text{ cm}$, welche z.B. anhand eines Videos überprüft werden kann. Der anhand von *measure dynamics* gemessene Wert von $h_{\text{vid}} = 14 \text{ cm}$ liegt dabei leicht über dem errechneten Wert, da die Beine beim Springen angehoben werden, wodurch der Abstand zum Boden erhöht wird. Die Sprunghöhe von $h = 11 \text{ cm}$ bezieht sich auf die Höhendifferenz, welche der Schwerpunkt überwindet, weswegen sich die beiden Werte nicht widersprechen, sondern das Verständnis der Schüler für den berechneten Wert verbessern.

5. Resümee

Mit Hilfe der drei aufgezeigten Messwerterfassungsmöglichkeiten können vielschichtige Daten über Bewegungen des menschlichen Körpers gewonnen werden. Durch die Zusammenführung der Ergebnisse ergänzen sich hierbei die Systeme gegenseitig, so dass Schwächen ausgeglichen werden können. Die Betrachtung von Schülerbewegungen stellt dabei einen sinnvollen Unterrichtsgegenstand dar. Ein tiefergehendes Verständnis der Zusammenhänge von Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft, sowie eine Verknüpfung mit Alltagserfahrungen und -wahrnehmungen der Schüler werden damit angestrebt.

6. Zusatzdateien

Dem Artikel sind als Zusatzdateien sich fünf Videos im avi-Format beigelegt, die aus *measure dynamics* exportiert wurden:

- Gehen mit eingeblendeten Beschleunigungen eines Funkbeschleunigungssensors
- Gehen mit eingeblendeter Bodenreaktionskraft einer Kraftmessplatte
- Laufen mit eingeblendetem Strichmännchen
- Treppensteigen mit eingeblendetem Strichmännchen
- Seilspringen mit eingeblendeter Bodenreaktionskraft

7. Literatur

- [1] Hoffmann, Lore; Häußler, Peter; Lehrke, Manfred (1998): Die IPN-Interessenstudie Physik. Kiel
- [2] Labudde, Peter (2009): Fachunterricht und fächerübergreifender Unterricht: Grundlagen. In: Arnold, Karl-Heinz (Hrsg.): Handbuch Unterricht, Klinkhardt, Bad Heilbrunn

- [3] Videoanalyseprogramm *measure dynamics* der Firma PHYWE. Informationen unter: <http://www.phywe.de/51/pid/4988/Software-measure-Dynamics,-Einzellizenz-.htm> (Stand 05/2011)
- [4] Michel, M.; Wilhelm, T. (2010): Einsatzmöglichkeiten von Hochgeschwindigkeitskameras im Physikunterricht. In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Hannover 2010, <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/145/181>
- [5] Benz, M.; Wilhelm, T. (2008): *measure Dynamics* – Ein Quantensprung in der digitalen Videoanalyse. In: Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik* - Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin
- [6] Scheler, S.; Wilhelm, T. (2009): Neue Möglichkeiten durch Funksensoren. In: Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik* - Bochum 2009, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [7] *Cobra4 Sensor-Unit Acceleration: 3D-Beschleunigung* der Firma PHYWE. Informationen unter: <http://www.phywe.de/51/pid/4247> (Stand 05/2011)
- [8] Scheler, Stefan (2009): Neue Möglichkeiten mit Funksensoren. Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/funksensoren.pdf> (Stand 05/2011)
- [9] *Cobra4 Wireless-Link* der Firma PHYWE: Informationen unter: <http://www.phywe.de/51/pid/4189/Cobra4-Wireless-Link-.htm> (Stand 05/2011)
- [10] *Cobra4 Wireless Manager* der Firma PHYWE: Informationen unter: <http://www.phywe.de/51/pid/4188/Cobra4-Wireless-Manager-.htm> (Stand 05/2011)
- [11] *measure Cobra4* der Firma PHYWE. Informationen unter: <http://www.phywe.de/51/pid/5062/Software-measure-Cobra4,-Einzelplatz-und-Schullizenz-.htm> (Stand 05/2011)
- [12] Wilhelm, T.; Geßner, T.; Suleder, M.; Heuer, D. (2003): Sportaktivitäten vielseitig analysieren und modellieren – Video und Messdaten multimedial aufbereitet. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 52, Nr. 2, S. 23 - 30
- [13] *2-Axis Force Platform* der Firma Pasco. Informationen unter: http://www.conatex.com/shop/product_info.php?products_id=138 (Stand 05/2011)
- [14] Waltner, Christine; Seidel, Samuel; Tobias, Verena; Wiesner, Hartmut (2009): Experimente mit der Kraftmessplatte für den Physikunterricht. In: Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik* – Bochum 2009 Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [15] *DataStudio* der Firma Pasco. Informationen unter: <http://www.pasco.com/datastudio/> (Stand 05/2011)
- [16] Seidel, Samuel; Waltner, Christine; Wiesner, Hartmut (2009): Kräfte messen beim Gehen und Laufen. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 58, Nr. 1, S. 23 - 26

2.3 Videoanalysen im Freizeitpark

Quelle:

SCHÜTTLER, M.; WILHELM, T.: *Bewegungsanalyse im Freizeitpark* – Erscheint in: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 60, Nr. 6, 2011

Inhalt und Bezug zum Thema:

Fahrgeschäfte in Freizeitparks sind geeignete Lernanlässe im Mechanikunterricht. Hierzu wurden bei einigen Fahr-Attraktionen des Europa-Parks in Rust Messungen mit Beschleunigungs- und GPS-Sensoren sowie Videoanalysen durchgeführt und verglichen, beispielsweise eine Kreisbewegung, eine Schiffschaukel und Achterbahnfahrten mit Looping und Hügel-fahrt.

Die GPS-Messung hat allerdings nicht nur den Nachteil großer Ortsungenauigkeit, sondern vor allem den Nachteil, dass die meisten Sensoren nur in für dieses Thema zu großen Zeitabständen den Ort erfassen. Außerdem gibt es z.T. das Problem, dass nicht durchgehend eine quasioptische Sichtverbindung zum Satelliten besteht. Beschleunigungssensoren haben den Vor- bzw. Nachteil, dass sie dreidimensional messen. Das wesentliche Problem ist dabei, dass sich die Lage des Sensors ändern kann und man damit die Problematik des Bezugssystems hat.

Die Videoanalyse erwies sich als vorteilhaft, da es sich dabei immer um eine objektive Betrachtung der Bewegung aus Sicht eines außen stehenden, ruhenden Beobachters handelt und mehrere verschiedener Punkte eines ausgedehnten Objektes betrachtet werden können. Eine Schwierigkeit ist jedoch häufig, einen geeigneten Aufnahmeort für die Kamera zu finden, so dass eine zweidimensionale Bewegung ohne Verzerrung gefilmt werden kann.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Ich habe mir Inhalt und Konzept einer Staatsexamensarbeit überlegt, in der verschiedene Fahrgeschäfte beschrieben werden, Videos derselben aufgenommen werden und Messungen mit 3D-Beschleunigungssensoren und GPS-Sensoren durchgeführt werden. Für diese Staatsexamensarbeit habe ich per Aushang einen Studierenden gesucht. Schließlich habe ich dann mit Herrn Schüttler zusammen gearbeitet und ihn bei der Umsetzung der Ideen betreut sowie Teile des Artikels geschrieben.

Weitere Veröffentlichung:

Dieser Artikel, der in der Fachzeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule“ erscheint, erscheint mit ähnlichem Inhalt auch in:

SCHÜTTLER, M.; WILHELM, T.: *Physik im Freizeitpark - Möglichkeiten und Vergleich von Beschleunigungs- und GPS-Messung sowie Videoanalyse* – Erscheint in: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Münster 2011, ISSN 2191-379X, 2011, www.phydid.de

Bewegungsanalyse im Freizeitpark

Manuel Schüttler, Thomas Wilhelm

1. Motivation

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

Eine sicherlich aufwendige Möglichkeit sind Exkursionen zu kooperierenden Vergnügungsparks oder Schaustellern auf Volksfesten. Hier können die Schüler selbst Messungen durchführen und Videos drehen, um diese später im Unterricht zu analysieren und auszuwerten. Jedoch kann es passieren, dass die Schüler dabei ihre Aufmerksamkeit auf die falschen Dinge fokussieren. Selbst wenn eine Exkursion nicht möglich ist, kann mit bereits aufgenommenen Messungen (siehe Abschnitt 3) Physik an interessanten Beispielen betrachtet werden. Neben der qualitativen Behandlung der Größen und ihrer Richtungen kann die Analyse von Diagrammen geübt werden; aber auch der Umgang mit Medien und die Nutzung des Computers sind relevante Ziele.

2. Messmöglichkeiten

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

Bei der Videoanalyse und der GPS-Messung wird der Ort des betrachteten Körpers erfasst und daraus durch Differenzenquotienten die Geschwindigkeit und die Geschwindigkeitsänderung bzw. Beschleunigung berechnet. Damit erhält

man die Beschleunigung bzw. die resultierende Gesamtkraft, wie sie ein objektiver Beobachter im ruhenden Bezugssystem sieht, was didaktisch sinnvoll ist, und kann so Zusammenhänge zwischen der Geschwindigkeitsänderung und der einwirkenden Kraft herstellen [5].

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

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

Bei einem mitgeführten 3-D-Beschleunigungssensor werden nicht die drei Beschleunigungskomponenten in die drei ruhenden Raumrichtungen gemessen, sondern drei Beschleunigungskomponenten aus Sicht des Beobachters (senkrecht, seitlich, vorne), d.h. das Koordinatensystem dreht sich mit dem Beobachter, was die Interpretation stark erschweren kann. Einfacher ist es, wenn der Beobachter nicht gedreht wird wie bei einem fliegenden Teppich (siehe Abschnitt 3.1), denn dann werden doch die Beschleunigungs-

komponenten in die drei ruhenden Raumrichtungen gemessen. Bei einer zweidimensionalen Kreisfahrt ist es außerdem möglich und sinnvoll, den Sensor so zu halten, dass eine Komponente die Tangentialbeschleunigung und eine Komponente die Radialbeschleunigung ist [2].

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

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

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

gemessen, eine Nullsetzung ist hier nicht möglich.

3. Beispiele für Videoanalysen

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

3.1 Videoanalyse einer Kreisbewegung

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

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

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

Der Bus wird auf der Kreisbahn immer langsamer, der Geschwindigkeitsvektor wird also immer kürzer. Ab einem gewissen Zeitpunkt werden selbst bei einer großen Schrittweite die Abstände aufein-

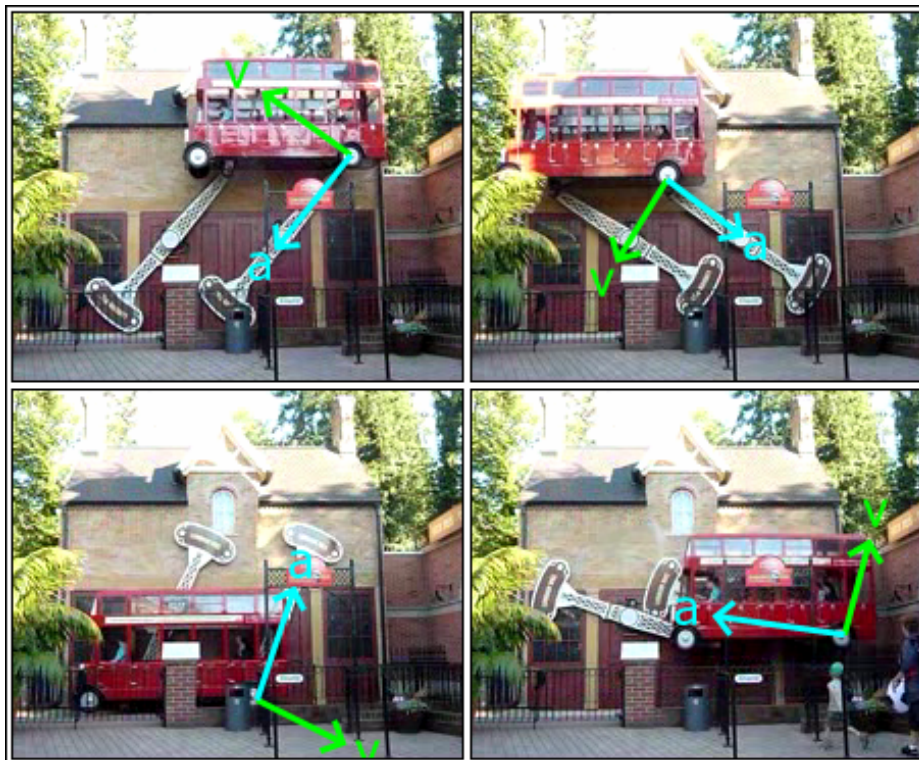


Abb. 1: Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren beim London Bus bei gleichmäßiger Kreisbewegung

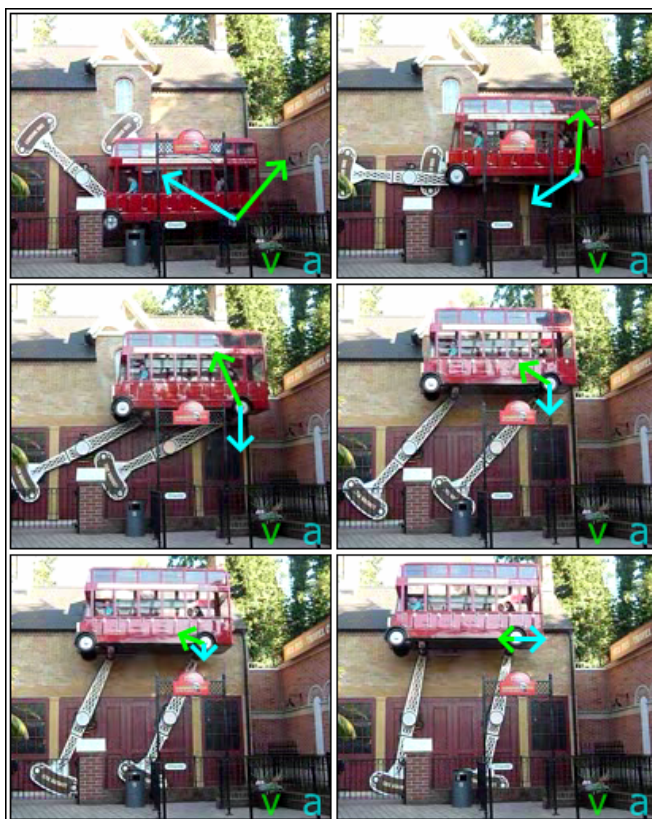
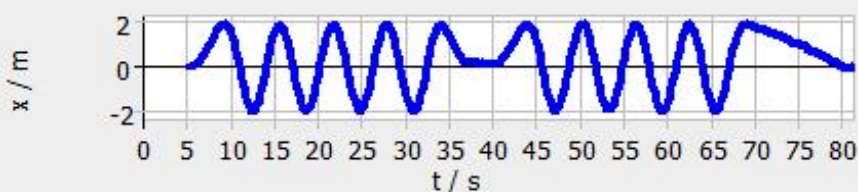


Abb. 2: Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren beim London Bus beim Abbremsvorgang

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



ander folgender Messpunkte so klein, dass die Ungenauigkeiten beim Markieren wieder mehr Einfluss auf die Vektoren nehmen. Die Fehler der Ortsmarkierung werden durch Differenzenbildung bei Geschwindigkeit und Beschleunigung größer (siehe hierzu Abb. 3 bis Abb. 5). Anhand der Schaubilder der einzelnen Komponenten kann man erkennen, dass die Kreisbewegung sowohl vorwärts als auch rückwärts vollführt wird. Trägt man den zeitlichen Verlauf des Geschwindigkeitsbetrags auf (siehe Abb. 6), so bestätigt sich die obige Behauptung: Der London Bus fährt tatsächlich die meiste Zeit mit konstanter Winkelgeschwindigkeit.

3.2 Videoanalyse einer Schiffschaukel

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

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

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

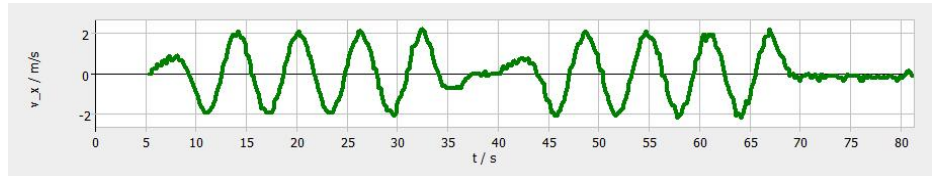


Abb. 4: Geschwindigkeitskomponente $v_x(t)$ beim London Bus

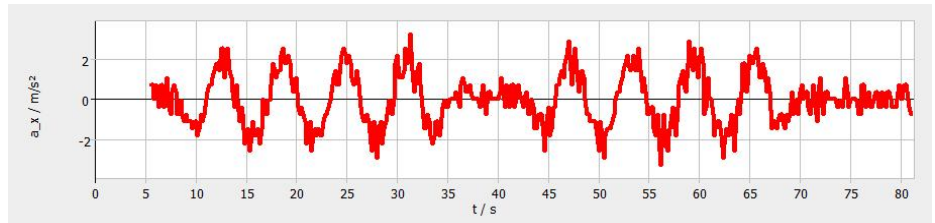


Abb. 5: Beschleunigungskomponente $a_x(t)$ beim London Bus



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

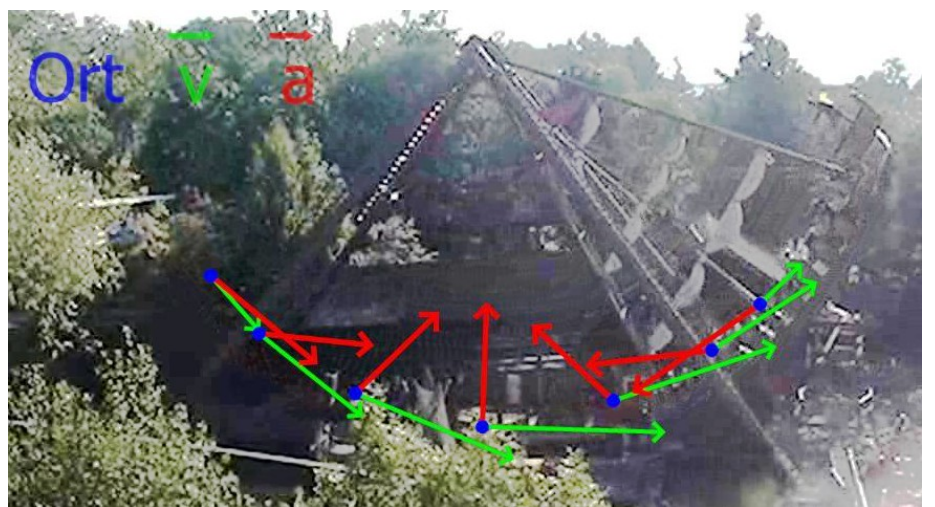
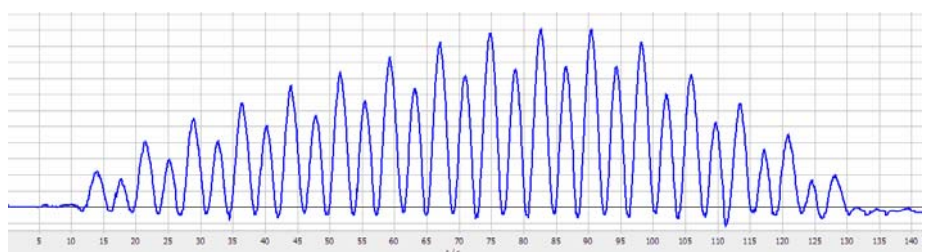


Abb. 7: Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren bei der Vindjammer (halbe Periode)

Abb. 8: Höhe $y(t)$ beim Vindjammer



wegung, weshalb die potentielle Energie an diesen Punkten auch minimal ist. Die gesamte mechanische Energie steigt in der ersten Hälfte der Messung an, da der Schiffschaukel über den Reifen Energie zugeführt wird. Das Abbremsen in der zweiten Hälfte der Fahrt führt zu einer Verringerung der mechanischen Energie.

3.3 Videoanalyse bei einer geradlinigen Beschleunigung

Die Achterbahn Blue Fire ist ein so genannter Launched Coaster. „Als Launched Coaster (dt. Katapult-Achterbahn oder Abschuss-Achterbahn) bezeichnet man eine Achterbahn, bei der der Zug nicht einen Hügel (Lifthill) hinaufbefördert wird, um dann durch Lageenergie zu beschleunigen, sondern auf einer ebenen geraden Strecke katapultartig beschleunigt wird.“ [8] Diese Beschleunigungsstrecke wurde aus größerer Entfernung und etwa orthogonal zur Bewegung aufgenommen.

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

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

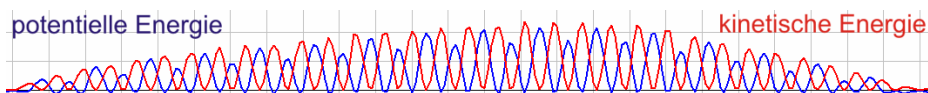


Abb. 9: Mechanische Energie beim Vindjammer



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

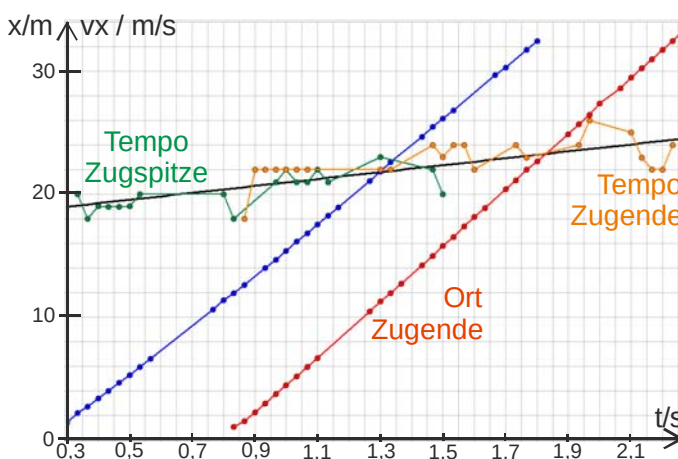
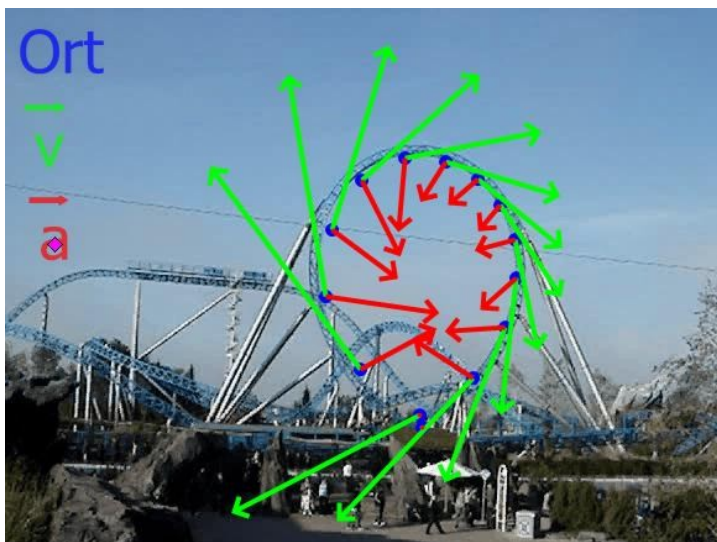


Abb. 11: Ort und Tempo bei der Beschleunigungsstrecke der Blue Fire

Abb. 12: Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren Looping der Blue Fire



den Kurven für v_x zusammen betrachtet werden: Man erkennt ein Ansteigen des Tempos des Zuges von etwa $19 \text{ m/s} \approx 68 \text{ km/h}$ auf $24 \text{ m/s} \approx 86 \text{ km/h}$ in einem Zeitraum von rund 1,8 Sekunden (eine Regressionsgerade ist schwarz eingezeichnet). Dies ergibt eine durchschnittliche Beschleunigung von rund 3 m/s^2 . Bei diesem Beispiel ist es also von Vorteil, dass man mehrere Punkte verfolgen kann.

3.4 Videoanalyse beim Looping

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

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

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

3.5 Videoanalyse einer Hügel Fahrt

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

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

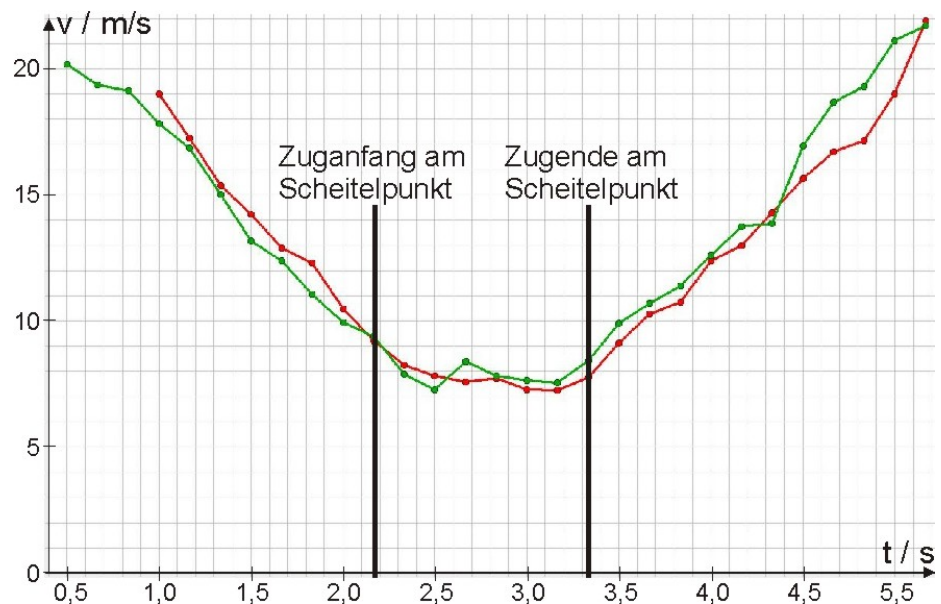
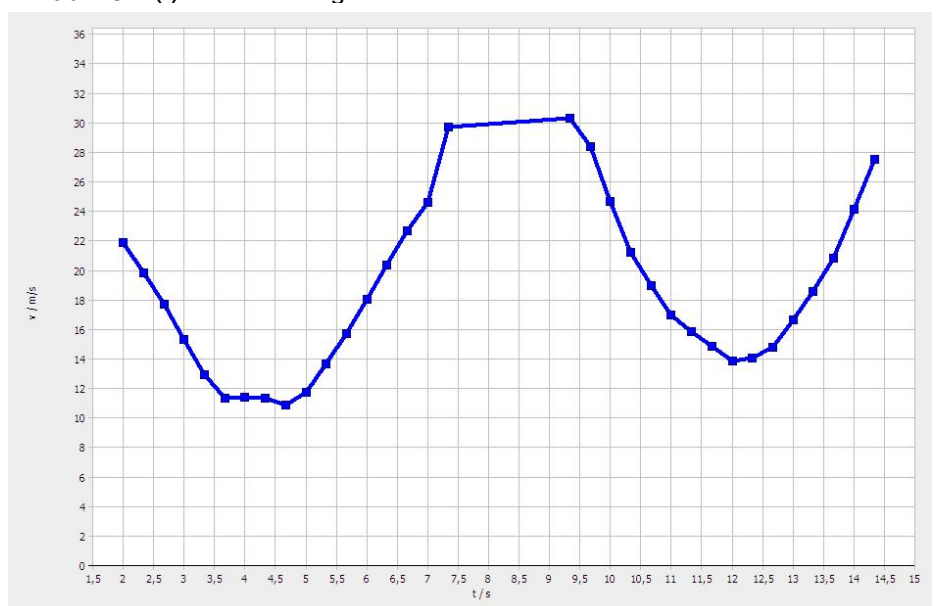


Abb. 13: Tempo $v(t)$ im Looping der Blue Fire (grün = Zuganfang, rot = Zugende)



Abb. 14: Hügel Fahrt beim Silver Star

Abb. 15: $v(t)$ bei einer Hügel Fahrt



4. Beispiele zur

Beschleunigungsmessung

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

4.1 Beschleunigungsmessung bei der Schiffschaukel

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

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

4.2 Beschleunigungsmessung in der Achterbahn

Bei Achterbahnen, bei denen der Sensor sich kippt und dreht, kann nur die Kraft bzw. Beschleunigung aus Sicht des Fahr-

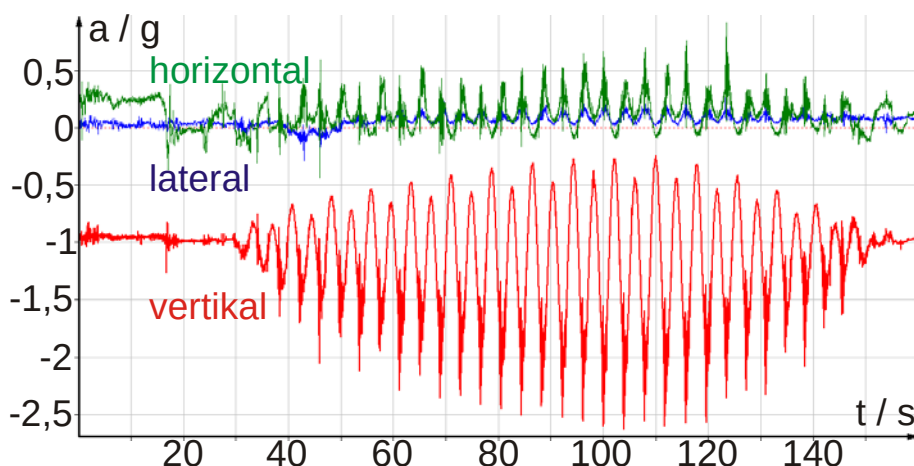


Abb. 16: Beschleunigung in einer Schiffschaukel

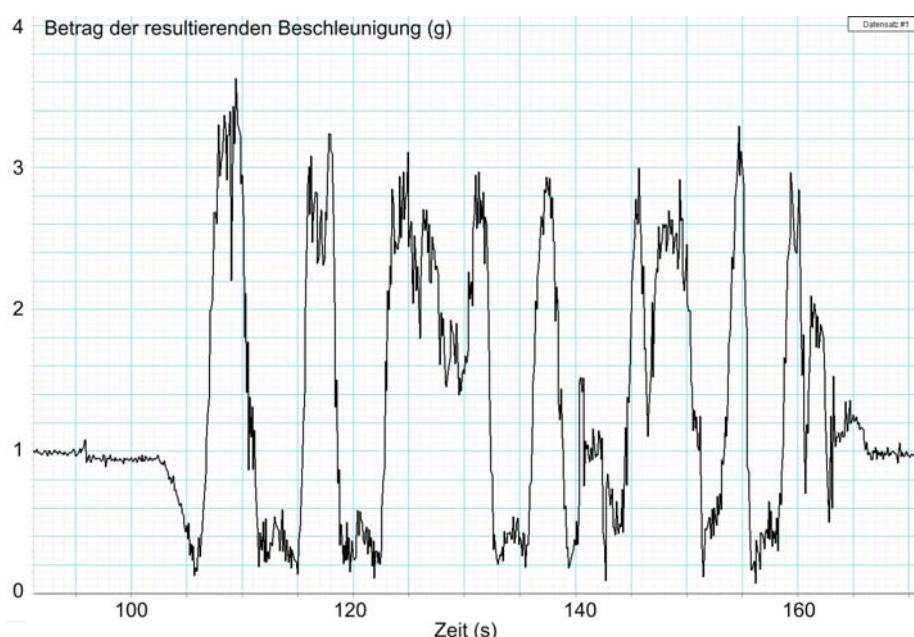


Abb. 17: Betrag der resultierenden Beschleunigung im Silver Star

gastes gemessen werden (siehe Abschnitt 2). Bei der Achterbahn Silver Star fiel die Auswertung der Messungen gegenüber anderen Achterbahnen wesentlich leichter: die Bahn ist nur selten verkippt und es gibt nur wenige Kurven. Die laterale Beschleunigungskomponente verschwindet also meistens. Deshalb lässt sich mit Hilfe des Beschleunigungsbetrages (siehe Abb. 17) die Behauptung überprüfen, dass der Fahrgast über 20 Sekunden eine Beschleunigung von nur 0,2 g erfährt [9]. Diese Zeit sehr kleiner Beschleunigung nennt man auch Airtime. Sie bezeichnet Zeiträume, in denen der Passagier einer Achterbahn sich schwerelos fühlt oder nur von den Sicherheitsbügeln im Zug gehalten wird. Dies wird im Silver Star mit parabelförmigen Hügeln erreicht. Die Wagen der Achterbahn müssen beim Überfahren eines solchen Hügels ein be-

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

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

5. Vergleich der beiden Messmöglichkeiten

Ein Vorteil der Videoanalyse ist sicher, dass es sich dabei immer um eine objektive Betrachtung der Bewegung aus Sicht eines außen stehenden, ruhenden Beobachters handelt. Eine Schwierigkeit ist jedoch häufig, einen geeigneten Aufnahmeort für die Kamera zu finden, so dass eine zweidimensionale Bewegung ohne Verzerrung gefilmt werden kann. Andererseits ist es sinnvoll, sich auf zweidimensionale Bewegungen zu beschränken. Ein weiterer Vorteil der Videoanalyse ist, dass bei ausgedehnten Objekten mehrere verschiedener Punkte des Objektes betrachtet werden können.

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

6. Fazit

Selbst einfach wirkende Bewegungen können einen komplizierten physikalischen Hintergrund haben. Die Mechanik mancher Attraktionen im Freizeitpark zu verstehen, erfordert viel Zeitaufwand,

welcher in der Schule oft nicht verfügbar ist. Häufig muss auf eine detaillierte Analyse der Bewegungen verzichtet werden. Dies kann jedoch auch als Anreiz dienen: Die Schüler sollen bemerken, dass aus den Diagrammen viel mehr Informationen gewonnen werden können, als auf den ersten Blick vermutet. So können Messungen im Freizeitpark als Anlass verwendet werden, damit sich Schüler wieder gerne mit Physik beschäftigen.

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

Literatur

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

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

[3] Backhaus, Udo; Braun, Thomas: GPS-Messungen im Freizeitpark, Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Bochum 2009, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin,

[4] Suleder, Michael: Videoanalyse und Physikunterricht. Technik – Didaktik - Unterrichtspraxis, Aulis Verlag, 2010

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

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

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

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

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

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

Anschrift der Verfasser

Manuel Schüttler, AR Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, Manuel.Schuetzler@physik.uni-wuerzburg.de, wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de,

2.4 Videoanalysen bei Sportbewegungen

Quelle:

EBERLEIN, A.; WILHELM, T.: *Lehr-Lern-Labor „Videoanalyse zweidimensionaler Bewegungen“*. *Konzeption und Durchführung* – Erscheint in: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Münster 2011, ISSN 2191-379X, 2011, www.phydid.de

Inhalt und Bezug zum Thema:

Der außerschulische Lernort gewinnt immer mehr an Bedeutung. Vor diesem Hintergrund haben Schülerinnen und Schüler der siebten Jahrgangsstufe (Realschule und Gymnasium) in einem Lehr-Lern-Labor die wichtigsten Grundbegriffe der Mechanik anhand zweidimensionaler Bewegungen selbst erkundet. In spielerischen Experimenten in verschiedene Stationen, z.B. mit Carrera-, Darda- und Spielzeugeisenbahn, wurden Bewegungsabläufe betrachtet und gefilmt. Mit Hilfe des Videoanalyseprogramms „measure dynamics“ ist es möglich, die aufgezeichneten Filmsequenzen zu analysieren und die Geschwindigkeit sowie die Beschleunigung visuell durch Vektorpfeile sichtbar zu machen. Es wird das Lehr-Lern-Labor sowie einige Erfahrungen vorgestellt.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Ich habe mir Inhalt und Konzept einer Staatsexamensarbeit überlegt, in der ein Lehr-Lern-Labor zur Einführung der Grundbegriffe der Mechanik stattfindet. Dazu sollten Aufbauten für zweidimensionale Bewegungen, vor allem an Spielzeugfahrbahnen, erstellt werden, die Schüler dann selbst filmen und selbst am Computer auswerten. Für diese Staatsexamensarbeit habe ich per Aushang einen Studierenden gesucht. Schließlich habe ich dann mit Herrn Eberlein zusammen gearbeitet und ihn intensiv bei der Umsetzung der Ideen betreut sowie Teile des Artikels geschrieben.

Lehr-Lern-Labor „Videoanalyse zweidimensionaler Bewegungen“

Konzeption und Durchführung

Andreas Eberlein, Thomas WilhelmLehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Am Hubland, 97074 Würzburg
andreas.eberlein@physik.uni-wuerzburg.de, thomas.wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de**Kurzfassung**

Der außerschulische Lernort gewinnt immer mehr an Bedeutung. Vor diesem Hintergrund sollen Schülerinnen und Schüler der siebten und achten Jahrgangsstufe der Realschule und des Gymnasiums in einem Lehr-Lern-Labor die wichtigsten Grundbegriffe der Mechanik anhand zweidimensionaler Bewegungen selbst erkunden. In spielerischen Experimenten an verschiedenen Stationen, unter anderem mit Carrera- und Darda-Bahn, werden Bewegungsabläufe betrachtet und gefilmt. Mit Hilfe des Videoanalyseprogramms „measure dynamics“ ist es möglich, die aufgezeichneten Filmsequenzen zu analysieren und die Geschwindigkeit sowie die Beschleunigung visuell durch Vektorpfeile sichtbar zu machen. In diesem Artikel wird auf die Konzeption, didaktische Überlegungen und die Durchführung des Labors eingegangen.

1. Einführung

Das Gebiet der Mechanik zeichnet sich besonders durch seine hohe Anschaulichkeit aus. Bewegungsabläufe können leicht auf Realsituationen im Alltag übertragen werden [1]. So sind fahrende Autos und Züge ideale Anschauungsobjekte für zweidimensionale Bewegungen. Um die im Alltag oft auf skalare Größen reduzierten Begriffe Geschwindigkeit und Beschleunigung mit korrekten physikalischen Größen zu beschreiben, ist es wichtig, diese im Zweidimensionalen einzuführen [2]. Dadurch kann den Fehlvorstellungen von Schülerinnen und Schülern (im Folgenden Schüler genannt) entgegengewirkt werden. Deswegen wurde im Lehr-Lern-Labor „Videoanalyse zweidimensionaler Bewegungen“ auf diesen Aspekt sowie auf die dynamisch ikonische Repräsentation besonderer Wert gelegt [3]. Als Medium wurden deshalb von Schülern selbst aufgenommene Videos verwendet, die es ermöglichen, die zugrunde liegende Struktur eines physikalischen Vorgangs mit dem Alltag zu verbinden [4].

Durch den Einsatz moderner Medien wie Videoanalyse können Lernprozesse optimiert und offene Aufgabenstellungen umgesetzt werden [4]. Mit dem Programm „measure dynamics“ (von Phywe) ist es möglich, zweidimensionale Bewegungen durch Videoanalyse einfach und berührungsfrei zu messen [5]. Zudem hilft die räumliche und zeitliche Kontiguität zwischen den Videos der Experimente und den zugehörigen Darstellungen physikalischer Größen den Schülern zu jedem Zeitpunkt eine Verbindung zwischen Realität und physikalischen Aussagen herzustellen [6]. Weiter bietet „measure dynamics“ die Möglichkeit durch Stroboskopbilder und Vektoreinblendungen physikalische Sachverhalte

direkt im Video zu analysieren [5]. So sind ideale Voraussetzungen für eine einfache und schnelle Analyse der erstellten Filme geschaffen.

Das Ziel eines jeden Schülerlabors ist es, das Interesse der Jugendlichen für die Physik zu steigern [7]. Deshalb wurde ein Lernumfeld geschaffen, das zur aktiven Auseinandersetzung mit möglichst lebensweltbezogenen Situationen anregt, woraus eine entspannte Atmosphäre zum Experimentieren entsteht [8]. Da es uns auch darum geht, dass die betreuenden Studierenden und die beobachtenden Lehrkräfte etwas dazulernen und positive Erfahrungen machen, sprechen wir vom „Lehr-Lern-Labor“.

Das Lehr-Lern-Labor wurde im März 2011 von drei Klassen wahrgenommen. Diese setzten sich aus zwei siebten Klassen aus einem Gymnasium sowie einer achten Klasse aus einer Realschule zusammen.

2. Konzeption

Das Lehr-Lern-Labor besteht aus insgesamt sieben Stationen. Die mehrfach vorhandenen Stationen „Eisenbahn“ und „Flummi“ dienen zur Einführung der Begriffe Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie deren Darstellung mit Vektorpfeilen und werden von allen Gruppen gleichzeitig durchgeführt. Die anschließenden Stationen „Carrera-Bahn“, „Schiffschaukel“, „Speed-Bus“ und „Darda-Bahn“ werden im Rotationsprinzip abwechselnd von den vier Gruppen durchlaufen. Abschließend wird der mehrfach vorhandene „Torschuss“ wieder von allen Gruppen parallel absolviert.

3. Durchführung

Im Folgenden werden die einzelnen Stationen beschrieben sowie deren Durchführung erläutert.

3.1. Station Eisenbahn

Bei der Station „Eisenbahn“ wird die vektorielle Größe Geschwindigkeit eingeführt. Der Versuchsaufbau besteht aus einer Eisenbahn, die mit konstantem Tempo auf Gleisen ihre Runden dreht. Die Schüler lernen, dass sie sich den Geschwindigkeitsvektor wie einen Pfeil vorstellen können. Dafür soll an der Lok ein Papppfeil angebracht werden.

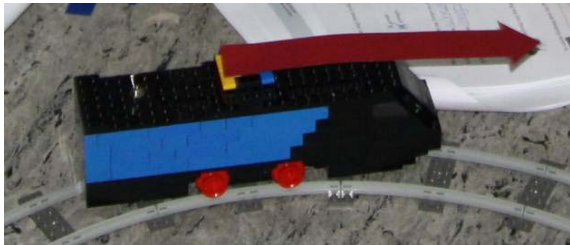


Abb. 1: Eisenbahn mit angebrachtem Papppfeil für die Geschwindigkeit

Als Lernziel erkennen die Schüler, dass sich die Geschwindigkeit aus Richtung und Tempo zusammensetzt. Anschließend wird der Zug ohne Papppfeil gefilmt, mit dem Videoprogramm „measure dynamics“ analysiert und der so erstellte Geschwindigkeitsvektor mit den vorherigen Aussagen abgeglichen.

3.2. Station Flummi

In der zweiten Station wird ein Gummiball auf den Boden geworfen und das Springen gefilmt. Mit Hilfe des Videoanalyseprogramms erstellen die Schüler ein Stroboskopbild. Dieses Bild wird auf das Arbeitsblatt übertragen. Zu drei beliebigen Zeitpunkten soll ein Geschwindigkeitspfeil eingezeichnet werden. Anschließend gleichen die Schüler ihre Zeichnungen mit den analysierten Videos am Computer ab.

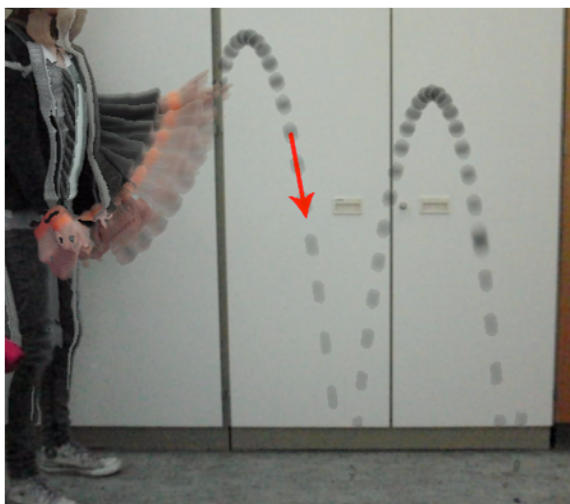


Abb. 2: Stroboskopbild des springenden Gummiballs

Diese Station behandelt die Änderung der Richtung des Geschwindigkeitsvektors im Laufe der Zeit. Die Schüler erkennen, dass die Länge des Geschwindigkeitsvektors vom Tempo abhängt. Bei Bodenkontakt verschwindet der Vektor, da dessen Länge null ist.

3.3. Station Carrera-Bahn

Auf einer vorgegeben Fläche am Fußboden bauen die Schüler eine Fahrbahn auf. Anschließend wird das Rennen gefilmt, auf den Computer übertragen und analysiert. Aus der von „measure dynamics“ errechneten Tabelle des Geschwindigkeitsbetrages wird die Höchstgeschwindigkeit ermittelt und in die für die Schüler alltagsverständliche Einheit „Kilometer pro Stunde“ umgerechnet. Die Bahnkurve wird als Diagramm (Abb. 3) ausgegeben. So kann die Bewegung des Autos beschrieben und die zurückgelegte Route bestimmt werden.

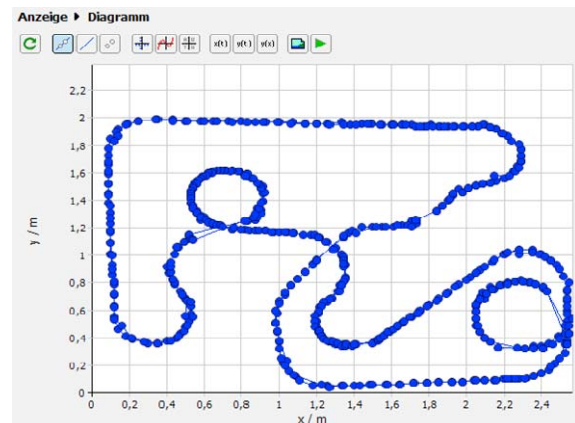


Abb. 3: Die Bahnkurve der der Carrera-Bahn in „measure dynamics“ als $y(x)$ -Diagramm erzeugt

Lernziel dieser Station ist die Beschreibung einer Bewegung durch die Feststellung des Ortes zu bestimmten Zeitpunkten. Hier kann das Tempo nicht abgelesen werden.

3.4. Station Speed-Bus

Nachdem die Schüler den Ausschnitt aus dem Film Speed, in dem ein Bus über einen fehlenden Brückenabschnitt springt, angesehen haben, sollen sie einschätzen, ob der Sprung physikalisch möglich ist. Dieser ist als Realexperiment nachgebaut. Die Schüler sollen nun mit Hilfe des Videoanalyseprogramms feststellen, wie das zweite Brückenteil positioniert werden muss, damit der Bus heil auf der anderen Seite landet. Dazu erzeugen sie ein Stroboskopbild und betrachten die Flugbahn des Busses.

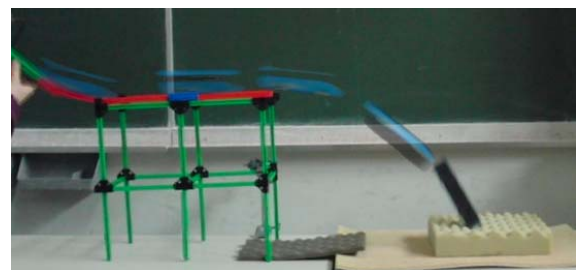


Abb. 4: Stroboskopbild des fallenden Busses

Lernziel dieser Station ist die Beschreibung der Wurfbewegung. Die Schüler erkennen, dass der Bus auf einer gekrümmten (parabelförmigen) Bahn auf den Boden fällt.

3.5. Station Schiffschaukel

Diese Station besteht aus einer aus Holz nachgebauten Schiffschaukel sowie einem mit einem Plexiglas versehenen TFT-Monitor. Das Video der gefilmten Schiffschaukel wird bis zu deren Stillstand auf dem Monitor betrachtet (siehe Abb. 5) und die jeweiligen Maximalhöhen der Schaukel mit einem Folienstift direkt auf dem Glas vor dem Bildschirm markiert. Die Schüler erkennen, dass die Maximalhöhe bei jedem Durchgang abnimmt und führen dies auf die Reibung zurück. Lernziel dieser Station ist die Einführung der Reibung. Diese bewirkt ein Abbremsen der Schaukel.



Abb. 5: Schülerin beim Analysieren der Videosequenz

Anschließend wird das Video analysiert und Geschwindigkeits- und Beschleunigungspfeil eingetragen (siehe Abb. 6). Es wird erkannt, dass eine Änderung des Tempos eine Längenänderung des Geschwindigkeitspfeils bewirkt. Die Auswirkung der Richtungsänderung wird durch den Beschleunigungsvektor beschrieben.

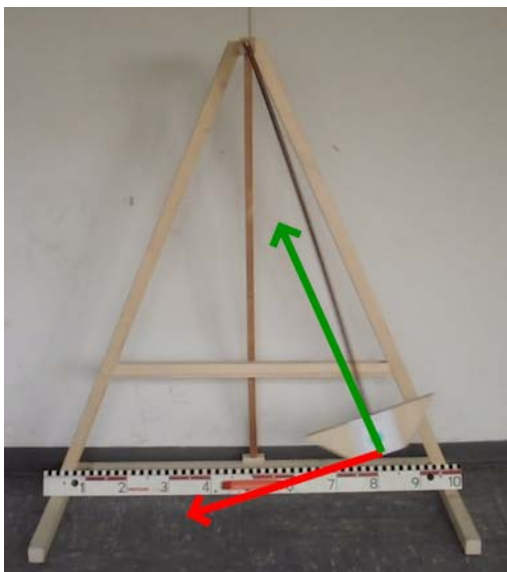


Abb. 6: Geschwindigkeitsvektor (rot) und Beschleunigungsvektor (grün) der Station „Schiffschaukel“

3.6. Station Darda-Bahn

Es wird die Durchfahrt eines Loopings gefilmt und analysiert. Aus der angezeigten Wertetabelle wird die Höchstgeschwindigkeit ermittelt und in km/h umgerechnet. Anschließend ergänzen die Schüler in fünf Momentaufnahmen der Loopingfahrt in ihren Arbeitsblättern den Geschwindigkeitspfeil und überprüfen ihre Aussagen mit Hilfe der Videoanalyse-Software.

Daraufhin erläutert der Betreuer den Zusammenhang von Tempo- bzw. Richtungsänderung mit dem Beschleunigungsvektor. In weiteren drei Momentaufnahmen wird der Beschleunigungsvektor eingezeichnet und wiederum mit dem von „measure dynamics“ analysierten Video abgeglichen. Während der Loopingfahrt zeigt der Beschleunigungsvektor stets ungefähr zum Mittelpunkt der kreisförmigen Loopingbahn (Abb. 7).

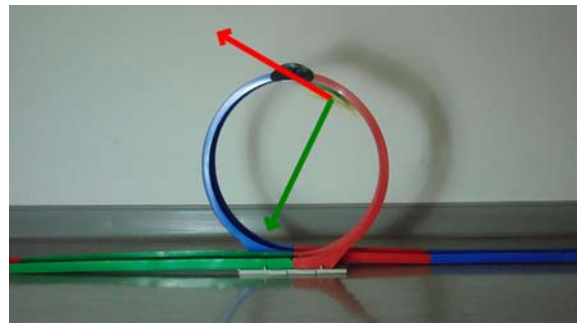


Abb. 7: Eine Loopingfahrt mit von „measure dynamics“ eingezeichnetem Geschwindigkeitsvektor (rot) und Beschleunigungsvektor (grün)

Lernziel dieser Station ist der korrekte Umgang mit dem Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektor. Es wird erkannt, dass der Beschleunigungsvektor eine Tempo- bzw. Richtungsänderung beschreibt.

3.7. Station Torschuss

Diese mehrfach vorhandene und von allen Gruppen gleichzeitig bearbeitete Station führt die Größe der Zusatzgeschwindigkeit ein. Die Schüler erhalten die Aufgabe, eine seitlich einrollende Metallkugel mit einem Holzbrett nach vorne in ein Tor zu schießen.

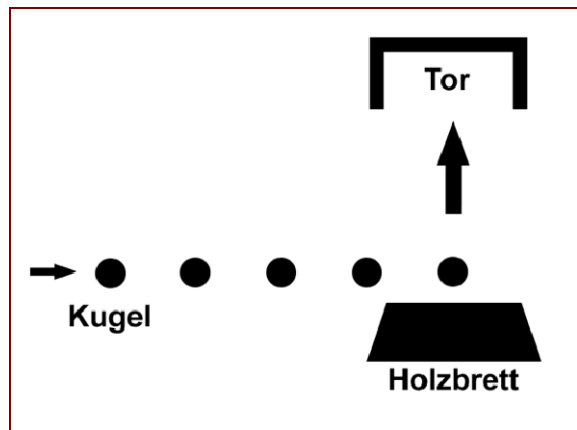


Abb. 8: Aufgabe Station „Torschuss“

Dabei verfehlen sie anfangs oft das Ziel. Nach und nach erkennen sie, dass der Stoß mit dem Brett nicht in Richtung des Tores erfolgen darf, sondern der heranrollenden Kugel entgegenwirken muss oder dass ein senkrechter Stoß weiter links geschehen muss. An dieser Stelle wird die Vektoraddition eingeführt. Lernziel dieser Station ist die Erkenntnis, dass durch eine Einwirkung von außen die Kugel eine Zusatzgeschwindigkeit erhält. Diese addiert sich zur bereits bestehenden Geschwindigkeit der einrollenden Kugel.

Mit Hilfe dieser Zusatzgeschwindigkeit kann im Unterricht die Newtonsche Bewegungsgleichung (2. Newtonsches Gesetz) in der Form $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ eingeführt werden [9-10]. Dies war jedoch nicht mehr Teil des Lehr-Lern-Labors.

4. Erfahrungen

Die anfänglichen Bedenken, die Schüler mit der Technik der Videokameras (Casio EX-FS10) und des Videoanalyseprogramms zu überfordern, wurden schnell widerlegt. Der Umgang mit der Kamera fiel den Schülern erstaunlich leicht. So haben sie sich schnell in das intuitiv bedienbare Programm „measure dynamics“ eingearbeitet und der Vektorcharakter wurde durch die automatische Einblendung von Geschwindigkeits- und Beschleunigungspfeil besonders gut ersichtlich. Durch die Einführung im Zweidimensionalen fiel den Schülern die Unterscheidung zwischen Tempo und Geschwindigkeit leicht. Außerdem verknüpfen die Schüler nun Alltagsgeschehen mit Physik, da sie nun reale Situationen, wie z.B. eine Kurvenfahrt im Auto, mit physikalischen Begriffen und Gesetzen erklären können.

Das Lehr-Lern-Labor wurde sehr gut von den Schülern angenommen, da der Fragebogen, der am Ende des Labors ausgefüllt wurde, belegt, dass die Mehrheit der Schüler gerne ein weiteres Schülerlabor besuchen möchte. Auch begleitende Lehrkräfte wurden dadurch motiviert, selbst einmal die Videoanalyse im Unterricht einzusetzen und dazu selbst Videos mit Schülern aufzunehmen.

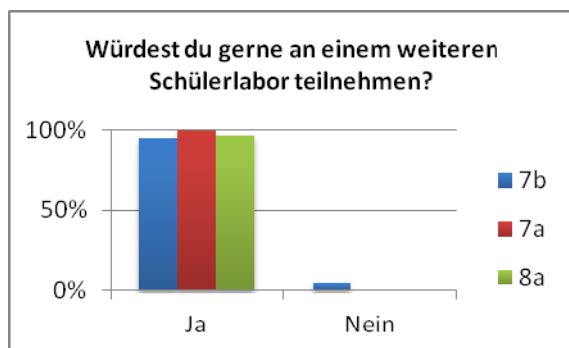


Abb. 9: Auszug Fragebogen

5. Literatur

- [1] Duit, Reinders (1993): Alltagsvorstellungen berücksichtigen! In: Praxis der Naturwissenschaften, 42(6)
- [2] Wilhelm, Thomas; Heuer, Dieter (2002): Fehlvorstellungen in der Kinematik vermeiden - durch Beginn mit der zweidimensionalen Bewegung. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 51, Nr. 7S. 29 - 34
- [3] Wilhelm, Thomas (2005): Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung, Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 46, Logos-Verlag, Berlin
- [4] Michel, Christine; Wilhelm, Thomas (2008): Lehrvideos mit dynamisch ikonischen Repräsentationen zu zweidimensionalen Bewegungen. In: V. Nordmeier und A. Oberländer: Beiträge zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik der DPG, Berlin
- [5] Benz, Michael; Wilhelm, Thomas (2008): measure Dynamics – Ein Quantensprung in der digitalen Videoanalyse. In: Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin
- [6] Wilhelm, Thomas (2009): Videoanalyse mit unterschiedlichen Darstellungsformen. In: Höttecke, D.: Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDGP, Schwäbisch Gmünd
- [7] Engeln, Kathrin (2004): Schülerlabors - authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken. In: Studien zum Physiklernen: Aulis-Verl. Deubner (Band 36).
- [8] Euler, Manfred (2009): Schülerlabore: Lernen durch Forschen und Entwickeln. In: Kircher, E.; Girwidz, R.; Häußler, P.: Physikdidaktik - Theorie und Praxis, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- [9] Walter, Christine; Tobias, Verena; Wiesner, Hartmut; Hopf, Martin; Wilhelm, Thomas (2010): Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Dynamik in der Mittelstufe. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 59, Nr. 7, 2010, S. 9 - 22
- [10] Wilhelm, Thomas; Tobias, Verena; Walter, Christine; Hopf, Martin; Wiesner, Hartmut (2011): Zweidimensional-dynamische Mechanik – Ergebnisse einer Studie. In: Höttecke, D. (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDGP in Potsdam 2010, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 31, Lit-Verlag, Münster

3. Neue Möglichkeiten außerhalb der Mechanik

3.1 Der Bierschaumzerfall als Analogon zum radioaktiven Zerfall?

Quelle:

WILHELM, T.; OSSAU, W.: *Bierschaumzerfall – Modelle und Realität im Vergleich* – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58, Nr. 8, 2009, S. 19 - 26

Inhalt und Bezug zum Thema:

Der Bierschaumzerfall wird häufig als Analogon zum radioaktiven Zerfall verwendet. In dem Artikel wird der Bierschaumzerfall fachlich beschrieben und ein Überblick über alle wichtigen Veröffentlichungen gegeben. An dem Messbeispiel von LEIKE wird gezeigt, wie man eine mathematische Gleichung findet, was man dabei beachten muss und wie man verschiedene Modelle bewerten kann. Schließlich wird ein Bierschaumzerfall mittels Videoanalyse studiert und die Messung kritisch beleuchtet. Insgesamt zeigt sich, dass der biexponentielle Zerfall ein brauchbares Modell für den Bierschaumzerfall ist.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Alle Fotos, Videoaufnahmen, Messungen dieses Artikels wurden von mir gemacht und ich habe den Artikel geschrieben. Herr Ossau hat dazu die Kurvenanpassungen gemäß der Methode der kleinsten Quadrate gemacht und aus den Messwerten, den theoretischen Werten aus der Modellanpassung und den jeweiligen Unsicherheiten der Messungen den Wert χ^2 berechnet.

Bierschaumzerfall

Modelle und Realität im Vergleich

Th. Wilhelm u. W. Ossau



1 Motivation und Begründung

Der Bierschaumzerfall ist ein bekannter Versuch im Physikunterricht, der als Analogversuch zum radioaktiven Zerfall verwendet wird [1-5]. Im Mathematikunterricht wird er außerdem bei der Einführung der Exponentialfunktion eingesetzt. Die Attraktivität des Versuchs liegt nicht nur daran, dass Bier für viele Schüler dieses Alters interessant und positiv besetzt ist. Der Zerfall des Bierschaums ist jedem aus dem Alltag bekannt, der Versuch ist sehr einfach (mit alkoholfreiem Bier!) durchführbar und kann von jedem Schüler zu Hause wiederholt werden [6]. Während man beim radioaktiven Zerfall die Anzahl der unzerfallenen Kerne nicht sehen kann und auch die Zerfallsrate nur mit Messgeräten erfassen kann, ist das Volumen der unzerfallenen Bierschaumbläschen gut sichtbar. Da man zylindrische Gefäße verwendet, ist die Höhe des Schaums gleichzeitig ein Maß für das Volumen. Weiterhin ist es scheinbar einleuchtend (aber nicht richtig), dass die Anzahl der Bläschenzerfälle pro Zeiteinheit proportional zur Anzahl vorhandener Bläschen ist:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N.$$

Dennoch haben schon viele Lehrer festgestellt, dass ihre Messwerte von dem erwarteten Verlauf

$$h(t) = h_0 e^{-\lambda t} \\ = h_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

bzw.

$$h(t) = h_0 2^{-\frac{t}{T}} \\ = h_0 e^{-\ln 2 \frac{t}{T}}$$

abweichen. Im Folgenden werden die wesentlichen Veröffentlichungen zum Bierschaumzerfall zusammengefasst und bewertet. Anschließend wird demonstriert, wie man bei angenommenen guten Messwerten eine geeignete Anpassung (Kurvenfit) macht. Schließlich wird gezeigt, wie man geschickt messen kann.

2 Fachliche Analysen

2.1 Der Bierschaum

Schäume begegnen uns häufig im Alltag, sind sehr interessant und verbergen einige noch ungeklärte Fragen [7]. Auch die Bildung und der Zerfall von Bierschaum ist ein sehr komplexer Vorgang, mit dem sich industrielle Forschung und Brauereien schon intensiv befassen haben [8-10]. Flüssiger Schaum ist eine feine Verteilung eines Gases in einer Flüssigkeit, die in der Chemie als Dispersion bezeichnet wird. Oder anders gesagt besteht flüssiger Schaum aus gasförmigen Bläschen, die von flüssigen Wänden eingeschlossen sind.

Durch die mechanische Arbeit des Einschenkens des Bieres wird die Entbindung von CO_2 , das in der Flüssigkeit gelöst war, begünstigt. Diese CO_2 -Gasbläschen treffen auf oberflächenaktive Substanzen (Tenside) wie Eiweißabbauprodukte und Hopfenbitterstoffe, die eine geringere Oberflächenspannung aufweisen und um das CO_2 eine elastische Hülle bilden. Die Schaumbildung hängt unter anderem von der Temperatur des Bieres, der Temperatur des Gefäßes, dem Alter des Bieres, der Wartezeit nach dem Öffnen der Flasche, dem Luftdruck und vor allem von der Art der Schaumerzeugung ab. Beim Einschenken des Bieres entsteht sofort Schaum, der bereits einige Sekunden nach dem Einschenken sein Maximum erreicht. Für den Zerfall spielen außerdem die Form des Gefäßes und Verunreinigungen an der Glaswand eine Rolle. Der Zerfall von Bierschaum geht zum einen auf das aufgrund der Schwerkraft nach unten Fließen der Flüssigkeit, die die CO_2 -Bläschen umgibt, zurück, sodass die Wände der Bläschen immer dünner werden, bis sie zerplatzen (Entwässerung des Schaums) [8]. Dieser als Drainage bezeichnete Effekt läuft relativ schnell ab. Zum anderen gibt es eine Zunahme der mittleren Blasengröße, auch Ostwald'sche Blasenreife [8] oder Vergrößerung [11] genannt. Hierbei diffundiert Kohlendioxid von kleineren in größere Blasen, weil in den kleineren Blasen größere Drücke herrschen, wodurch sich die kleinen Blasen verkleinern, bis sie kein CO_2

mehr enthalten und verschwinden. Die entstehenden großen Blasen können aufgrund eines zu großen Gasvolumens platzen und verschwinden dadurch ebenso. Dieser zweite Zerfallsmechanismus läuft deutlich langsamer als die zuerst genannte Entwässerung ab. Als drittes spielt am oberen Ende des Schaums auch Verdunstung eine Rolle. Dieser Effekt ist aber im Gegensatz zu den anderen beiden vernachlässigbar bzw. durch Abdecken des Gefäßes minimierbar. Alle drei Effekte finden gleichzeitig statt. Es stellt sich deshalb die Frage, welche Zerfallsgleichung den Bierschaumzerfall insgesamt am besten beschreibt.

2.2 Monoexponentielle Ergebnisse?

Viele didaktische Beiträge gehen davon aus, dass die Abnahme des Bierschaumvolumens durch das Modell eines exponentiellen Zerfalls gut beschrieben werden kann. Dabei wird stets die Schaumhöhe bzw. das Schaumvolumen betrachtet, nicht die Schaummasse. Göbel und Haubold [1] verwenden dazu einen nicht zu engen Messzylinder, in den sie das Bier langsam einfüllen, so dass die Schaumbildung nicht zu stark ist, was einen exponentiellen Abfall ergeben soll. Bei Hilscher [2] wird dagegen ein hohes Trinkglas mit großem Durchmesser verwendet und das Bier aus etwa einem halben Meter ins Glas fallen gelassen. Entgegen den gemachten Behauptungen weicht die angegebene Messkurve deutlich von einer Exponentialfunktion ab (Messzeit 300 s): Sie zeigt in etwa für $t < 1$ min einen schnellen exponentiellen Abfall (Halbwertszeit $T = 50$ s) und einen langsameren exponentiellen Abfall mit größerer Halbwertszeit für $t > 1$ min ($T = 99$ s). Sennekamp [3] nimmt ein handelsübliches Bierglas, das mit Bier aus geringen Höhen gefüllt wird. Um nicht Ober- und Unterkannte des Schaums messen zu müssen, wurde das Glas so präpariert, dass die sich absetzende Flüssigkeit durch kleine Bodenlöcher abfließt und die Schaumhöhe wurde über eine Widerstandsmessung bestimmt (Messzeit 540 s). Dass das Ergebnis vom erwarteten exponentiellen Zerfall abweicht, wird zumindest erwähnt. Das logarithmische

Diagramm zeigt jedoch einen starken exponentiellen Abfall für $t < 4$ min (Halbwertszeit $T = 66$ s) und einen anderen exponentiellen Abfall mit größerer Halbwertszeit für $t > 4$ min ($T = 97$ s).

Seiler [4] verwendet einen Messzylinder mit einem Fassungsvermögen von 100 ml, in den durch leichtes Kippen des Zylinders langsam eingeschenkt wird und jede Minute gemessen wird (Messzeit 300 s). Seiler weist darauf hin, dass der Zerfall am Anfang (erste Minute) nicht exponentiell ist, während sich danach eine Exponentialfunktion ergibt. Da nur bis zur doppelten Halbwertszeit gemessen wurde, kann eine Abweichung vom exponentiellen Zerfall so kaum nachgewiesen werden.

Genauere Untersuchungen liefert Leike [12]. Er füllte Messzylinder mit einem Durchmesser von 7,2 cm so, dass eine Schaumhöhe von bis zu 17 cm entstand. Die Messung wiederholte er mehrfach, wobei er die verschiedenen entstandenen Schaumhöhen auf die jeweils gleiche Anfangshöhe von 17 cm normierte, was bedenklich ist. Er gab für jeden Zeitpunkt Mittelwert und Fehler an, wobei nicht klar wird, ob auch die Fehler mitnormiert wurden. Mithilfe eines χ^2 -Tests wurde der Faktor τ in

$$h = h_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

ermittelt, der die passendste e-Funktion ergibt, und es wurde gezeigt, dass eine lineare Zerfallskurve den Messwerten weniger entspricht. Wie bei allen anderen Autoren sieht man jedoch im Diagramm, dass die Messwerte am Anfang stärker als die angepasste e-Funktion fallen und später langsamer.

Schaut man sich die Diagramme der erwähnten Autoren an, stellt man fest, dass der Bierschaum am Anfang schneller (mit einer kleineren Halbwertszeit) und nach längerer Messzeit langsamer (mit einer größeren Halbwertszeit) zerfällt, als es das Modell des monoexponentiellen Zerfalls erwarten lässt.

Der Ingenieur Potreck hat in seiner Dissertation [8] ein System entwickelt, das die Schaumhaltbarkeit weitgehend automatisiert und mit guter Reproduzierbarkeit bestimmt. Damit wurde der Einfluss vieler Parameter auf den Bierschaumzerfall bestimmt. Überraschenderweise geht auch er von einem monoexponentiellen Zerfall der Anzahl der Schaumblasen aus [8, S. 117]. Er misst allerdings nur das zurückgebildete Flüssigkeitsvolumen und beginnt seine

Messungen der Zerfallskurven stets erst, wenn sich von den aufgeschäumten 164 ml Bier schon 50 ml Bier aus dem Schaum zurückgebildet haben (> 100 s), so dass diese Untersuchungen für unsere Fragestellung wenig hilfreich ist.

2.3 Mehrphasige Ergebnisse

Dale et al. haben Bier künstlich mit Kohlendioxid aufgeschäumt (100 ml Schaum) und die Leitfähigkeit und die Masse des Schaums gemessen [9, S. 84]. Sie fanden drei unterschiedliche Zerfallsphasen [9, S. 85]. Die initiale Phase, die sie als exponentiellen Abfall der Schaummasse beschreiben, führen sie auf die Drainage des Bieres aus dem Schaum zurück ($t < 360$ s). Die Konsolidierungsphase, für die sie ebenfalls eine einfach exponentielle Abnahme der Schaummasse annahmen, sei durch eine Anreicherung des Peptidmaterials in den verbleibenden Flüssigkeitslamellen charakterisiert ($360 < t < 1000$ s). Die dritte nicht-exponentielle Schlussphase sei durch den Zusammenbruch des kleinen Schaumrestes gegeben ($1000 < t < 2000$ s) und befindet sich jenseits der üblichen Messzeit. Während in der ersten Phase ein sehr schneller Abfall der Schaummassenkurve zu sehen ist, nimmt sie in der zweiten Phase mit einer größeren Halbwertszeit ab.

Plath und Sauerbrei [10] weisen darauf hin, dass das Einschenken des Bieres sehr kritisch ist und beim mechanischen Einschenken keine Reproduzierbarkeit gegeben ist. Selbst bekannte Aufschäumverfahren hielten sie nicht für zuverlässig und entwickelten ein Ultraschallaufschäumverfahren (aus 20 ml ungeschäumtem Bier wurden 40 ml Schaum und 4 ml Bier, gemessen wurde im 100 ml Messzylinder). Unter diesen Bedingungen konnten Plath und Sauerbrei eine Zerfallsgleichung

$$V = V_0 e^{-bt - ct^{2.5}}$$

für das Schaumvolumen ermitteln, was sie wie folgt erklären. In der ersten Phase dominiert das nach unten Fließen der Flüssigkeit, die sich zwischen den Blasen befindet. Dies lässt sich durch einen Exponentialansatz vollständig beschreiben (bei „Beck's Pils“: $t < 160$ s). In einer zweiten Phase findet ein anderer Prozess statt, der für $t > 200$ s gut durch

$$V = V_0 e^{-kt^{2.5}}$$

beschrieben wird, während es dazwischen zu einer Überlagerung kommt. In dieser

zweiten Phase findet die Ostwald'sche Blasenreifung statt, in der kleine Blasen schrumpfen und große platzen. Plath und Sauerbrei [10] sprechen hier von einer Apollonischen Umordnung. Apollonische Kreise erhält man, wenn man in einen Kreis zwei oder drei sich berührende Kreise zeichnet und in den verbleibenden Flächen immer wieder größtmögliche Kreise zeichnet, was zu einer fraktalen Figur führt. Entsprechend muss man sich den Schaum als fraktales Blasengebilde Apollonischer Kugelpackungen vorstellen, die sich ständig verändert. Bei Plath und Sauerbrei zerfällt der Schaum in der zweiten Phase allerdings seltsamerweise und im Gegensatz zu anderen Arbeiten schneller als es eine exponentielle Extrapolation der ersten Phase erwarten ließ.

Der Lebensmitteltechnologe Anaya hat die Bierschaumhöhe mit einer Videoanalyse-Software bestimmt [13]. Auch er stellt fest, dass die gemessenen Kurven systematisch teilweise über und teilweise unter der angepassten Exponentialkurve liegen, was er als „Stufentheorie“ bezeichnet. Seine Messkurven zeigen auch zwei Phasen, d. h. einen Knick in der Zerfallskurve. Mit seinen mathematischen Verfahren konnte er aber dieses Modell nicht bestätigen.

2.4 Die Zerfallsphasen

Nach dem Einschenken gibt es eine kurze Phase, bei der die obere Schaumgrenze noch wächst, sodass diese Phase üblicherweise nicht beim Bierschaumzerfall betrachtet wird. Allerdings steigt während dieser Zeit die untere Bierschaumgrenze bereits stark an, so dass die effektive Schaumhöhe abnimmt. Dennoch beginnen die meisten Messungen frühestens ab dem Zeitpunkt der höchsten oberen Schaumgrenze.

Überblickt man alle Untersuchungen, kann man als Gemeinsamkeit feststellen, dass der Bierschaum in der üblicherweise betrachteten Zeitspanne in zwei Phasen zerfällt, wobei die erste näherungsweise exponentiell ist. Für die zweite Phase gibt es unterschiedliche Forschungsergebnisse und sie grenzt sich unterschiedlich gut von der ersten Phase ab.

In der ersten Phase überwiegt das nach unten Fließen der Flüssigkeit aufgrund der Schwerkraft [9, 10]. Wir nennen diese Phase die „Bierückholungsphase“. In der zweiten Phase überwiegen die Blasenvergrößerung [9, 10] und das Platzen der Blasen.

Wie gut man die beiden Phasen unterscheiden kann, hängt eindeutig von den ge-

wählten Randbedingungen ab. So zeigten z. B. bei *Plath* und *Sauerbrei* [10] Versuche mit unterschiedlichen Mengen und unterschiedlich weiten Messzylindern, dass auch die Gestalt des Messzylinders einen Einfluss auf den Zerfall hat.

3 Modellbildung: Welche Gleichung passt am besten?

● *Theyßen* zeigt, dass für die Drainage bei trockenen Schäumen mit etlichen Vereinfachungen gezeigt werden kann, dass es sich in sehr grober Näherung um einen hyperbolischen Zerfall des Schaumvolumens handelt, was für den nassen Bierschaum nicht relevant ist [11]. Sie betont weiterhin, dass man für den gesamten Ablauf weder die Exponentialfunktion noch eine andere Funktion theoretisch begründen kann, da die Differentialgleichungen einschließlich der Blasenvergrößerung durch Diffusion nicht mehr analytisch lösbar sind. So stellt sich die Frage, wie wir aus experimenteller Sicht die Messwerte am besten mathematisch beschreiben, nachdem es kein theoretisches Modell gibt.

Da wir an die sichtbare Schaummenge denken, betrachten wir nicht die Schaummasse (wie *Dale et al.*), sondern das Schaumvolumen, wozu man wie *Leike* die untere und obere Schaumgrenze messen muss. Uns interessieren auch keine wissenschaftlichen Aufschäumverfahren, sondern das nicht-reproduzierbare normale Einschenken (ein einfaches reproduzierbares Einschenkenverfahren findet sich bei [14]).

Leike [12] zeigt mit Hilfe des χ^2 -Tests, dass hierfür die Exponentialfunktion besser als lineare Funktionen passt, ohne andere Funktionen zu berücksichtigen. Für diese Arbeit bekam er den Ig-Nobelpreis, eine satirische Auszeichnung, die von der Harvard-Universität für unnütze, unwichtige oder skurrile wissenschaftliche Arbeiten verliehen wird. *Theyßen* [11] zeigt nur, dass Exponentialfunktion und eine hyperbolische Funktion in einer graphischen Darstellung ähnlich gut zu den Messwerten von *Leike* passen. *Plath* und *Sauerbrei* [10] haben von einer Software 2500 Funktionsansätze untersuchen lassen und kamen so auf die komplizierte Gleichung, die im Exponenten der e-Funktion $t^{2.5}$ hat, was auch nicht wissenschaftlich erscheint und nicht interpretiert werden kann.

Wir wollen nun an dem Messbeispiel von *Leike* [12] zeigen, wie man ein mathematisches Modell für einen speziellen Bier-

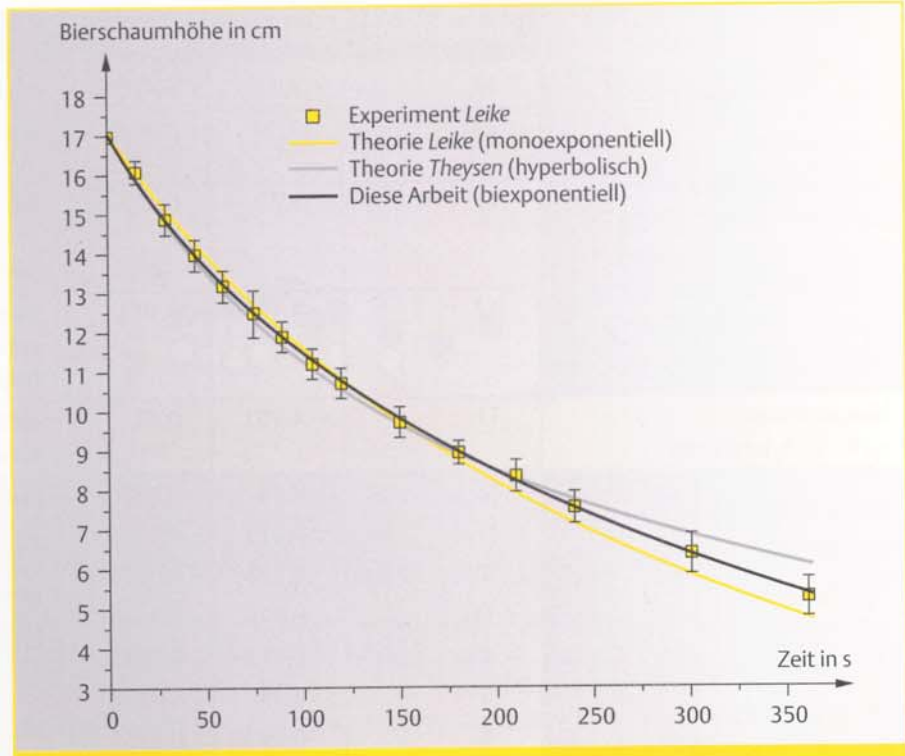


Abb. 1: Messwerte von *Leike* [12] mit Fehler und mit drei Anpassungen: monoexponentiell, hyperbolisch und biexponentiell

schaumzerfall unter bestimmten Bedingungen in der Form einer expliziten Gleichung für die Abhängigkeit der Bierschaumhöhe von der Zeit finden kann. Dabei geht es nicht darum, die Kurve zu finden, die die Messergebnisse am besten beschreibt, sondern darum, eine Kurve zu finden, die möglichst einfach ist und die man auch interpretieren kann. Wir nehmen dazu zunächst die aus neun Messungen gemittelten Messdaten von *Leike* für Erdinger Weißbier mit 15 Messpunkten (siehe Abb. 1) und wenden das an, was man im ersten Semester in einer Vorlesung „Auswertung von Messungen und Fehlerrechnung“ lernen kann.

Bei der Methode der kleinsten Quadrate wird bei Kurvenanpassungen aus den Messwerten h_i , den theoretischen Werten aus der Modellanpassung h_t und den jeweiligen Unsicherheiten der Messungen Δh_i ein Wert berechnet:

$$\chi^2 = \sum \frac{(h_i - h_t)^2}{(\Delta h_i)^2}.$$

Dieser wird durch Anpassung der Modellparameter minimiert und so die bestmögliche Beschreibung des experimentellen Verlaufs ermittelt. Bei Anwendung eines linearen Modells gelingt dies nicht (siehe Tab. 1). Der χ^2 -Wert eines guten Fits sollte etwa in der Größe von $D_{OF} \pm \sqrt{D_{OF}}$ liegen, wobei sich die Anzahl der Freiheitsgrade D_{OF}

berechnet aus der Anzahl der Messungen N (15) minus der Anzahl der Zwangsbedingungen P (2 bei einem linearen Modell). *Leike* hat, aufgrund des Versagens eines linearen Modells, einen exponentiellen Zerfall angenommen und die Halbwertszeit τ nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt und ein χ^2 erhalten, das wesentlich kleiner wird als für ein lineares Modell (siehe Tab. 1). Bei der explorativen Datenanalyse ist es jedoch nicht nur wesentlich, ein möglichst kleines χ^2 zu erhalten. Ferner sollten die ermittelten Residuen

$$h_{\text{Experiment}} - h_{\text{Theorie}}$$

gleichmäßig um die Nulllinie streuen. Bestimmt man nun aber die Residuen, d. h. die Abweichungen der Messwerte von den berechneten Werten, dann sieht man eine systematische, nicht zufällige Abweichungen (siehe Abb. 2). Die Messwerte sind in der ersten Hälfte der Messzeit systematisch kleiner und in der zweiten Hälfte systematisch größer als die Modellrechnung.

Ähnlich verhält es sich mit der von *Theyßen* [11] vorgeschlagenen hyperbolischen Funktion

$$h(t) = \frac{h_0}{t - t_0} \quad \text{mit } t_0 < 0.$$

Sie ergibt ein besseres χ^2 , also eine bessere Anpassung im Messbereich. Vor dem Messbereich, also bei negativen Zeiten, hat die

	Freiheitsgrade	χ^2	χ^2_{reduced}	Bemerkung
Linear	13	110,11	8,47	eine extrem schlechte Näherung
exponentiell; τ bestimmt, h_0 fest	13	10,29	0,791	die Anpassung von <i>Leike</i>
hyperbolische Funktion; h_0, t_0 bestimmt	13	5,47	0,421	die Anpassung von <i>Theyßen</i> : besser als <i>Leike</i> , aber unphysikalisch, da eine Singularität im Verlauf
exponentiell mit Resthöhe h_∞ ; τ, h_0, h_∞ bestimmt	12	2,10	0,175	eine noch bessere Anpassung, aber unphysikalisch, da eine Resthöhe nicht beobachtet wird
biexponentiell; τ_1, h_1, τ_2, h_2 bestimmt	11	4,707	0,43	die beste Anpassung mit Exponentialfunktionen und physikalisch sinnvoll
Polynom 2. Grades	12	7,94	0,662	Die Anpassung wird zunehmend besser. Es ergeben sich hier aber sinnlose Verläufe außerhalb der Messpunkte. Darüber hinaus haben die Koeffizienten keine physikalische Bedeutung.
Polynom 3. Grades	11	0,613	0,0558	
Polynom 4. Grades	10	0,570	0,0518	
Polynom 5. Grades	9	0,446	0,0496	
Polynom 6. Grades	8	0,412	0,0515	
Polynom 7. Grades	7	0,356	0,0508	
Polynom 8. Grades	6	0,0908	0,0151	
Polynom 9. Grades	5	0,0795	0,0159	

Tab. 1: Qualität verschiedener Anpassungen an die Messwerte von *Leike*

Funktion aber eine physikalisch nicht interpretierbare Polstelle. Der Bierschaum hat also vor dem willkürlich festsetzbaren Start der Messung ($t = 0$) eine unendliche Höhe. Im Messbereich großer Zeiten geht die theoretische Kurve zwar wie verlangt asymptotisch gegen Null, scheint aber im Vergleich zu den Messdaten zu hoch zu laufen. Die Residuen haben auch hier systematische Abweichungen (siehe Abb. 2). Eine weitere einfache Annahme für den Bierschaumzerfall wäre ein exponentieller Zerfall mit einer Resthöhe h_∞ . Um aufgrund der unterschiedlichen Zwangsbedingungen der verschiedenen Anpassungen die Qualität des Kurvenfits zu vergleichen, berechnet man χ^2 pro Freiheitsgrad D_{OF} (χ^2_{reduced} , siehe Tab. 1). Betrachtet man diesen mittels Anpassung gefundenen Wert, ergibt sich eine noch bessere Anpassung. Ferner streuen die Residuen nicht mehr systematisch um die Nulllage. Der exponentielle Bierschaumzerfall mit einer Restbierschaumhöhe ist somit sowohl vom Kriterium eines kleinen χ^2 -Wertes her als auch aufgrund der Residuenanalyse das bislang zu favorisierende Modell. Allerdings ist eine nach sehr langer Messzeit verbleibende Restbierschaumhöhe nicht plausibel zu machen. Sowohl die hyperbolische Modellvorstellungen als auch der exponentielle Zerfall mit einer Resthöhe h_∞ sind somit physikalisch nicht belastbar.

Man könnte, um unphysikalische Modellvorstellungen auf die Spitze zu treiben, auch auf die Idee kommen, einen Polynomfit zu machen und erhält im Bereich der Messdaten eine sehr gute Anpassung. Für ein Polynom vierter Ordnung ergibt sich eine geradezu perfekte Anpassung an die Messwerte, die wesentlich besser als alle bisherigen Vorschläge ist. Betrachtet man aber den Verlauf dieses Polynoms außerhalb des Messbereichs ($t < 0$ bzw. $t > 400$ s), stellt man einen völlig sinnlosen Verlauf fest, so dass man diese Funktion nicht wählen darf (siehe Abb. 3). Außerdem sind noch stärker als in den beiden Beispielen vorher die Koeffizienten nicht physikalisch interpretierbar.

Die Zerfallskurven von Bierschaum weisen meist zwei Abschnitte auf, und die logarithmische Auftragung der Messwerte der Messung aus Abschnitt 4.3 ergibt für beide einen linearen Verlauf (siehe Abb. 7). Wir modellieren daher den Bierschaumzerfall mittels eines biexponentiellen Zerfalls

$$h(t) = h_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + h_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}$$

und erhalten eine fast perfekte Anpassung an die Messwerte von *Leike* (siehe Abb. 1). Bestimmen wir auch hier die Residuen, dann sieht man zufällige, nicht systematische Abweichungen von der Nulllage (siehe Abb. 2). Diese zwei Teile der Gleichung

kann man nun auch mit den zwei entscheidenden Vorgängen beim Bierschaumzerfall, der Drainage (Entwässerung) und dem Platzen der Blasen aufgrund der Blasenvergrößerung, in Verbindung bringen. Der biexponentielle Verlauf passt also am besten zu den Messwerten von *Leike*. Der Summand mit der kurzen Zerfallszeit beschreibt die Abnahme der Bierschaumhöhe aufgrund der Drainage, während der Summand mit der längeren Zerfallszeit die Abnahme der Schaumhöhe durch das Platzen der Blasen interpretiert. Wir haben ein physikalisch sinnvolles Modell gefunden, das die Messwerte von *Leike* sowohl hinsichtlich eines kleinen χ^2 -Wertes als auch der Residuen hervorragend beschreibt, allerdings bleibt die Frage, ob dieses Modell auf alle Messungen von Bierschaumzerfällen anwendbar ist und wie gut die Messwerte von *Leike* tatsächlich sind.

4 | Messung mit der Videoanalyse

● Da man bei der Radioaktivität nichts sehen kann und außer dem Knacken eines Zählers nur Messwerte hat, sind Analogexperimente im Unterricht sinnvoll. So kann man in eine Schachtel viele Spielwürfel geben und diese schütteln. Beim Öffnen werden alle Würfel entfernt, die bestimmte Zahlen anzeigen (z. B. eine Sechs, eine Eins oder Zwei, eine gerade Zahl). Nun hat

man einen statistischen Prozess, bei dem die Änderung der Würfelanzahl in der Schachtel im Mittel von der Anzahl N der Würfel abhängt:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N.$$

So ergibt sich im Mittel eine exponentielle Abnahme. Auch wenn dies beim Bierschaumzerfall nicht gilt, ist er eine motivierende Ergänzung, die den Zerfall visuell deutlich macht.

Theyßen ist der Meinung, dass das Thema „Schäume“ für den Unterricht ein bereicherndes Thema ist und die grundlegenden drei Zerfallsmechanismen im Schulunterricht behandelbar sind [11, S. 57]. Darüber hinaus kann der Bierschaumzerfall im Grundstudium genutzt werden, um Kenntnisse zur Fehleranalyse und zum Kurvenfit zu vermitteln. In allen Fällen eignet sich die Videoanalyse als Messverfahren.

4.1 Vorteile der Videoanalyse

Eine Messwerterfassung mit einem Videoanalyseprogramm ist eine berührungslose und störungsfreie Messung der Schaumhöhe, die wesentlich genauer ist als eine Messung mit dem Lineal. Außerdem erhält man viel mehr Messpunkte als das mit dem Lineal möglich wäre. Für die Skalierung gibt man für eine Höhe im Video an, welchem Schaumvolumen in ml es entspricht. So wird die Schaummenge vom Videoanalyseprogramm stets in ml angegeben und ein Umrechnen einer Länge in ein Volumen entfällt.

Benutzt man die Videoanalysesoftware *measure Dynamics* [15] ergeben sich noch weitere Vorteile. Man kann für das Abspielen des Videos eine Schrittweite einstellen, was bedeutet, dass beim Abspielen nur jedes x -te Bild des Videos gezeigt wird. Dadurch erhält man einen Zeitraffereffekt und kann sich den Bierschaumzerfall im schnellen Ablauf anschauen, um so einen qualitativen Eindruck des Zerfalls zu bekommen. Die Ablaufgeschwindigkeit ist dabei über die Schrittweite wählbar. Da man das Video auch mit dieser Schrittweite exportieren kann, kann man so Zeitraffervideos erstellen.

Ein Video eines Bierschaumzerfalls ist je nach Gefäß zwischen drei und fünfzehn Minuten lang. Die Messung aus Abbildung 6 war 560 s, gut neun Minuten. Mit 25 Frames (=Bilder) pro Sekunde ergeben sich 14 000 Frames. Wenn man in jedem Bild die

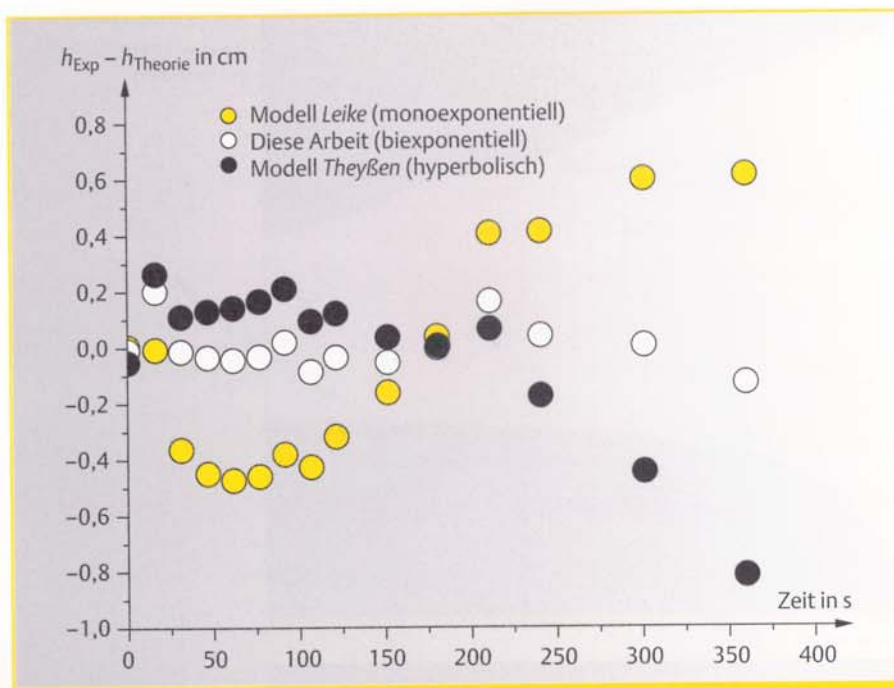


Abb. 2: Residuen bei den Messwerten von Leike [12] bei drei Anpassungen: monoexponentiell, hyperbolisch und biexponentiell

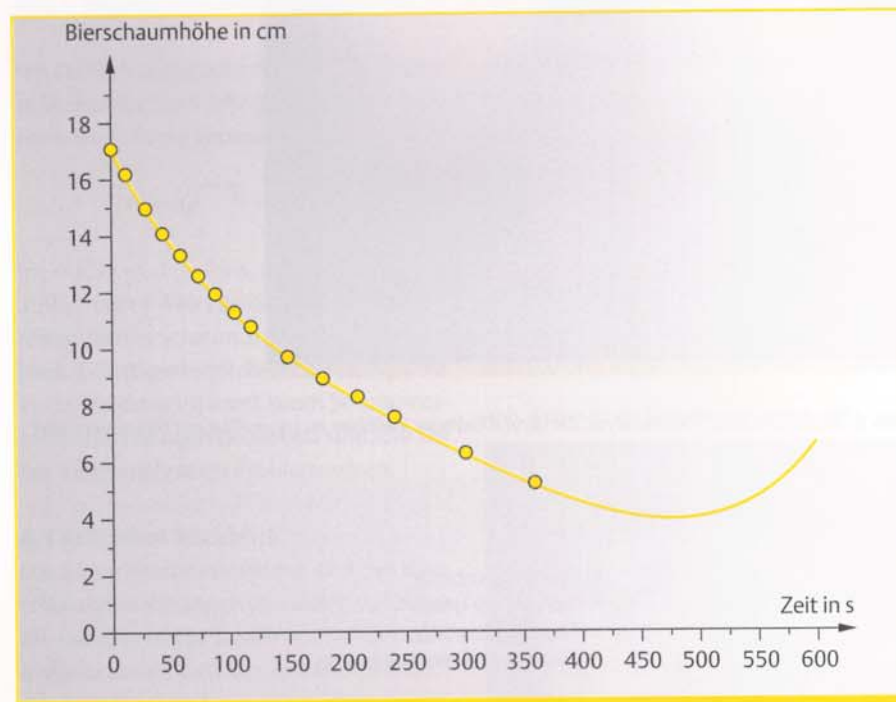


Abb. 3: Eine sehr gute, aber sinnlose Anpassung mit einem Polynom vierter Ordnung

Ober- und Unterkante des Schaums per Hand mit der Maus markieren will, bedeutet dies, dass 28 000 Mausklicks nötig sind. Wir haben beim Bearbeiten des Videos in einem Videobearbeitungsprogramm jeden zweiten Frame gelöscht und in *measure Dynamics* eine Schrittweite von 50 eingestellt, so dass sich eine akzeptable Anzahl von 280 notwendigen Mausklicks ergibt. Das bedeutet, es wird nur alle vier Sekunden ein Frame ausgewertet. So ist die Einstellung der Schrittweite eine erhebliche Arbeitser-

leichterung. Dennoch erhält man deutlich mehr und verlässlichere Daten als in vielen der zitierten Arbeiten.

Eine weitere Möglichkeit für eine qualitative Betrachtung ist die Erstellung eines Serienbildes aus dünnen Streifen [16, 17]. Dazu wählt man im Video einen sehr schmalen Streifen aus, der die ganze Glas- höhe umfasst. Bei den obigen 7 000 Frames ergeben sich bei einer Schrittweite von 100 genau 70 Streifen, die ohne Abstand nebeneinander gesetzt werden. Somit ergibt

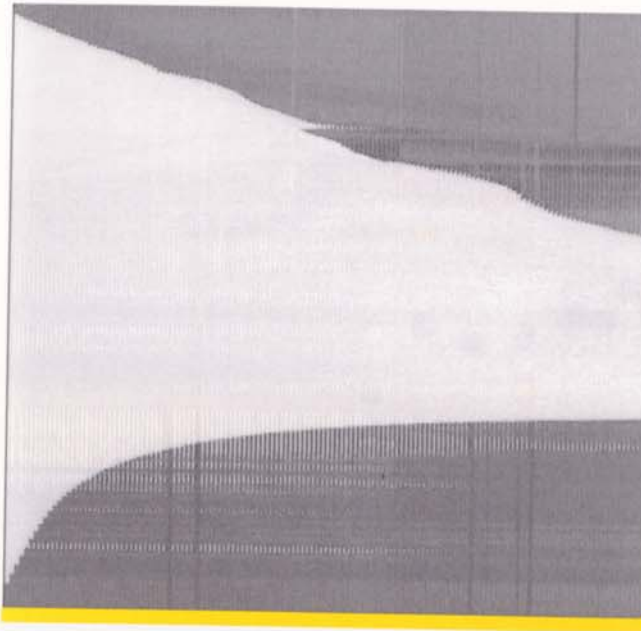


Abb. 4: Streifenbild eines Bierschaumzerfalls (Erdinger Weißbier)

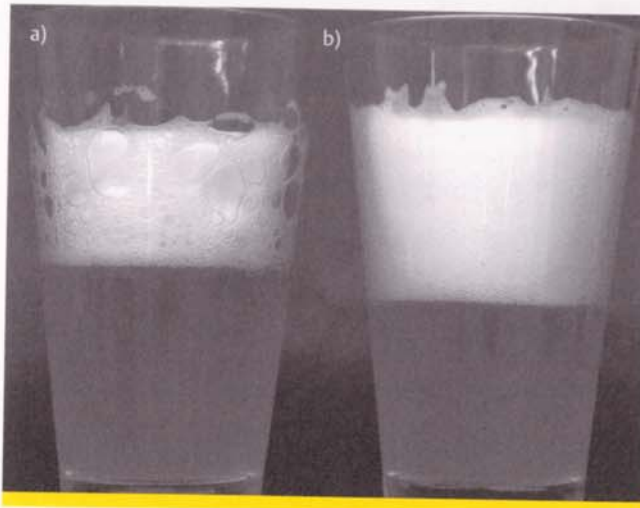
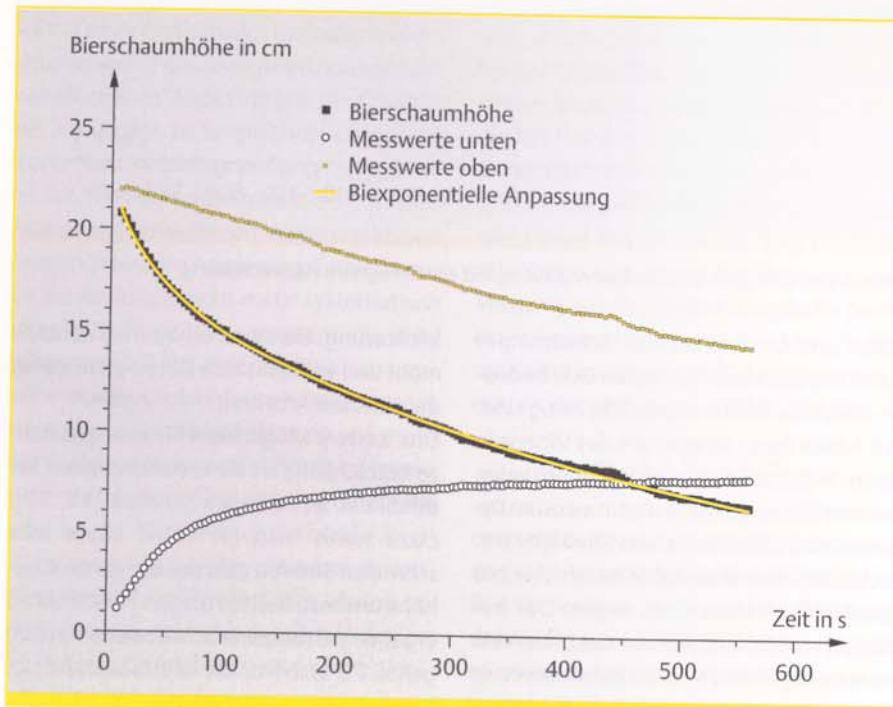


Abb. 5: Zerfall in zwei Gläsern: mit leicht fetten Fingern berührt (a) und im sauberen Glas (b)

Abb. 6: Messkurve einer Videoanalyse: Zerfall von Erdinger Weißbier im engen Glas mit biexponentieller Näherung



sich ein Streifenbild wie in Abb. 4. Dies ist als t - h -Diagramm lesbar und zeigt eindrucksvoll, wie sich die untere und die obere Schaumgrenze mit der Zeit verschieben. In *measure Dynamics* würde man mit einer sinnvoll gewählten Schrittweite einmal eine manuelle Analyse der oberen Schaumgrenze und einmal eine Analyse der unteren Schaumgrenze durchführen. Die Daten werden dann in zwei getrennten Tabellenblättern abgelegt. Diese können nach *Excel* exportiert werden und dort weiterverarbeitet werden. Dort wird die Differenz gebildet, diese graphisch dargestellt und verschiedene Kurvenanpassungen durchgeführt. In der Videoanalysesoftware *Coach 6* gibt es dagegen die Möglichkeit, gleich in jedem Frame zwei Punkte anzuklicken und die Software bildet sofort die Differenz. Diese Option ist eigentlich für die Situation gedacht, dass die Videokamera beim Filmen eines bewegten Objektes mitbewegt wurde. Indem man jeweils einen Punkt des Hintergrundes und das bewegte Objekt anklickt, ergibt die Differenz den Ort im Bezug zum Hintergrund.

4.2 Rahmenbedingungen

Für die Videoaufnahme sollte ein schwarzer, matter Hintergrund gewählt und der Versuch indirekt beleuchtet werden. Ungünstig sind helle Fenster, deren Licht sich im Glas spiegeln kann. Das verwendete Glasgefäß sollte ganz glatt, aber kein Bierkrug sein, um optische Verzerrungen durch Linseneffekte verschiedener Glasstärken (Muster im Glas) zu vermeiden. Um Verzerrungen zu minimieren, wird die Videokamera in die Höhe der Mitte des Schaums gestellt und ein größerer Abstand mit Teleobjektiv so gewählt, dass das Bild weitgehend ausgefüllt ist.

Da die Hypothese bekannt ist, dass die Art der Glassäuberung bzw. zurückbleibende Verunreinigungen einen Einfluss haben, wurden Parallelversuche mit unterschiedlich sauberen Gläsern durchgeführt, wobei immer zwei Gläser gleichzeitig eingeschenkt und beobachtet wurden. Ein innen mit leicht fettigen Fingern ausgewischtes Glas (in Abb. 5a) wurde mit einem nicht berührten verglichen (in Abb. 5b). Im leicht fettigen Glas entstanden am Rand sehr große Schaumblasen, während im sauberen Glas die Schaumblasen kleiner und homogener blieben. Für die Videoanalyse von Vorteil ist, dass im fettigen Glas praktisch kein Schaum am Glas hängen blieb, während im sauberen etwas am Glas hängen

blieb. Allerdings zerfiel der Schaum im fettigen Glas viel schneller als im sauberen Glas, so dass man einen Zerfall mit einer anderen Zeitkonstante misst. Ein Videovergleich mit einem extrem eingefetteten Glas findet man unter [18].

Fettrückstände sowie gewöhnliche Spülmittel, die fetthaltig sind, beeinträchtigen also die Schaumbildung und -erhaltung, da diese Substanzen mit der Gasbläschenhülle reagieren und deren Oberflächenspannung verringern, so dass die Gasblasen platzen. Wir haben uns für die Spülmaschine und anschließendes Ausspülen mit klarem Wasser und Lufttrocknen entschieden.

4.3 Messergebnisse

Es kann hier nicht darum gehen aufzuzeigen, unter welchen reproduzierbaren Bedingungen man welchen Zerfall bekommt, sondern es können nur ein paar Messbeispiele diskutiert werden. Es wurden mehrere Messungen mit verschiedenen hohen und verschiedenen breiten Messgefäßen durchgeführt. Das bedeutet insbesondere, dass das Bier auch aus verschiedenen Höhen in das Gefäß fallen gelassen wurde, so dass es zu unterschiedlich intensiver Schaumbildung kam und sich das Volumenverhältnis Schaum/Flüssigkeit am Anfang deutlich unterschied. Bei den Videoanalysen mit verschiedenem Bier und verschiedenen Bedingungen ergaben sich fast immer Zerfallskurven mit zwei deutlichen Phasen, die mit einer biexponentiellen Gleichung gut angefitet werden konnten.

Um die Werte mit denen von *Leike* vergleichen zu können, haben wir auch Erdinger Weißbier (8°C) und ein Gefäß mit 7,2 cm Durchmesser verwendet (Innenhöhe 28 cm), obwohl bei engen Gläsern die Adhäsion am Glas eine Rolle spielt, die den Zerfall verlangsamt, weshalb Weißbiergläser auch so eng sind. Bei dem dargestellten Experiment wurde das Bier aus ca. 30 cm in das Glas fallen gelassen. Im Gegensatz zu *Leike* haben wir wie in Abschnitt 4.1 beschrieben durch die Videoanalyse mehr Messwerte (140 statt 15) und eine längere Messzeit (560 s statt 360 s) ¹.

Abb. 6 zeigt ein Messergebnis, das deutlich zwei Phasen aufweist. Für $t < 55$ s und für $t > 120$ s ergeben sich Zerfallskurven, die sich sehr gut monoexponentiell anpassen lassen (Halbwertszeiten $T_1 = 146$ s, $T_2 = 388$ s), was eine logarithmische Auftragung der Messda-

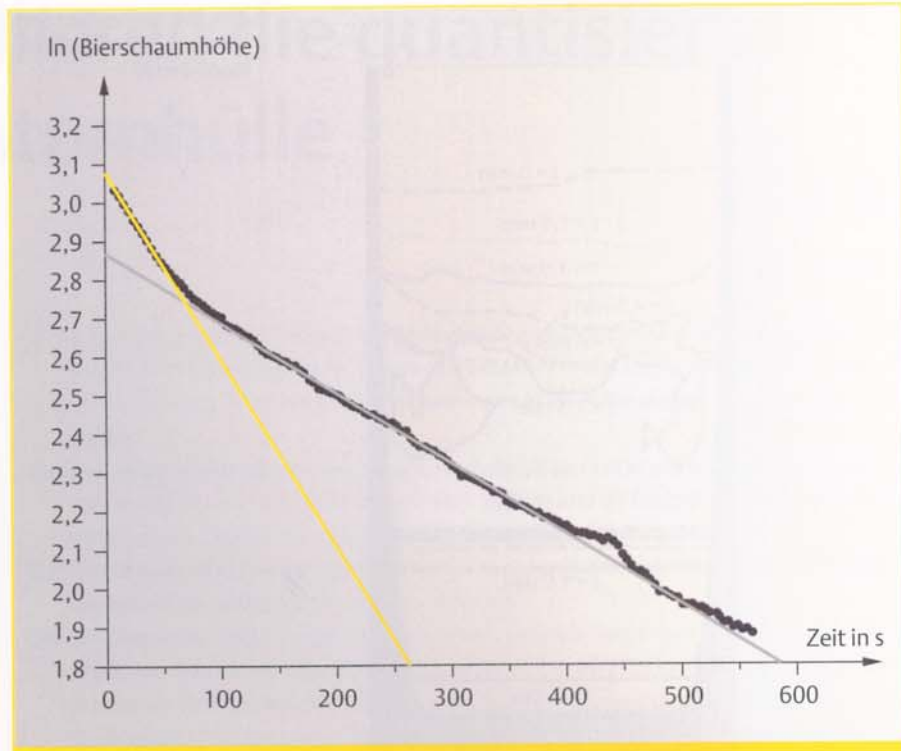


Abb. 7: Logarithmische Auftragung der Messwerte aus Abb. 6

ten deutlich zeigt (siehe Abb. 7). Der gesamte Verlauf lässt sich sehr gut durch eine biexponentielle Kurve anpassen (siehe Abb. 6):

$$h(t) = h_1 e^{-\ln 2 \frac{t}{T_1}} + h_2 e^{-\ln 2 \frac{t}{T_2}}$$

($h_1 = 4,9$ cm, $T_1 = 29$ s, $h_2 = 17,1$ cm, $T_2 = 399$ s). Bei $t = 440$ s zeigen sich einige Ausreißer, da hier Schaum am Glasrand hängen blieb. Günstig war bei dieser Messung, dass an der Vorderseite sonst kaum Schaumreste am Glas hängen geblieben sind, die bei der Videoanalyse ein Problem wären.

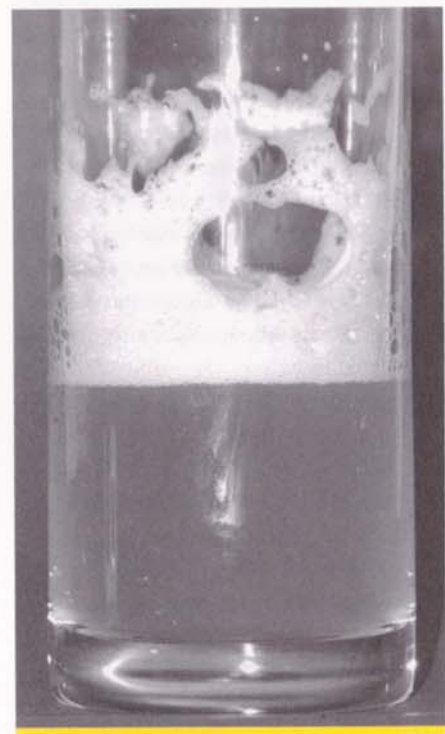
4.4 Kritischer Rückblick

Die Bierschaumentstehung und der Bierschaumzerfall hängen von vielen Variablen ab, die man in der Schule nur schwer kontrollieren kann, sodass man das Experiment nur unzureichend reproduzierbar durchführen kann. Das macht es schwer, allgemeine Aussagen über den Bierschaum zu machen.

Deshalb betrachteten wir eine Messung unter speziellen Bedingungen. Die Ergebnisse der Videoanalyse vermitteln den Eindruck, als gäbe es nur einen kleinen Messfehler. Bei der Analyse fällt aber manchmal auf, dass der Bierschaum am Rand unterschiedlich hoch steht und man eine subjektive Mittelung durchführt. Auch beim Messen mit dem Lineal führt der Experimentator eine subjektive Mittelung durch, die den Messwerten eine kleinere als tatsächlich vorhandene Un-

sicherheit zuweist. Der Schaum am Rand kann einige Zentimeter höher als im Inneren sein (siehe Abb. 8). Manchmal zerfällt der Schaum aber auch so inhomogen, dass sich die Schaumhöhe gegen Ende der Messung selbst im Inneren des Glases um mehrere Zentimeter unterscheidet. Eine Messung in einem sehr sauberen, weiten, eckigen Gefäß mit quadratischem Querschnitt (Breite innen 9,0 cm) ergab (vor allem nach 5 Minu-

Abb. 8: Was ist die Bierschaumobergrenze?



¹ Die Videodatei wird unter www.aulis.de → Zeitschriften → Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule → 8/58 als Online-Ergänzung angeboten.

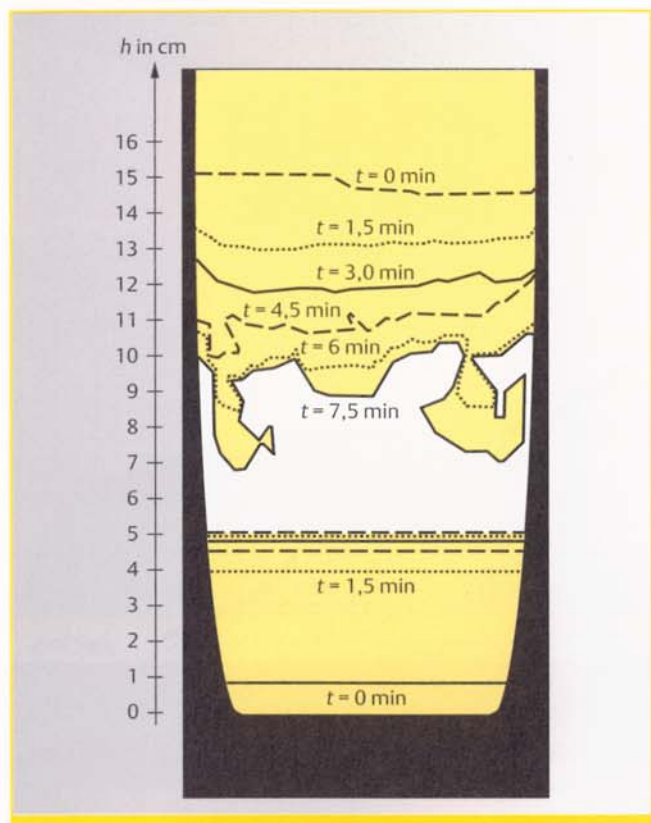


Abb. 9: Bierschaumgrenzen bei einem sehr ungleichmäßigem Zerfall

ten Messzeit) eine besonders unebene obere Schaumgrenze. Selbst wenn man von Randeffekten absah, war die obere Schaumgrenze im Inneren des Glases ein Gebirge. In der Videoanalysesoftware *measure Dynamics* kann man Bilder des Videos in bestimmten zeitlichen Abständen als Bilderserie exportieren lassen. Für Abb. 9 wurden die Bilder alle 1,5 Minuten genommen und die Schaumgrenzen im Graphikprogramm nachgezeichnet. Hier ist deutlich die inhomogene Schaumhöhe bei langen Messzeiten zu erkennen.

Die Tatsache, dass große Messunsicherheiten bei langen Messzeiten auftreten, schmälert jedoch nicht die Aussage, dass der Bierschaumzerfall in zwei Phasen auftritt, wobei der erste exponentielle Zerfall bei kurzen Messzeiten zweifelsfrei nachgewiesen werden kann. Dennoch bedeutet diese durch die Videoanalyse aufgezeigten Messunsicherheiten, dass eine Modellierung, wie sie in Abschnitt 3 und von anderen Autoren durchgeführt wurde, in vielen Fällen übertrieben ist. Die Schwankungen, die man von Modell zu Modell diskutiert, werden überschätzt, da man bei der Datenaufnahme bereits größere Unsicherheiten in den Messdaten erzielt, als man häufig annimmt. Das Video kann zeigen, dass die Messgenauigkeit zuweilen deutlich schlechter ist, als man glaubt, zum Beispiel beim Ablesen mit einem Lineal zu erzielen.

5 | Fazit

Wir können theoretisch keine Zerfallsgleichung bestimmen und auch experimentell keine allgemeingültige Gleichung beweisen. Als Lehrer kann man sich auf den Standpunkt stellen, dass die Exponentialfunktion eine didaktisch sinnvolle Elementarisierung des Bierschaumzerfalls ist. Bei den großen Messfehlern ist das auf den ersten Blick einigermaßen passend, insbesondere wenn man mit der Messung verspätet startet oder früh endet, so dass man nur eine Phase misst. Dennoch erhält man bei guter Messung meist Zerfallskurven, die zwei Phasen haben. Der biexponentielle Verlauf wäre hier eine Elementarisierung, die den Messwerten besser entspricht und besser theoretisch mit den zwei Phänomenen Drainage und Blasenvergrößerung begründbar ist.

Der Bierschaumzerfall ist also als Analogon des radioaktiven Zerfalls problematisch. Schüler können aber im Rahmen von Seminararbeiten oder „Jugend forscht“ herausfinden, welches Bier unter welchen Bedingungen wie zerfällt. Dabei sollten nicht nur die Eigenschaften des Bieres, sondern auch die des Gefäßes beachtet werden. Auf jeden Fall eignet sich der Bierschaumzerfall, um in der Sekundarstufe II oder der Universität über Modellierung, Fehleranalyse und Kurvenanpassung zu reden.

Literatur

- [1] R. Göbel, K. Haubold: Freihandexperimente in Klasse 10, in: Physik in der Schule 27, Heft 3, 1989, S. 104-105
- [2] H. Hilscher (Koord.): Physikalische Freihandexperimente, Band 2, Aulis, Köln, 2004
- [3] B. Sennkamp: Exponentielle Vorgänge: Kaffeefiltern und Bierschaumzerfall als physikalische Schulversuche, MNU Heft 1, 1980, S. 31 - 36
- [4] T. Seiler: Bierschaumzerfall im Unterricht, PdN-Ph 12 (1979), S. 322-324
- [5] A. Donges: Exponentialfunktion im Physikunterricht – Eine Anmerkung, MNU Heft 8, 2006, S. 502 - 503
- [6] S. Timmerberg: Kinetik des Bierschaumzerfalls, Facharbeit, Mariengymnasium Jever, <http://www.hausarbeiten.de/faecher/vorschau/110071.html>, 2006
- [7] W. Drenckhan: Physik für Schaumschläger, Physik Journal 8, Heft 7, 2009, S. 29 - 35
- [8] M. Potreck: Optimierte Messung der Bierschaumstabilität in Abhängigkeit von Milieubedingungen und fluiddynamischen Kennwerten, Dissertation, Berlin, <http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2004/783/>, 2004
- [9] C. Dale, C. West, J. Eade, M. Rito-Palomares, A. Lyddiatt: Studies on the physical and compositional changes in collapsing beer foam, Chemical Engineering Journal, Volume 72, Issue 1, 1999, S. 83 - 89, [10] P. Plath, S. Sauerbrei: Apollonische Umordnung des Schaums – in: Brauindustrie 89, Heft 7, 2004, S. 20-23, http://fzarchiv.sachon.de/Fachzeitschriften/Getraenke-Fachzeitschriften/Brauindustrie/2004/07_04/BI_07-04_Apollonische_Umordnung_des_Schaums.pdf
- [11] H. Theyßen: Mythos Bierschaumzerfall. Ein Analogon für den radioaktiven Zerfall? – In: PhuDid 8, Band 2, 2009, S. 49 - 57
- [12] A. Leike: Demonstration of the exponential decay law using beer froth, in: European Journal of Physics 23, Heft 1, 2002, S. 21-26, <http://www.iop.org/EJ/article/0143-0807/23/1/304/ej2104.pdf>
- [13] D. Anaya: Mathematisch-statistische Modellierung von Schäumen, Diplomarbeit, Fachhochschule Weihenstephan, <http://www.grin.com/e-book/82015/mathematisch-statistische-modellierung-von-schaeuemen>, 2007
- [14] J. J. Hackbarth: Multivariate Analyses of Beer Foam Stand, Journal of the Institute of Brewing 112, Nr. 1, 2006, S. 17-24, <http://www.phywe.de/framenav.php?nav1=60&nav2=7&csscol=son&ref=nav>
- [15] M. Benz, T. Wilhelm: Digitale Videoanalyse von Bewegungen – Neue Möglichkeiten mit der Software „measure Dynamics“. In: Nordmeier, V.; Oberländer, A.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik – Berlin 2008, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin 2008
- [16] T. Wilhelm: Videoanalyse mit unterschiedlichen Darstellungsformen – in: D. Höttercke (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDGP in Schwäbisch Gmünd 2008, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 29, Lit-Verlag, Münster, 2009
- [17] http://www.uni-regensburg.de/Fakultaeten/nat_Fak_IV/Organische_Chemie/Didaktik/Keusch/D-beer_foam-d.htm

Anschrift der Verfasser

AR Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Prof. Dr. Wolfgang Ossau, Lehrstuhl für Experimentelle Physik III, Physikalisches Institut der Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, E-Mail: wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de, www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm E-Mail: ossau@physik.uni-wuerzburg.de

3.2 Modellgase zur kinetischen Gastheorie

Quelle:

GEßNER, T.; BENZ, M.; WILHELM, T.: *Einstein, Maxwell und Co. Auf der Spur – Auswertung von Modellgasen mittels Videoanalyse* – In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule PhyDid-A 1/8, www.phydid.de, 2009, S. 1 – 10

Inhalt und Bezug zum Thema:

Erst durch die quantitativen Vorhersagen von Einstein und Smoluchowski zur Brownschen Bewegung und durch die Experimente von Perrin wurde die Existenz der Atome als gesichert angesehen. In dem Beitrag werden drei Möglichkeiten für ein Modellgas bzw. für ein Modell der Brownschen Bewegung vorgestellt. Des Weiteren wird aufgezeigt, wie diese jeweils mittels Videoanalyse qualitativ und sogar quantitativ ausgewertet werden können, um so die Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung zu gewinnen und Einsteins Theorie zu bestätigen.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Herr StR Geßner und ich haben die Idee für diesen Artikel lange verfolgt und gemeinsam diskutiert, bis es auf meine Initiative zur Erstellung des Artikels kam. Schließlich hat Herr Geßner die Videoaufnahmen und Videoanalysen mit dem Gerät zur kinetischen Gastheorie gemacht. Ich habe Herrn Benz beauftragt, im Rahmen seiner Staatsexamensarbeit das Video mit dem großen Luftkissentisch zu machen und ich habe selbst das Video mit dem kleinen Luftkissentisch gemacht. Den Text haben wir gemeinsam geschrieben und ich habe alle Abbildungen gemacht. Das Ergebnis habe ich als Poster auf der DPG-Tagung 2009 präsentiert und wurde dann von mir in der referierten Zeitschrift PhyDid-A eingereicht.

Einstein, Maxwell und Co. auf der Spur

Auswertung von Modellgasen mittels Videoanalyse

Thomas Geßner^{*,+}, Michael Benz⁺, Thomas Wilhelm⁺

^{*} Hanns-Seidel-Gymnasium, An der Maas 2, 63768 Hösbach,

⁺ Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg
(Eingegangen: 20.10.2008; Angenommen: 26.11.2008)

Kurzfassung

Erst durch die quantitativen Vorhersagen von Einstein und Smoluchowski zur Brownschen Bewegung und durch die Experimente von Perrin wurde die Existenz der Atome als gesichert angesehen. In dem Beitrag werden drei Möglichkeiten für ein Modellgas bzw. für ein Modell der Brownschen Bewegung vorgestellt. Des Weiteren wird aufgezeigt, wie diese jeweils mittels Videoanalyse qualitativ und sogar quantitativ ausgewertet werden können, um so die Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung zu gewinnen und Einsteins Theorie zu bestätigen.

1. Intention und Begründung

In den „Annalen der Physik“, Ausgabe 19 von 1906, erschien eine wichtige Arbeit Albert Einsteins [1], in der er eine quantitative Vorhersage für die Brownsche Molekularbewegung gab. Im Jahre 1827 war dem Arzt und Botaniker Robert Brown aufgefallen, dass sich Pollen in Wasser seltsam „zackig“ bewegten. Jahrzehntlang scheiterten die Erklärungsversuche und die seltsame Bewegung blieb geheimnisvoll. Für die Idee, dass die Bewegung der Pollen durch ständige Stöße mit Wassermolekülen verursacht wird, war Einsteins Berechnung ein wichtiger Punkt. Bis dahin waren noch keinerlei überzeugende Experimente für die Existenz kleiner „unsichtbarer“ Teilchen, wie Atome oder Moleküle, bekannt oder sind in diese Richtung interpretiert worden. Der entscheidende Schritt, um die Zweifler der Atomtheorie (z.B. Mach oder Ostwald) zu überzeugen und gleichzeitig die Brownsche Bewegung zu erklären, waren zwei Artikel Einsteins in den Annalen der Physik 1905 [2] und 1906 [1], in denen er sich mit der kinetischen Gastheorie und der Brownschen Molekularbewegung beschäftigte. Fast gleichzeitig (Annalen der Physik 21 von 1906) lieferte der polnische Physiker Marian von Smoluchowski ebenfalls eine Erklärung der Brownschen Bewegung durch Molekülstöße [3]. Die Ergebnisse dieser Arbeiten und die einfache experimentelle Prüfung dieser Ergebnisse durch die Brownsche Bewegung bestätigten experimentell die Existenz von Atomen und Molekülen. Jean-Baptist Perrin lieferte einige Jahre später sehr genaue experimentelle Daten, welche die Theorien Einsteins und Smoluchowskis zur Brownschen Molekularbewegung bestätigten. Quasi als Nebenprodukt der Lösung des Rätsels der Brownschen Bewegung wurde auch die Richtigkeit der kinetischen Theorie der Wärme gezeigt. Dafür erhielt Perrin 1926 den Nobelpreis für Physik.

Die theoretische Erklärung der Brownschen Bewegung ist in der Einstein- Smoluchowski- Beziehung zusammengefasst, welche den Zusammenhang zwischen dem mittleren Verschiebungsquadrat der Gasmoleküle und unter anderem der Temperatur T beschreibt:

$$\langle x^2 \rangle = \frac{k \cdot T \cdot t}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r} \quad \{1\}$$

Eine ausführliche Herleitung findet man neben den Originalabhandlungen in jeder Standardliteratur der statistischen Physik. Einen Vorschlag, der auch für Schüler geeignet ist, zeigen Rainer Götz und Albert ter Wolbeek [4] auf.

Da sowohl Einstein als auch Smoluchowski von der Idee der kinetischen Theorie der Wärme ausgingen, kann für die Teilchengeschwindigkeit die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung angenommen werden. Die Modellvorstellung Maxwells geht von einer großen Anzahl kleiner, harter Teilchen aus, die sich vollkommen elastisch stoßen. Im Idealfall handelt es sich um Teilchen gleicher Masse, die nach den Stoßgesetzen der Mechanik ihre Impulse austauschen. Als anschauliches Beispiel dient hier der Stoß von Billardkugeln. Maxwell hoffte, durch dieses Modell die realen Vorgänge in einem Gas erklären zu können: „Wenn sich herausstellen sollte, dass die Eigenschaften eines solchen Teilchensystems mit den Eigenschaften von Gasen korrespondieren, dann hat man eine wichtige physikalische Analogie gewonnen, die zu einem besseren Verständnis der Materialeigenschaften führen könnte“ (zitiert aus [5, S. 129]).

Aus diesem Modell berechnete Maxwell die nach ihm benannte Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen in einem Gas. Die Verteilungsfunktion $F(v)$ lässt sich für ein dreidimensionales Gas in der Form

$$F(v) = \frac{m}{k \cdot T} \cdot v^2 \cdot e^{-\frac{m \cdot v^2}{2 \cdot k \cdot T}} \quad \{2\}$$

darstellen.

Wir betrachten hier aber zweidimensionale Gase und die zweidimensionale Projektion eines dreidimensionalen Gases und müssen daher auch die Verteilungsfunktion $F(v)$ anpassen.

Wir betrachten die Bewegungen in x - bzw. y -Richtung als unabhängig, woraus sich für die Verteilungsfunktion $F(v)$ der Produktansatz

$$F(v)dv = f(v_x) \cdot f(v_y) dv_x dv_y \quad \{3\}$$

mit

$$f(v_{x/y}) = a \cdot e^{\pm b \cdot v_{x/y}^2} \quad \{4\}$$

ergibt. Durch die Normierung der Funktion $f(v_{x/y})$ erhält man einen Zusammenhang zwischen den Variablen a und b :

$$a = \sqrt{\frac{b}{\pi}}. \quad \{5\}$$

Wir nehmen ein Gas mit zwei Freiheitsgraden an. Dabei betrachten wir zunächst nur eine Komponente, welche im Mittel die Hälfte der kinetischen Energie trägt. Nach dem Gleichverteilungssatz der kinetischen Gastheorie gilt

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot \langle v_x^2 \rangle = \frac{1}{2} \cdot k \cdot T. \quad \{6\}$$

Daraus und unter Berücksichtigung des mittleren Geschwindigkeitsquadrats

$$\langle v_x^2 \rangle = \int v_x^2 \cdot f(v_x) dv_x \quad \{7\}$$

ergibt sich

$$b = \frac{m}{2 \cdot k \cdot T} \quad \{8\}$$

und

$$f(v_x) = \left(\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\left(\frac{m}{2 \cdot k \cdot T} \cdot v_x^2 \right)}, \quad \{9\}$$

so gilt

$$F(v)dv = \left(\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T} \right) \cdot e^{-\left(\frac{m}{2 \cdot k \cdot T} \cdot v^2 \right)} dv_x dv_y. \quad \{10\}$$

Dabei ist $dv_x dv_y$ ein Flächenelement, welches nur von v abhängig ist, ein Kreisring mit Radius v der Breite dv . Somit gilt im zweidimensionalen Fall $dv_x dv_y = 2v\pi dv$ und es ergibt sich als Verteilungsfunktion

$$F(v) = \frac{m}{k \cdot T} \cdot v \cdot e^{-\frac{m}{2 \cdot k \cdot T} \cdot v^2}. \quad \{11\}$$

Die Vereinfachung auf zwei Dimensionen ändert damit die Verteilungsfunktion entscheidend ab:

$$F(v) = \frac{m}{k \cdot T} \cdot v \cdot e^{-\frac{m \cdot v^2}{2 \cdot k \cdot T}} = c \cdot v \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot c \cdot v^2}. \quad \{12\}$$

Statt der Proportionalität der Verteilungsfunktion zu v^2 (im dreidimensionalen Fall) lässt sich also hier im zweidimensionalen Fall eine direkte Proportionalität der Verteilungsfunktion zur Geschwindigkeit ableiten.

Die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung wurde zwar für mikroskopische Teilchen hergeleitet, sie gilt aber auch für makroskopische Teilchen. Diese Erkenntnis kann bei der Durchführung von Demonstrationsexperimenten mit Hilfe von Modellapparaturen genutzt werden. Dabei geht es nicht um eine formelmäßige Herleitung der Verteilung, sondern darum, ausgehend von den zugrunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten zu einer graphischen Darstellung der Maxwellschen Geschwindigkeitsverteilung zu kommen.

Die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung sagt zunächst aus, welche Geschwindigkeitsverteilung man erhält, wenn man sich zu einem Zeitpunkt die Geschwindigkeit aller Gasteilchen anschaut. Robert Brown betrachtete aber einzelne Pollen und auch wir wollen hier einzelne Teilchen betrachten. Dazu muss man wissen, dass man nach der Ergodenhypothese (Scharmittel = Zeitmittel) die gleiche Geschwindigkeitsverteilung erhält, wenn man die Geschwindigkeit eines Gasteilchens zu allen Zeitpunkten anschaut. Hier könnte man wiederum einwenden, dass die Pollen bzw. die hier betrachteten Teilchen schwerer als die sie umgebenden und anstoßenden Teilchen sind. Deshalb sind ihre Geschwindigkeiten auch kleiner, aber die Verteilung folgt der gleichen Funktion.

Im Physikunterricht ist bei der Behandlung der Brownschen Molekularbewegung neben den statistischen Aussagen besonders der Aspekt der Temperaturabhängigkeit der Bewegung von Interesse. Aus dem Experiment selbst lassen sich mehrere Fragen beantworten:

- Ist die Bewegung der Teilchen tatsächlich statistisch, also zufällig?
- Genügt die experimentell bestimmte Geschwindigkeitsverteilung der Maxwell-Boltzmann-Verteilung?
- Wie hängt die Geschwindigkeitsverteilung der Gasmoleküle von der Temperatur ab?
- Wie hängt das mittlere Verschiebungskadrat der Gasmoleküle von der Temperatur ab?
- Wie hängt die Gesamtenergie des Gases von der Temperatur ab? Denn die Beziehung der Gesamtenergie des Gases und der Temperatur ist eine der zentralen Aussagen der kinetischen Gastheorie.

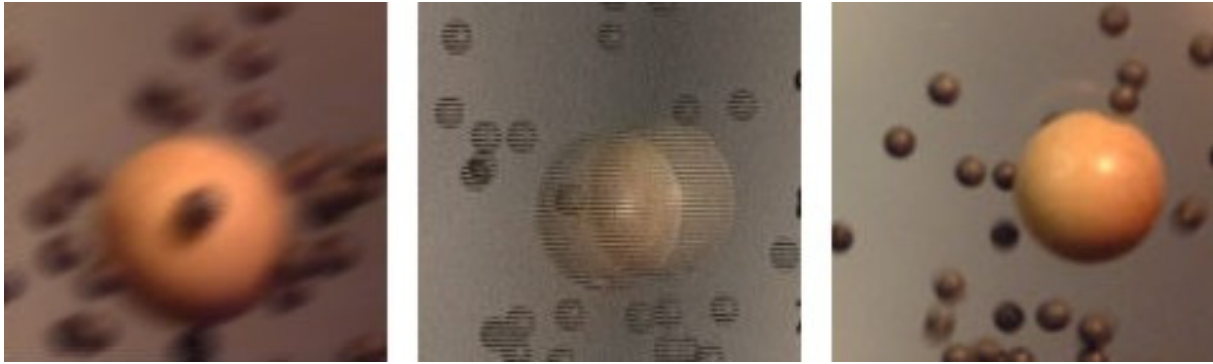


Abb. 1: Videoaufnahmen einer Holzkugel in der „Rüttelkammer: a) zu lange Belichtungszeit b) keine Vollbilder c) gut auswertbares Bild

All diese Aussagen können relativ einfach mittels Videoanalyse verschiedener Aufnahmen nachgeprüft werden.

2. Videoanalyse

Der Einsatz der digitalen Videoanalyse von Bewegungen ist heute in vielen Lehrplänen im Rahmen des Kinematik- und Dynamikunterrichts vorgesehen, da die Erstellung digitaler Videos heute problemlos möglich ist. Als Messwerterfassungssystem eignet sich die Videoanalyse aber nicht nur für die Mechanik.

Videos enthalten stets Orts- und Zeitinformationen. Ist eine Referenzlänge im Video bekannt, kann jeder Ort über die Anzahl der Pixel berechnet werden. Bereits früher wurde eine Videoanalyse durchgeführt, indem man eine Folie auf den Fernsehbildschirm gelegt hat und mit Lineal abgemessen hat. Dies wird heute von Computerprogrammen erledigt, die die Berechnung und Darstellung übernehmen. Bei vielen Programmen geschieht die Ortsmessung allerdings noch dadurch, dass man in jedem Einzelbild das bewegte Objekt mit der Maus anklicken muss.

Eine deutliche Verbesserung gegenüber den bisherigen Programmen stellt die automatische Analyse dar. Diese war bei den deutschen Videoanalyseprogrammen für den Physikunterricht bisher nur bei den Programmen „AVA“, „Coach 6“ und „Viana“ möglich. Die reine Farbanalyse von Coach 6 und Viana führte oft zu schlechten Ergebnissen und erforderte eine manuelle Nachbearbeitung oder sogar eine komplette manuelle Analyse. Bei AVA wurde zwar das Objekt erkannt, es durfte aber nicht rotieren, was ebenfalls zu Problemen führte. Die automatische Analyse bei „measure Dynamics“ [6, 7] arbeitet mit Farb- und Bewegungsanalyse, wobei entweder je eine der beiden Analysearten oder eine gleichzeitige Analyse nach beiden Arten möglich ist. Die Software erkennt dabei die geometrische Form und die Größe des zu analysierenden Objektes, auch wenn dieses rotiert oder die Farbe oder Helligkeit ändert. Die automatische Analyse stellt besonders bei längeren Videos eine erhebliche Zeitersparnis dar. Um die Maxwell-Verteilung als statistische Verteilung zu zeigen, ist tatsächlich ein langes Video mit einer

großen Bildanzahl nötig. Die in den nächsten Absätzen beschriebenen Videos enthalten z.B. über 2.000 Einzelbilder.

Wichtig ist, dass die Videos möglichst verzerrungsfrei aufgenommen werden, wozu die Kamera senkrecht vor der Mitte der erwarteten Bahnkurve stehen muss. So ist ein berührungsfreies Messen zweidimensionaler Bewegungen möglich.

Prinzipiell kann auch eine Webcam verwendet werden. Dabei ist aber darauf zu achten, dass es die Software ermöglicht, eine feste Zeitbasis einzustellen. Damit werden die Bilder der Kamera zu bestimmten Zeitpunkten aufgenommen, und nicht - wie bei Webcams üblich - bei genügend großen Veränderungen im Bild. Außerdem darf die Webcam nicht bei großem Datenaufkommen Frames doppelt oder dreimal hintereinander ausgeben.

Um die Bilder gut auswerten zu können, benötigt man saubere Bilder. Damit die beobachteten Teilchen nicht „verschmieren“ (Abb. 1a), sollte bei schnellen Bewegungen an der Kamera eine möglichst kurze Belichtungszeit eingestellt werden. Daraus ergibt sich, dass der Versuchsaufbau gut ausgeleuchtet werden muss, um genügend Helligkeit zu erhalten. Hierfür ist nicht jede helle Lichtquelle geeignet. Bei Vorversuchen zeigte sich, dass die 50 Hz-Betriebsspannung eines Overheadprojektors in Kombination mit der kurzen Verschlusszeit und Abtastrate der Kamera zu starken Helligkeitsschwankungen im Video führte, was die automatische Analyse unmöglich machte. Deshalb wurde eine Videoleuchte verwendet, welche eine konstante Helligkeit liefert. Alternativ kann aber auch eine Kohlebogenlampe verwendet werden. Normalerweise arbeitet eine Kamera im so genannten Halbbildmodus, das heißt, es wird im Wechsel nur jede zweite Zeile aufgenommen. Bei sich schnell bewegenden Objekten kann es deshalb vorkommen, dass diese an zwei verschiedenen Orten zu sein scheinen (Abb. 1b). Um dies zu vermeiden, sollte der Vollbildmodus oder „Progressiv mode“ der Kamera verwendet werden (Abb. 1c). Typischerweise werden bei einer Kamera 24,5 bzw. 25 Einzelbilder (Frames) pro Sekunde aufgenommen. Die hier verwendete Kamera machte im Vollbildmodus 12,5 Vollbilder pro Sekunde, die jeweils doppelt ausgegeben werden,

um auf die übliche Framerate zu kommen. Zwischen wirklich neuen Bildern ist damit ein zeitlicher Abstand von 0,08s.

3. Anschauliche Modelle

3.1. Großer Luftkissentisch

Für ein quantitativ gutes Modellgas braucht man eine große Anzahl kleiner harter Teilchen, die sich in allen drei Raumrichtungen bewegen können. Ein Problem dabei ist, dass man die Stöße nicht mehr mit dem Auge verfolgen kann, sondern nur noch die Zick-Zack-Bewegung eines markierten Teilchens als deren Folge sieht. Für ein anschaulicheres Modell wurde deshalb der große Luftkissentisch der Firma Deadalon (erhältlich bei GRS-Lehrgeräte, Nr. 34-0067) mit einem beweglichen Rahmen verwendet, der auf der Innenseite mit einem Draht bespannt ist [7, 8]. Dieser Rahmen kann mittels eines Riemenantriebs in Bewegung versetzt werden, so dass er sich kreisförmig um wenige Zentimeter bewegt. Setzt man mehrere Pucks auf den Luftkissentisch, werden diese durch elastische Stöße mit dem bewegten Rahmen zu ungeordneten Bewegungen innerhalb des Rahmens angeregt (siehe Abb. 2). Die Pucks aus hartem Plastik stoßen auch untereinander elastisch. Somit erhält man ein Modell eines zweidimensionalen Gases. Der Motor für den Riemenantrieb ist in Abb. 2 hinter der linken Ecke des Luftkissentisches zu sehen. An der Vorderseite ist der Schlauchanschluss für die Luftzufuhr erkennbar. Die Konstruktion mit der Stativstange an der linken Seite des Luftkissentisches verhindert ein Verrutschen des relativ leichten Luftkissentisches, wenn der Riemen zum Motor gespannt wird. So wird der Rahmen in eine rotierende Bewegung versetzt. Dieser Aufbau wurde direkt von oben gefilmt. Indem die optische Achse senkrecht auf der Bewegungsebene, also in diesem Fall dem Luftkissentisch steht, werden Verzerrungen vermieden, die zu einer fehlerhaften Auswertung führen könnten. So kann man es gut an einer Empore oder in einem Treppenhaus aufnehmen. Die Anregung der Pucks muss dabei nicht unbedingt über einen motorbetriebenen Rahmen erfolgen. Für eine einfachere Umsetzung in der Schule wäre auch ein manuelles Anstoßen der Pucks mit dem Drahtrahmen denkbar.

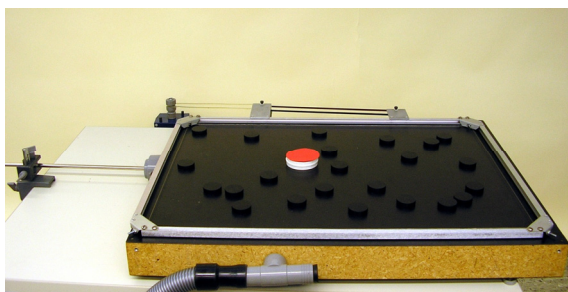


Abb. 2: Großer Luftkissentisch mit rotierendem Rahmen (hellgrau)

Um den Versuch auszuwerten, wurde ein Video von knapp drei Minuten Länge mit 12,5 Vollbilder pro Sekunde aufgenommen, so dass ein Video mit

2.157 Frames entstand, das mit der Videoanalysesoftware „measure Dynamics“ analysiert wurde. Die Rahmenbreite von 78 cm diente dabei als Skalierung. Hier ist es wichtig, diese Referenzlänge in Zentimeter (oder Millimeter) einzugeben, da alle berechneten Werte auf zwei Dezimalstellen gerundet werden und man die Geschwindigkeit auf 0,01 cm/s statt auf 0,01 m/s berechnen sollte. Analysiert wurde die Bewegung des einen rot markierten Pucks, wobei die automatische Analyse fehlerfrei verlief. So konnte ohne großen Arbeitsaufwand die unbedingt notwendige hohe Anzahl an Frames ausgewertet werden.

Um einen ersten qualitativen Eindruck davon zu haben, dass der beobachtete Puck unterschiedliche Geschwindigkeiten hat, wurde die Geschwindigkeit in der Software „measure Dynamics“ als Geschwindigkeitspfeil an das Objekt angeheftet (siehe Abb. 3). Man sieht nun beim Ablauf des Videos, dass sich die Geschwindigkeit durch Stöße mit den anderen Pucks ändert. Und man sieht, dass sehr große Geschwindigkeitsbeträge selten vorkommen. Um zusätzlich den Schülern den Zusammenhang zwischen den beiden Geschwindigkeiten $\vec{v}_x$ und $\vec{v}_y$ und der Gesamtgeschwindigkeit $\vec{v}$ zu verdeutlichen, wurden Pfeileinblendungen für alle drei Geschwindigkeiten erstellt (siehe Abb. 3).

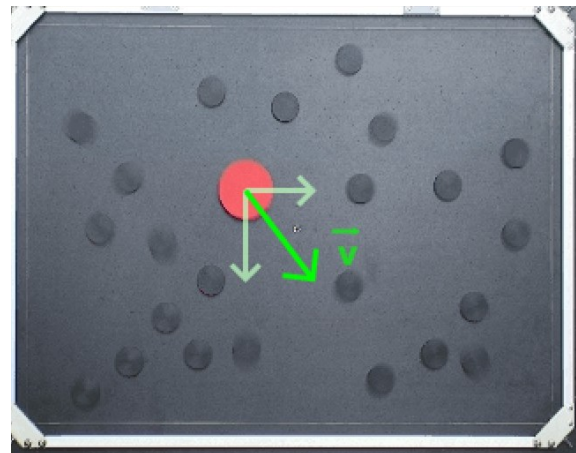


Abb. 3: Videobild des großen Luftkissentisches mit einblendetem Geschwindigkeitspfeil (grün) und den beiden Komponenten (blassgrün).

Zur Auswertung wurde die Datentabelle exportiert und mit Excel bearbeitet. Aus den Geschwindigkeitskomponenten v_x und v_y wurde mit der Gleichung

$$|\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad \{13\}$$

der Betrag $|\vec{v}|$ der Gesamtgeschwindigkeit in jedem Frame berechnet. Es ergaben sich Werte von 0 cm/s bis 110 cm/s. Um die Geschwindigkeitsverteilung graphisch darstellen zu können, wurden Intervalle mit einer Größe von 1 cm/s festgelegt. In Excel wurde anschließend gezählt, wie sich die gemessenen Geschwindigkeiten auf die Intervalle verteilen. Die Anzahl pro Intervall wurde als Absolutwert bestimmt und zusätzlich als prozentualer Anteil aller

Geschwindigkeitswerte ausgegeben. Aus diesen Daten wurde ein Balkendiagramm der Geschwindigkeitsverteilung erstellt, das in Abb. 4 zu sehen ist (angegeben wurde jeweils die untere Intervallgrenze). Über das Diagramm wurde eine Fitkurve der Form

$$F(v) = c \cdot v \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot c \cdot v^2} \quad \{14\}$$

gelegt. Dies entspricht der Verteilungsfunktion für ein zweidimensionales Gas (Man beachte den Unterschied im Funktionsterm im Vergleich zum dreidimensionalen Gas!). Mittels dieser Fitkurve wird ein Vergleich des gemessenen und des theoretischen Ergebnisses vereinfacht. Obwohl die Teilchenzahl mit insgesamt nur 24 Teilchen sehr gering ist, hat die gemessene Verteilung in guter Näherung die zu erwartende Form.

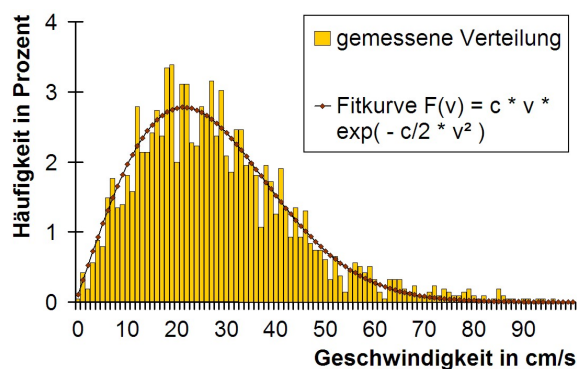


Abb. 4: Gemessene Geschwindigkeitsverteilung beim großen Luftkissentisch und Fitkurve $c = 21 \text{ s}^2 / \text{m}^2$.

Wählt man für die Berechnung größere Geschwindigkeitsintervalle, z.B. 5 cm/s, sieht die gemessene Geschwindigkeitsverteilung schöner aus, obwohl man eigentlich einen Verlust an Informationen hat (siehe Abb. 5). Da man nun die Häufigkeit in einem fünfmal so großen Geschwindigkeitsintervall betrachtet, muss man auch die Fitkurve entsprechend anpassen.

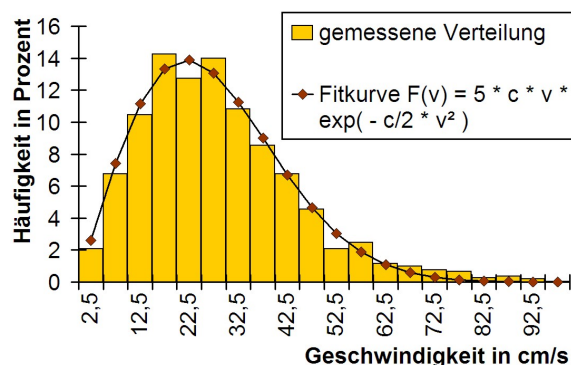


Abb. 5: Gemessene Geschwindigkeitsverteilung und Fitkurve bei größeren Intervallen ($c = 21 \text{ s}^2 / \text{m}^2$).

3.2. Kleiner Luftkissentisch

Bei dem kleinen Luftkissentisch der Firma Phywe (Artikel-Nr. 11204.88) geschieht ein ständiges Anstoßen der Teilchen bereits durch den Luftstrom selbst, so dass diese auch ohne anstoßenden Rahmen

nicht zur Ruhe kommen (siehe Abb. 6). Ein Unterschied bei diesem Aufbau zum oben beschriebenen ist, dass man kein mechanisches Aneinanderstoßen der einzelnen Teilchen sieht, sondern sich diese allein auf Grund ihres Magnetfeldes elastisch abstoßen, also durch Felder wechselwirken. Der wesentliche Aspekt des gegenseitigen Stoßens wird damit nicht mehr so deutlich wie im obigen Beispiel, ist aber näher an der Realität, da die Atome und Moleküle untereinander ja auch über Felder wechselwirken. Während man auf dem großen Luftkissentisch die Modelltemperatur durch Ändern der Rahmengeschwindigkeit in Grenzen ändern kann, ist dies hier nur sehr schlecht durch Drosselung der Luftzufuhr möglich. Von Vorteil ist aber, dass man zusätzlich zur Videoanalyse den Ablauf durch eine Projektion mit dem Overheadprojektor zeigen kann.

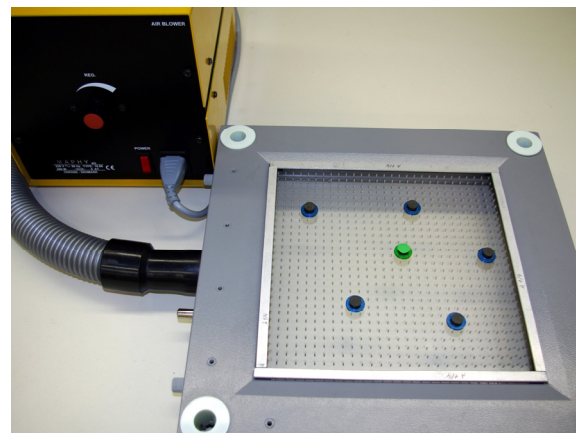


Abb. 6: Kleiner Luftkissentisch

Für die Videoaufnahme stellt man den Luftkissentisch auf eine helle Unterlage und filmt die Bewegung senkrecht von oben. Es ist nicht nötig, einen Puck farbig zu markieren, da bereits Pucks zweier Farben mitgeliefert werden. So verwendet man beispielsweise einen grünen und sonst nur blaue Pucks. Sicherheitshalber bzw. für eine einfachere Beobachtung kann man auf den Magnet des grünen Pucks noch ein Stück farbiges Papier kleben.

Um den Versuch auszuwerten, wurde wieder ein Video von drei Minuten Länge aufgenommen, so dass bei 12,5 Vollbildern pro Sekunde ein Video mit 2.250 Frames entstand. Die Breite von 21 cm diente als Skalierung und die automatische Analyse des grünen Pucks verlief fehlerfrei. Für einen ersten qualitativen Eindruck wurde die Geschwindigkeit wieder als Geschwindigkeitspfeil an das Objekt angeheftet (siehe Abb. 7). Zur Auswertung wurde die Datentabelle wieder exportiert und mit Excel bearbeitet. Es ergaben sich Werte von 0 cm/s bis 19 cm/s. Um die Geschwindigkeitsverteilung graphisch darstellen zu können, wurden Intervalle mit einer Größe von 1 cm/s festgelegt. In Excel wurde anschließend gezählt, wie sich die gemessenen Geschwindigkeiten auf diese Intervalle verteilen und als prozentualer Anteil ausgegeben.

Das entstandene Balkendiagramm der Geschwindigkeitsverteilung ist in Abbildung 8 zu sehen (angegeben wurde jeweils die mittlere Geschwindigkeit im

Intervall). Obwohl die Teilchenzahl mit insgesamt nur sechs Teilchen extrem gering ist, hat die gemessene Verteilung in guter Näherung die zu erwartende Form.

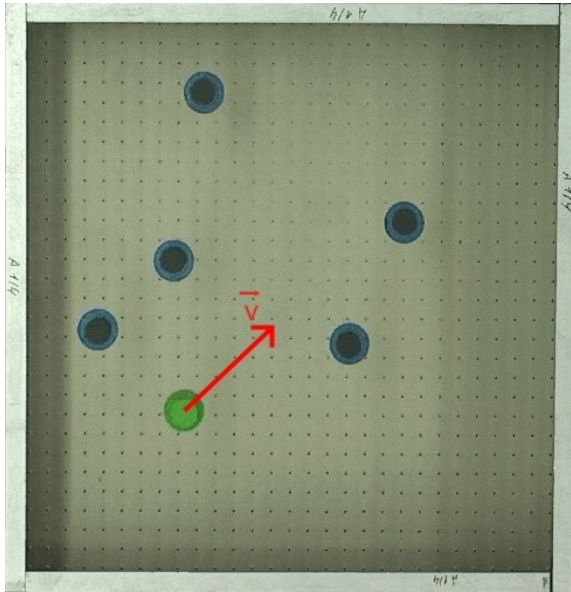


Abb. 7: Videobild des kleinen Luftkissentisches mit einblendetem Geschwindigkeitspfeil (rot).

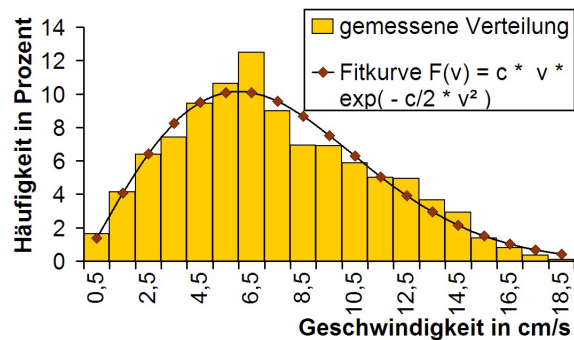


Abb. 8: Gemessene Geschwindigkeitsverteilung beim kleinen Luftkissentisch und Fitkurve ($c = 280 \text{ s}^2 / \text{m}^2$).

4. Quantitativ verwendbares Modell

Ein übliches Demonstrationsexperiment zur Veranschaulichung der Maxwellverteilung ist die Darstellung mit dem Gerät zur kinetischen Gastheorie, wie es zum Beispiel die Firma Phywe anbietet (Artikel-Nr. 09060.00, siehe Abb. 9). Die über eine Rüttelplatte in ungeordnete Bewegung versetzten Kügelchen simulieren die Teilchen in einem dreidimensionalen Gas.

Diese Kügelchen können das Gehäuse über eine kleine Öffnung verlassen. Dabei müssen sie zwei Blenden passieren, so dass nur Kügelchen mit einer rein horizontalen Geschwindigkeitsrichtung das Gehäuse verlassen können. Daher kann mit diesem Versuchsaufbau nur die Geschwindigkeitsverteilung eines eindimensionalen Gases untersucht werden. Je nach Geschwindigkeit fliegen die Kügelchen auf einer Wurfparabel unterschiedlich weit. Durch den Auffänger fallen die Kügelchen entsprechend ihrer

Flugweite in die Registrierkammer. Bei genügend langer Versuchsdauer mit gelegentlichem Nachfüllen von Kügelchen ergibt sich in der Registrierkammer eine Verteilung entsprechend der Maxwell'schen Theorie für ein eindimensionales Gas.



Abb. 9: Gerät zur kinetischen Gastheorie

Sinnvoller ist es, eine kleine Holzkugel in die Rüttelkammer (Abb. 10) zu geben und diese mit „measure Dynamics“ zu verfolgen. Der wesentliche Vorteil dieser Apparatur gegenüber den obigen anschaulicheren Lösungen ist, dass über einen Spannungsregler das Modellgas verschieden stark angeregt werden kann und so verschiedene Modelltemperaturen realisiert werden können. Dieses Modell ist einfach handhabbar und für unsere Zwecke geeigneter als eine Latexsuspension mit Heizplatte unter einem Mikroskop.

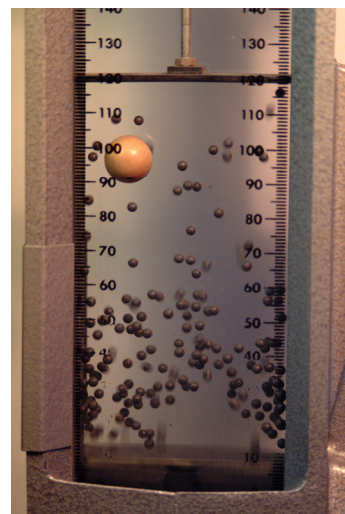


Abb. 10: Rüttelkammer mit Holzkugel

4.1. Aufbau und Auswertung

Der Aufbau mit dieser Rüttelkammer und Spannungsregler ist denkbar einfach (Abb. 11). Um einen homogenen Hintergrund für die Aufnahme zu erreichen, empfiehlt es sich, die Rückwand der Rüttelkammer mit einem weißen Stück Papier abzuhängen. Die Kammer wird fest eingespannt, durch eine Kohlebogenlampe beleuchtet und mit einer Videokamera gefilmt.

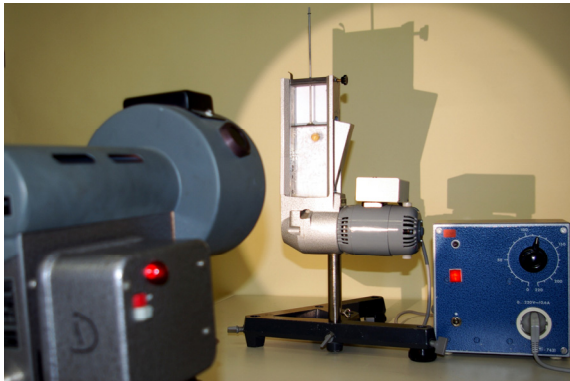


Abb. 11: Versuchsaufbau der Rüttelkammer

Da es sich bei der Filmaufnahme um eine zweidimensionale Projektion eines dreidimensionalen Gases handelt, muss die zugrunde gelegte Verteilungsfunktion angepasst werden. Als Fitfunktion wurde wieder

$$F(v) = \frac{m}{k \cdot T} \cdot v \cdot e^{-\frac{m \cdot v^2}{2 \cdot k \cdot T}} = c \cdot v \cdot e^{-\frac{c \cdot v^2}{2}} \quad \{15\}$$

(siehe Abschnitt 1) verwendet, wobei der Parameter c jeweils mit Excel bestimmt wurde. Um genügend Daten für eine sinnvolle Statistik zu erhalten, wurden Zwei-Minuten-Videos mit 3.000 Einzelbilder aufgenommen. Daraus ergaben sich durch die Videoanalyse 1.500 Datensätze, da aufgrund der Vollbildaufnahme (siehe dazu Abschnitt 2) jeweils zwei identische Bilder hintereinander produziert werden.

4.2. Ist die Bewegung der Teilchen tatsächlich statistisch, also zufällig?

Aus denen durch die Videoanalyse gewonnen Ortsdaten des betrachteten Teilchens kann man schon einige qualitative bzw. halbquantitative Erkenntnisse gewinnen. Auf den ersten Blick lässt sich die Zufälligkeit der Bewegung gut erkennen und darstellen. In Abbildung 12 hat das beobachtete Teilchen zweimal die gleiche „Startposition“, nimmt aber dann ganz unterschiedliche Wege in der Rüttelkammer.

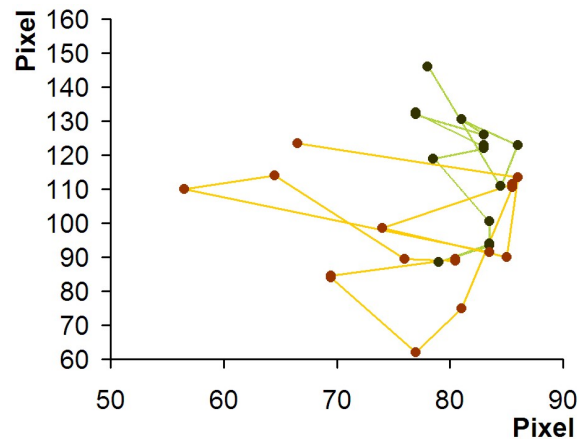


Abb. 12: Laufweg eines Teilchens, welches zweimal vom selben Punkt aus startet ($\Delta t = 0,08 \text{ s}$).

4.3. Genügt die experimentell bestimmte Geschwindigkeitsverteilung der Maxwell-Boltzmann-Verteilung?

Wertet man die Ortsdaten nun genauer aus, indem man daraus die Geschwindigkeitsdaten des beobachteten Teilchens errechnet, so kann man mit den Geschwindigkeitsdaten Statistik betreiben. Hierbei lassen sich Aussagen darüber treffen, wie gut die experimentellen Daten der Videoanalyse zu den theoretisch erwarteten Daten passen. Wie erläutert, ist die Verteilungsfunktion für ein zweidimensionales Gas zu verwenden. Die Abbildung 13 zeigt, dass die experimentellen Daten gut zu dieser Verteilungsfunktion passen. Eine Annäherung durch die Verteilungsfunktion eines dreidimensionalen Gases konnte nicht sinnvoll erfolgen, was unsere Annahmen unterstrich.

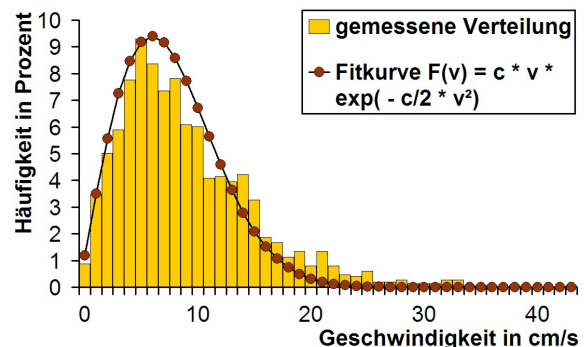


Abb. 13: Experimentell bestimmte und theoretische Geschwindigkeitsverteilung für ein beobachtetes Teilchen in der Rüttelkammer ($c = 240 \text{ s}^2/\text{m}^2$).

Mehrere Videoaufnahmen unterschiedlicher Länge bei gleicher Temperatur erbrachten in der Analyse gut übereinstimmende Verteilungen (Abb. 14), weshalb die gefundenen Werte als sehr gut reproduzierbar angesehen werden können.

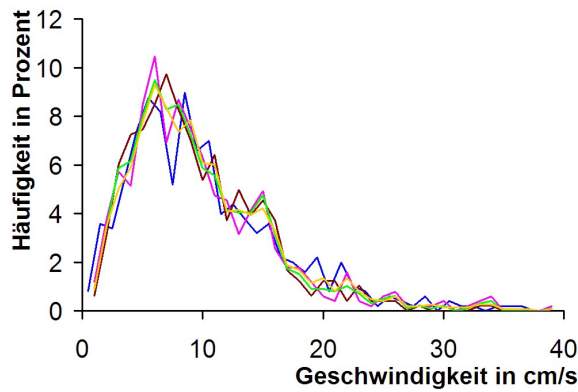


Abb. 14: Fünf gemessene Geschwindigkeitsverteilungen, welche aus verschiedenen Videos unterschiedlicher Länge gewonnen wurden.

4.4. Bestimmung der relativen Modellgastemperatur

Bisher haben wir nur Daten für eine bestimmte Modellgastemperatur gewonnen. Wenn man eine Latexsuspension auf einem Objektträger verwendet, hat man die Möglichkeit durch eine externe Heizung die Temperatur der Suspension zu ändern. Durch die Heizung, aber auch durch die Beleuchtung des Mikroskops kann es aber zu dem Problem kommen, dass die Brownsche Bewegung durch eine Wärmeströmung in der Flüssigkeit überlagert wird, was das Auswerten unmöglich macht. Mit der Rüttelkammer hat man durch die Verwendung eines Spannungsreglers die Möglichkeit, das Modellgas verschieden stark anzuregen und damit auch verschiedene Modelltemperaturen zu realisieren. Damit können die Teilchenbewegungen auch in Abhängigkeit von der Temperatur untersucht werden. Damit aus dem Versuchsaufbau Daten gewonnen werden können, die man untereinander vergleichen kann, muss den verschiedenen Versuchsdurchläufen bei verschiedenen Spannungen eine Modelltemperatur zugeordnet werden.

Um einen Zusammenhang zwischen dieser Betriebsspannung und der Modellgastemperatur zu bekommen, ist eine energetische Betrachtung sinnvoll. Mit der Annahme, dass die Rüttelkammer im Bereich von 130 V bis 230 V den gleichen Wirkungsgrad hat und die Teilchen mit den Wänden vollkommen elastische Stöße ausführen, wird pro Zeiteinheit Δt die Energie $\Delta E = k \cdot P_{el} \cdot \Delta t$ an das Modellgas abgegeben, wobei k eine gerätespezifische Konstante ist, welche nicht näher bestimmt werden muss. Das Modellgas hat als dreidimensionales Gas die innere Energie

$$E_{in} = \frac{3}{2} \cdot N \cdot k_B \cdot T = a \cdot T \quad \{16\}$$

mit einer Konstanten a . Und damit gilt

$$k \cdot P_{el} \cdot \Delta t = a \cdot T \quad \{17\}$$

Es folgt:

$$k \cdot U \cdot I \cdot \Delta t = a \cdot T \quad \{18\}$$

$$k \cdot U \cdot \frac{U}{R} \cdot \Delta t = a \cdot T \quad \{19\}$$

$$U^2 = \frac{a \cdot R}{k \cdot \Delta t} \cdot T \quad \{20\}$$

oder

$$U^2 \propto T \quad \{21\}$$

Für jede Betriebsspannung lässt sich der Faktor

$$c = \frac{m}{k \cdot T} \quad \{22\}$$

aus der angepassten Verteilungsfunktion bestimmen und sich so das Verhältnis T/T_0 bilden, wobei T_0 die Temperatur des Modellgases bei einer Betriebsspannung von 130 V ist. Die Abbildung 15 zeigt, dass das Quadrat der Betriebsspannung U direkt proportional zur Modellgastemperatur T ist. Daher ist es wegen der Transitivität von jetzt ab möglich, die Daten mit U^2 und damit auch direkt mit der Temperatur zu vergleichen.

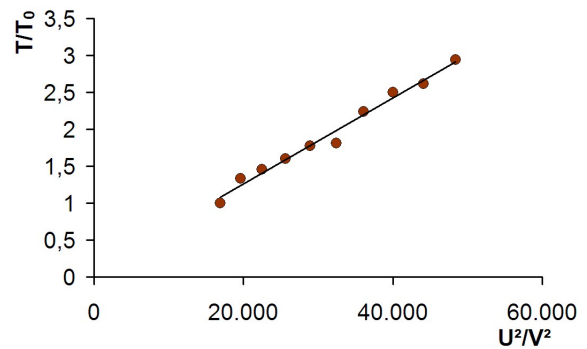


Abb. 15: Vergleich des Quadrates der Betriebsspannung U^2 und der relativen Modellgastemperatur T/T_0 ($R^2 = 0,983$)

4.5. Wie hängt die Geschwindigkeitsverteilung der Gasmoleküle von der Temperatur ab?

Durch den Vergleich der zehn analysierten Datensätze für zehn verschiedene Temperaturen lassen sich jetzt noch einige weitere interessante Zusammenhänge überprüfen. So ist jeder Datensatz für sich alleine gut analysierbar und es lässt sich gut eine Fitkurve anpassen. Dabei stellt sich die Frage, wie stimmig diese Anpassungen untereinander sind. Abbildung 16 zeigt die angepassten, theoretischen Kurven der zehn Datensätze. Wie zu erwarten ist, verschiebt sich das Geschwindigkeitsmaximum bei höheren Modellgastemperaturen nach rechts zu höheren Geschwindigkeiten, wobei die Kurven breiter werden.

Man kann die Qualität der Anpassungen untereinander noch besser vergleichen, wenn man sich die ersten Faktoren.

$$c = \frac{m}{k \cdot T} \quad \{23\}$$

der Verteilungsfunktionen in Abhängigkeit von der Temperatur betrachtet. Man erwartet für den indirekt

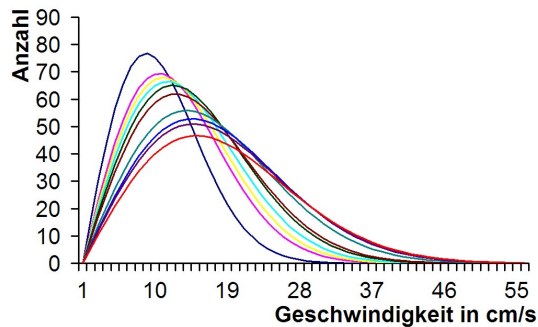
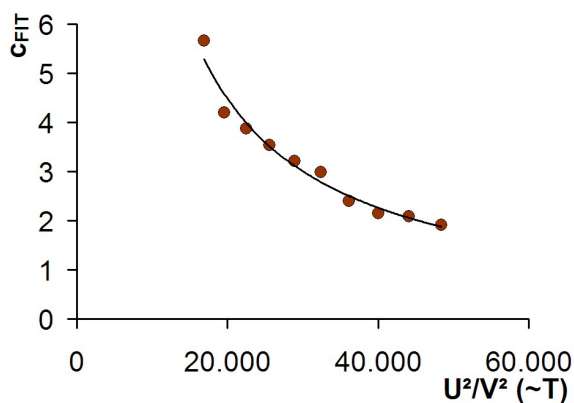


Abb. 16: Fitkurven aller zehn Datensätzen

proportionalen Zusammenhang einen Exponenten von -1, die Ausgleichskurve in Abbildung 17 ergibt einen Wert von -0,9855.

Abb. 17: Erster, linearer Faktor der angepassten Verteilungsfunktion in Abhängigkeit der Temperatur ($R^2 = 0,979$)

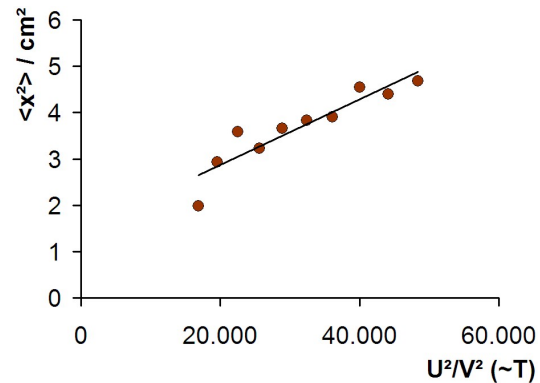
Daher kann man von einer guten Übereinstimmung mit der Theorie sprechen.

5. Wie hängt das mittlere Verschiebungsquadrat der Gasmoleküle von der Temperatur ab?

Nach der Einstein- Smoluchowski- Beziehung

$$\langle x^2 \rangle = \frac{k \cdot T \cdot t}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r} \quad \{24\}$$

besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem mittleren Verschiebungsquadrat eines Teilchens und der Temperatur in gleichen Zeitabschnitten. Da für alle analysierten Videos gleich viele Frames und damit die gleiche Beobachtungszeit verwendet wurden, sollte das mittlere Verschiebungsquadrat und die Temperatur direkt proportional zueinander sein, was die Abbildung 18 bestätigt.

Abb. 18: Mittleres Verschiebungsquadrat in Abhängigkeit der Temperatur ($R^2 = 0,846$)

5.1. Wie hängt die mittlere Geschwindigkeit der Gasmoleküle und damit die mittlere kinetische Energie von der Temperatur ab?

Die kinetische Gastheorie erklärt die Gasgesetze und die Eigenschaften von Gasen durch Bewegungsvorgänge mikroskopisch kleiner Teilchen. Dabei wird die innere Energie als kinetische Energie der Gasteilchen interpretiert. Ein dreidimensionales Gas hat die innere Energie

$$E = \frac{3}{2} \cdot N \cdot k \cdot T \quad \{25\}$$

Die kinetische Energie der N Teilchen des betrachteten Gases beträgt

$$E_{kin} = N \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad \{26\}$$

Somit gilt:

$$N \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{3}{2} \cdot N \cdot k \cdot T \quad \{27\}$$

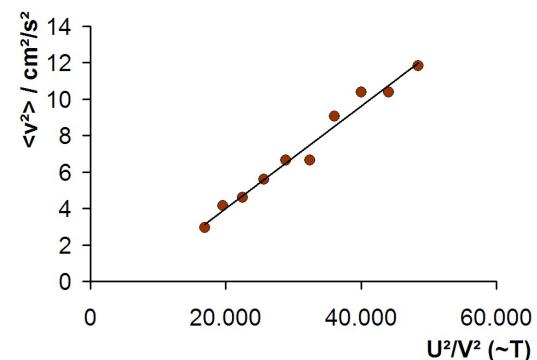
Daraus folgt:

$$v^2 = 3 \cdot \frac{k}{m} \cdot T \quad \{28\}$$

also

$$v^2 \propto T \propto U^2 \quad \{29\}$$

Auch diese Aussage wird, wie man in Abbildung 19 erkennen kann, durch die ausgewerteten Daten gut bestätigt.

Abb. 19: Mittleres Geschwindigkeitsquadrat in Abhängigkeit der Temperatur ($R^2 = 0,977$)

6. Fazit

1905 beendete Einstein seinen Artikel über die Brownsche Molekularbewegung mit dem Wunsch „*Möge es bald einem Forscher gelingen, die hier aufgeworfenen, für die Theorie der Wärme wichtigen Fragen zu entscheiden!*“ [2]. Etwas mehr als 100 Jahre später lernen die Schüler nicht nur die Richtigkeit der Annahmen Einsteins im Unterricht, sondern können auch mit dem modernen Mittel der Videoanalyse seinem Wunsch nachkommen, seine Ideen experimentell zu belegen. Egal ob mit einem kleinen oder großen Luftkissentisch oder mit der Rüttelkammer experimentiert wird, können die Schüler die Zufälligkeit der Bewegung sofort erkennen und durch die Analyse der Daten grundlegende Folgerungen ziehen. Die Abhängigkeit des mittleren Verschiebungsquadrats oder des mittleren Geschwindigkeitsquadrats von der Temperatur lassen sich einfach und überzeugend erkennen. Eine weitere Erkenntnis eröffnet sich den Schüler dadurch, dass verschiedene Aufnahmen der Bewegungen gleiche Ergebnisse liefern. Umso mehr Bilder betrachtet werden, desto mehr nähern sich die Ergebnisse an die Theorie an, wodurch der statistische Aspekt der Brownschen Bewegung unterstrichen wird.

7. Literatur

- [1] Einstein, Albert (1906): Zur Theorie der Brownschen Bewegung. In: Annalen der Physik, Band 19, S. 371-381
- [2] Einstein, Albert (1905): Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen, Band 17, S. 549-560
- [3] Smoluchowski, Marian von (1906): Zur kinetischen Theorie der Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen. In: Annalen der Physik, Band 21, S. 756-780
- [4] Götz, Rainer; ter Wolbeek, Albert (1982): Ein experimenteller Nachweis für die Temperaturabhängigkeit der Brownschen Molekularbewegung im Physikunterricht. In: Praxis der Naturwissenschaften Physik 31, Nr. 8, S. 235-244
- [5] Harsch, Günther (1985): Die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung. In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 38, Nr. 3, S. 129-138
- [6] <http://www.phywe.de/framenav.php?nav1=60&nav2=7&csscol=son&ref=nav>
- [7] Benz, Michael; Wilhelm, Thomas (2008): Digitale Videoanalyse von Bewegungen – Neue Möglichkeiten mit der Software „measure Dynamics“. In: Nordmeier, V.; Oberländer, A.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [8] Benz, Michael (2008): Digitale Videoanalyse von Bewegungen - neue Möglichkeiten mit der Software "measure Dynamics", Staatsexamensarbeit, www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/Videoanalyse2.htm

Danksagung

Wir bedanken uns bei Herrn AD Wolfgang Reusch für Anregungen zu diesem Beitrag und bei Herrn Dr. Markus Grumann für das zur Verfügung Stellen der Software measure Dynamics.

3.3 Videoanalysen bei einer Nebelkammer

Quelle:

BACKMUND, U.; WILHELM, T.: *Selbstbau einer kontinuierlichen Diffusions-Nebelkammer*
– In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58, Nr. 1, 2009, S. 27 – 32

Inhalt und Bezug zum Thema:

Die Wilsonsche Nebelkammer ist auf Grund ihrer kurzen Sensitivität für den Schulunterricht ungeeignet im Gegensatz zu einer kontinuierlichen Diffusions-Nebelkammer, die jedoch sehr teuer ist. Damit Lehrer oder Schüler selbst eine kostengünstig bauen können, wurde eine Nebelkammer mit Peltier-Elementen konstruiert und ausführliche Bauanleitungen erstellt. Es werden die Ideen der Bauweise, die Art der Bauanleitung und evtl. Probleme vorgestellt. Des Weiteren werden verschiedene qualitative und quantitative Einsatzmöglichkeiten beschrieben. Dazu gehören zwei Einsatzmöglichkeiten der Videoanalysesoftware „measure dynamics“: Bringt man Radongas in die Kammer ein, zeichnet man die Nebelspuren des Radonzerfalls mit einer Videokamera auf und stellt im Videoanalyseprogramm „measure dynamics“ ein, dass man nur jedes 50-te oder 100-te Bild sehen will, sieht man beim Abspielen des Videos durch den so erzielten Zeitraffer qualitativ die Abnahme der Aktivität. Für eine quantitative Auswertung zählt man die Spuren in jedem 100-ten Frame oder man zählt mithilfe der Zählfunktion in den einzelnen Bildern, wobei man jedes 100-te hat exportieren lassen. Mit dem Videoanalyseprogramm „measure dynamics“ ist auch das Ausmessen der Länge der Spuren einfach möglich und aus der gemessenen Spurlänge kann man dann die Geschwindigkeit und die kinetische Energie von α -Teilchen bestimmen.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Herr Backmund hat in seiner Staatsexamensarbeit mit meiner Unterstützung die Diffusions-Nebelkammer gebaut und den Bauplan geschrieben, wobei ich ihn intensiv bei der Umsetzung der Ideen betreut habe. Für unseren gemeinsamen Artikel habe ich eine Videoaufnahme gemacht und Möglichkeiten der Auswertung ausprobiert.

Selbstbau einer kontinuierlichen Diffusions-Nebelkammer

U. Backmund u. T. Wilhelm

1 | Intention der Bauanleitung

Der Unterricht zur Radioaktivität steht vor dem Problem, dass nur wenig motivierende Schulexperimente möglich sind. Für den Einsatz einer Nebelkammer im Unterricht spricht deshalb eine Vielzahl von Gründen. Die Nebelkammer ist zweifelsohne eines der wichtigsten und faszinierendsten Demonstrationsinstrumente des Stoffgebiets der Atom- und Kernphysik [1].

Aus Kostengründen beschränken sich aber viele Schulen auf die Wilsonsche Expansions-Nebelkammer, die nicht gut funktioniert, nur eine kleine Beobachtungsfläche besitzt und eine äußerst kurze Spurenbereitschaft aufweist. Überdies ist der erfolgreiche Betrieb dieses Kammertyps nicht unproblematisch. Häufig wird eine Vielzahl von Expansionen benötigt, bis sich die ersehnten Bahns Spuren beobachten lassen. Da die Bahns Spuren für höchstens eine Sekunde sichtbar bleiben, bleibt dann nur zu hoffen, dass die Schülerinnen und Schüler die Versuche mit dem nötigen Interesse verfolgt haben und nicht gelangweilt durch eine Reihe von Fehlversuchen ihre Aufmerksamkeit anderem zugewendet haben. Gewiss ist der eine oder andere Fehlversuch auf eine falsche Bedienung der Kammer zurückzuführen. Jedoch ist es ein offenkundiges Defizit dieses Kammertyps, dass die Erfolgswahrscheinlichkeit des Versuchs durch eine gute und intensive Vorbereitung nicht wesentlich erhöht werden kann.

Auf Grund ihrer dauerhaften Sensitivität ist eine kontinuierliche Diffusionsnebelkammer viel geeigneter, jedoch sehr teuer. Die Kammer kann längere Zeit vor dem Unterricht vorbereitet und in Betrieb genommen werden, wodurch sich die Erfolgchancen im Vergleich zur Expansionsnebelkammer beachtlich verbessern. Damit Lehrer oder Schüler selbst eine solche Kammer bauen können, wurde eine Diffusions-Nebelkammer mit Peltiermodulen konstruiert und ausführliche Bauanleitungen für „Laien“ vorgelegt. Die benötigten Finanzen (300 – 400 €) sind dabei weit unter den Anschaffungskosten vergleichbarer Nebelkammern

der Lehrmittelhersteller (1 000 – 2000 €) – ohne diesen nachzustehen. Schon der Null-effekt genügt, um Bahns Spuren zu beobachten. Die Nebelkammer ist für interessierte und handwerklich begabte Lehrer und Schüler nachbaubar und wurde bereits von einem Schüler nachgebaut. Bei der Konstruktion der Nebelkammer wurde darauf geachtet, dass diese von handwerklichen Laien angefertigt werden kann und bei der Herstellung ausschließlich konventionelle Werkzeuge aus dem Heimwerkerbereich zur Anwendung kommen. Lediglich grundsätzliche Fähigkeiten im Umgang mit dem Bohrer, als auch der Stichsäge und dem Lötkolben sind notwendig. Allerdings sollte das Lesen von Zeichnungen und deren gedankliche Umsetzung keine größeren Schwierigkeiten bereiten. Für den prinzipiellen Aufbau der Kammer diene als Grundlage und Leitgedanke der Eigenbau einer Diffusions-Nebelkammer mit Peltierkühlung von *Thomas Rapp*, der auf seiner Homepage seine selbstgebaute Nebelkammer knapp vorstellt [2].

2 | Funktionsweise von Nebelkammern

Nebelkammern sind Spurendetektoren zur Sichtbarmachung von Bahns Spuren einzelner ionisierender Teilchen bzw. Strahlung. Grundsätzlich werden zwei Arten von Nebelkammern unterschieden: Die 1911 von dem englischen Physiker *C. T. R. Wilson* (1869 – 1959) entwickelte Expansions-Nebelkammer und die kontinuierlich arbeitende Diffusions-Nebelkammer.

Für das Verständnis der Funktionsweise dieser Spurendetektoren müssen folgende grundlegende physikalische Tatsachen beachtet werden: Wird ein mit Alkoholdampf bzw. Wasserdampf gesättigter Raum abgekühlt, so verringert sich seine Aufnahmefähigkeit für das jeweilige Gas-Dampf-Gemisch. Infolgedessen wird der Dampf übersättigt, das heißt in der Luft befinden sich mehr Dampfmoleküle, als bei der erniedrigten Temperatur eigentlich möglich sind (relative Luftfeuchtigkeit über 100 %).

„Je nach dem Grad der Übersättigung verbleibt der Dampf in der Luft, oder er scheidet sich in Form kleiner Tröpfchen, d.h. als Nebel, ab“ [3]. Die Bildung dieses Tröpfchenregens geschieht zum Beispiel in staubiger Luft leichter als in staubfreier, da die Staubpartikel Ansatzkerne für die sich bildenden Wasser- bzw. Alkoholtröpfchen sind. Für die Nebelbildung sind solche Kondensationskerne enorm wichtig. Allerdings können nicht nur Staubteilchen als Kondensationskerne dienen, sondern auch Ionen. Daraus folgt unmittelbar eine weitere für die Wirkungsweise von Nebelkammern wichtige physikalische Tatsache, die ionisierende Wirkung radioaktiver Strahlung.

Beide Kammertypen beruhen auf diesen physikalischen Tatsachen. Letztlich besteht der entscheidende Unterschied der zwei Kammerarten lediglich in der Art und Weise, wie der übersättigte Dampf in der Kammer hergestellt wird.

2.1 Wilson-Nebelkammern

Bei einer Wilson-Nebelkammer wird durch adiabatische Expansion eines gesättigten Gas-Dampf-Gemisches übersättigter Dampf erzeugt, indem das Kammervolumen schnell vergrößert wird. Dabei kühlt das Gas-Dampf-Gemisch ab und der Dampf wird übersättigt. So ist die Wilson-Nebelkammer, auch Expansions-Nebelkammer genannt, nicht dauerhaft sensitiv, d.h. die Kammer ist nicht permanent bereit, von eintretenden Teilchen Nebelspuren zu bilden. Die Spurenbereitschaft der Nebelkammer ist nur 0,1 bis 1 s nach der Expansion vorhanden.

2.2 Diffusions-Nebelkammern

Bei einer Diffusions-Nebelkammer wird die Übersättigung des in der Kammer befindlichen Gas-Dampf-Gemisches durch ein stationäres Temperaturgefälle zwischen Kammerboden und -deckel in einem Teil des Kammervolumens dauernd aufrechterhalten [3]. Zur Herstellung dieses Temperaturgradienten wird der Boden der Nebelkammer kontinuierlich gekühlt. Außerdem wird der Kammer das benötigte Kondensa-

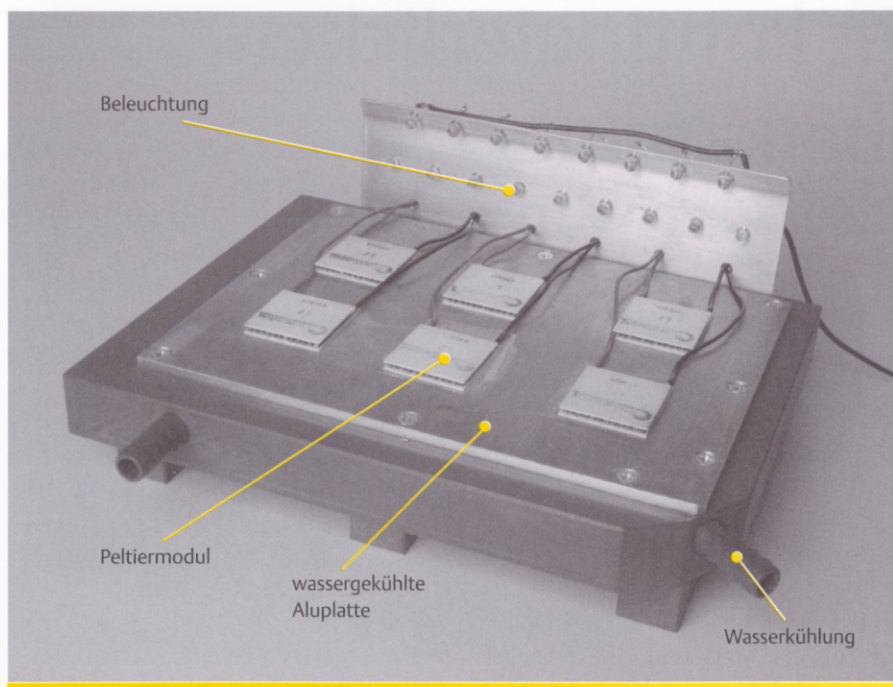


Abb. 1: Wassergekühlte Aluminiumplatte mit sechs Peltiermodulen

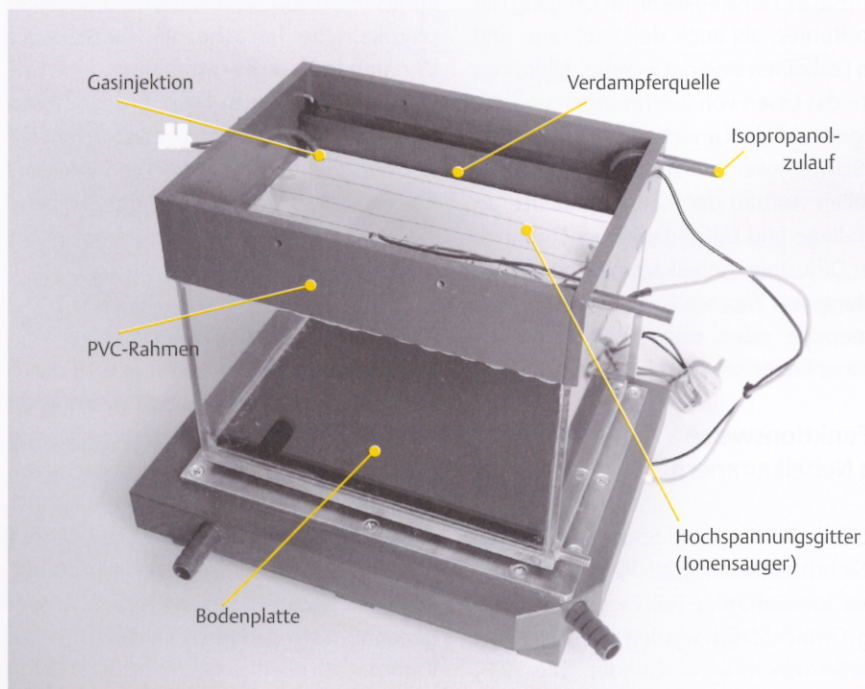


Abb. 2: Die Kammer mit Verdampferquelle und Hochspannungsgitter

tionsmedium als Gas-Dampf-Gemisch laufend durch eine Verdampferquelle, die sich auf der gegenüberliegenden Seite befindet, zugeführt. Als Kondensationsmedium wird häufig Alkohol, zum Beispiel Isopropanol, verwendet. Das von der Verdampferquelle ausgestoßene Gas-Dampf-Gemisch diffundiert langsam durch das Füllgas (Luft) der Kammer von der Verdampferquelle zum erheblich kälteren Kammerboden. Dabei kommt das Gemisch in immer kälteren Schichten und wird ab einer gewissen Höhe übersättigt.

Gelangt nun ionisierende Strahlung in dieses Übersättigungsgebiet, auch empfindliches Kammervolumen genannt, erzeugt die Strahlung längs ihrer Bahn Ionen, die als Kondensationskerne dienen, wodurch Ketten kleinster Flüssigkeitströpfchen entstehen. Wird diese Nebelspur seitlich beleuchtet, wird das Licht an den Nebeltröpfchen gestreut (Mie-Streuung), so dass die Teilchenbahn gut als heller Nebelstreifen gegen den dunklen Hintergrund zu sehen ist. Das empfindliche Kammervolumen befindet sich direkt über dem Kammerboden

und hat in etwa eine Dicke von 10 – 15 mm [4]. Zwar kann bei einer Diffusionsnebelkammer die Beobachtungsfläche beliebig groß gebaut werden, die Höhe der empfindlichen Schicht bleibt jedoch auf ca. 15 mm begrenzt. Damit nicht durch unerwünschte, im Kammergas befindliche „Störionen“ ein allgemeiner Nebelschleier verursacht wird, müssen diese Ionen durch ein angelegtes elektrisches Feld abgesaugt werden.

Abhängig von der jeweiligen baulichen Umsetzung der Diffusions-Nebelkammer muss der Kammerboden auf einer relativ konstanten Temperatur von weniger als -10°C gekühlt werden. Dies kann zum Beispiel durch Trockeneis, ein Kühlaggregat oder Peltiermodule geschehen. Als Verdampferquelle wird oftmals ein mit Alkohol getränkter Filz oder ein elektrisch beheizter Behälter benutzt.

3 | Aufbau der Selbstbau-Kammer

Bei der hier beschriebenen Diffusionsnebelkammer wird die Bodenplatte der Kammer mit Hilfe von sechs Peltiermodulen auf -10° bis -15°C gekühlt (siehe Abb. 1). Peltiermodule transportieren Wärme von einer Peltiermodul-Seite (Kaltseite) zur anderen Seite (Warmseite). Dabei muss für eine korrekte Funktion der Elemente die Wärmemenge auf der Warmseite der Peltiermodule abgeführt werden. Um einen ausreichenden Wärmeabtransport zu gewährleisten, liegen die Peltiermodule mit ihrer Warmseite auf einer 4 mm starken Aluminiumplatte, die mit Wasser gekühlt wird. Die eigentliche Kammer besteht aus einer 8 mm starken Bodenplatte aus Aluminium und wird seitlich durch Glaswände abgeschlossen.

Auf den Glaswänden sitzt abschließend ein Rahmen aus PVC, der ein Hochspannungsgitter für den Ionenabtransport („Ionensauger“), die Verdampferquelle (zwei beheizte Isopropanol-führende Kupferrinnen), den Isopropanol-Zulauf und eine Einmündung für die Einbringung radioaktiver Gase beherbergt (siehe Abb. 2). Abgeschlossen wird die Kammer mit einem Deckel aus Glas.

Als Spannungsquelle für nahezu alle elektrischen Bauteile der Kammer dient ein ausrangiertes Computer-Netzteil (mit mind. 220 W). Ausschließlich die Versorgung des „Ionensaugers“ mit Hochspannung (1,5 kV bis 3 kV) muss von einem externen Hochspannungsnetzgerät, welches in der Regel

Nachdem alle Bauteile der Diffusions-Nebelkammer angefertigt worden sind, werden die einzelnen Bauteile zur eigentlichen Nebelkammer zusammengesetzt. Auch in diesem Fall wird jeder einzelne Arbeits-

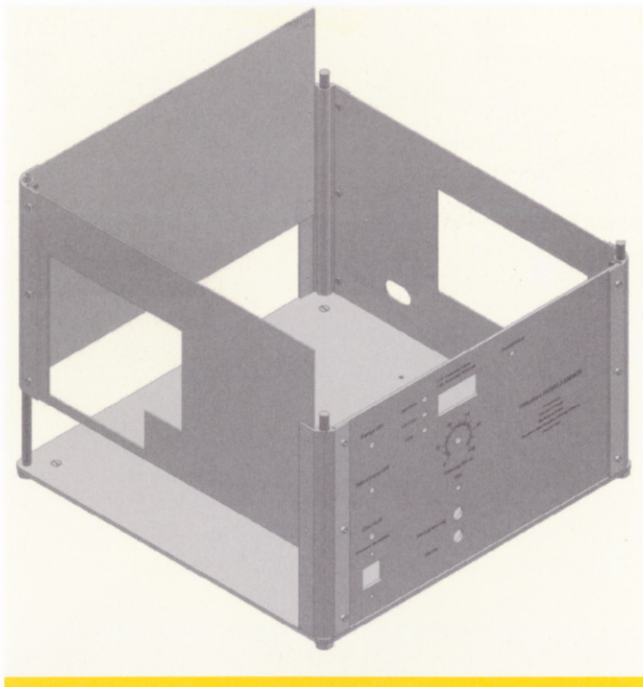


Abb. 5: Beispiel einer dreidimensionalen Abbildung

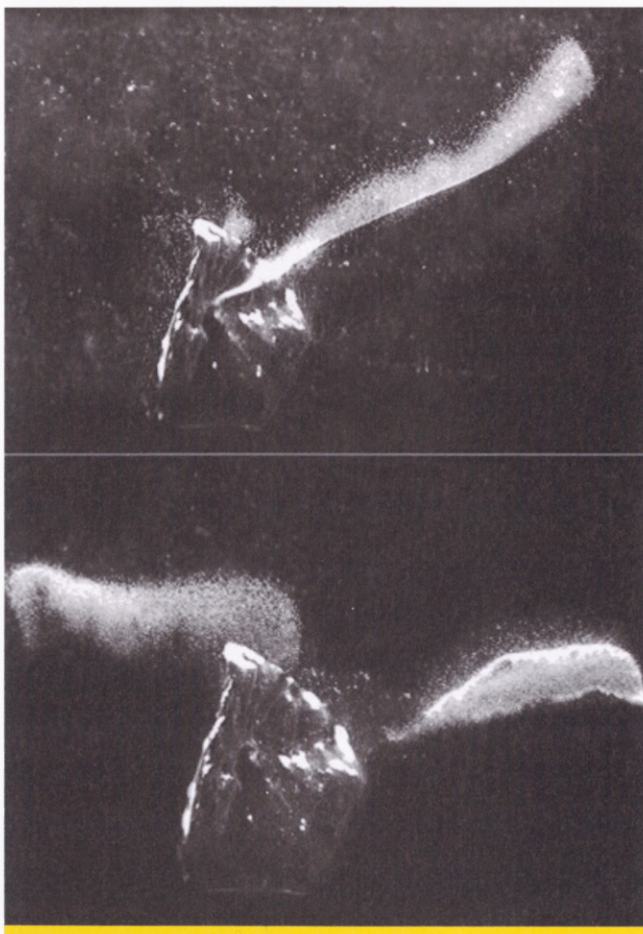


Abb. 6: Nebelspuren von einem radioaktiven Mineral

schrift ausführlich unter Zuhilfenahme von Zeichnungen, dreidimensionalen Abbildungen (siehe Abb. 5) und Detail-Aufnahmen des Prototypen geschildert.

Für die Versorgung der Verdampferquelle, der Pumpe und des Temperaturschaltmoduls mit der korrekten Spannung werden Schaltungen nach entsprechenden Schalt-

plänen auf einer Lochrasterplatte aufgebaut. Da sich unter Umständen die elektrischen Verbraucher bezüglich ihrer Anforderungen an die Spannungsversorgung von denen im Prototypen verbauten unterscheiden können, werden in der Bauanleitung unterschiedliche Schaltungen zur Verfügung gestellt, die eine individuelle An-

passung an die eigenen Gegebenheiten erleichtern sollen. Ebenso wird Hilfestellung für die Verwendung verschiedener Computer-Netzteile gegeben.

Zu guter Letzt wird die Fertigung eines Gehäuses beschrieben, welches die Spannungsquelle, die Elektronik, die Pumpe zusammen mit dem Isopropanol-Reservoir und schließlich die Nebelkammer selbst beherbergen wird. Auch in diesem Fall werden zuerst die notwendigen Gehäuse-Einzelteile angefertigt und abschließend zum Gehäuse zusammengebaut.

Nachdem alle Komponenten im Gehäuse angeordnet, verkabelt und korrekt angeschlossen wurden, kann die Diffusionsnebelkammer in Betrieb genommen werden. Sowohl die Inbetriebnahme, als auch die Außerbetriebnahme werden in einem eigenen Abschnitt Schritt für Schritt ausführlich beschrieben. Nach der Inbetriebnahme der Peltiermodule ist die Bodenplatte der Nebelkammer in der Regel nach zehn bis 15 Minuten auf mindestens -10°C heruntergekühlt. Ist dieser Schwellenwert erreicht bzw. unterschritten, können kurze Zeit später die ersten Nebelspuren beobachtet werden.

5 Probleme und Alternativen

5.1 Kammerboden

Der Kammerboden besteht aus einer 8 mm starken Aluminiumplatte. Um die Kondensationsstreifen gut erkennen zu können, ist die Oberseite der Platte zur Verbesserung des Kontrastes schwarz lackiert. Viele Lacke sind bedauerlicherweise nicht dauerhaft resistent gegenüber der Belastung mit Isopropanol und müssen so immer wieder erneuert werden. Als Lösung bietet sich die Verwendung eines Zwei-Komponenten-Polyurethan-Lacks an (am Besten mit Zwei-Komponenten-Grundierung auf Epoxidharzbasis), wie er im Flugzeugbau Verwendung findet. Im Versuch hielt er das Isopropanol gut aus, aber langfristige Erprobungen stehen noch aus.

Um solchen Problemen aus dem Weg zu gehen, sollte die Aluplatte nicht lackiert, sondern schwarz eloxiert sein. Es ist jedoch schwierig, einen Verkäufer derartiger eloxierter Platten zu finden. Unter www.electronic-things.de ist eine kleine Anleitung zum selber Eloxieren zu finden, die Schüler zusammen mit einem Chemielehrer (nicht allein!) durchführen können. Ein eigener Versuch ergab ein schönes Ergebnis, machte aber auch einige Arbeit.

5.2 Pumpe

Um die Kosten und den Aufwand zu minimieren, kann prinzipiell auf die Anlage zur Förderung des Isopropanols in die Verdampferquelle verzichtet werden. In diesem Fall würde die Elektronik für die Pumpe, die Pumpe selbst und das komplette Leitungssystem zur Isopropanolförderung entfallen. Jedoch müssten dann die Isopropanol führenden Rinnen der Verdampferquelle mit einer Spritze von Hand befüllt werden. Wer die Kammer für längere Zeit ohne Aufsicht betreiben möchte, müsste eine automatisierte Befüllung der Rinnen einarbeiten.

5.3 Präparate und Strahlungsquellen

Grundsätzlich können alle denkbaren radioaktiven Quellen (Gase, Präparate) in die Kammer eingebracht werden, sofern sie nicht erheblich breiter als 25 mm und länger als 150 mm sind. Allerdings ist zu beachten, dass relativ aktive Strahlungsquellen für den Einsatz in Diffusionsnebelkammern eher ungeeignet sind. Durch die hohe Aktivität wäre die empfindliche Schicht der Diffusionsnebelkammer in kürzester Zeit verbraucht. Infolgedessen würden sich die Spuren dann nicht mehr vom allgemeinen Nebeluntergrund abheben und wären deshalb nicht mehr zu erkennen.

Radioaktive Gase können leicht über einen extra für diesen Zweck integrierten Stutzen in das Kammerinnere eingeblasen werden. Feststoffe können mit einer geeigneten Pinzette von oben in die Kammer gelegt werden. Die Abb. 6a und 6b wurden durch das seitliche Beobachtungsfenster der Diffusionsnebelkammer (siehe Abb. 3) aufgenommen. Auf beiden Bildern sind Nebelkammerspuren zu sehen, die von einem in die Kammer eingebrachten radioaktiven Mineral ausgehen. Es ist eine Besonderheit der Beobachtung von der Seite, dass das zu Boden Fallen der Nebeltröpfchen, aus denen die Spuren bestehen, beobachtet werden kann. Dadurch entsteht ein „Schleier“ aus kleinsten Nebeltröpfchen, wie er auf den Bildern schön zu erkennen ist.

Beim Experimentieren mit dem Prototypen sind bei Verwendung des radioaktiven Gases Radon besonders eindrucksvolle Ergebnisse zu Stande gekommen. Zur Gewinnung von radioaktivem Radongas kann beispielsweise ein leicht radioaktiver Glühstrumpf, welcher in Campingleuchten verwendet wird, in das Innere einer 50 ml Spritze platziert werden (siehe Abb. 7). Glühstrümpfe enthalten in der Regel das radio-



Abb. 7: Spritze mit radioaktivem Glühstrumpf und radioaktives Mineral

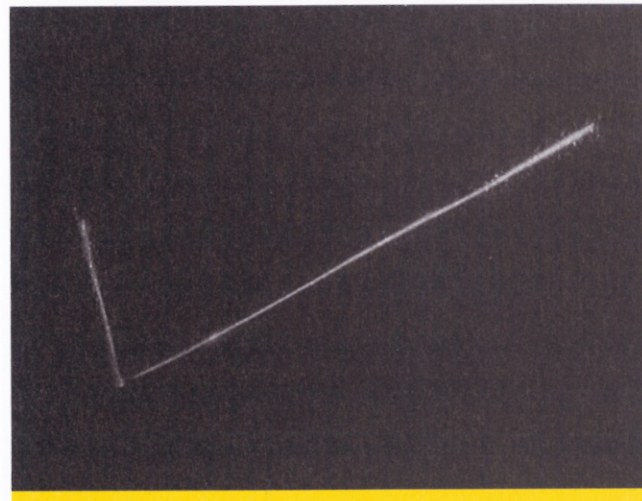


Abb. 8: Nebelspur von Radongas (Gabelspur)

aktive Element Thorium. Beim Thoriumzerfall entsteht laufend Radon ($Rn\ 220$), das mit der Spritze über den Stutzen der Gasinjektion in die Nebelkammer eingebracht werden kann.

Abb. 8 wurde von oben unmittelbar nach der Injektion von Radongas aufgenommen. Es sind „Gabelspuren“ zu erkennen, d.h. zwei Spuren, die von annähernd demselben Raumpunkt auszugehen scheinen. Sie sind für den Zerfall von Radongas charakteristisch [6]. Der Grund für diese Spuren ist in der Zerfallsreihe von Radon zu finden. Radon zerfällt unter Emission eines α -Teilchens mit einer Halbwertszeit von 56 s in Polonium ($Po\ 216$), das anschließend mit einer äußerst geringen Halbwertszeit von 0,15 s wiederum unter Emission eines α -Teilchens in das instabile $Pb\ 212$ zerfällt, wodurch letztlich „Gabelspuren“ entstehen.

Da bei Glühstrümpfen die Gefahr der Kontamination durch Inkorporation besteht, sollten Schüler nicht in direkten Kontakt mit

Glühstrümpfen kommen. Eingeschweißte Glühstrümpfe verhindern zwar eine Inkorporation, sind aber hier leider nicht geeignet. Beim Einkauf der Glühstrümpfe muss beachtet werden, dass mittlerweile auch nicht-radioaktive Glühstrümpfe hergestellt werden. Außerdem ist zu beachten, ob es bundeslandspezifische Bestimmungen im Umgang mit diesen leicht radioaktiven, frei verkäuflichen Glühstrümpfen gibt.

6 Einsatzmöglichkeiten

● Prinzipiell ist die Diffusionsnebelkammer in unterschiedlichen Unterrichtsphasen einsetzbar. Als „verblüffendes“ Phänomen ist die Nebelkammer hervorragend geeignet, in der Einstiegsphase einer Unterrichtsssequenz das Interesse für das Stoffgebiet „Kernphysik“ (Einstiegsmotivation) anzufachen. In der Regel werden einfach die Nebelspuren beobachtet, was sehr fesselnd sein kann. Unter Umständen werden schon in dieser Phase durch diese rein qualitative

Versuchsdurchführung nachhaltige Eindrücke vermittelt, was die Elaboration begünstigen könnte. Eine Nebelkammer „ist der eindrucksvollste Teilchendetektor für den Lernenden und zurzeit der einzige Kernstrahlungs-Bahndetektor, der es ermöglicht, auch breiteren Kreisen der Bevölkerung das verblüffende Geschehen des radioaktiven Zerfalls unmittelbar und augenscheinlich zugänglich zu machen.“ [1].

Allerdings ist die Beobachtung der magnetischen Ablenkung von α -Teilchen und die Bestimmung der Energie von β -Teilchen aus der Bahnkrümmung in einem magnetischen oder elektrischen Feld nicht möglich, da nur schlecht geeignete Felder erzeugt werden können. Weiterhin muss man bedenken, dass bei der hier beschriebenen Nebelkammer der relativ große Strom in den Peltiermodulen zu einem nicht vernachlässigbaren Magnetfeld führt, was bereits zu gebogenen Nebelspuren führen kann. Für eine derartige Auswertung ist eine mit einem Kühlaggregat betriebene Diffusions-Nebelkammer besser geeignet. Bringt man, wie im Abschnitt 5.3 erläutert, Radongas in die Kammer ein, kann zunächst eine hohe Aktivität beobachtet werden, die schnell abnimmt. So ist zunächst die Abnahme der Zerfälle qualitativ zu sehen. Zeichnet man zusätzlich die Nebelspuren des Radonzerfalls mit einer Videokamera auf und stellt z. B. im neuen Videoanalyseprogramm „measure Dynamics“ ein, dass man nur jedes 50-te oder 100-te Bild sehen will, sieht man beim Abspielen des Videos durch den so erzielten Zeitraffer schön die Abnahme der Aktivität. Die „Gesellschaft für Schwerionenforschung“ lässt Schüler im Rahmen eines Schülerlabors Nebelspuren von α - und β -Teilchen mit einer Webcam in einer sehr teuren Nebelkammer aufzeichnen (nur ein Bild alle fünf Sekunden) und dann die einzelnen Bilder (50 Stück) auswerten [6]. Aus der Anzahl der Radonzerfälle (≤ 30 pro Bild) wird anschließend die Halbwertszeit von Radon experimentell bestimmt. Schaut man in dem obigen Videofilm in „measure Dynamics“ beispielsweise nur jeden 100-ten Frame (= 4 s) an (nach einer Analyse sind die Frames bedienerfreundlich über eine Tabelle direkt anwählbar), können die Spuren ebenfalls per Hand gezählt werden und man erhält ein ähnliches Ergebnis (Die Zählfunktion der Software geht nur für einzelne Bilder, nicht für Videos [7]). Nachteilig ist, dass die Beobachtungsfläche der hier vorgestellten Nebelkammer kleiner ist,

so dass die Anzahl der Spuren pro Bild geringer ausfällt (< 20 pro Bild). In Anbetracht der großen Arbeit und der starken statistischen Streuungen ist eine derartige Auswertung für den normalen Unterricht nicht zu empfehlen.

Mit dem Videoanalyseprogramm „measure Dynamics“ ist auch das Ausmessen der Länge der Spuren einfach möglich [7]. Aus der gemessenen Spurlänge kann dann die Geschwindigkeit und die kinetische Energie von α -Teilchen bestimmt werden [6]. Die Reichweitenmessung von α -Teilchen sollte man „... grundsätzlich mit Nebelkammern vornehmen, weil sie gegenüber anderen Detektoren (Zählrohre) am unmittelbarsten und offensichtlichsten die Messergebnisse liefern“ [1].

7 | Vergleich mit der Wilsonkammer

● Vergleicht man die Eigenschaften einer Expansionsnebelkammer mit denen einer Diffusionsnebelkammer, fällt wohl am meisten die beachtliche Abweichung im Bereich der Sensitivität der Kammern auf. Die relativ kurze Beobachtungsdauer bei Expansionsnebelkammer ist offenkundig der größte Nachteil dieses Kammertyps. Folglich ist dieser Kammertyp für den Nachweis seltener Ereignisse, wie zum Beispiel dem Nulleffekt, gänzlich ungeeignet. Aus diesem Grund liegt dann auch in der dauerhaften Sensitivität der große Vorteil einer Diffusionsnebelkammer. Seltene Ereignisse, wie zum Beispiel die natürliche Radioaktivität der Luft und die Höhenstrahlung, können nur mit einer kontinuierlich arbeitenden Nebelkammer beobachtet werden.

Für die Verwendung im Unterricht ergibt sich in diesem Zusammenhang ein weiterer Vorzug dieses Kammertyps. Im Gegensatz zur Expansionsnebelkammer lässt sich eine Diffusionsnebelkammer mit dauerhafter Kühlung längere Zeit vor einer Unterrichtseinheit, in der die Kammer eingesetzt werden soll, in Betrieb nehmen. In dieser vorbereitenden Phase kann die Kammer optimal eingerichtet werden. Beim späteren Einsatz im Unterricht ist dann im Normalfall keine nennenswerte Neu- bzw. Nachjustierung nötig. Dadurch wird die Erfolgswahrscheinlichkeit des Versuchs im Vergleich zum Einsatz einer Expansionsnebelkammer beachtlich erhöht. Für die Arbeit mit relativ aktiven Strahlungsquellen ist dieser Kammertyp jedoch, wie bereits erwähnt, gänzlich ungeeignet.

8 | Erfahrungen mit der Selbstbaukammer

● Überall, wo die Nebelkammer bisher im Einsatz war, fand sie sehr großes Interesse – bei Schülern, Studenten und Lehrern. Es verblüffte z. B., dass schon der Nulleffekt genügt, um Bahns Spuren zu beobachten. Besonders schön sind Nebelkammeraufnahmen [8] von radioaktivem Gas, das von Glühstrümpfen freigesetzt wird (siehe Abb. 8) und von schwach radioaktiven Mineralien (siehe Abb. 6). Die Nebelkammer wurde bereits von einem Schüler der Jahrgangsstufe 13 im Rahmen einer Seminararbeit nachgebaut. Besonders erfreulich war, dass bereits der erste Versuch der Inbetriebnahme der fertig gestellten Kammer erfolgreich gewesen ist. Dadurch wurde gezeigt, dass ein Nachbau möglich ist. Seine Kammer hat sehr gut funktioniert. Weitere Nachbauten durch Schüler laufen gerade und bereichern hoffentlich bald den Physikunterricht.

Literatur

- [1] Gläser, Manfred: Die Nebelkammer im experimentellen Unterricht, Praxis Schriftenreihe Physik, Band 33, Aulis Verlag Deubner, Köln 1976.
- [2] Rapp, Thomas (Hrsg.): Rapp-Instruments: Nebelkammern. <http://www.rapp-instruments.de/index5.htm>
- [3] Höfling, Oskar; Mirow, Bernd; Becker, Gerhard: Physik: Lehrbuch für Unterricht und Selbststudium, 13. Auflage, Dümmler Verlag, Bonn 1981, S. 856-861
- [4] Paus, Hans J.: Physik: in Experimenten und Beispielen, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München 2002, S. 941-942
- [5] Backmund, Udo: Anleitung zum Selbstbau einer kontinuierlichen Diffusions-Nebelkammer, Staatsexamensarbeit 2007, www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/Nebelkammer.htm
- [6] Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH (Hrsg.): SchülerLabor: Station 8, Auswertung von Nebelkammerbildern, Darmstadt, www.gsi.de/documents/DOC-2005-Nov-177-1.pdf
- [7] Wilhelm, Thomas: Videoanalyse mit unterschiedlichen Darstellungsformen, in: Höttecke, D. (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDGP in Schwäbisch Gmünd 2008, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 28, Lit-Verlag, Münster
- [8] anschaulich unter www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/Nebelkammer.htm

Anschrift der Verfasser

StRef Udo Backmund, AR Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg; E-Mail: ub1979@web.de, wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de, www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm

3.4 Bildanalysen bei der Beugung am Gitter

Quelle:

WILHELM, T.: *Laserstrahlen mit der Nebelmaschine sichtbar machen* - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 59, Nr. 8, 2010, S. 14 - 16

Inhalt und Bezug zum Thema:

Um einen Laserstrahl in Luft im Physikunterricht sichtbar zu machen, ist der Einsatz einer Verdampfer-Nebelmaschine einfach und führt zu beeindruckenden Ergebnissen. Solche Nebelmaschinen sind von Bühnen, aus Discos und von privaten Partys bekannt und kosten ab 30 €. An Beispielen werden Anordnungen von Planspiegeln, das Sichtbarmachen von Schwingungen mit einem Drehspiegel, das Michelson-Interferometer und die Beugung an Spalten und am Gitter vorgestellt. Bei der Beugung am Gitter wird auch gezeigt, wie eine quantitative Auswertung mit einem Videoanalyseprogramm geschehen kann: Macht man ein Foto, kann man in einem Videoanalyseprogramm wie z.B. „Coach6“ oder „measure dynamics“ direkt die Winkel im Bild mit der Software sehr genau ausmessen.

Laserstrahlen mit der Nebelmaschine sichtbar machen

Th. Wilhelm

1. Ausgangslage

Laser wurden in den vergangenen Jahrzehnten immer preisgünstiger, und heute ist der Laserpointer schon ein bekanntes Alltagsgerät, der deshalb auch gerne im Physikunterricht eingesetzt wird. Allerdings gibt es hier das Problem, dass der Laserstrahl normalerweise nicht sichtbar ist, sondern nur sein Auftreffpunkt auf der Wand. Denn nur Licht, das ins Auge fällt, wird gesehen, während Licht, das am Auge vorbeigeht, unsichtbar ist.

Um einen Laserstrahl in einer Flüssigkeit sichtbar zu machen, nutzt man z.B. die Streuung durch die Fetttropfchen von wenig Milch im Wasser (oder von Salz oder Zucker im Wasser). In einem festen Körper kann man einen Laserstrahl sichtbar machen, indem man die Streuung von Gelatine oder Götterspeise verwendet [1]. In Luft

wird vor allem der streifende Lichteinfall eines Lichtfächers benutzt [2]. Dazu muss der Laserstrahl allerdings aufgeweitet werden.

Ein klassisches Vorgehen ist, den Laserstrahl mit dem Kreidestaub des Tafellapens sichtbar zu machen. Dies ist aber nicht nur ein staubiges, sondern ein ineffektives Vorgehen, denn leider hält sich der Staub nicht lange in der Luft. Dagegen ist der Einsatz einer Verdampfer-Nebelmaschine einfacher und führt zu besseren Ergebnissen. Bei den Schülerinnen und Schülern sind Nebelmaschinen außerdem positiv besetzt, da sie diese aus Discos, Konzerten und Partys kennen. Viele Erfahrungen zeigen, dass es Lehramtsstudierende lieben, eine Nebelmaschine einzusetzen und deren Einsatz für didaktisch sinnvoll halten.

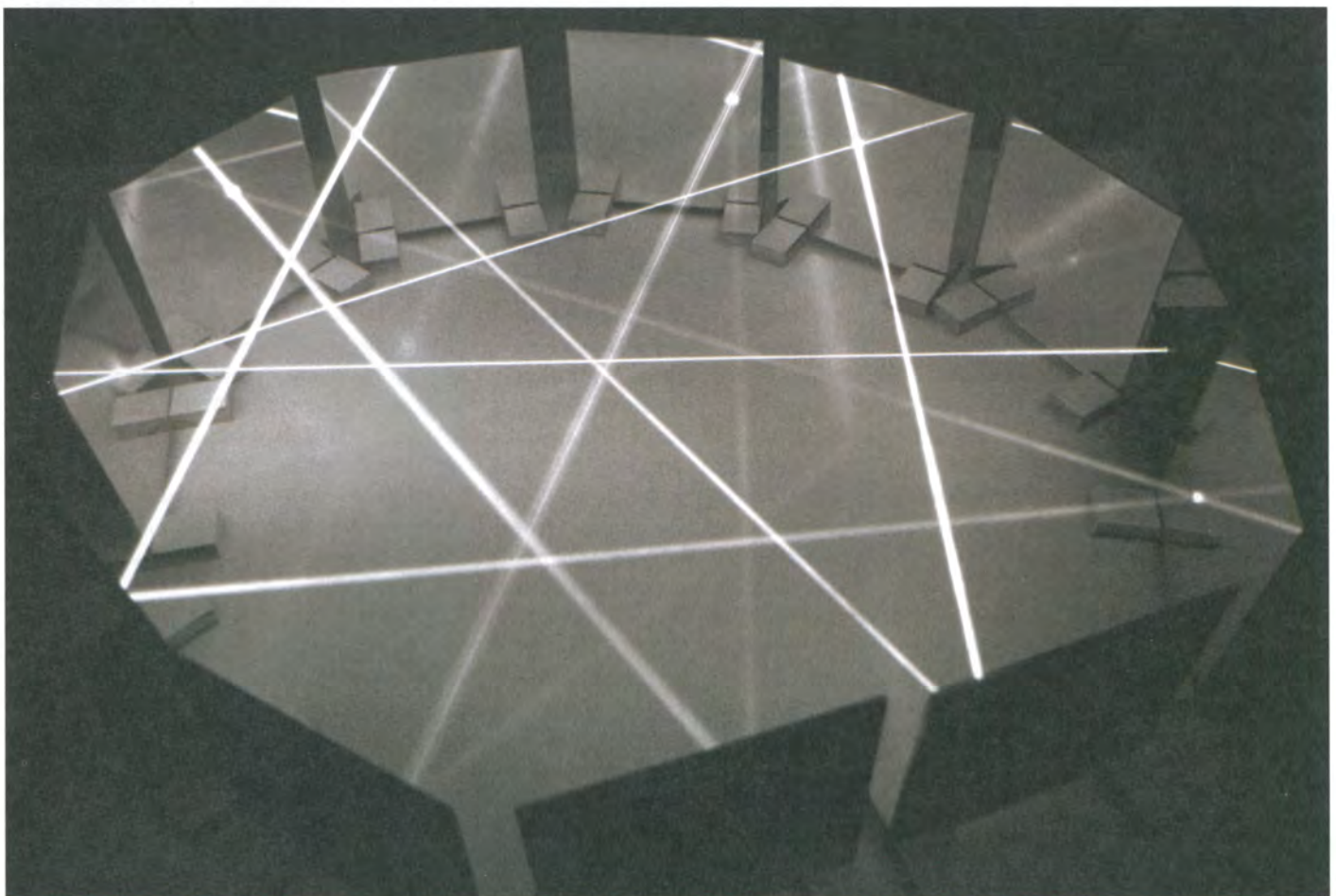
Da die Tröpfchengröße bei diesem Nebel größer als die Wellenlänge des Lichts ist (Mie-Streuung), wird das Laserlicht nicht gleichmäßig in alle Richtungen gestreut, was aber unerheblich ist. Von Vorteil ist allerdings ein dunkler Hintergrund oder ein leichtes Abdunkeln des Experimentierraumes.

Kiupel hat diese Methode bereits genutzt, um dreidimensional im Raum zu untersuchen, wie weiße Lichtbündel gebrochen und reflektiert werden und er hat sich damit Linsen und Dispersion angeschaut [3]. Außerdem kann man eine solche Nebelmaschine auch für einen Windkanal nutzen [4].

2. Nebelmaschinen

Heutige Nebelmaschinen, wie sie auf Bühnen, in Discos und auf privaten Partys ver-

Abb. 1: Reflexionen eines Laserstrahles an vielen Spiegelkacheln



wendet werden, erzeugen einen Nebel, indem sie ein Nebelfluid verdampfen, das hauptsächlich aus destilliertem Wasser und dem farb- und geruchlosem Propylen-glycol besteht. Dabei geht es darum, die Wirkung von Scheinwerfern und Laserstrahlen zu erhöhen.

Bei den heute üblichen Verdampfer-Nebelmaschinen wird das Fluid in ein Heizelement gepumpt, in dem es verdampft wird. Der Glykoldampf wird dann durch einen Luftstrom in feine Tröpfchen kondensiert und mit diesem durch eine Düse als Nebel ausgestoßen.

Für physikalische Versuche reichen bereits kleine und einfache Geräte, die es ab 25 € [5] zu kaufen gibt. Da anders als in der Disco das Gerät nicht fest an die Decke montiert wird, ist eine Fernbedienung nicht notwendig.

Lange Zeit wurden zur Nebelerzeugung auch Trockeneis, also gefrorenes CO_2 , und heißes Wasser verwendet. Da Trockeneis heute aber kaum noch zu bekommen ist, gibt es diese Art der Nebelerzeugung kaum noch. Für unsere Versuche weniger geeignet sind außerdem sogenannte Hazer [wie in 4], die einen schwächeren Nebel erzeugen, indem sie Wasser rein mechanisch mit Ultraschall zerstäuben. Bekannt ist dieses Prinzip von den Nebelbrunnen, die als dekorative Luftbefeuchter verwendet werden.

3. Beispiele

Den Nebel kann man nun nicht nur verwenden, um zu zeigen, dass sich das Laserlicht im homogenen Medium geradlinig ausbreitet. Besonders sinnvoll ist es dort, wo das Licht seine Richtung ändert. Im Folgenden wird anhand von vier Beispielen gezeigt, wie Laserstrahlen sehr eindrucksvoll mit Hilfe einer Nebelmaschine¹ im Unterricht gezeigt werden können.

3.1 Spiegelanordnungen

Legt man einen Spiegel auf den Versuchstisch und bläst darüber den Nebel, kann man das Reflexionsgesetz zeigen. Außerdem wird hier deutlich, dass einfallender und reflektierter Strahl in einer Ebene liegen, was beim streifenden Lichteinfall nicht wirklich gezeigt werden kann. Um auch das Lot sichtbar zu machen, klebt man einen Trinkhalm auf den Spiegel.

Interessanter sind Anordnungen mit mehreren Spiegeln. So kann man sichtbar machen, dass bei einem Tripelspiegel der Laserstrahl die Anordnung wieder parallel

¹ Verwendet wurde die Nebelmaschine I-180 für 50 € (Best.-Nr.: 590812 - 62 bei Conrad.de).

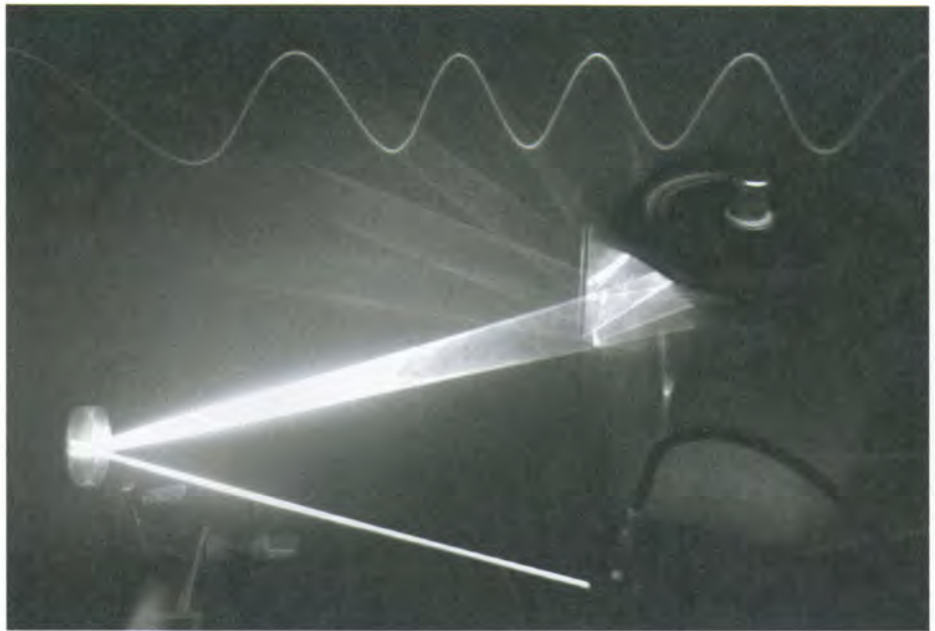


Abb. 2: Schwingung einer Blattfeder mit einem Drehspiegel sichtbar gemacht

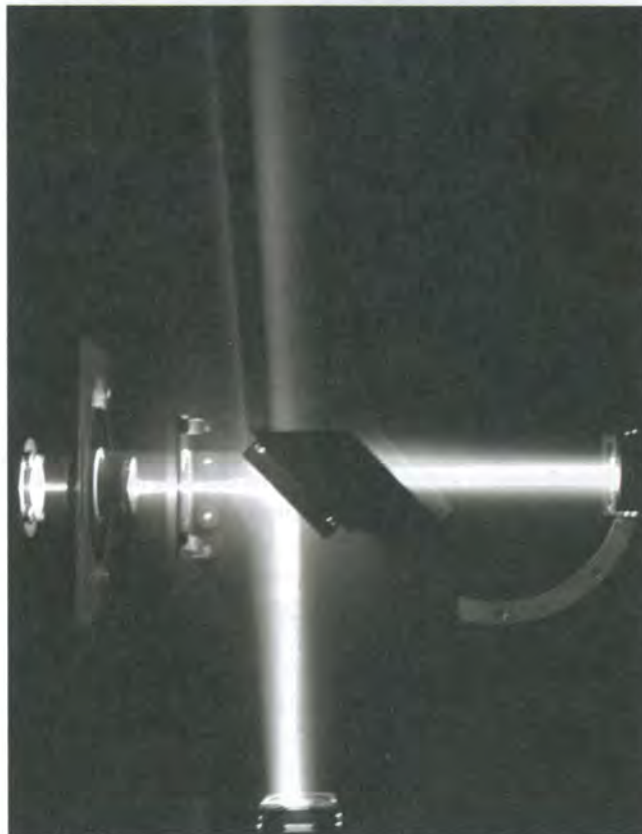


Abb. 3: Das Michelson-Interferometer (Der Laser steht links)

zum einfallenden Strahl verlässt – und das nicht nur in einer Ebene, sondern im Raum.

In offeneren Unterrichtsphasen können Schüler auch mit Spiegelkacheln lange Lichtwege mit vielen Reflexionen aufbauen. Die vielen im Nebel sichtbaren Laserstrahlen faszinieren dabei immer die Beobachter (siehe Abb. 1). Geschickt ist es, die Spiegelkacheln eng nebeneinander in einem Oval aufzustellen, so dass der Nebel, den man hinein füllt, nicht so leicht entweichen kann.

3.2 Schwingungen mit Drehspiegel

Die Schwingung einer Blattfeder oder eines Lautsprechers kann man mit einem Laserstrahl und einem Drehspiegel als Liniengraph an der Wand sichtbar machen. Dabei erscheint normalerweise nur eine Sinuslinie an der Wand. Nebelt man den Raum zwischen Laser, Blattfeder (mit Spiegel), Drehspiegel und Wand ein, dann sieht man deutlich, wie der dünne Laserstrahl durch die Blattfeder in eine Richtung (oben – unten) auseinander gezogen wird (siehe Abb. 2). Außerdem sieht man bei

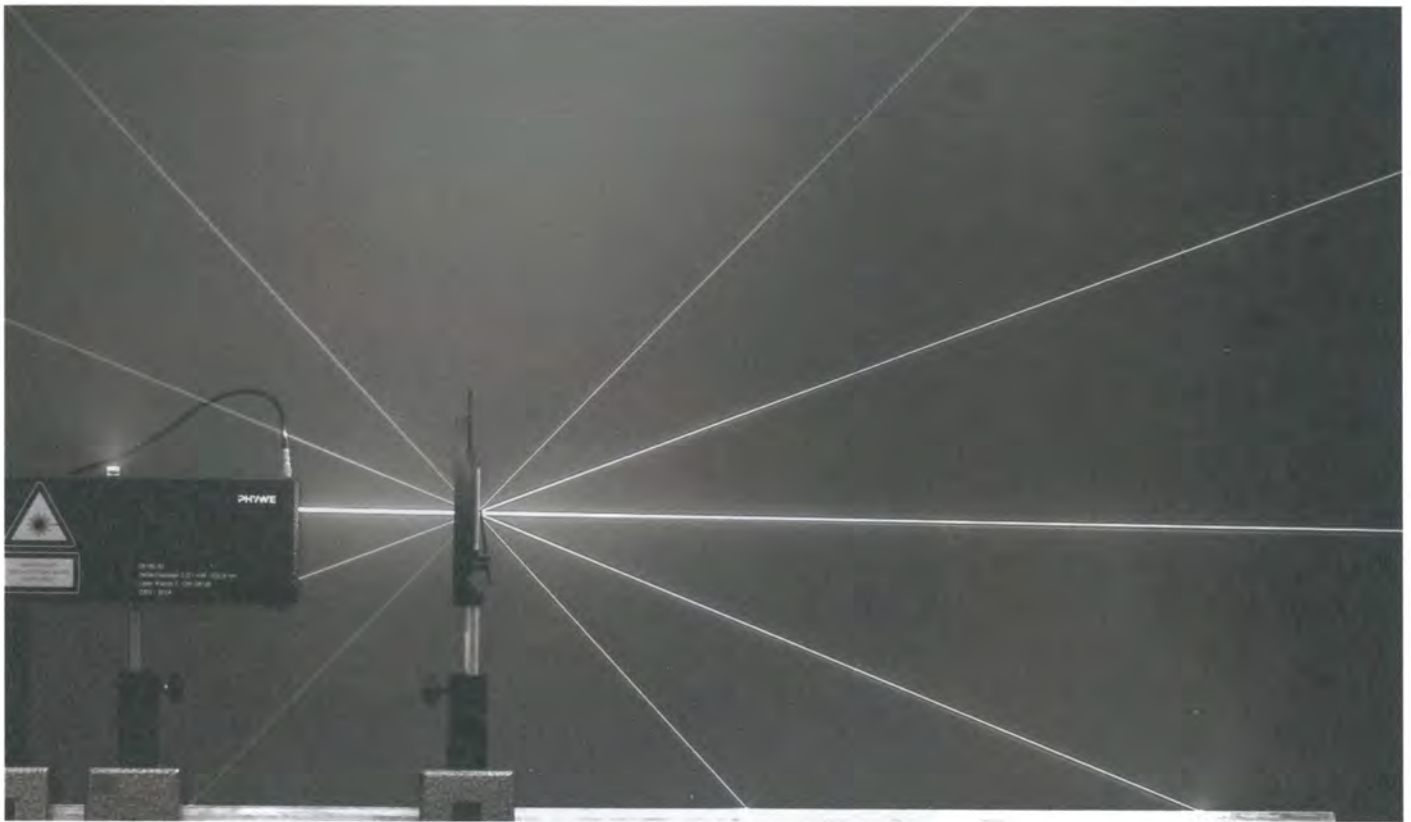


Abb. 4: Interferenz am Gitter (570 Linien pro mm)

langsamem Lauf des Drehspiegels wie dieser den Laserstrahl mit der Zeit in die andere Richtung (rechts) ablenkt. Das Sichtbarmachen des Lichtweges kann also helfen, den Versuchsaufbau zu verstehen.

3.3 Michelson-Interferometer

Das Michelson-Interferometer kann in der Sekundarstufe II beim Thema Interferenz behandelt werden. Seine eigentliche Bedeutung hat es aber als historischer Versuch bei den Postulaten der Speziellen Relativitätstheorie. Hier ist es wichtig zu verstehen, welche Wege der Laserstrahl nehmen kann. Auch hier hilft der Nebel einer Nebelmaschine (siehe Abb. 3). Dabei fällt auf, dass es sich entgegen üblicher Zeichnungen nicht um dünne Laserstrahlen handelt, sondern um Lichtbündel, da der Laserstrahl durch eine Kugellinse (Sammellinse sehr kleiner Brennweite) aufgeweitet wird.

3.4 Beugung an Spalten und am Gitter

Bei der Beugung am Einfach- und Doppelspalt sowie am Gitter wird in der Regel im Experiment nur das Bild auf einem Schirm betrachtet. Bei der Berechnung der Bedingung für Maxima wird dann aber deutlich, dass nur die Richtung wichtig ist und irgendwo in großer Entfernung betrachtet wird. Wird der Raum hinter (und vor) dem Gitter eingenebelt, wird diese Richtung sichtbar (siehe Abb. 4). Das Ergebnis ist zu-

mindest beeindruckender als Punkte auf einem Schirm. Da in Abbildung 4 eine Gitterfolie zwischen Schutzglasscheiben verwendet wurde, gibt es auch Reflexionen in den Raum vor dem Gitter. An dem ungebeugten zurückreflektierten Strahl sieht man im Nebel auch einfach, ob das Gitter ganz senkrecht zum einfallenden Strahl steht. Eine leichte Verkipfung um den Winkel β ist unbedingt zu vermeiden, denn dann gilt: $g(\sin\alpha_k \pm \sin\beta) = k\lambda$.

Macht man ein Foto wie in Abbildung 4, kann man in einem Videoanalyseprogramm wie z. B. „Coach6“ oder „measure dynamics“ [6] auch direkt die Winkel im Bild mit der Software sehr genau ausmessen. Mit dem Foto aus Abb. 4 (10 MPixel, Brennweite 33 mm, Entfernung ca. 1,65 cm) erhält man $\alpha_1 = 21,17^\circ \pm 0,03^\circ$ und damit $\lambda = 633,6$ nm. D. h. die verwendete Wellenlänge 632,8 nm wurde recht genau bestimmt und sogar genauer als bei einer Abstandsmessung der Leuchtpunkte auf dem Schirm.

4. Fazit

Mit Nebel kann der Verlauf von Laserstrahlen deutlich sichtbar gemacht werden und so können klassische Versuche mit wenig Aufwand aufgewertet werden. Die günstigen Heim-Nebelmaschinen sind damit eine preisgünstige Möglichkeit, Versuche mit Laserstrahlen durchschaubarer zu machen. Einfache Handhabung und gute Versuchsergebnisse sprechen für den Einsatz. ■

Literatur

- [1] Geßner, T.; Wilhelm, T.: Der Regensensor im Unterricht - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 57, Nr. 1, 2008, S. 24 - 31
- [2] Wilhelm, T.: Brechung mit der Laserwasserwaage - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 58, Nr. 1, 2009, S. 5 - 8
- [3] Kiupel, M.: 3D-Optik mit der Nebelmaschine - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 47, Nr. 2, 1998, S. 42 - 43
- [4] Priemer, B.; Schmidt, T.: Ein Nebelwindkanal im Selbstbau - Einfache Erzeugung von Stromlinien und Messung von Strömungsgeschwindigkeiten um verschiedene Objekte - In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht, Nr. 4, 2008, S. 217 - 223
- [5] Z. B. Mini-Nebelmaschine eurolite n-10 (25 €) bei www.voelkner.de oder American DJ Mini Fog 400 Nebelmaschine (30 €) bei www.prolighting.de oder Stairville SF-80 Nebelmaschine (35 €) bei www.thomann.de
- [6] Mück, T.; Wilhelm, T.: Neue Möglichkeiten der Videoanalyse am Beispiel von Sportbewegungen - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 58, Nr. 7, 2009, 19 - 27

Anschrift des Verfassers:

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

4. Zweidimensionaler Mechanikunterricht mit Betonung der Richtung der Größen

4.1 Probleme mit gerichteten Größen

Quelle:

WILHELM, T.: *Vektorverständnis und vektorielles Kinematikverständnis von Studienanfängern* – In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A.; GRÖTZEBAUCH, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik - Regensburg 2007*, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2007, ISBN 978-3-86541-255-3 – Und in: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A.; GRÖTZEBAUCH, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik - Berlin 2008*, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2008, ISBN 978-3-86541-317-8

Inhalt und Bezug zum Thema:

Da vektorielle Größen in der Physik eine wichtige Rolle spielen, brauchen Studenten gewisse Fähigkeiten im Umgang mit Vektoren. An der Universität Würzburg wurde in einem Mathematikvorkurs vor Beginn der Vorlesungszeit untersucht, inwieweit Physikstudierende des ersten Semesters grundlegende Fähigkeiten aus der Schule mitbringen. Dazu mussten sie vor Studienbeginn einerseits mathematische Aufgaben und Aufgaben mit physikalischem Kontext aus der Statik bearbeiten. Andererseits wurden Aufgaben zum vektoriellen Verständnis der Beschleunigung gestellt.

Auch diese Untersuchung zeigt erneut das Scheitern des Konzeptes des herkömmlichen Physikunterrichts, die Kinematik und Dynamik an eindimensionalen Bewegungen einzuführen und später auf mehrere Dimensionen zu erweitern. Wie bereits seit Jahrzehnten von vielen Didaktikern gefordert, ist es nötig, mit zweidimensionalen Bewegungen zu beginnen. Dazu braucht man aber ein Messwerterfassungssystem für zweidimensionale Bewegungen, das nicht die beiden Komponenten von Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung getrennt angibt, sondern diese Größen als Pfeile anzeigt. Dies ist in der Videoanalysesoftware „measure dynamics“ möglich.

Vektorverständnis und vektorielles Kinematikverständnis von Studienanfängern

Thomas Wilhelm

Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Am Hubland, 97074 Würzburg

Kurzfassung

Da vektorielle Größen in der Physik eine wichtige Rolle spielen, brauchen Studenten gewisse Fähigkeiten im Umgang mit Vektoren. An der Universität Würzburg wurde in einem Mathematikvorkurs vor Beginn der Vorlesungszeit untersucht, inwieweit Physikstudenten des ersten Semesters grundlegende Fähigkeiten aus der Schule mitbringen. Dazu mussten sie vor Studienbeginn einerseits mathematische Aufgaben und Aufgaben mit physikalischem Kontext aus der Statik bearbeiten. Andererseits wurden Aufgaben zum vektoriellen Verständnis der Beschleunigung gestellt. Im Vergleich mit amerikanischen Universitäts-Studenten haben die deutschen Studienanfänger zwar bessere mathematische Fähigkeiten im Umgang mit Vektoren, dennoch zeigen sich verschiedene Defizite. Die Ergebnisse ermöglichen Rückschlüsse auf Schwächen des schulischen Mathematik- und Physikunterrichtes.

1. Fragestellung

Vektorielle Größen spielen in der Physik eine wichtige Rolle und es ist stets relevant, ob es sich bei einer Größe um eine skalare oder vektorielle Größe handelt. Insbesondere in der Mechanik, mit der das Physikstudium üblicherweise beginnt, ist ein angemessenes Verständnis von Vektoren nötig. Reduziert man die Behandlung vektorieller Größen auf die Betrachtung des eindimensionalen Falls, führt dies zu gravierenden Fehlvorstellungen. Für das Physikstudium ist es deshalb wünschenswert, dass Studenten bereits hinreichende Fähigkeiten im Umgang mit Vektoren mitbringen. Die Tatsache, dass neuere Physik-Hochschulbücher [1-3] dieses Thema jedoch erst in einem Vorkapitel behandeln, macht deutlich, dass hier häufig Defizite auftreten.

Auch in den Übungen zur „Einführung in die Physik I“ für Erstsemester an der Universität Würzburg wird die Erfahrung gemacht, dass bei mathematischen Vorkenntnissen viele Defizite vorhanden sind. Dabei besteht der Eindruck, dass diese Defizite über die Jahre eher größer wurden. Insbesondere mit Vektoren und vektoriellen Größen haben Studienanfänger Schwierigkeiten, so fehlt das Bewusstsein für den vektoriellen Charakter verschiedener physikalischer Größen, so dass häufig nicht zwischen vektoriellen und skalaren Größen unterschieden wird. Eine einfache Klausuraufgabe wie „Kann sich der Impuls eines Körpers ändern, ohne dass sich die Energie ändert?“ wird deshalb von vielen falsch beantwortet.

Zudem besteht der Eindruck, dass die Erstsemester sehr auf rechnerische Lösungen fixiert sind und graphische Lösungen ablehnen. Entsprechend scheint z.T. eine Anschauung von Vektoren als Pfeile im Raum wenig ausgebildet zu sein.

Aus diesen Gründen sollte mit einem Multiple-Choice-Test Aspekte eines Vektorverständnisses bei Studienanfängern untersucht werden, wobei weniger an rechnerische Leistungen, sondern an zeichnerische Fähigkeiten und die Vektoraddition gedacht wurde. Diese sollte in einem abstrakten Zusammenhang und bei Aufgaben zur Kraft in der Statik untersucht werden. Ein weiterer Punkt war, das vektorielle Verständnis der Größe „Beschleunigung“ zu ermitteln. Die Ergebnisse sollen in die Gestaltung zukünftiger Mathematik-Vorkurse und in die Vorlesung „Einführung in die Physik I“ einfließen.

2. Der Fragebogen

Um die Art der gewählten Aufgaben zu beschreiben, kann die Klassifizierung von Vektoraufgaben nach BOCZIANOWSKI und SCHÖN verwendet werden [4]: Bei den Aufgaben ist bei Vektoren nicht an den abstrakten mathematischen Vektorraum (n -Tupel) gedacht und weniger an eine geometrisch-arithmetische Pfeilkasse (Vektoren in Spaltennotation mit geometrischer Repräsentation), sondern an Pfeile im Sinne einer geometrischen Pfeilkasse, bei denen Rechenoperationen geometrisch durchgeführt werden (z.B. Kraftpfeile). Vom Schulunterricht erwarten wir, dass die Aufgaben als Reproduktion oder als Anwendung von Unterrichtsinhalten gesehen werden. Neben abstrakt mathematischen Kontexten sollten auch die Kontexte „Beschleunigung“ und „Kraft“ in einem z.T. lebensweltlichen Kontext einbezogen werden.

Damit die Ergebnisse auch mit anderen Untersuchungen verglichen werden können, wurden für diese Untersuchung keine eigenen Aufgaben entworfen, sondern nur Aufgaben aus der Literatur [5-10] entnommen. Welches Item von welchen Autoren

übernommen wurde, sieht man in Tab. 1 und Tab. 2. Der Test befindet sich als pdf auf dieser CD.

Autor- en Item	NGUYEN, MELTZER [5]	KNIGHT [6]	FLORES et al. [7]	REUSCH (unveröf- fentlicht)
M 1.	1.			
M 2.	2.			
M 3.		2.		
M 4.		3.		
M 5.		4.		
M 6.		7.		
M 7.		8.		
M 8.		9.		
M 9.		5.		
M 10.	4.			
M 11.	3.			
M 12.	5.			
M 13.	7.			
M 14.		6.		
M 15.			1.	
M 16.	6.			
M 17.			2.	
M 18.			5.	
M 19.				x

Tab. 1: Quelle der Items von Teil 1 des Tests (Mathematik und Statik)

Autor- en Item	FLORES et al. [7]	HESTENES, WELLS [8]	LABUDDE et al. [9]	WILHELM [10]
P 1.			1.5	
P 2.				6.4.3
P 3.				6.4.3
P 4.			2.2	
P 5.	7.			
P 6.	6.			
P 7.			2.1	
P 8.		4.		
P 9.		5.		
P 10.		6.		
P 11.				6.4.1
P 12.	9.			
P 13.	10.			
P 14.		7.		
P 15.		8.		

Tab. 2: Quelle der Items von Teil 2 des Tests (Kinematik und Dynamik)

3. Die Studentengruppen

An der Universität Würzburg gibt es im Oktober kurz vor Vorlesungsbeginn für die Physikstudenten des ersten Semesters einen einwöchigen, ganztägigen Mathematikvorkurs, in dem für das Studium wichtige Inhalte aus der Schulmathematik wiederholt und geübt werden bzw. bei geringen Vorkenntnissen vermittelt werden. Jeder Tag besteht aus einer Vorlesung und Übungen in Kleingruppen. Im Rahmen dieses Mathematikvorkurses war es möglich,

den Erstsemesterstudenten vor der Behandlung dieses Themas und vor dem eigentlichen Studienbeginn die Testaufgaben zu stellen, so dass Rückschlüsse auf den Schulunterricht möglich sind. Da die zur Verfügung stehende Zeit begrenzt war, wurde im Jahr 2005 der erste Teil und im Jahr 2006 der zweite Teil zur Bearbeitung gestellt. Die Werte aus dem Jahr 2006 werden in diesem Abschnitt in Klammern hinter den Werten aus dem Jahr 2005 angegeben.

An dem Test im Jahr 2005 (2006) nahmen 239 (251) Studenten teil, von denen 47 % (41 %) den Studiengang Physik-Diplom, 36 % (34 %) den Studiengang Nanostrukturtechnik-Diplom (Ingenieursstudiengang mit Schwerpunkt Festkörperphysik), 13 % (16 %) den Studiengang Lehramt Gymnasium und 4 % (6 %) den Studiengang Lehramt Unterrichtsfach (Grundschule, Hauptschule und vor allem Realschule) gewählt hatten. Von den Studenten waren 82 % (76 %) männlich und 18 % (24 %) weiblich.

63 % (57 %) aller Studenten hatten in ihrer Schulzeit einen Physik-Leistungskurs, 23 % (22 %) wenigstens einen Grundkurs bis zum Abitur. 5 % (10 %) hatten nur in der zwölften Jahrgangsstufe einen Grundkurs in Physik und 5 % (8 %) hatten nur bis zur elften Jahrgangsstufe Physikunterricht. 64 % (67 %) hatten einen Mathematik-Leistungskurs und 31 % (26 %) einen Mathematik-Grundkurs bis zum Abitur. 52 % (54 %) hatten im selben Jahr ihr Abitur abgelegt, während 39 % (36 %) dies bereits ein Jahr vorher getan hatten. Wenn die Abiturprüfung $x = n + 0,5$ Jahre vor Studienbeginn ist, lag die Abiturprüfung im Durchschnitt $\bar{x} = 1,3$ Jahre zurück. 57 % (64 %) der Studenten haben ihr Abitur in Bayern, 12 % (10 %) in Baden-Württemberg und 31 % (26 %) in anderen Bundesländern abgelegt.

4. Ergebnisse des Mathematik-/Statikteils (Teil 1)

Der Schwerpunkt des ersten Tests lag darin, abzufragen, ob die Studenten Vektoren graphisch addieren und subtrahieren können und dies von der Addition bzw. Subtraktion der Beträge unterscheiden können. Vorher wurden noch einige andere Fähigkeiten nur kurz geprüft.

In Bayern hätten die Studenten in der Mittelstufe Verschiebungspfeile und Vektoren einschließlich der Koordinatenschreibweise kennen lernen sollen, sowie die graphische und rechnerische Addition und Subtraktion. Dem Thema wird jedoch von Mathematiklehrern häufig nur wenig Bedeutung beigemessen und im neuen Gymnasiallehrplan fehlt es völlig. In der Oberstufe werden in Bayern außerdem alle Schüler in analytischer Geometrie unterrichtet.

Für den Test bekamen die Studienanfänger 40 Minuten Zeit. Bei einer anschließenden Abstimmung per Handzeichen gaben mindestens 95 % an, dass die Zeit ausreichend war. Bei dieser Gelegenheit gaben auch ca. 80 - 90 % an, dass sie die verlangten Inhalte in der Schule ausführlich behandelt hätten. Von diesen Studenten gaben wiederum alle an, dass dies im Mathematikunterricht geschah und ca. 10 - 20 %

gaben zusätzlich den Physikunterricht an. Die Abstimmung zwischen dem Mathematik- und Physikunterricht schätzten nur ca. 5 % als gut, aber ca. 50 % als schlecht ein. Ein gutes Drittel gab an, dass sie Probleme mit verwendeten Bezeichnungen bzw. Begriffen hatten, obwohl ihnen der Inhalt klar war.

4.1 Ergebnisse Vektoren allgemein

Beim ersten Item sollten die Studienanfänger angeben, welche gezeichneten Vektoren den gleichen Betrag haben, was von 86 % vollständig richtig gelöst wurde. Beim zweiten Item sollten Vektoren gesucht werden, die die gleiche Richtung wie ein vorgegebener Vektor haben. Dies wurde allerdings nur von 78 % richtig gelöst. 10 % gaben überraschenderweise außer dem richtigen Vektor noch denjenigen Vektor an, der genau in die entgegengesetzte Richtung zeigte. Es wurde sogar mehrfach dazugeschrieben, dieser hätte dieselbe Richtung, aber entgegengesetzte Orientierung.

Sind $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ die Einheitsvektoren eines kartesischen Koordinatensystems, so wird in der Physik ein Vektor häufig als Summe seiner Komponenten angegeben: $\vec{a} = a_1\vec{e}_x + a_2\vec{e}_y + a_3\vec{e}_z$. In der Schule werden dagegen üblicherweise die Koordinaten in einer

Spalte angegeben: $\vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}$ (Koordinatenschreib-

weise). Insofern war es ungünstig, beim dritten Item nach der „Komponentenform“ eines gezeichneten Vektors zu fragen bzw. bei weiteren Items Vektoren in der Komponentenschreibweise (Summe) statt der Koordinatenschreibweise (Spalte) anzugeben. Bei der Frage nach der Komponentenform gaben so 73 % den Vektor nur in Spaltenform an, 6 % nur als Summe der Komponenten und 8 % beides, so dass insgesamt 87 % eine richtige Lösung hatten.

War ein Vektor in einem zweidimensionalen Koordinatensystem gezeichnet, konnten 92 % dessen Betrag und 77 % den Winkel zwischen Vektor und x-Achse berechnen. War der Vektor dagegen in der Komponentenschreibweise (Summe) angegeben, fielen diese Werte auf 78 % bzw. 54 % ab, was die Unvertrautheit mit dieser Schreibweise zeigt.

91 % gaben an, in der Schule das Skalarprodukt kennen gelernt zu haben, während dies 7 % verneinten. Es gibt zwei Möglichkeiten, ein Skalarprodukt zu berechnen: Als Summe der Produkte der Koordinaten oder als Produkt von den Beträgen und dem Kosinus des Zwischenwinkels. Waren die beiden Vektoren gezeichnet (Winkel 60°), konnten dennoch nur 41 % das Skalarprodukt berechnen. 60 % von diesen gingen den einfachen Weg über den Kosinus, während 40 % von diesen zuerst umständlich die Koordinaten ermittelten. Waren die Vektoren jedoch mit ihren Komponenten angegeben, konnten nur 35 % das Skalarprodukt berechnen. Hier ist anzunehmen, dass die Koordinatenschreibweise ein etwas besseres Ergebnis gebracht hätte.

Nur 74 % gaben weiterhin an, dass sie das „Kreuzprodukt“ $\vec{A} \times \vec{B}$ zweier Vektoren $\vec{A}$ und $\vec{B}$ in der Schule kennen gelernt haben, während 24 % das verneinten. Der in der Schule übliche Begriff ist allerdings auch „Vektorprodukt“. Nur 17 % haben den richtigen Betrag angegeben und nur einer (0,4 %) die richtige Richtung. Es gibt zwei Möglichkeiten, ein Kreuzprodukt zu berechnen: Entweder mit Hilfe einer Formel für zwei Vektoren in einem dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem oder den Betrag als Produkt von den Beträgen und dem Sinus des Zwischenwinkels (= Fläche der von den Vektoren aufgespannten Parallelogramms) und die Richtung mit Hilfe der Drei-Finger-Regel der rechten Hand. Für die Physik ist eine anschauliche Lösung über den Flächeninhalt und die Drei-Finger-Regel viel sinnvoller als eine abstrakte Formel, die aber von den Studierenden häufiger verwendet wird: 11 % der Studienanfänger kamen mit dem Sinus (Flächeninhalt) zum richtigen Betrag. 15 % versuchten sich an die Formel mit den Koordinaten der Vektoren zu erinnern bzw. diese anzuwenden, was nur bei zwei Fünftel zum richtigen Betrag (6 % von allen), aber nie zur richtigen Richtung führte.

Im Vergleich mit den Ergebnissen von amerikanischen Studienanfänger (Tab. 3) sind die deutschen Physik-Studienanfänger zwar deutlich besser. Bedenkt man aber, dass die verlangten Fähigkeiten in Physik-Einführungsvorlesungen vorausgesetzt werden, zeigt sich doch die Notwendigkeit eines Mathematikvorkurses. Insbesondere kann man feststellen, dass der Schulmathematikunterricht bei dem für die Physik wichtigen Skalar- und Vektorprodukt keine ausreichenden Kompetenzen vermittelt.

Studien- Item	deutsche Studien- anfänger	amerikani- sche Studien- anfänger Uni	amerikani- sche Zweit- semester Uni
1	86 %	63 % / 83 %	79 % / 87 %
2	78 %	55 % / 71 %	63 % / 77 %
3	87 %	43 %	-
4 Betrag	92 %	38 %	-
4 Winkel	77 %	16 %	-
5 Betrag	78 %	27 %	-
5 Winkel	54 %	11 %	-
6	35 %	10 %	-
7	41 %	3 %	-
8 Betrag	17 %	-	-
8 Rich- tung	0,4 %	1 %	-

Tab. 3: Vergleich der Ergebnisse des allgemeinen Vektorteils: Deutsche Studienanfänger in Physik und amerikanische Universitäts-Studenten verschiedener naturwissenschaftlicher Studiengänge (zwei Werte pro Feld bei algebra-based und calculus-based Kursen)

4.2 Ergebnisse Vektoraddition und -subtraktion

Insgesamt wurden sechs Aufgaben zur graphischen Addition und eine zur Komponentenaddition ge-

stellt, die erfreulicherweise jeweils von 90 % bis 96 % richtig gelöst wurden (Tab. 4). Bedenkt man aber, dass schon Unterstufenschüler dies nach einem entsprechenden Unterricht können, hätte man sich hier noch bessere Ergebnisse erwartet. Ein wenig schlechter sehen die Ergebnisse aus, wenn Vektoren subtrahiert (15.cd) werden sollen (86 %) bzw. wenn man es mit einer Subtraktion lösen könnte (Finde $\vec{B}$, so dass $\vec{A} + \vec{B} = \vec{R}$) (85 %).

Ein Vergleich mit amerikanischen Testergebnissen (Tab. 4) ergibt, dass die deutschen Studienanfänger nicht nur deutlich besser als amerikanische Studienanfänger sind, sondern sogar besser als die amerikanischen Universitäts-Studenten nach dem ersten Semester, in dem in der Mechanik mit Vektoren operiert wird. Selbst nach veränderten Erstsemesterveranstaltungen, in denen mehr Wert auf Vektoren gelegt wurde [7, S. 461], sind die amerikanischen Studenten nicht besser.

Item	Studienanfänger D	Studienanfänger USA (algebra/calculus)	Zweitsemester USA (algebra/calculus)	nach tradition. Vorlesung, USA	nach veränderter Vorlesung 2 Unis, USA
9	93 %	49 %	-	-	-
10	94 %	58 % / 84 %	73 % / 92 %	-	-
11	95 %	83 % / 91 %	90 % / 96 %	-	-
12	93 %	22 % / 58 %	44 % / 73 %	-	-
13	96 %	32 % / 57 %	48 % / 68 %	-	-
14	90 %	55 %	-	-	-
15 a	95 %	-	-	50 %	75 % / 95 %
15 b	92 %	-	-	30 %	60 % / 85 %
15 c	86 %	-	-	60 %	80 % / 90 %
15 d	74 %	-	-	25 %	50 % / 70 %
16	85 %	18 % / 54 %	35 % / 68 %	-	-

Tab. 4: Vergleich der Ergebnisse zur Vektoraddition und Vektorsubtraktion: Deutsche Studienanfänger in Physik und amerikanische Universitäts-Studenten verschiedener naturwissenschaftlicher Studiengänge

4.3 Ergebnisse zu Aufgaben aus der Statik

Schließlich wurden im ersten Testteil noch wenige Items mit einem Kontext aus der Statik gestellt, die schlechter als beim abstrakt mathematischen Kontext bearbeitet wurden. Beim sehr einfachen Item 19 (84 % bzw. 80 % richtig) könnte dies darin liegen, dass ein paar Studenten für dieses Item keine Zeit mehr hatten.

Das Item 17 (64 % richtig) war ein wenig anspruchsvoller als die mathematischen Items. Beim Item 18 (29 % richtig), liegt aber sicher ein anderer Effekt vor: Da die Aufgabe sehr alltagsnah ist, ist davon auszugehen, dass die Studierenden nicht ihr mathematisches Vektorwissen heranzogen, sondern auf Alltagswissen zurückgriffen. Die falsche Lösung war hier zu attraktiv (Gewichtskraft teilt sich auf zwei Seile auf, die allerdings schräg laufen). Dennoch schneiden die deutschen Studienanfänger im

Vergleich zu amerikanischen Ergebnissen gut ab (Tab. 5).

Item	Studienanfänger D	nach traditioneller Vorlesung Uni, USA	nach veränderter Vorlesung, 2 Unis, USA
17	64 %	-	50 % / 55 %
18	29 %	2 %	20 % / 45 %

Tab. 5: Vergleich der Ergebnisse zur Statik mit amerikanischen Universitäts-Studenten

4.4. Faktorenanalyse und Reliabilität

Für die Analyse wurden die Items 4, 5 und 8 in je zwei Items zerlegt (Betrag und Richtung) und ebenso die Items 13, 15a, 15c, 17 und 18 (Aufgabe und Erklärung). Da das Item „8 Richtung“ nicht weiter betrachtet werden musste, ergaben sich 30 Items, die dichotom ausgewertet wurden.

Der Scree-Test von CATELL [11] lieferte drei Faktoren, so dass eine Faktorenanalyse mit drei Faktoren und Varimaxrotation durchgeführt wurde. Auf einem Faktor laden die Items 1 bis 8 und 14 hoch (außer Item 2), die algebraische Lösungen fordern. Auf einem anderen Faktor laden die Items hoch, die eine graphische Addition verlangen (außer den Items 9, 11 und 16), während auf dem dritten Faktor die Items zur Statik hoch laden. Entsprechend wurden drei Subskalen gebildet (siehe Tab. 6), die jeweils eine hohe Reliabilität haben (Die Cronbachs Alphas sind über 0,7).

Subskala	Items	Reliabilität Cronbachs Alpha	Anteil richtiger Antworten
algebraische Vektorrechnung	1, 3, 4B, 4W, 5B, 5W, 6, 7, 8B, 14	0,70	66 %
graphische Addition	10, 12, 13a, 13b, 15a, 15aE, 15b, 15c, 15cE, 15d	0,78	89 %
Anwendung in der Statik	17, 17E, 18, 18E, 19a, 19b	0,77	34 %

Tab. 6: Subskalen des ersten Testteils und ihre Reliabilität

5. Ergebnisse Kinematik-/Dynamikteil (Teil 2)

Im zweiten Test sollte festgestellt werden, ob die Studienanfänger eine richtige vektorielle Vorstellung von kinematischen und dynamischen Größen, insbesondere der Beschleunigung haben. Für den Test bekamen die Studienanfänger 30 Minuten Zeit, was für fast alle ausreichend war. Nach dem Test antworteten auf die Frage, ob solche Aufgaben in der Schule vorkamen, alle Studienanfänger per Handzeichen mit Ja. Auf die Frage, ob sie sich bei diesen Aufgaben sicher fühlten, gaben allerdings nur ca. 5 % die Antwort „Ja“. Dass sie sich bei diesem Thema wenig sicher fühlen, gaben aber auch nur ca. 10 % zu, während die Hälfte angab, sich zu 50 % sicher zu fühlen.

5.1 Ergebnisse zur Kinematik

Da davon auszugehen ist, dass die Studienanfänger die Richtung der Geschwindigkeit in der Regel richtig angeben, beziehen sich fast alle Items auf die Beschleunigung. Lediglich Item 6 fragt bei einer Kreisbewegung mit konstantem Tempo (Mond um Erde) nach der Änderung der Geschwindigkeit innerhalb einer Viertel Umdrehung. Alle anderen kinematischen Aufgaben fragen nach der Beschleunigungsrichtung. Die Ergebnisse sind davon abhängig, ob es sich um ein- oder zweidimensionale Bewegungen handelt und wie sich das Tempo ändert, aber auch vom Kontext der Aufgabe (siehe Tab. 7). Trotzdem haben diese 16 Items zur Beschleunigung bei dichotomer Auswertung (richtig/falsch) eine hohe Reliabilität: Es ergibt sich ein Cronbachs Alpha von 0,81.

Aufgabe	Bewegung	Tempo	richtig
11a	gerade	zunehmend	93 %
11b	gerade	abnehmend	91 %
4	gerade	abnehmend	74 %
8	gerade	zunehmend	73 %
1	gerade	Null, Minimum	58 %
3	gerade	ab/Null/zu	37 %
2	gerade	ab/Null/zu	34 %
10	Kurve	Null, Minimum	57 %
15 $\vec{a}$	Kurve	konstant	43 %
6	Kurve	konstant	33 %
11d	Kurve	konstant	19 %
7	Kurve	zunehmend	18 %
11e	Kurve	zunehmend	15 %
11c	Kurve	abnehmend	15 %
5	Kurve	abnehmend	12 %
9	Kurve	Maximum	3 %

Tab. 7: Aufgaben zur Kinematik: Itembeschreibung und Ergebnisse

Zur Beantwortung dieser Beschleunigungsitems ist die Anwendung dreier Konzepte denkbar: 1. Beschleunigung kann als eine Eigenschaft der Geschwindigkeit aufgefasst werden, so dass die Geschwindigkeitsrichtung angegeben wird (Fehlkonzept). 2. Beschleunigung wird als Änderung der Schnelligkeit aufgefasst und ist damit eine Zahl; ist sie positiv, wird sie in Geschwindigkeitsrichtung eingezeichnet, ist sie negativ, dagegen (Fehlkonzept). 3. Die Beschleunigung ist die Änderung des Geschwindigkeitsvektors (physikalisches Konzept). Bei eindimensionalen Bewegungen oder bei schneller werdenden Bewegungen können verschiedene Konzepte zur gleichen Antwort führen. Bei den Items 8 und 11a führen sogar alle drei Konzepte zum gleichen Ergebnis.

Die Tab. 8 zeigt, dass je nach Aufgabe bis zu einem Drittel der Studenten das Geschwindigkeitskonzept (1.) verwenden. Besonders beliebt ist das Schneller/langsamer-Konzept (2.), was in der Schule z.T. so gelehrt wird, zumindest aber eine Folge der schulischen Überbetonung eindimensionaler Bewegun-

gen ist. Fällt das Ergebnis des physikalischen Konzeptes nicht mit dem Ergebnis dieses Konzeptes zusammen, wird das physikalische Konzept durchschnittlich nur von einem Viertel der Studierenden bei der Lösung der Items eingesetzt (28 %).

Konzept Item	$\vec{a} \sim \vec{v}$	$a \sim \Delta v $ tangential	$\vec{a} \sim \Delta\vec{v}$
11b	3 %	91 %	
4	20 %	74 %	
1	38 %		61 %
3	33 %	4 %	37 %
2	24 %	18 %	34 %
10	14 %	13 %	57 %
15 $\vec{a}$	4 %	48 %	43 %
6	31 %	30 %	33 %
11d	6 %	47 %	19 %
7	53 %		18 %
11e	49 %		15 %
11c	4 %	68 %	15 %
5	15 %	39 %	12 %
9	19 %	59 %	3 %

Tab. 8: Häufigkeiten der Antworten, die sich aus den drei verschiedenen Beschleunigungskonzepten ergeben

Zur Ermittlung der physikalischen Beschleunigungsrichtung sind zwei kinematische Vorgehensweisen möglich: 1. Aus zwei Geschwindigkeitsvektoren wird der Geschwindigkeitsänderungsvektor mit seiner Richtung ermittelt. 2. Aus der Veränderung des Tempos wird der tangentielle Anteil und aus der Krümmung der Kurve der radiale Anteil des Beschleunigungsvektors überlegt. Dagegen werden bei manchen Aufgaben wie bei Fallbewegung physikalische Experten z.T. von der Kraft auf die Beschleunigung schließen.

Vergleicht man die Ergebnisse der Studienanfänger mit den Ergebnissen, die bayerische Gymnasiasten nach dem entsprechenden Mechanikunterricht der Oberstufe erreichen (Tab. 9), sind die Physikstudenten wie erwartet etwas besser. Geht man aber davon aus, dass die Studenten in der Schule zu den besten Physikschülern gehörten, sind die Ergebnisse dennoch enttäuschend.

Item	Studienanfänger D vor Studium	bayerische Gymnasiasten nach Unterricht 11. Jgst.
11a	93 %	93 %
11b	91 %	88 %
3	37 %	9 %
2	34 %	7 %
11d	19 %	12 %
11e	15 %	9 %
11c	15 %	6 %

Tab. 9: Vergleich der Ergebnisse zur Kinematik mit bayerischen Gymnasiasten nach dem Mechanikunterricht

Während bei den mathematischen Aufgaben zum Vektorverständnis die deutschen Studienanfänger deutlich besser als amerikanische Studenten waren, liegen die deutschen Studenten bei der Kinematik im unteren Bereich der amerikanischen Ergebnisse (Tab. 10). An manchen High Schools sind sogar die Ergebnisse der Schüler wesentlich besser als die der deutschen Erstsemester. Das zeigt, dass der deutsche Physikunterricht mehr erreichen könnte und sich in dieser Hinsicht verändern muss. Gute Ergebnisse wurden insbesondere in den USA nach veränderten Erstsemesterveranstaltungen erzielt, in denen auf konzeptuelles Verständnis Wert gelegt wurde und Geschwindigkeitsänderungsvektoren in der ein- und zweidimensionalen Kinematik konstruiert wurden [7, S. 461].

Item	Studienanfänger D	nach High School Unterricht USA	nach traditioneller Vorlesung Uni, USA	nach modifizierter Vorlesung, 2 Unis, USA
8	73 %	80 – 94 %	67 – 86 %	-
10	57 %	44 – 73 %	53 – 96 %	-
6	33 %	-	15 %	50 % / 90 %
5	12 %	-	-	50 % / 70 %
9	3 %	1 – 40 %	12 – 72 %	-

Tab. 10: Vergleich der Ergebnisse zur Kinematik mit amerikanischen Untersuchungen (in USA: verschiedene Gruppen an High Schools und Universitäten)

5.2 Ergebnisse zur Dynamik

Zur Dynamik wurden nur recht wenige Aufgaben gestellt, so dass sich dazu nur wenig aussagen lässt. Die resultierende Kraft auf einen Körper ist im newtonschen Konzept proportional zu dessen Beschleunigung, so dass für einen Physiker die Frage nach der Zentripetalkraft äquivalent zur Frage nach der Zentripetalbeschleunigung ist. Für Lernende muss das keineswegs so sein. So war die häufigste Antwort (39 %) bei dem abstrakten Item 15, dass bei der Kreisbewegung mit konstantem Tempo die Beschleunigung Null ist und eine Kraft nach außen auf den Körper wirkt (richtige Antwort: 29 %). Amerikanische Testwerte zeigen (Tab. 11), dass auch hier durchaus bessere Ergebnisse möglich wären.

Item	Studienanfänger D	nach High School Unterricht USA	nach traditioneller Vorlesung Uni, USA	nach modifizierter Vorlesung Uni, USA
14	41 %	8 – 40 %	67 – 92 %	-
13	43 %	-	-	40 %
15	29 %	23 – 83 %	67 – 92 %	-
12	24 %	-	-	30 %

Tab. 11: Vergleich der Ergebnisse zur Dynamik mit amerikanischen Untersuchungen (in USA: verschiedene Gruppen an High Schools und Universitäten)

Bei der schwierigeren Aufgabe 13 mit anderem Kontext gaben dagegen 43 % die richtige Antwort

(z.T. ohne Begründung). Über ein Drittel dieser Studenten (16 % von allen) argumentierte allerdings mit der Flieh-/Zentrifugalkraft (Sicht des mitbewegenden Beobachters). Ob diese auch zur objektiven Sicht des ruhenden Beobachters fähig sind, darf bezweifelt werden und es wird angenommen, dass manche Lehrer immer noch die Scheinkräfte statt die Sicht des ruhenden Beobachters unterrichten. Mit der gleichen Argumentation über die Fliehkraft müsste auch Item 12 richtig lösbar sein. In dieser anderen Situation gaben aber dennoch nur 24 % die richtige Antwort.

Beim Item 14 wird nur überprüft, ob ein Vektor richtig in seine Komponenten zerlegt werden kann (41 % richtig). Da die richtige Vorstellung (Kräfte kompensieren sich) zum gleichen Ergebnis wie eine typische Fehlvorstellung (Kraft in Bewegungsrichtung nötig) führt, ist es keine sinnvolle Dynamik-Aufgabe.

6. Zusammenfassung und Folgerungen

Die Ergebnisse bei der graphischen Addition und Subtraktion von Vektoren sind besser als dies vorher aufgrund von Erfahrungen in Übungen erwartet wurde. Dennoch zeigt der Test, dass Mathematikvorkurse und hier die Behandlung von Vektoren weiterhin notwendig sind. Die graphische Vektoraddition ist für die zu wiederholen, die darin nicht sicher sind. Insbesondere sind aber die algebraischen Fertigkeiten in solchen Vorkursen zu schulen, wozu vor allem das Skalar- und Vektorprodukt gehört, die wenig beherrscht werden.

In der einführenden Mechanikvorlesung ist es besonders wichtig, die Richtung der Größen zu betonen. Dabei sollte beachtet werden, dass viele Studenten meinen, die Größe „Beschleunigung“ zu kennen und dennoch physikalisch falsche Konzepte verwenden.

Für den Mathematikunterricht der Schule ist zu fordern, dass in der „analytischen Geometrie“ mehr die Anschauung trainiert wird anstelle eines abstrakten Rechnens, indem mehr Wert auf die geometrische Darstellung gelegt wird. Dazu gehört eine anschauliche Vorstellung des Skalarproduktes als Produkt der Längen der Vektoren nach einer senkrechten Projektion eines Vektors auf den anderen. Ein anschauliches Vektorverständnis sollte aber bereits der Mittelstufenunterricht fördern, indem er Pfeile mit Betrag und Richtung behandelt, die geometrisch addiert werden. Deshalb ist es bedenklich, wenn z.B. in Bayern die Pfeile bzw. Vektoren nicht mehr im Mathematiklehrplan der Sekundarstufe I gefordert werden.

Auch diese Untersuchung zeigt erneut das Scheitern des Konzeptes des herkömmlichen Physikunterrichts, die Kinematik und Dynamik an eindimensionalen Bewegungen einzuführen und später auf mehrere Dimensionen zu erweitern. Wie bereits JUNG [11] und andere [12-15] seit Jahrzehnten forderten, ist es nötig, mit zweidimensionalen Bewegungen zu

beginnen. Dazu liegen Konzepte und Evaluationen für die Grundschule [11], die Mittelstufe [12-15] und die Oberstufe [10] vor, die beachtet werden sollten.

7. Literatur

- [1] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. (2003): Physik, Wiley-VCH, Weinheim
- [2] GIANCOLI, D. (2006): Physik, Pearson Education, München
- [3] NOLTING, W. (2002): Grundkurs Theoretische Physik 1, Klassische Mechanik, 8. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg
- [4] BOCZIANOWSKI, F.; SCHÖN, L.-H. (2007): Mit der Statik in die Mechanik - Vektoren als kumulatives Element - In: Höttecke, D. (Hrsg.): Naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich, Jahrestagung der GDGP in Bern 2006, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 27, Lit-Verlag, Münster
- [5] NGUYEN, N.; MELTZER, D. (2003): Initial understanding of vector concepts - In: American Journal of Physics 71, Nr. 6, S. 630 - 638
- [6] KNIGHT, R. (1995): The Vector Knowledge of Beginning Physics Students - In: The physics teacher 33, S. 74 - 78
- [7] FLORES, S.; KANIM, S.; KAUTZ, C. (2004): Student use of vectors in introductory mechanics - In: American Journal of Physics 72, Nr. 4, S. 460 - 468
- [8] HESTENES, D.; WELLS, M. (1992): A Mechanics Baseline Test - In: The physics teacher 30, S. 159 - 166
- [9] LABUDDE, P.; REIF, F.; QUINN, L. (1988): Facilitation of scientific concept learning by interpretation procedures and diagnosis - In: International Journal of Science Education, Vol. 10, S. 81 - 98
- [10] WILHELM, T. (2005): Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung, Dissertation, Logos-Verlag
- [11] JUNG, W.; REUL, H.; SCHWEDES, H. (1977): Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3 - 6, Beiträge zur Methodik und Didaktik der Physik, Diesterweg, Frankfurt am Main
- [12] SPILL, L.; WIESNER, H. (1988): Zur Einführung des dynamischen Kraftbegriffs in der Sekundarstufe I. Bericht über Unterrichtsversuche - In: Kuhn, W. (Hrsg.): Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1988 Gießen (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 412 - 417
- [13] WODZINSKI, R.; WIESNER, H. (1994a): Einführung in die Mechanik über die Dynamik. Beschreibung von Bewegungen und Geschwin-

digkeitsänderungen - In: Physik in der Schule 32, Nr. 5, S. 164 - 169

- [14] WODZINSKI, R.; WIESNER, H. (1994b): Einführung in die Mechanik über die Dynamik. Zusatzbewegung und Newtonsche Bewegungsgleichung - In: Physik in der Schule 32, Nr. 6, S. 202 - 207
- [15] WODZINSKI, R. (1995): Untersuchungen von Lernprozessen bei der Einführung in die Newtonsche Dynamik - Untersuchungskonzeption und erste Ergebnisse - In: Behrendt, H. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Freiburg i.Br., September 1994, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, S. 247 - 249

8. Danksagung

Besonderer Dank gilt AD Wolfgang REUSCH, der die Untersuchung unterstützte und im Mathematik-Vorkurs die Zeit für die Erhebung zur Verfügung stellte.

9. Adresse

StR Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Physikalisches Institut der Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, Tel. 0931/888-5788,
www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm
wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de

4.2 Lehrerkenntnisse von diesen Schülervorstellungen

Quelle:

WILHELM, T.: *Vorstellungen von Lehrern über Schülervorstellungen* – In: Höttecke, D. (Hrsg.): *Kompetenzen, Kompetenzmodelle, Kompetenzentwicklung, Jahrestagung der GDGP in Essen 2007*, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 28, Lit-Verlag, Münster, 2008, ISBN 3-8258-1059-7, S. 44 – 46

Inhalt und Bezug zum Thema:

In vielen Lehrerfortbildungen hat sich herausgestellt, dass Lehrkräfte kaum Vorstellungen von den Schülervorstellungen haben, aber dieses Thema sehr wichtig finden, sobald sie etwas davon erfahren. Dadurch verbessern sich ihre Überzeugungen bezüglich Schülervorstellungen und ihre Handlungen. Dennoch gab es lange kaum Erhebungen, welche Vorstellungen Lehrkräfte über die Vorstellungen der Schüler haben. Im Vorfeld einer Lehrerfortbildung ergab sich die Möglichkeit, die Physikgymnasiallehrer von Unterfranken mit einem Fragebogen zu befragen (245 teilnehmende Lehrer). In dieser Untersuchung sollte zum einen ermittelt werden, ob Physiklehrer typische Schülerfehlvorstellungen kennen und zum anderen, welche Vorstellungen sie bezüglich der Häufigkeit ihres Auftretens bei typischen Fragestellungen haben (vor und nach dem entsprechenden Unterricht).

Interessant ist insbesondere, dass Lehrkräfte die Schwierigkeiten der Schüler im Umgang mit Beschleunigungsgraphen bei eindimensionalen Bewegungen kennen, aber keine Vorstellung haben von den Problemen bei zweidimensionalen Bewegungen, wie sie nach einem traditionellen Unterricht vorhanden sind. Man kann vermuten, dass Lehrer denken, Schüler könnten ihr Wissen über eindimensionale Bewegungen auf zwei Dimensionen erweitern, was aber nicht der Fall ist. Eine eindimensionale Behandlung der Kinematik steht sogar dem Verstehen bei zwei Dimensionen im Wege; umgekehrt ließe sich aber leicht von zwei Dimensionen auf eine reduzieren.

Vorstellungen von Lehrern über Schülervorstellungen

Einführung und Fragestellung

In vielen Lehrerfortbildungen hat sich gezeigt, dass Lehrer kaum Vorstellungen von den Schülervorstellungen haben, die in den letzten 30 Jahren erforscht wurden, aber es sehr wichtig finden, wenn sie davon hören. Dadurch verbessern sich ihre Überzeugungen bezüglich Schülervorstellungen (Heran-Dörr, 2006) und ihre Handlungen (Vehmeier, 2006) und Unterrichtsergebnisse (Wilhelm, 2006). Es gibt viele Untersuchungen zu den Vorstellungen von Lehrern (Fischler, 2000). Dennoch gibt es kaum Erhebungen, welche Vorstellungen Lehrer über die Vorstellungen der Schüler haben bzw. ob sie bekannte Schülervorstellungen auch kennen. In der schriftlichen Befragung von Merzyn (1994) aus dem Jahr 1987 stimmten zwar 83 % der Lehrer der Aussage zu „Ausgangspunkt für physikalischen Denkens sollten die Alltagsvorstellungen der Schüler sein“. Es ist aber nicht sicher, was sich die Lehrer unter dem Begriff „Alltagsvorstellungen“ vorstellen. Interessant ist, dass 56 % der Hauptschullehrer, aber nur 37 % der Gymnasiallehrer voll zustimmen, was ein signifikanter Unterschied ist, es aber keine signifikante Beziehung zum Dienstalter gibt.

In der hier vorgestellten Untersuchung sollte zum einen ermittelt werden, ob Physiklehrer typische Schülerfehlvorstellungen kennen und zum anderen, welche Vorstellungen sie bezüglich der Häufigkeit ihres Auftretens bei typischen Fragestellungen haben und zwar vor und nach dem entsprechenden Unterricht. Damit wird nebenbei auch abgefragt, wie erfolgreich sie den Physikunterricht in Bezug auf Veränderung der Schülervorstellungen halten. Um quantitative Aussagen machen zu können und verschiedenste Lehrer zu erfassen, wurde ein schriftlicher Fragebogen gewählt. Da er kurz sein musste, können die Ergebnisse nur erste Hinweise sein und sind nicht abgesichert. Die Möglichkeit zu dieser kleinen Erhebung entstand dadurch, dass nach der GDGP-Tagung eine Lehrerfortbildung zu Schülervorstellungen vom Autor durchgeführt wird und die Umfrage sollte Bedürfnisse der Physiklehrer ermitteln. Die Umfrage wurde deshalb staatlich unterstützt und der Fragebogen auf offiziellem Weg an alle 44 Gymnasien in Unterfranken geschickt mit der Bitte, dass alle Physik-Lehrkräfte der Schule ihn ausfüllen. Auf diese Weise antworteten 244 unterfränkische Gymnasiallehrer von 41 Gymnasien.

Angaben der Lehrer

Es gab einen hohen Anteil junger Lehrer (41 % unter zehn Dienstjahre, 17 % zehn bis 20 Dienstjahre, 22 % 20 bis 30 und 18 % mehr als 30 Dienstjahre). 18 % gaben an, in ihrer Ausbildung nichts zu diesem Thema gehört zu haben. 55 % haben wenig dazu gehört und 23 % viel. 70 % derer, die viel gehört haben, sind ganz junge Lehrer (Diesem Thema wird in Würzburg in der ersten Ausbildungsphase ein wichtiger Stellenwert beigemessen). Nach ihrer Ausbildung haben 51 % der Lehrer zu dem Thema etwas gelesen, 44 % etwas von Kollegen gehört und 23 % etwas in Fortbildungen gehört. 80 % gaben Interesse an einer Fortbildung zum Thema „Schülervorstellungen“ an. 18 % wollen auf jeden Fall teilnehmen. Bei den ganz jungen Lehrern ist das Interesse an einer solchen Fortbildung hoch signifikant höher als bei älteren Lehrern. Lehrer, die ein Interesse an der Fortbildung zeigen, schneiden bei diesen Aufgaben hoch signifikant besser ab als diejenigen, die kein Interesse angeben. Als erstes wurden verschiedene allgemeine Vorstellungen über Schülervorstellungen beschrieben und eine Entscheidung verlangt, welche man am zutreffendsten findet. 15 % der Lehrer wählten die Aussage, dass „Schülervorstellungen berücksichtigen“ bedeutet, die

Interessen der Schüler zu berücksichtigen. 10 % gaben an, dass Schüler Vorstellungen haben, wo Physik eine Rolle spielt, aber keine Vorstellungen zu physikalischen Begriffen. Die restlichen 75 % gestanden zu, dass Schüler mit unphysikalischen Vorstellungen zu physikalischen Begriffen in den Unterricht kommen: 48 % wählten die Aussage, die Begriffe müssten exakt definiert und erklärt werden, so dass sich die Vorstellungen ändern; 13 % meinten, erst gute Experimente überzeugen die Schüler; nur 9 % und ausschließlich jüngere Lehrer wählten die Aussage, die der Meinung der Didaktiker entspricht: die Schülervorstellungen sind stabil und ändern sich durch den Unterricht kaum.

Welche Schülervorstellungen werden für wahrscheinlich gehalten?

Es wurden verschiedene Vorstellungen beschrieben und jeweils gefragt, für wie wahrscheinlich es die Lehrer halten, dass Schüler so denken. Dazu konnten die Lehrer auf einer fünfstufigen Skala von „sehr unwahrscheinlich“ bis „sehr wahrscheinlich“ wählen. Für die Auswertung wurde diese fünfstufige Likert-Skala auf eine dreistufige reduziert.

Die korrekte Aussage, dass der gleiche Schüler vielfältige und sich widersprechende Vorstellungen haben kann, wurde von 76 % der Lehrer für wahrscheinlich gehalten (10 % Ablehnung), was positiv zu sehen ist. Die Sehstrahlvorstellung wird korrekterweise von 49 % für unwahrscheinlich gehalten. Die zwei weiteren Aussagen zum Sehen waren entgegengesetzt: 1. „[...] Fast alle Schüler lehnen es ab, dass der Gegenstand Licht in ihr Auge sendet“ und 2. „[...] dass man nur sieht, wenn Licht in das Auge fällt, ist den Schülern schnell klar“. Dennoch wurden beide Aussagen für wahrscheinlich gehalten (52 % bzw. 77 %). Erklärung: Etliche Lehrer meinen, dass Schüler die physikalische Sehvorstellung zunächst ablehnen, es ihnen im Unterricht aber dann schnell klar wird. D.h. die Lehrer halten hier den Unterricht für sehr effektiv. Einen ähnlichen Widerspruch gab es bei drei Aussagen zum Spiegelbild: „Nur wenige Schüler akzeptieren, dass das Spiegelbild hinter dem Spiegel liegt [...]“ (48 % Zustimmung), „[...] durch geeignete Experimente [kann dies] leicht korrigiert werden“ (71 % Zustimmung) und „Nach dem Optikunterricht wissen die Schüler, wo das Spiegelbild liegt [...]“ (77 % Zustimmung). Auch hier erklärt sich die Antwortkombination dadurch, dass etliche Lehrer (etwa ein Drittel) wissen, dass es zunächst zu Beginn ein Problem mit dem Spiegelbild gibt, aber glauben, dies leicht im Unterricht verändern zu können.

Dass Schüler glauben, dass sich die Stromstärke an einem Verzweigungspunkt in gleiche Teile aufteilt, wurde von 59 % für wahrscheinlich gehalten (19 % für unwahrscheinlich).

48 % der Lehrer meinen, dass die Schüler wahrscheinlich angeben, dass bei einem nach oben geworfenen Ball und bei Vernachlässigung der Luftreibung nach Verlassen der Hand nur noch die Gewichtskraft wirkt. Tatsächlich ist dies aber sehr unwahrscheinlich (36 % der Lehrer) (nach dem Mechanikunterricht SII nur 5 % der Schüler). Bezüglich der Kräfte auf ein Buch, das auf dem Tisch liegt, gab es wieder zwei sich ausschließende Aussagen: 1. Schüler sehen häufig keine Kräfte [...] und 2. Schüler sehen nur die Gewichtskraft [...]. Während die erste Sicht unwahrscheinlich ist, ist das zweite wahrscheinlich. Die Lehrer hielten aber beides für wahrscheinlich (73 % bzw. 83 %). Dass Schüler am Beginn der elften Klassenstufe meinen, dass bei einem frontalen Zusammenstoß zwischen Lastwagen und Kleinwagen der Lastwagen die größere Kraft ausübt, halten 90 % der Lehrer korrekterweise für wahrscheinlich. Bedenklich ist aber, dass viele auch die für Schüler völlig sinnlose Aussage wahrscheinlich halten, dass ein Lastwagen, der frontal mit einem Kleinwagen zusammenstößt, keine Kraft aus ihm ausübt, sondern ihn nur zerdrückt, weil er im Wege ist.

Auch beim Teilchenmodell antwortet die Mehrheit der Lehrer wie gewünscht. Verschiedene tatsächlich vorkommende Schülervorstellungen wurden von jeweils ca. 60 % der Lehrer für wahrscheinlich gehalten. Nur die Vorstellung, dass zwischen den Teilchen eines Stoffes der gleiche Stoff in kontinuierlicher Form ist, halten nur 22 % für wahrscheinlich.

Für eine weitere Auswertung wurde jedem Lehrer für jedes Item zur Wahrscheinlichkeit bestimmter Vorstellungen ein Pluspunkt gegeben, wenn die Antwort der eines Didaktikers

entspricht und ein Minuspunkt, wenn er das Gegenteil angab. Dabei ist festzustellen, dass hier die jüngste Altersgruppe (unter zehn Dienstjahre) höchst signifikant besser ist als die übrigen Lehrer. Ihren Angaben, wie viel sie in ihrer Ausbildung zu diesem Thema gehört haben, unterscheiden sich aber auch höchst signifikant von den älteren Lehrern. Das war so auch zu erwarten, da Schülervorstellungen noch nicht so lange zu den Standardthemen der Lehrerbildung gehören.

Quantitative Einschätzungen der Lehrer

Für den letzten Testteil wurden einige Items aus Schülertests verwendet, von denen Ergebnisse bayerischer Gymnasiasten in großer Anzahl aus empirischen Schülertests vorliegen. Zu diesen Items wurden verschiedene quantitative Vorschläge gemacht, wie die Schüler vor und vor allem nach dem Unterricht diese beantworteten, und die Lehrer mussten sich für ein Ergebnis entscheiden.

Bei einer Aufgabe zu einfachen Stromkreisen, die nach dem Unterricht nur von unter 20 % richtig beantwortet wird, schätzen 75 % der Lehrer einen viel höheren Anteil richtiger Antworten. Bezüglich Beschleunigungsgraphen bei eindimensionalen Bewegungen wählte die Hälfte der Lehrer richtigerweise die Antwort, dass nach dem Unterricht nur die Hälfte der Schüler den richtigen Graph angeben kann. Ganz anders sieht es aber bei zweidimensionalen Bewegungen aus: Entsprechend den Erhebungen geben ca. 12 % der Schüler bei Kurvenfahrten mit konstantem Tempo die Beschleunigung radial nach innen an (von 4 % der Lehrer vermutet); fast alle gingen von weit besseren Ergebnissen aus. Die Lehrer kennen also die Schwierigkeiten im Umgang mit Graphen, haben aber keine Vorstellung von den Problemen bei zweidimensionalen Bewegungen. Nur 30 % der Lehrer geben richtig an, dass nach dem Unterricht nur ein Drittel der Schüler den richtigen Kraft-Graphen zu einer beschriebenen Bewegung angeben kann. Die anderen Lehrer gehen wieder von viel höheren Anteilen aus. Bei der Golfballaufgabe des FCI-Tests geben ca. 80 % der Schüler am Schuljahresbeginn und ca. 70 % am Ende eine falsche Antwort mit Abschlagskraft an, was aber nur 5 % der Lehrer vermuten. 29 % geben für den Schuljahresbeginn die richtige Antwort, aber eine sehr optimistische für das Schuljahresende. 62 % geben sogar zusätzlich für den Schuljahresanfang optimistischere Ergebnisse an. Bei der FCI-Aufgabe, bei der ein Lastwagen frontal mit einem Kleinwagen zusammenstößt, wird von ca. 10 % am Schuljahresbeginn und von ca. 20 % am Ende richtig beantwortet. So vermuten es aber nur 9 % der Lehrer. 36 % vermuten viel bessere Ergebnisse für das Schuljahresende, die restlichen 53 % zusätzlich für den Schuljahresanfang.

Zusammenfassung

Meistens halten über die Hälfte der Lehrer die genannten typischen Schülervorstellungen für wahrscheinlich, was bei allen Lehrern wünschenswert wäre. Allerdings werden auch falsche Vorstellungen, die bei Schülern kaum vorkommen, für wahrscheinlich gehalten. Mehrheitlich halten die Lehrer das Auftreten der Schülerfehlvorstellungen in Testaufgaben am Schuljahresanfang und insbesondere am Schuljahresende für seltener als es die Ergebnisse von Untersuchungen zeigen. Schülervorstellungen sind also nicht nur für die Lehrerbildung, sondern auch für die Lehrerfortbildung ein wichtiges Thema.

Literatur

- Heran-Dörr, E.; Wiesner H.: Lehrerfortbildung zur Förderung der physikalischen Kompetenz von Sachunterrichtslehrkräften - In: GDGP in Bern 2006, Band 27, Lit-Verlag, Münster 2007
- Vehmeier, J.: Lehrervorstellungen und -handlungen: Gibt es Zusammenhänge? - In: GDGP in Bern 2006, Band 27, Lit-Verlag, Münster 2007
- Wilhelm, T.: Konzeption einer erfolgreichen Lehrerfortbildung - In: GDGP in Bern 2006, Band 27, Lit-Verlag
- Merzyn, G. (1994): Physikschulbücher, Physiklehrer und Physikunterricht: Beiträge auf der Grundlage einer Befragung westdeutscher Physiklehrer, Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, Kiel

4.3 Ein Unterrichtsgang in der Sekundarstufe II mit Videoanalyse

Quelle:

GRÖBER, S.; POTH, T.; WILHELM, T.: *Zweidimensional-vektorielle Kinematik mit Videoanalyse - Vorstellung eines Unterrichtsganges im MultiMechanics Project* - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 54, Nr. 8, 2005, S. 41 – 47

Inhalt und Bezug zum Thema:

Es wird dargestellt, welche Vorteile sich für den Oberstufenunterricht aus einer zweidimensional-vektoriellen Kinematik in Verbindung mit dem Physikmedium „Videoanalyse“ zu Beginn der Mechanik ergeben. An drei zweidimensionalen Bewegungen, einer allgemeinen Fahrradfahrbewegung, einem Basketballkorbwurf und der Rotorbewegung einer Windkraftanlage lernen Schüler Bewegungen zu erfassen und mit Vektoren zu beschreiben. Die traditionell bisher im Vordergrund stehenden eindimensionalen einfachen Bewegungsformen ergeben sich aus den Projektionen von Wurf- und Kreisbewegung auf die Koordinatenachse.

Hier wurde das erste Mal ein Unterricht beschrieben, der die Kinematik anhand zweidimensionaler Bewegungen behandelt und dazu als alleiniges Messwerterfassungssystem die Videoanalyse benutzt. Damals gab es allerdings noch kein Videoanalyseprogramm, das direkt Vektorpfeile in das Video einzeichnen kann. So wurde das Videoanalyseprogramm der Software „Coach 5“ verwendet.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Ich habe die beiden Physiklehrer in ihrem Projekt intensiv unterstützt und mit ihnen und ihren Schülern zu Beginn des Projektes ein ganzes Wochenende verbracht. Dabei habe ich Ihnen viele Ideen zum Mechanikunterricht vermittelt, so dass sich Herr Gröber entschlossen hat, die Kinematik anhand zweidimensionaler Bewegungen zu behandeln und dazu als alleiniges Messwerterfassungssystem die Videoanalyse zu benutzen. Da ich das für neu und wegweisend hielt, habe ich den gemeinsamen Artikel angeregt.

Zweidimensional-vektorielle Kinematik mit Videoanalyse

– Vorstellung eines Unterrichtsgangs im MultiMechanics Project

S. Gröber, T. Poth u. T. Wilhelm

1 Warum zweidimensional-vektorielle Kinematik?

Einige Lernschwierigkeiten von Schülern in der Kinematik ergeben sich aus ihrem Alltagskonzept von Geschwindigkeit und Beschleunigung als skalaren positiven Größen, aber auch daraus, dass der Unterricht den Vektorcharakter dieser Größen zu wenig betont [1]. Die *Newton'sche* Mechanik besitzt eine deduktive Struktur, so dass unzureichende Begriffsbildungen nicht ohne Konsequenzen bleiben:

- Geschwindigkeit wird in der Alltagsbedeutung von Tempo oder Schnelligkeit verwendet: Die gleichförmige Kreisbewegung bleibt eine unbeschleunigte Bewegung [2].
- Beschleunigung wird eindimensional als Geschwindigkeitszuwachs oder bestenfalls als Geschwindigkeitszuwachs pro Zeitintervall gesehen [1]: Der allgemeine vektorielle Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung kann nicht in voller Tiefe vermittelt werden.

Ein Beginn der *Newton'schen* Mechanik mit einer zweidimensional-vektoriellen Bewegungsbeschreibung begegnet diesen Problemen. Darüber hinaus sind weitere positive Effekte zu nennen:

- Eine zweidimensional-vektorielle Bewegungsbeschreibung lässt sich leicht auf eine Dimension reduzieren: Die Vorzeichen eindimensionaler kinematischer Größen ergeben sich zwanglos und schlüssig aus den Vektordarstellungen.
- Eine zweidimensional-vektorielle Bewegungsbeschreibung lässt sich leicht auf drei Dimensionen verallgemeinern: Das sichert eine hohe Anschlussfähigkeit für die Inhalte eines natur- oder ingenieurwissenschaftlichen Studiums.
- Vektoren sind ein übergreifendes Konzept zur mathematischen und dennoch anschaulichen Beschreibung komplexerer physikalischer Sachverhalte: Bei harmonischen mechanischen oder elektrischen Schwingungen und Wellen wie bei der Überlagerung elektrischer und magnetischer Felder kann auf das in der Mechanik vermittelte Wissen aufgebaut werden.

2 Warum Videoanalyse?

Das „neue“ Physikmedium „Videoanalyse“ ist ein optisches Messverfahren. In einem digitalen Video der zu untersuchenden Bewegung wird mit einem Videoanalyseprogramm nach einer Strecken- und Zeitkalibrierung durch Maßstab bzw. Bildfrequenz die zweidimensionale Zeit-Orts-Kurve (t, x, y) gemessen [3]:

- Als zweidimensionales Messverfahren eignet sich die Videoanalyse zur vektoriellen Bewegungsbeschreibung,
- als universelles Messverfahren kann sie durchgängig in der Kinematik eingesetzt werden,
- als berührungsloses Messverfahren eignet sie sich zur Untersuchung realer Alltagsbewegungen,
- als digitales Messverfahren bietet sie allen Schülern eines Kurses die Möglichkeit einzeln oder in Gruppen im PC-Raum oder mit Laptops im Physiksaal Videos zu vermessen oder sogar eigene Videos zu produzieren,
- als kostengünstiges Messverfahren – einige Videoanalyseprogramme wie Viana [4] sind als Freeware im Internet verfügbar und die Schulen sind mit PC-Räumen ausgestattet – kann jeder Lehrer Videoanalyse im Unterricht sofort einsetzen.

Insgesamt entfaltet dieses Medium seine volle Wirkung, wenn den Schülern in Gruppen Gelegenheit gegeben wird, es als ihr Werkzeug zur eigenständigen Untersuchung von Bewegungen und zum Erlernen der Kinematik einzusetzen.

3 Unterrichtsgang

Vorgestellt werden die ersten beiden Module „Bewegungen erfassen“ und „Vektorielle Bewegungsbeschreibung“, wie sie im Rahmen des MultiMechanics Projects [5] an zwei Schulen entwickelt und im Unterricht erprobt worden sind:

- Im Modul „Bewegungen erfassen“ werden am Beispiel einer beliebigen zweidimensionalen, den Schülern sehr vertrauten Fahrradfahrbewegung Fragen einer vollständigen physikalischen Bewegungserfassung diskutiert [1] und die Videoanalyse als Messverfahren entdeckt.
- Im Modul „Vektorielle Bewegungsbeschreibung“ werden in systematischer Weise die vektoriellen kinematischen Größen entwickelt, auf die Ergebnisse der Videoanalyse eines Basketballkorbwurfs angewendet und mit der Videoanalyse der Kreisbewegung des Rotors einer Windkraftanlage vertieft.

Vektoren und deren Verknüpfungen werden unterrichtsbegleitend in einem Wechselspiel von Mathematik und Physik an den entsprechenden Stellen eingeführt. Die Alternative eines mathematischen Vorkurses „Vektoren“ zum Schuljahresbeginn erweckt zu früh den Eindruck einer mathematischen Physik und setzt mathematische Kenntnisse nicht zeitnah genug in physikalische Anwendungen um. Der Geschwindigkeitsvektor wird vor dem Ortsvektor eingeführt, da die Alltagsvorstellung von Bewegungsrichtung und Bewegungstempo in sehr natürlicher Weise zum Ob-



Abb. 1: Datenübermittlung per Handy vom Schulhof in den Physiksaal

jekt „Vektor“ führt. Geschwindigkeitspfeile werden auch im Alltag wie z. B. für Windgeschwindigkeit- und -richtung bei der Wettervorhersage verwendet. Zuerst Ortsvektoren einzuführen erscheint demgegenüber eher künstlich und fachsystematisch als didaktisch-methodisch motiviert.

Die Auswahl und frühzeitige Betrachtung einer zweidimensionalen Wurf- und Kreisbewegung hat folgende positive Effekte:

- Der vektorielle Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung kann in voller Tiefe nur an zweidimensionalen Bewegungen mit bekannten einwirkenden Kräften erfasst werden. Dazu müssen frühzeitig die Beschleunigungsvektoren dieser Bewegungen betrachtet und in der Dynamik mit den wirkenden Kräften in Beziehung gesetzt werden.
- Das Konzept „Projektion auf die Koordinatenachsen“ bzw. „Zerlegung einer zweidimensionalen in zwei eindimensionale Bewegungen“ liefert bei der Wurfbewegung sofort die wichtigsten einfachen eindimensionalen Bewegungsformen, bei der Kreisbewegung die harmonische Schwingungsbewegung.

Eine einheitliche, genau festgelegte und durchgängige Bezeichnung kinematischer Größen ist für die Entwicklung eines geschlossenen Bildes der Bewegungsbeschreibung notwendig: Alle Bewegungen werden prinzipiell in einem x - y -Koordinatensystem beschrieben. Strecken zwischen zwei Punkten werden mit Δr , Koordinatendifferenzen mit Δx bzw. Δy bezeichnet. Zwischen einem Vektor und seinem Betrag wird durch Weglassen des Pfeils unterschieden. Die Bezeichnung s für den Weg wird prinzipiell nicht verwendet, da sie mit der Zeiteinheit übereinstimmt und in Büchern sowie von Schülern oft synonym als Streckenlänge und Koordinate verwendet wird.

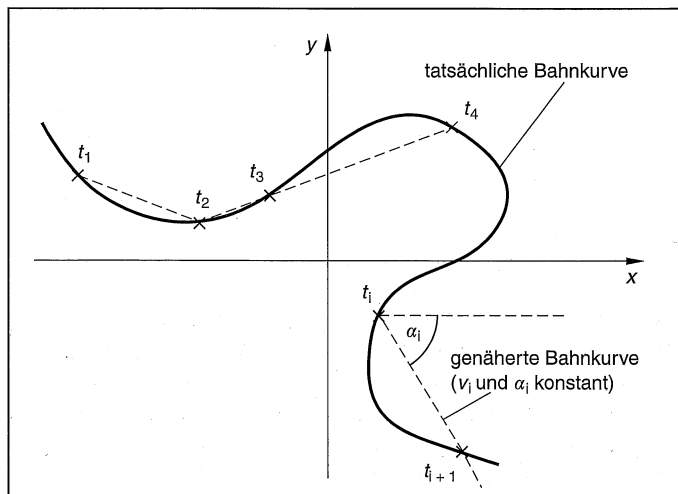
4 Bewegung hat Richtungscharakter

Als Einstieg in das Modul „Bewegungen erfassen“ eignet sich folgender Versuch: Ein Schüler fährt ausgestattet mit Handy und einem einfachen Headset auf dem Schulhof Fahrrad (Abb. 1). Ohne den Einsatz spezieller Messtechnik werden während des Fahrradfahrens die angezeigte Tachometergeschwindigkeit und Uhrzeit alle 10 s vom Schulhof in den Physiksaal übermittelt. Alle übermittelten Daten werden notiert und für eine bessere Bewegungsvorstellung durch Zeitnullpunktverschiebung und Geschwindigkeitsumrechnung in m/s aufbereitet (Tab. 1). Die Aufgabe „Rekonstruiere die Fahrradfahrbewegung“ führt zu einer mehr informationstechnischen und ganzheitlichen Betrachtungsweise der Bewegung mit folgenden zwei Fragen:

- Welche Daten werden benötigt?
- Wie viele Daten werden benötigt?

Der Blick fällt hauptsächlich auf die fehlende Richtungsangabe durch einen Winkel. Für die spätere Vektorisierung wird nicht die Richtungsänderung des Fahrradfahrers, sondern seine Fahrtrichtung $\alpha \in]-180^\circ; 180^\circ]$ zu einer frei wählbaren Bezugsgeraden angegeben (Tab. 1). Zur Hervorhebung der Vieldeutigkeit aufgrund der fehlenden Richtungsangaben werden zwei oder drei Bahnkurvenrekonstruktionen unter der Annahme durchgeführt, dass der Fahrradfahrer die zum Zeitpunkt t_i übermittelte Geschwindigkeit und Richtung während des Zeitintervalls Δt_i beibehält. Die dazu notwendige Ermittlung der Streckenzuwächse Δr führt von Beginn an das „Delta-Denken“ ein und zwar analytisch gebunden an die Bewegung und nicht geometrisch an ein vermeintlich anschauliches Steigungsdreieck im Weg-Zeit-Graphen. Die Zuordnung von Geschwindigkeit, Streckenzuwachs und Bewegungsrichtung zu einem Zeitintervall wird durch eine entsprechende Schreibweise verdeutlicht (Tab. 1). Neben der koordinatenfreien Bewegungsbeschreibung durch

Abb. 2: tatsächliche und genäherte Bahnkurve eines Körpers in 2D



Tab. 1: $v(t)$ -Datensatz eines Fahrradfahrers, daraus abgeleitete Größen und ergänzte Fahrtrichtung

Uhrzeit in h:min:s	10:37:10	10:37:20	10:37:30	10:37:40	10:37:50
v in km/h	15	22	13	5	8
t in s	0	10	20	30	40
Δt in s		10	10	10	10
v in m/s		4,2	6,1	3,6	1,4
$\Delta r = v \Delta t$ in m		42	61	36	14
α in Grad		-20	40	120	-30

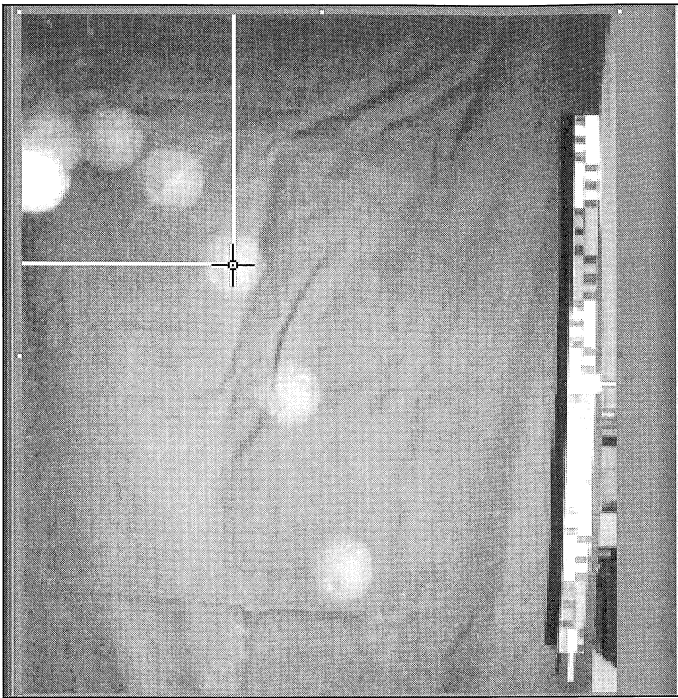


Abb. 3: Aufnahme der Pixelkoordinaten (rechts unten) in der Stroboskopaufnahme einer Körperbewegung mit „Paint“ (Lineallänge 60 cm, $f = 13 \text{ Hz}$)

Datentripel (t, v, α) ist auch eine koordinatengebundene Bewegungsbeschreibung durch Datentripel (t, x, y) möglich. Eine Umrechnung zwischen beiden Darstellungen mit dem Satz des Pythagoras und Winkelfunktionen bindet Mittelstufenkenntnisse in die Physik ein und macht die Äquivalenz der Darstellungen deutlich.

Schüler erkennen schnell, dass mehr Datentripel in der gleichen Gesamtzeit, also eine höhere Datenrate, zu einem feingliedrigeren Polygonzug und damit zu einer besseren

Bewegungserfassung führt. Die seltener gestellte Frage nach der Messgenauigkeit kann an dieser Stelle qualitativ durch Nennung von Fehlerquellen beantwortet werden. Zusammenfassend wird folgender Text mit Skizze formuliert (Abb. 2):

- Durch Geschwindigkeitsbetrag und Richtung (v, α) oder Position (x, y) eines Körpers kann dessen Körperbewegung zu einzelnen Zeitpunkten t_i physikalisch erfasst werden.
- In den einzelnen Zeitintervallen $[t_i, t_{i+1}]$ wird die Bahnkurve des Körpers näherungsweise als geradlinig ($a_i = \text{konstant}$) und seine Bewegungsgeschwindigkeit als konstant angenommen ($v_i = \text{konstant}$).
- Diese näherungsweise Bewegungserfassung ist umso genauer, je dichter die Messzeitpunkte t_i liegen.

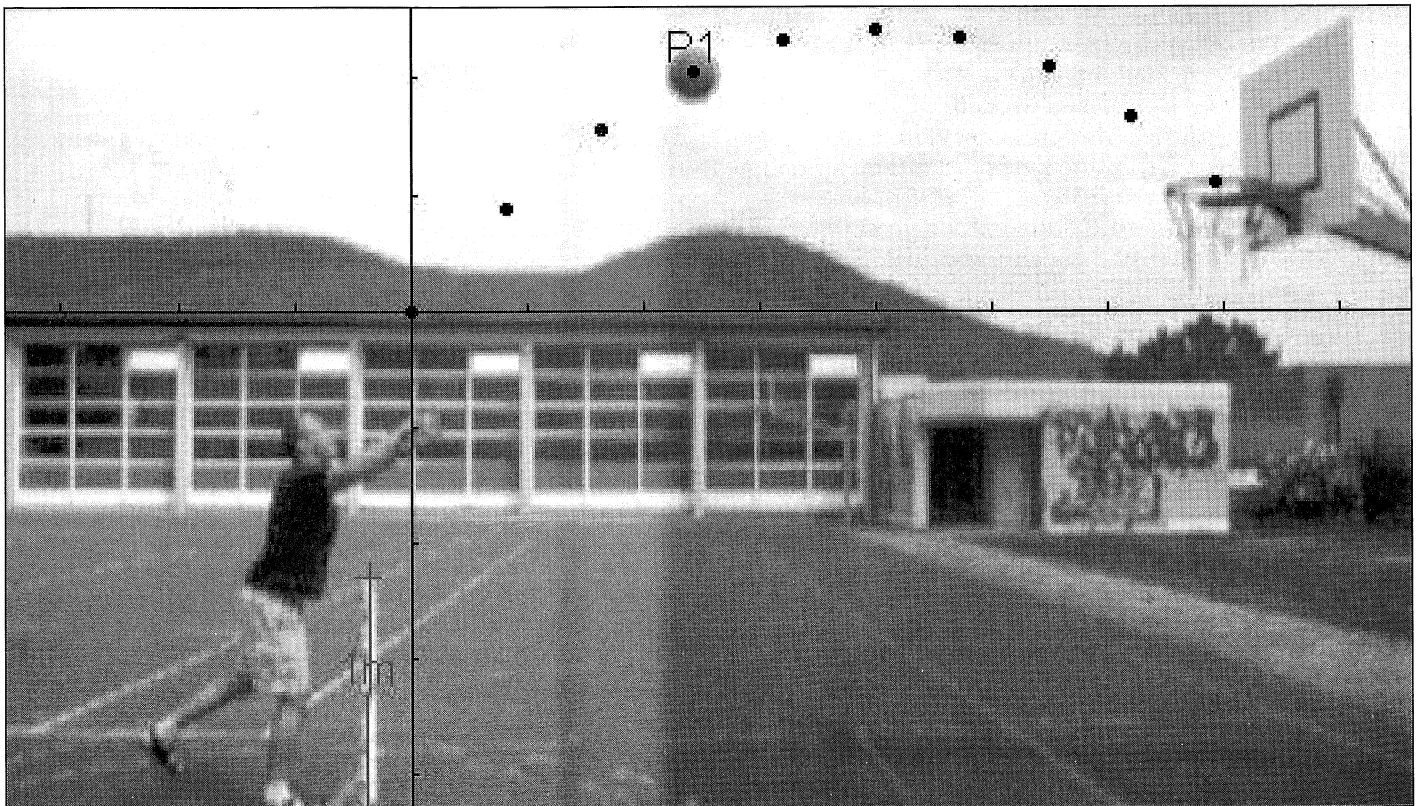
5 Videoanalyse als Messverfahren

Wie lassen sich Datentripel (x, y, t) der Bewegung eines Gegenstandes messen? Die Videoanalyse wird zum besseren Verständnis des Messverfahrens aus der Stroboskopie heraus entwickelt: Eine im Unterricht aufgenommene oder fremde digitale Stroboskopaufnahme kann mit Paint, da es Pixelkoordinaten anzeigt, ausgewertet werden (Abb. 3).

Die Schüler lernen

- den Koordinatenursprung und Zeitnullpunkt frei und unabhängig voneinander zu wählen
- die Notwendigkeit eines Maßstabes zu erkennen
- die Umrechnung von Pixel- in Ortskoordinaten
- die Veränderung der Koordinaten / Zeiten bei Verschiebung des Koordinatenursprungs / Zeitnullpunkts
- die Darstellung der Messdaten in Tabelle und Diagramm.

Abb. 4: Teil der Bahnkurve eines Basketballkorbwurfs im Videoanalyseprogramm von Coach 5



Zeitpunkt t in s	0	10	20
$\vec{v}(t)$ 1 mm $\hat{=}$ 2 m/s			
$\vec{r}(t)$ 1 mm $\hat{=}$ 10 m			

Tab. 2: $\vec{r}(t)$ - und $\vec{v}(t)$ -Datensätze zweier Bewegungen

Dann kann man in den Gebrauch eines Videoanalyseprogramms einführen und hat so die Messtechnik von der Programmbedienung getrennt.

Mit dem Videoanalyseprogramm wird die Bahnkurve eines Basketballkorbwurfes vermessen (Abb. 4) und diese in einem x - y -Diagramm mit gleichem Maßstab in x - und y -Richtung für das Einzeichnen von Vektoren ausgedrückt. Hilfreich dabei sind Videoanalyseprogramme wie „Coach 5“ [6], die über eine Formeleingabe die automatische Berechnung des Geschwindigkeitsbetrages in den Zeitintervallen und einen Datenausdruck in Tabellenform erlauben. Die Schüler haben so erfahren, wie ein Videoanalyseprogramm im Prinzip funktioniert und wie viel „Handarbeit“ es einem abnimmt.

6 Geschwindigkeits- und Ortsvektor

Im Modul „Vektorielle Bewegungsbeschreibung“ werden die koordinatenfreie (v , α , t) und koordinatengebundene Bewegungserfassung (x , y , t) vektorisiert:

Der Geschwindigkeitsbetrag v und die Bewegungsrichtung α des Fahrradfahrers werden zum mathematischen Objekt „Vektor“, angegeben durch einen Pfeil, verschmolzen. Ein Vektor beinhaltet also immer zwei Angaben. Dieses Vorgehen vermeidet, dass für Schüler die Geschwindigkeitsrichtung nur ein „Anhängsel“ zum Geschwindigkeitsbetrag ist [8]. In analoger Weise kann ein Punkt im Koordinatensystem durch einen Pfeil mit Länge r zum Ursprung und Winkel α zur x -Achse angeben werden.

Bewegungen lassen sich also entweder durch einen Pfeildatensatz $\vec{r}(t)$ oder $\vec{v}(t)$ mathematisch erfassen und rekonstruieren (Tab. 2).

In einem mathematischen Exkurs werden geometrisch die Addition, Subtraktion und skalare Multiplikation zweier Vektoren und die dazugehörigen Schreibweisen eingeführt. Für die physikalische Anwendung des Delta-Denkens wird die Subtraktion auch als Ausgangspfeil + Änderungspfeil = Endpfeil interpretiert.

Wie lässt sich der Bahngeschwindigkeitsvektor in einem Zeitintervall beim Basketballkorbwurf aus Ortsvektoren

ermitteln? Die Anwendung des bisherigen mathematischen und physikalischen Wissens führt zur Definition des Bahndurchschnittsgeschwindigkeitsvektors

$$\vec{v}_{\Delta t} = \frac{\vec{r}(t_2) - \vec{r}(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \Delta \vec{r} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

Wichtig für das Verständnis sind qualitative Folgerungen aus der Definitionsgleichung:

- Eine Bahndurchschnittsgeschwindigkeit ergibt sich sowohl als Folge einer zeitlichen Längen- als auch Richtungsänderung des Ortsvektors,
- $\vec{v}_{\Delta t}$ hat die gleiche Richtung wie $\Delta \vec{r}$ und zeigt immer in Bewegungsrichtung,
- Eine große Bahndurchschnittsgeschwindigkeit ergibt sich für großes Δr bei kleinem Δt , eine kleine Bahngeschwindigkeit bei kleinem Δr und großem Δt .
- $\Delta \vec{r} = 0 \Rightarrow \Delta \vec{v}_{\Delta t} = 0$.

Zur Konstruktion der Bahndurchschnittsgeschwindigkeitsvektoren in der Bahnkurve des Basketballs wird vereinbart, die Vektoren in der Streckenmitte der Zeitintervalle in einem geeigneten Geschwindigkeitsmaßstab einzutragen (Abb. 5). Ihre Richtung ändert sich ständig und der Geschwindigkeitsbetrag ist im obersten Punkt der Bahn am kleinsten.

Mit einer Folge von Bahndurchschnittsgeschwindigkeitspfeilen in der Bahnkurve des Basketballkorbwurfes für immer kleineres Δt lässt sich auch eine Vorstellung von der Momentangeschwindigkeit $\vec{v}$ zum Zeitpunkt t im Punkt P der Bahn entwickeln: Die Schüler erkennen leicht $\vec{v}$ als tangentialen Grenzvektor an die Bahn bzw. als Vektor, der die momentane Bewegungsrichtung des Körpers angibt. Dass dieser Grenzvektor auch eine endliche, von Null verschiedene Länge besitzen muss, ergibt sich aus der Tatsache, dass z.B. der Tachometer beim Autofahren ständig die Momentangeschwindigkeit $v(t)$ anzeigt [7].

7 Beschleunigungsvektor

Die zu Beginn erwähnten Schülervorstellungen zum Beschleunigungsbegriff und der sich erst später in vollem Umfang innerhalb der Dynamik ergebende Sinn eines vektoriellen Beschleunigungsbegriffs erschweren einen schülerorientierten Zugang zur vektoriellen Beschleunigungsdefinition. Was kann man tun?

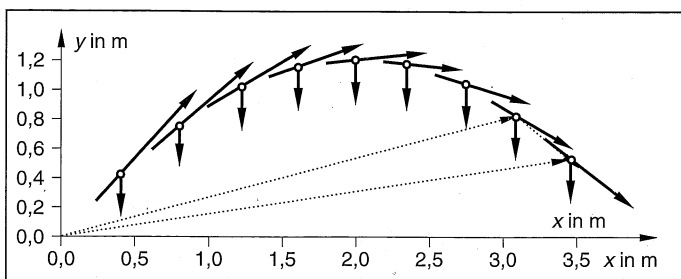
Ein erster von der Mathematik zur Physik führender Weg definiert zunächst die Durchschnittsbeschleunigung in Analogie zur Durchschnittsgeschwindigkeit als zeitliche vektorielle Änderung der Momentangeschwindigkeit:

$$\vec{a}_{\Delta t} = \frac{\vec{v}(t_2) - \vec{v}(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \Delta \vec{v} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Zum besseren Verständnis der Schüler durch beispielhafte Anwendung wird dann die gleichförmig geradlinige Bewegung mit der gleichförmigen Kreisbewegung hinsichtlich einer skalaren und vektoriellen Beschleunigungsdefinition verglichen.

Ein zweiter von der Physik zur Mathematik führender Weg innerhalb der Kinematik greift auf Mittelstufenkenntnisse über Kraftwirkungen zurück: Ein Körper kann schneller

Abb. 5: Orts-, Bahndurchschnittsgeschwindigkeits- und Bahndurchschnittsbeschleunigungsvektoren eines Basketballkorbwurfes



und langsamer werden, aber auch seine Richtung ändern. Den Schülern teilt man mit, dass physikalisch der Körper in beiden Fällen eine beschleunigte Bewegung ausführt, und fragt, wie eine entsprechende Definition der Beschleunigung dazu aussehen muss.

Ein dritter ebenfalls von der Physik zur Mathematik führender Weg innerhalb der Dynamik setzt direkt beim Zusammenhang von Kraft und Beschleunigung an: Immer wenn auf einen Körper eine (resultierende) Kraft einwirkt ist seine Bewegung beschleunigt. Der Basketballkorbwurf ist wegen der wirkenden Gewichtskraft eine beschleunigte Bewegung, was aber wegen des veränderlichen Betrags der Bahngeschwindigkeit nicht unmittelbar zu einer vektoriellen Beschleunigungsdefinition führt. Bei der Kreisbewegung versagt zwar eine skalare Beschleunigungsdefinition, aber für Schüler dominiert die Zentrifugalkraft gegenüber der Zentripetalkraft oder die beiden Kräfte heben sich gegenseitig auf [2].

Der erste und zweite Weg oder eine Kombination beider Wege ist gangbar, der dritte nicht. Qualitative Betrachtungen

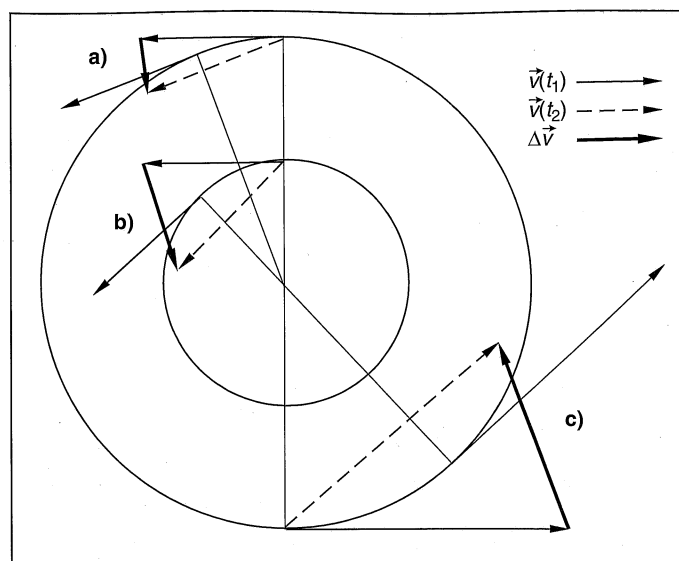


Abb. 6: Vergleich des Geschwindigkeitszuwachses bei gleichem Δt bzw. der Durchschnittsbeschleunigung einer gegebenen Kreisbewegung (a), mit dem bei halben Radius (b), und doppelter Geschwindigkeit (c)

Tab. 3: Überblick zur vektoriellen Bewegungsbeschreibung

Bewegung	Bahnkurve			Geschwindigkeitsvektoren		Beschleunigungsvektoren	
	Dim.	Koordinatensystem mit Messpunkten	Graph: Gleichung $y(x)$	Betrag v	Richtung α	Betrag a	Richtung α
Basketballkorbwurf (Wurfbewegung)	2		Parabel: $y(x) = ax^2 + bx + c$	veränderlich	veränderlich	konstant	konstant
				$\vec{v} \neq \text{konst}$		$\vec{a} = \text{konst}$	
Riesenrad (Kreisbewegung)	2		Kreis: $y(x) = \sqrt{r^2 - x^2}$	veränderlich	veränderlich	konstant	veränderlich
				$\vec{v} \neq \text{konst}$		$\vec{a} \neq \text{konst}$	
Federpendel (Schwingungsbewegung)	1		Strecke: $x = 0$ für $y \in [y_{\min}, y_{\max}]$	veränderlich	veränderlich	veränderlich	veränderlich
				$\vec{v} \neq \text{konst}$		$\vec{a} \neq \text{konst}$	
Fahrradfahrer in der Ebene (gleichförmig geradlinige Bewegung)	1		Strecke: $y = 0$ für $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$	konstant	konstant	konstant	unbestimmt
				$\vec{v} = \text{konst}$		$\vec{a} = \vec{0}$	
Fahrradfahrer am Hang (gleichmäßig beschleunigte Bewegung)	1		Strecke: $y = 0$ für $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$	veränderlich	konstant	konstant	konstant
				$\vec{v} \neq \text{konst}$		$\vec{a} = \text{konst}$	
Stehender Gegenstand (Körper in Ruhe)	0		Punkt: $y(0) = 0$	konstant	unbestimmt	konstant	unbestimmt
				$\vec{v} = \vec{0}$		$\vec{a} = \vec{0}$	

der Beschleunigungsdefinition wie zuvor beim Bahndurchschnittsgeschwindigkeitsvektor – insbesondere des ersten Punktes – sind auch hier wichtig.

Zur konkreten Anwendung der Beschleunigungsdefinition werden in der Bahnkurve die Beschleunigungsvektoren jeweils aus zwei aufeinander folgenden Geschwindigkeitsvektoren konstruiert und vereinbarungsgemäß in den Bahnpunkten angetragen (Abb. 5). Das erstaunliche Ergebnis, dass alle Beschleunigungsvektoren in etwa die gleiche Richtung mit gleicher Länge zwischen 9 und 10 m/s² zeigen, führt zur Definition der gleichmäßig beschleunigten Bewegung. Schüler mit guten Mittelstufenkenntnissen erkennen hier bereits den Richtungszusammenhang mit der Gewichtskraft und den Betragszusammenhang mit dem Ortsfaktor.

8 Kreisbewegung

Erst wenn Inhalte möglichst eigenständig auf neue Sachverhalte angewendet werden können, kann man von einem Schritt des Verstehens reden: Anhand der Aufgabe „Untersucht die Rotorbewegung einer Windkraftanlage und dokumentiert eure Ergebnisse“ lernen die Schüler

- eine Bewegung in einem günstig gelegten Koordinatensystem mit Videoanalyse zu vermessen und die Messergebnisse darzustellen,
- Geschwindigkeits- und Ortsvektoren zu konstruieren,
- Aussagen über Betrag und Richtung von Orts-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren für die gleichförmige Kreisbewegung zu formulieren.

Zur Vertiefung des vektoriellen Beschleunigungsbegriffs bietet es sich an, Schülervermutungen zur Abhängigkeit der Kreisbeschleunigung von Kreisbewegungsgrößen formulieren zu lassen. Durch Konstruktion der Beschleunigungsvektoren kann $a \sim v^2$ mit $r = \text{konst.}$ und $a \sim 1/r$ mit $v = \text{konst.}$ nachgewiesen werden (Abb. 6):

Es wird deutlich, dass die Beschleunigung sich bei halbem Bahnradius wegen der doppelten Richtungsänderung des Bahngeschwindigkeitsvektors im gleichen Zeitintervall verdoppelt. Bei doppelter Geschwindigkeit vervierfacht sich aber wegen der zusätzlichen doppelten Länge des Bahngeschwindigkeitsvektors die Geschwindigkeitsänderung und damit die Beschleunigung. Solche halbquantitativen Betrachtungen tragen enorm zum physikalischen Verständnis der Schüler bei und binden wiederum Mathematikkenntnisse aus der Mittelstufe ein.

9 Übergang zu eindimensionalen Bewegungen

Welche Bewegung sieht ein Beobachter, wenn er in der Bewegungsebene von weit oben oder weit von der Seite aus auf die Basketballbewegung beim Korbwurf schaut? Nach Mathematisierung der Projektion durch $y = 0$ bzw. $x = 0$ werden anhand der eindimensionalen Bahnkurven qualitative Aussagen zu Richtung und Betrag der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren formuliert: In x -Richtung ergibt sich aus den äquidistanten Bahnpunkten $\vec{v}_x = \text{konst.}$ und $\vec{a}_x = \vec{0}$. In y -Richtung stimmen die Beschleunigungsvektoren mit denen der zweidimensionalen Bewegung überein. Aus diesen Befunden können die Schüler erkennen, dass sich die Vektoren der eindimensionalen Bewegungen durch Projektion der Vektoren der zweidimensionalen

nen Bewegung auf die Koordinatenachsen ergeben. Sinnvollerweise führt man an dieser Stelle die Koordinatendarstellung von Vektoren ein und kann damit Richtungsregeln für die skalare Beschreibung eindimensionaler Bewegungen nach dem Aussagenschema Vektor, Komponente und Körperbewegung aufstellen:

- Ortsvektor in oder entgegen Koordinatenachsenrichtung $\Leftrightarrow x$ bzw. $y > 0$ oder x bzw. $y < 0 \Leftrightarrow$ Körper befindet sich bei x bzw. $y > 0$ oder x bzw. $y < 0$,
- Geschwindigkeitsvektor in oder entgegen Koordinatenachsenrichtung $\Leftrightarrow v_x$ bzw. $v_y > 0$ oder v_x bzw. $v_y < 0 \Leftrightarrow$ Körper bewegt sich in oder entgegen Koordinatenachsenrichtung,
- Beschleunigungsvektor in oder entgegen Koordinatenachsenrichtung $\Leftrightarrow a_x$ bzw. $a_y > 0$ oder a_x bzw. $a_y < 0 \Leftrightarrow$ Körper wird in Koordinatenachsenrichtung schneller / entgegen Koordinatenachsenrichtung langsamer oder in Koordinatenachsenrichtung langsamer / entgegen Koordinatenachsenrichtung schneller.

An dieser Stelle sollte auch herausgearbeitet werden, dass die Koordinaten kinematischer Vektoren abhängig von der Wahl des Koordinatenursprungs- und den Achsenorientierungen sind, die Geschwindigkeits- und Beschleunigungspeile jedoch nicht.

Orts-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungs-Zeit-Diagramme der gleichförmigen und gleichmäßig beschleunigten Bewegung können anhand der Bewegungsdaten entweder per Hand oder mit den Darstellungsmöglichkeiten des Videoanalyseprogramms in einem Zug dargestellt, ausgewertet und miteinander verglichen werden.

Analog zur Vertiefung der zweidimensionalen vektoriellen Bewegungsbeschreibung am Beispiel der Kreisbewegung analysieren die Schüler eigenständig eindimensionale Bewegungen wie die eines Federschwingers und eines mit konstanter oder gleichmäßig zunehmender Geschwindigkeit rollenden Fahrradfahrers. Insbesondere beim Federschwinger finden alle Richtungsregeln für die skalare Bewegungsbeschreibung Anwendung. Beim Fahrradfahrer können Geschwindigkeit und Beschleunigung wie üblich aus der Steigung des Graphen ermittelt werden.

10 Bewegungsklassifikation und Ausblick

Für viele Schüler bleiben in der Kinematik betrachtete Bewegungen ohne inneren Zusammenhang und ohne eine übergreifende Struktur. In einer Übersicht sind daher die betrachteten Bewegungen mit Alltags- und physikalischen Bezeichnungen zusammengestellt (Tab. 3). Die Doppelinformation von Betrag und Richtung des Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektor wird in einer Aussage zusammengefasst und Bewegungen nach der Konstanz des Geschwindigkeits- bzw. Beschleunigungsvektors klassifiziert.

In der Dynamik werden die Aussagen zusammen mit dem Wissen aus dem Modul „Kräfte und Kraftgesetze“ zum Newton'schen Grundgesetz bzw. dem Trägheitssatz verdichtet. An verschiedenen Stellen des vorgestellten Unterrichtsgangs bieten sich Erweiterungen und Vertiefungen an:

- Bei der Kreisbewegung können die Schüler noch fehlende kinematische Kreisgrößen und deren Zusammenhänge mit dem Video und dem Schulbuch eigenständig erarbeiten.
- Nach der Zerlegung des Basketballkorbwurfs in zwei Teilbewegungen können Funktionsgleichungen von Be-

wegungen behandelt und die bekannten Rechnungen zum schiefen, senkrechten und horizontalen Wurf durchgeführt werden.

Im sich anschließenden Modul „Bewegungsbeschreibung mit Graphen und Funktionen“ wird der Übergang zu ein-dimensionalen Bewegungen weitergeführt. x bzw. y und v wird als orientierte Fläche im v - t - und a - t -Diagramm interpretiert und Bewegungsgleichungen werden zusammen mit einem Modellbildungsprogramm zum Modellieren von Überholvorgängen verwendet werden.

Literatur

- [1] *Wilhelm, T.; Heuer, D.*: 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
- [2] *Wiesner, H.*: Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Mechanik – Schülervorstellungen, Lernschwierigkeiten und fachdidaktische Schlussfolgerung. – In: Physik in der Schule 32, 1994, Nr. 4, S. 122-127

[3] *Gröber, S.*: Neues Physikmedium „Videoanalyse“, <http://physik.bildung-rp.de/unterrichtphy/MMP/Videoanalyse/Videoanalyse.htm>

[4] *Nordmeier, V.; Kersting, T.; Hahn, W.*: Digitale VideoANalyse, <http://didaktik.physik.uni-essen.de/viana/>

[5] *Gröber, S.; Poth, T.*: Das MultiMechanicsProject, <http://physik.bildung-rp.de/unterrichtphy/MMP/MMP.htm>

[6] Centre for Microcomputer Applications: Coach 5 – A versatile learning and authoring environment for Science, Technology and Mathematics, <http://www.cma.science.uva.nl/english/index.html>

[7] *Herrmann, F.*: Altlasten der Physik (61) – Momentan- und Durchschnittsgeschwindigkeit. – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 51, 2002, Nr. 5, S. 46

[8] *Schecker, H.*: Das Schülerverständnis zur Mechanik – Eine Untersuchung in der Sekundarstufe II unter Einbeziehung historischer und wissenschaftlicher Aspekte, Dissertation Universität Bremen, 1985

Anschriften der Verfasser:

StR Sebastian Gröber, StR Thomas Poth, LandesMedienZentrum Rheinland-Pfalz, Hofstr. 257c, 56077 Koblenz, E-Mail: groeber@lmz.bildung-rp.de; poth@lmz.bildung-rp.de; StR Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, E-Mail: wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de

4.4 Ein Unterrichtsgang in der Sekundarstufe I mit Videoanalyse

Quelle:

SCHÜLLER, F.; WILHELM, T.: *Mechanik in Jahrgangsstufe 7 - Zweidimensional und multimedial* – In: NORDMEIER, V.; GRÖTZEBAUCH, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik - Berlin 2008*, Lehmanns Media, Berlin, 2008, ISBN 978-3-86541-317-8

Inhalt und Bezug zum Thema:

Im neuen bayerischen Gymnasiallehrplan werden die kinematischen Größen sowie die Newtonschen Gesetze bereits in der siebten Jahrgangsstufe kennen gelernt, während Diagramme und Bewegungsfunktionen erst in späteren Jahren behandelt werden. Verschiedene Studien zeigten, dass es sinnvoll ist, dazu zweidimensionale Bewegungen zu betrachten, um dieses qualitative Verständnis ohne mathematische Vorkenntnisse zu erreichen. Deshalb wurde ein entsprechender Unterricht konzipiert und durchgeführt, bei dem die Darstellung der Größen durch Pfeile betont wurde. Hierbei wurde besonders darauf geachtet, dass die Schüler selbst aktiv beteiligt sind. Außerdem wurden verschiedenste Medien vom Spielzeug bis zu Videos und Simulationen eingesetzt. Es wird von den Erfahrungen sowie von den Ergebnissen eines durchgeführten Tests berichtet.

Eine zentrale Veranschaulichung in diesem Unterrichtskonzept waren Videoprojekte, in denen die kinematischen Größen durch Pfeile dynamisch auf einem gefilmten Eisenbahnzug im Video dargestellt wurden. Da es damals noch keine Software gab, mit der das einfach möglich war, wurde vor dem Unterricht die Bewegung gefilmt und in dem Videoanalyseprogramm AVA analysiert. Dann wurde in der Software PAKMA das Video eingebunden und die Pfeile gemäß den Daten der Videoanalyse darüber gezeichnet.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Ich habe Herrn Schüller für seine Staatsexamensarbeit den Vorschlag gemacht, ein Unterrichtskonzept für die siebte Jahrgangsstufe im neuen bayerischen achtjährigen Gymnasiallehrplan zu erstellen und auszuprobieren, wofür ich ihn viel Literatur und Ideen gab. Vorgabe war, sich am Wiesnerschen Kraftstoßkonzept zu orientieren und dynamisch ikonische Repräsentationen in Form bewegter Pfeile sowie die Videoanalyse zu nutzen. Schließlich habe ich dann mit Herrn Schüller zusammen gearbeitet und ihn intensiv bei der Umsetzung der Ideen betreut. Da die Erstellung der Videoprojekte mit PAKMA nicht so einfach war, habe ich diese erstellt. Da gleichzeitig die Entwicklung des Videoanalyseprogrammes lief, das später „measure dynamics“ genannt wurde, war klar, dass dies nur eine Übergangslösung ist, die schon die Möglichkeiten der neuen Software aufzeigt.

Mechanik in Jahrgangsstufe 7 – zweidimensional und multimedial

Florian Schüller, Thomas Wilhelm

Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Am Hubland, 97074 Würzburg

Kurzfassung

Im neuen bayerischen Gymnasiallehrplan werden die kinematischen Größen sowie die Newtonschen Gesetze bereits in der siebten Jahrgangsstufe kennen gelernt, während Diagramme und Bewegungsfunktionen erst in späteren Jahren behandelt werden. Verschiedene Studien zeigten, dass es sinnvoll ist, dazu zweidimensionale Bewegungen zu betrachten, um dieses qualitative Verständnis ohne mathematische Vorkenntnisse zu erreichen. Deshalb wurde ein entsprechender Unterricht konzipiert und durchgeführt, bei dem die Darstellung der Größen durch Pfeile betont wurde. Hierbei wurde besonders darauf geachtet, dass die Schüler selbst aktiv beteiligt sind. Außerdem wurden verschiedenste Medien vom Spielzeug bis zu Videos und Simulationen eingesetzt. Auf dem Poster wird von den Erfahrungen sowie von den Ergebnissen eines durchgeführten Tests berichtet.

1. Konzeption

Die Mechanik ist ein Gebiet, dessen Inhalte dem Leben der Schüler relativ nahe stehen, und durch eine Einführung in die Mechanik über die Dynamik und durch alltagsnahe Beispiele sind die Inhalte motivierend. Deshalb werden kinematischen Grundgrößen und die Newtonschen Gesetze im neuen bayerischen Gymnasiallehrplan bereits in der siebten Jahrgangsstufe im Fach „Natur und Technik“ eingeführt. Dies ist auch sinnvoll, um der Entstehung von Fehlvorstellungen frühzeitig entgegen zu wirken. Die geringere mathematische Vorbildung und das noch nicht voll entwickelte Abstraktionsvermögen der Kinder dieser Jahrgangsstufe verlangen jedoch ein grundsätzlich anderes Vorgehen als in höheren Jahrgangsstufen. Anwendungsorientiertheit, phänomenologisches Vorgehen und Schüleraktivitäten sind von Bedeutung.

Verschiedene Studien und Unterrichtserfahrungen haben gezeigt, dass eine Einführung in die Mechanik sinnvoller Weise anhand zweidimensionaler Bewegungen erfolgen sollte, um Fehlvorstellungen zu vermeiden, die durch eine Einführung über eindimensionale Bewegungen entstehen. Dabei ist der Vektorcharakter der kinematischen und dynamischen Größen entscheidend für das wirkliche Verständnis der Newtonschen Mechanik. Zudem eignet sich gerade ein zweidimensionaler Kurs, bei dem viel mit anschaulichen Pfeilen gearbeitet werden kann, gut, um wie gefordert das Maß an Mathematik zurückzuschrauben und ein qualitatives und anschauliches Verständnis der Mechanik aufzubauen. Aus diesen Gründen wurde ein entsprechendes Unterrichtskonzept zur Einführung in die Mechanik entworfen, das diese Erkenntnisse umsetzen sollte. Vorlagen waren das Konzept von JUNG (dritte bis sechste Jahrgangsstufe) [1-2] und das Konzept von WIESNER und WODZINSKI (Sekundarstufe I) [3-6],

die noch nicht über neue Medien verfügten, sowie das Konzept von WILHELM [7-9] mit neuen Medien, das aber für die elfte Jahrgangsstufe konzipiert war. Daraus wurde ein zum aktuellen Lehrplan für die siebte Jahrgangsstufe des bayerischen Gymnasiums passendes Konzept im Umfang von zehn Unterrichtsstunden entwickelt und überprüft [10].

Bei der Umsetzung wurde großen Wert auf die geforderten Grundsätze Schülernähe, Alltagsrelevanz und Anschaulichkeit gelegt. Der Schwerpunkt wurde auf ein anschauliches qualitatives Grundverständnis gelegt, ohne Diagramme und Berechnungen zu nutzen. Stattdessen sollten die Betrachtungen zweidimensional erfolgen und von Beginn an den Richtungscharakter der mechanischen Größen betonen. Dabei wurden neben traditionellen Medien nicht nur verschiedenste motivierende Spielsachen eingesetzt, sondern ein besonderes Augenmerk der Arbeit lag auch darauf, das Konzept medial neu zu gestalten und die großen Möglichkeiten der modernen Medien, wie Videoanalyse und Computersimulationen zu nutzen. D.h. es sollte altersgemäß vielfältige und unterschiedlichste Medien eingesetzt werden.

2. Kinematik

Die kinematischen Grundgrößen sollten von Beginn an als Richtungsgrößen eingeführt und anschaulich durch Pfeile mit Länge und Richtung dargestellt werden. Anhand von zweidimensionalen Bewegungen aus dem Alltag lernten die Schüler die Geschwindigkeit als Pfeilgröße zur gleichzeitigen Beschreibung von Tempo und Bewegungsrichtung kennen. Geschwindigkeitsänderungen wurden auf natürliche Weise als Änderungen von Tempo und/oder Richtung erfasst und durch einen Zusatzgeschwindigkeitspfeil beschrieben. Dieser wurde abschließend auf die Beschleunigung erweitert, um

zusätzlich darzustellen, wie schnell sich die Geschwindigkeit ändert.

Um das Interesse der Schüler zu wecken und ihre Abstraktionsfähigkeit nicht zu überfordern, wurde großen Wert auf die vielfältige und schülernahe mediale Gestaltung gelegt - einschließlich Spielen (siehe Abb. 1) und Spielsachen (siehe Abb. 2).



Abb. 1: Grunerfahrten zur Beschreibung von Bewegungen im Spiel: Damit der blinde Fänger den voraus laufenden Schüler fangen kann, braucht er Informationen über die nötige Bewegungsrichtung



Abb. 2: Die Bewegungsrichtung von Spielzeugfahrzeugen wie ein ferngesteuertes Auto oder eine Lego-Eisenbahn wurde mit aufgeklebten Pfeilen deutlich gemacht

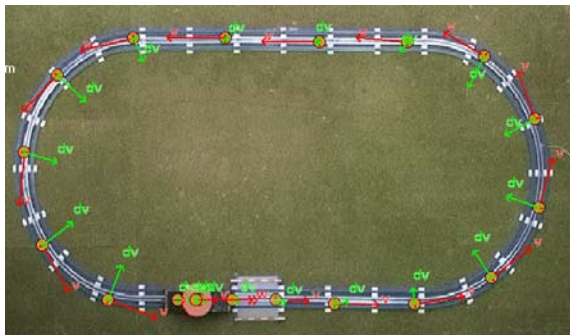


Abb. 3: Videoprojekte am Computer zeigen eine Video einer Bewegung der Lego-Eisenbahn mit simultaner Darstellung der kinematischen Größen als Pfeile, hier: Geschwindigkeit und Zusatzgeschwindigkeit

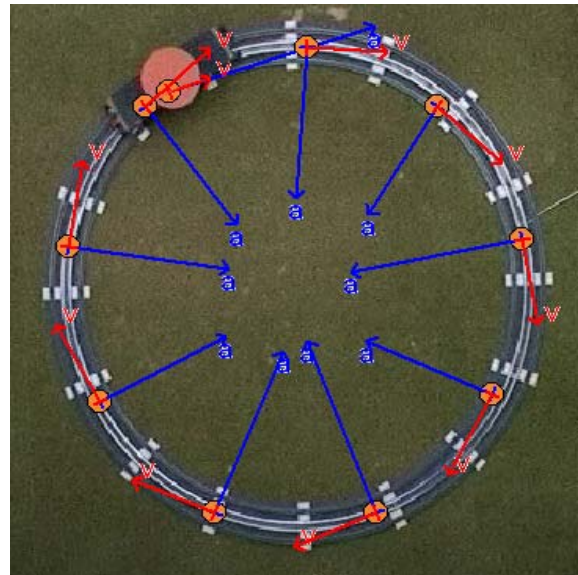


Abb. 4: Das Videoprojekt am Computer zeigt eine Kreisbewegung der Lego-Eisenbahn mit simultaner Darstellung von Geschwindigkeit und Beschleunigung

Zentrale Veranschaulichung waren Videoprojekte, in denen die kinematischen Größen durch Pfeile dynamisch auf einem gefilmten Eisenbahnzug im Video repräsentiert wurden (siehe Abb. 3 + 4). Dazu wurde vorher die Bewegung gefilmt und in einem Videoanalyseprogramm (AVA) analysiert. In der Software PAKMA wurde das Video gezeigt und die Pfeile gemäß den Daten der Videoanalyse darüber gezeichnet [9+11].

3. Dynamik

Ausgehend von der Erkenntnis, dass jede Bewegungsänderung eine Einwirkung als Ursache hat, wurde die Kraft zur Beschreibung von Stärke und Richtung von Einwirkungen als Pfeilgröße eingeführt. Die Schüler sollten sich Kräfte als rasche Folge von Stößen vorstellen.



Abb. 5: Schülerübung zum Kugelstoßen zum Sammeln eigener Erfahrungen zu Einwirkungen und Geschwindigkeitsänderungen

Hierzu wurde eine Schülerübung mit Stoßbrettern und Metallkugeln (siehe Abb. 5) entworfen, damit

die Schüler Grunderfahrungen zu Stößen und den verursachten Bewegungsänderungen sammeln: Ändert ein Körper seine Geschwindigkeit, also Tempo und/oder Bewegungsrichtung, so muss eine Kraft auf ihn wirken (siehe Abb. 6).

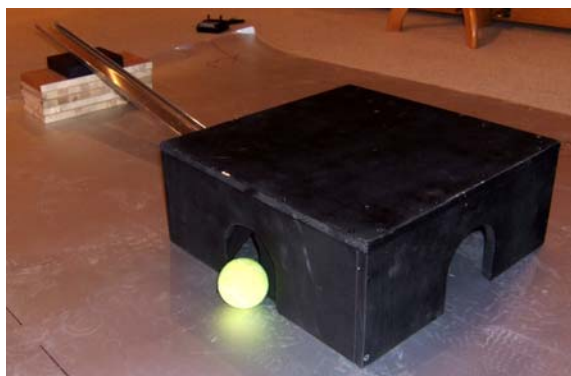


Abb. 6: Ein Black-Box-Versuch zur Veranschaulichung: Jede Geschwindigkeitsänderung bedarf einer Einwirkung

Insbesondere wurde untersucht, wie man auf einen Körper einwirken muss, um ihn auf eine Kurvenbahn zu zwingen. Um das anschauliche Verständnis zu stärken, wurden zudem verstärkt Computersimulationen eingesetzt (siehe Abb. 7+8).

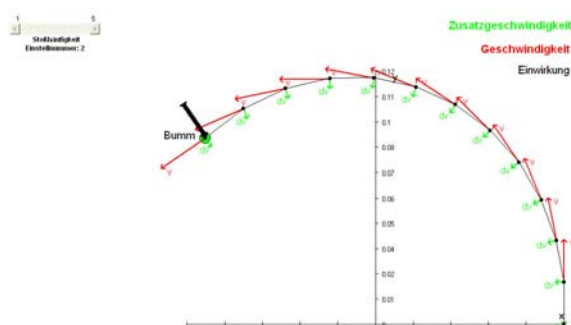


Abb. 7: Simulation einer Kurvenfahrt als Folge ständiger Einwirkungen in Richtung Kurveninneres

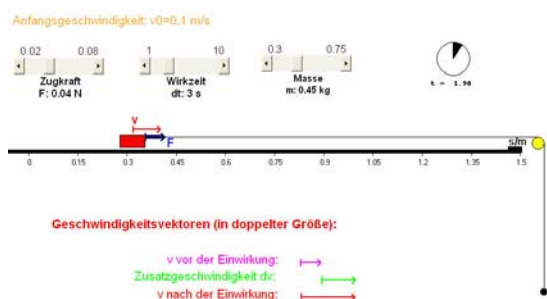


Abb. 8: Computersimulation zur Newtonschen Bewegungsgleichung

Der Zusammenhang zwischen Kraft und Bewegungsänderung, sowie der Einfluss von Masse und Einwirkungsdauer wurde zunächst in qualitativen, aber sehr anschaulichen Experimenten untersucht (siehe Abb. 9) und schließlich zusammengefasst in

der Newtonschen Bewegungsgleichung der Form:

$$\Delta \vec{v} = \frac{\vec{F} \cdot \Delta t}{m}.$$



Abb. 9: Versuche mit einem normalen und einem mit Sand gefüllten Volleyball, um die Bedeutung der Masse deutlich zu machen: Je größer die Masse des Balles, umso schwerer ist er zu beschleunigen

4. Erfahrungen

Die Erfahrungen waren sehr positiv. Die Durchführung in einer siebten Klasse stieß zum einen auf großes Interesse der Fachkollegen. Zum anderen schienen die Schüler selbst motiviert und ihre Rückmeldungen waren durchwegs positiv. Dabei trugen die ausgewählten Medien viel zum Verständnis der Schüler bei. Es entstand der Eindruck, dass die Schüler die gewünschten Lernziele gut erreicht haben.

Ein anschließender Test mit qualitativen Verständnisaufgaben fiel sehr positiv aus. Aufgaben zum Richtungsverständnis wurden dabei teilweise besser gelöst als von traditionell unterrichteten Elftklässlern.

5. Detaillierte Konzeptbeschreibung

Auf der Tagungs-CD befindet sich die Arbeit [10], in der das Unterrichtskonzept genau beschrieben wird. Außerdem findet man dort die detaillierten Ergebnisse der Kurzevaluation. Wer Interesse an den Unterrichtsmaterialien hat, kann von den Autoren gegen einen Unkostenbeitrag eine Kopie einer DVD bekommen.

6. Literatur

- [1] JUNG, W. (1980): Mechanik für die Sekundarstufe I, Verlag Moritz Diesterweg, Frankfurt, Berlin, München
- [2] JUNG, W.; REUL, H.; SCHWEDES H. (1977): Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3-6, Beiträge zur Methodik und Didaktik der Physik, Diesterweg, Frankfurt am Main
- [3] WIESNER, H. (1994): Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Mechanik. Schülervorstellungen, Lernschwierigkeiten und fachdidaktische Forschungen – In: Physik in der Schule 32, Nr. 4, S. 122 – 127
- [4] WODZINSKI, R.; WIESNER, H. (1994): Einführung in die Mechanik über die Dynamik. Beschreibung von Bewegungen und Geschwindigkeitsänderungen – In: Physik in der Schule 32, Nr. 6, S. 164 – 169
- [5] WODZINSKI, R.; WIESNER, H. (1994): Einführung in die Mechanik über die Dynamik. Zusatzbewegung und Newtonsche Bewegungsgleichung – In: Physik in der Schule 32, Nr. 6, S. 202 – 207
- [6] WODZINSKI, R. (1996): Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht, Lit Verlag, Münster
- [7] WILHELM, T.; HEUER, D. (2002): Fehlvorstellungen in der Kinematik vermeiden – durch Beginn mit der zweidimensionalen Bewegung – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 51, Nr. 7, S. 29 – 34
- [8] WILHELM, T. (2005): Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung, Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 46, Logos-Verlag, Berlin, 2005, ISBN 3-8325-1046-X
- [9] WILHELM, T. (2006): Zweidimensionale Bewegungen – Vergleich von vier verschiedenen Möglichkeiten der Messwerterfassung und Evaluationsergebnisse eines Unterrichtseinsatzes – In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A. (Red.): Didaktik der Physik – Kassel 2006, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [10] SCHÜLLER, F. (2008): Ein Unterrichtskonzept zur Mechanik in Jahrgangsstufe 7 – zweidimensional und multimedial, In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A.; GRÖTZEBAUCH, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, auf dieser Tagungs-CD
- [11] WILHELM, T.; GEßNER, T.; SULEDER, M.; HEUER, D. (2003): Sportaktivitäten vielseitig analysieren und modellieren – Video und Messdaten multimedial aufbereitet – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 52, Nr. 2, S. 23 - 30

7. Adresse

Florian Schüller, AR Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut der Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, Tel. 0931/888-5788,
wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de
flo.schueller@gmx.at
www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm

4.5 Zweidimensionale Mechanik mit measure dynamics

Quelle:

MICHEL, C.; WILHELM, T.: *Lehrvideos mit dynamisch ikonischen Repräsentationen zu zweidimensionalen Bewegungen* – In: NORDMEIER, V.; GRÖTZEBAUCH, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik - Berlin 2008*, Lehmanns Media, Berlin, 2008, ISBN 978-3-86541-317-8

Inhalt und Bezug zum Thema:

Für die Messwerterfassung und Darstellung physikalischer Sachverhalte im Bereich der Mechanik eignet sich die Videoanalyse. Sie besitzt gegenüber anderer Darstellungsformen den Vorteil, dass es sich hierbei um bewegte Bilder handelt. Bei dem neuen Programm „measure dynamics“ können im Video in Kombination mit dynamisch ikonischen Repräsentationen einige Größen sichtbar gemacht werden, die sonst für das Auge nicht fassbar sind. Dabei handelt es sich vor allem um die Größen „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“. Ihr vektorieller Charakter wird durch die Darstellung von bewegten Pfeilen betont und das Verständnis der Schüler bewusst in diese Richtung geschult. Außerdem kann so über zweidimensionale Bewegungen in die Kinematik eingeführt werden. Dadurch können Fehlvorstellungen vermieden oder gegebenenfalls korrigiert werden. Durch die dynamisch ikonische Darstellung können die Zusammenhänge und der Verlauf verschiedener Größen deutlich besser veranschaulicht werden, als dies beispielsweise durch Graphen möglich wäre. In einer Staatsexamensarbeit wurden verschiedene zweidimensionale Bewegungen gefilmt und mit dieser Software aufbereitet. Es werden ausgewählte Beispiele aus dieser Arbeit präsentiert und deren Verwendung im Unterricht erläutert.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Bei der Entwicklung der Videoanalysesoftware „measure dynamics“ habe ich den Programmierer beraten und schließlich die Software an die Lehrmittelfirma PHYWE vermittelt, die sie vertreibt. Als dies soweit war, habe ich mir Inhalt und Konzept einer Staatsexamensarbeit überlegt, in der verschiedene zweidimensionale Bewegungen digital gefilmt werden und die Videos analysiert werden. Damit sollen Projekte erstellt werden, bei den Orts-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren zum Video zugeschaltet werden können. Für diese Staatsexamensarbeit habe ich per Aushang einen Studierenden gesucht und Frau Michel gefunden. Schließlich habe ich dann mit Frau Michel zusammen gearbeitet und sie intensiv bei der Umsetzung der Ideen betreut.

Lehrvideos mit dynamisch ikonischen Repräsentationen zu zweidimensionalen Bewegungen

Christine Michel, Thomas Wilhelm

Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Am Hubland, 97074 Würzburg

Kurzfassung

Für die Messwerterfassung und Darstellung physikalischer Sachverhalte im Bereich der Mechanik eignet sich die Videoanalyse. Sie besitzt gegenüber anderer Darstellungsformen den Vorteil, dass es sich hierbei um bewegte Bilder handelt. Bei dem neuen Programm „measure Dynamics“ können im Video in Kombination mit dynamisch ikonischen Repräsentationen einige Größen sichtbar gemacht werden, die sonst für das Auge nicht fassbar sind. Dabei handelt es sich vor allem um die Größen „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“. Ihr vektorieller Charakter wird durch die Darstellung von bewegten Pfeilen betont und das Verständnis der Schüler bewusst in diese Richtung geschult. Außerdem kann so über zweidimensionale Bewegungen in die Kinematik eingeführt werden. Dadurch können Fehlvorstellungen vermieden oder gegebenenfalls korrigiert werden. Durch die dynamisch ikonische Darstellung können die Zusammenhänge und der Verlauf verschiedener Größen deutlich besser veranschaulicht werden, als dies beispielsweise durch Graphen möglich wäre. In einer Staatsexamensarbeit wurden verschiedene zweidimensionale Bewegungen gefilmt und mit dieser Software aufbereitet. Im Vortrag werden ausgewählte Beispiele aus dieser Arbeit präsentiert und deren Verwendung im Unterricht erläutert.

1. Einsatz von Videoanalyse im Physikunterricht

Zweidimensionale Bewegungen lassen sich im Unterricht auf die verschiedensten Arten analysieren. Neben der klassischen Weise auf Tafel und Papier gibt es noch die Möglichkeit, reale zweidimensionale Bewegungen zu messen und zu untersuchen. Hierzu bieten sich verschiedene Mittel im Physikunterricht an: dazu gehören die Messung mit Maus, Graphiktableau oder GPS-Empfänger, die Spurenplatte oder die Videoanalyse [7].

Um aufgenommene Videos im Unterricht sinnvoll einsetzen zu können, benötigt man ein Videoanalyseprogramm wie zum Beispiel „measure Dynamics“ [2]. Dieses Programm ermöglicht eine automatische Objekterkennung und dynamisch ikonischen Repräsentationen wie Pfeile werden vom PC automatisch gezeichnet und zusammen mit dem Video abgespielt. Zu einem besseren Verständnis der Schüler und zur Förderung ihrer Kompetenz des Lesens von Graphen können das Video und der entsprechende Graph zeitgleich aufgebaut werden (räumliches und zeitliches Kontiguitätsprinzip).

2. Vorteile der Videoanalyse

Zu Beginn soll darauf hingewiesen werden, dass der Einsatz von Videos im Unterricht das Experiment auf keinen Fall ersetzen soll, sondern im Gegenteil dabei helfen soll, den Schülern den Versuch besser verständlich zu machen.

Videos können dem Lehrer dabei helfen, Versuchsvorgänge so aufzubereiten, dass Fehlkonzepte der Schüler durch die Konfrontation in Frage gestellt

werden und in physikalische Konzepte umgewandelt werden [3]. Videos ermöglichen es, das Phänomen und die zugrunde liegende Struktur eines physikalischen Vorgangs miteinander zu verbinden und die Analyse zu erleichtern. Durch diese Verbindung wird die kognitive Belastung der Schüler gemäß der Cognitive Load Theorie von SWELLER [6] verringert und der Lernprozess erleichtert. Neben der Koppelung des Realexperiments mit dynamisch ikonischen Repräsentationen in Form von Pfeilen können die Bewegungen auch durch Graphen repräsentiert werden. Die Kombination von Experiment mit dynamisch ikonischen Repräsentationen und Graphen (Multicodierung) ermöglicht es zudem, den Schülern das Lesen von Graphen zu vermitteln. Diese zeitliche Kontiguität von Experiment und Graph hilft ihnen an jedem Zeitpunkt des Versuchverlaufs die kognitive Verbindung zwischen den beiden Darstellungsformen herzustellen.

Da in der heutigen Zeit bereits viele Schulen Computerräume mit Schülerarbeitsplätzen besitzen, müssen die im Unterricht verwendet Videos nicht zwingend vom Lehrer analysiert werden, sondern es ist wünschenswert und didaktisch sinnvoll, dass die Schüler anhand eigener Beispiele das Prinzip des Programms verstehen und selbst zweidimensionale Bewegungen mit ihm analysieren. „measure Dynamics“ bietet sogar einen sehr hohen Grad an Interaktivität, da das Programm weitestgehend selbsterklärend ist und nach einer kleinen Einführung durch den Lehrer den Schülern viele verschiedene Optionen bietet, um das ihnen zur Verfügung gestellte

Kurzvideo zu analysieren. Die Schüler haben dadurch die Chance selbstständig und entdeckend zu lernen. Das Wissen wird für sie dadurch lebendiger und „persönlicher“, was ihnen nach der „Theorie zum Lernen mit Multimedia“ von MAYER [4] den Lernprozess erleichtert.

Aus den Ergebnissen der internationalen Vergleichsstudien TIMSS (1997) und PISA (2001) wurde die Frage nach Kompetenzen wie die des Problemlösens laut. Es wird ein Unterricht gefordert, der sich an lebensnahen und authentischen Problemen orientiert, die sich durch eine hohe Komplexität auszeichnen und sich im „realen“ Leben wieder finden lassen. Ziel dieser neuen Aufgabekultur ist es, den Schülern anwendungsbezogenes Wissen zu vermitteln, dass ihnen erlaubt, außerschulische Probleme zu lösen [1]. Mit Hilfe eines Videoanalyseprogramms wie „measure Dynamics“ können die Schüler aus dem entdeckenden Lernen heraus Problemlösestrategien erlernen, die über die fachlichen Strategien („Wie wende ich mein Wissen auf dieses Problem an?“) hinaus zu allgemeinen Problemlösestrategien („Wie gehe ich an ein ganz neues Problem wie die Verwendung eines Videoanalyseprogramms heran?“) gehen. Neben dem Einsatz eines Videoanalyseprogramms zur Erstellung einer Selbstlerneinheit kann der Lehrer es auch zur Gestaltung eines problemorientierten Unterrichts verwenden. Also anhand von Alltagssituationen bewusst kognitive Konflikte bei den Schülern hervorrufen und diese dann mit den Schülern durch analysierte Realversuchsvideos lösen.

Ein weiterer Vorteil der Videoanalyse ist die Möglichkeit, Größen zu visualisieren, die normalerweise mit dem menschlichen Auge nicht sichtbar sind. Dabei handelt es sich um Größen wie „Geschwindigkeit“ oder „Beschleunigung“. Ihr vektorieller Charakter wird durch die Darstellung von bewegten Pfeilen betont und das Verständnis der Schüler bewusst in diese Richtung geschult, wodurch eventuelle Fehlvorstellungen vermieden oder korrigiert werden können. Der zweidimensionale Einstieg in die Mechanik kann durch den Einsatz von Videoanalyse erleichtert und veranschaulicht werden.

3. Die Einführung mechanischer Grundgrößen anhand zweidimensionaler Bewegungen

Die Größen „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ werden im Mechanikunterricht sinnvollerweise an zweidimensionalen Bewegungen eingeführt [7]. Als Beispiel soll die Kreisfahrt einer Spielzeugschienenbahn mit konstantem Tempo dienen. Zunächst kann die Bahnkurve gezeigt werden, z.B. in dem man die Ortsmarken stempelt (siehe Abb. 1). Schließlich kann der Ortsvektor $\vec{x}$ gezeigt oder die Ortsvektoren hinter dem Wagen gestempelt werden (siehe Abb. 2).

Zur Erarbeitung der Geschwindigkeit über die Ortsänderung kann der Ortsvektor der aktuellen Position der Eisenbahn (weißer Pfeil) und zukünftigen

(ein Frame weiter) Position (grüner Pfeil) dargestellt werden. Der türkise Pfeil zeigt dann die Ortsänderung (also: $\Delta\vec{x} = (\vec{x}_1 - \vec{x}_2)$) an und besitzt die gleiche Richtung wie der Geschwindigkeitspfeil (gelber Pfeil), der aus diesem durch Division durch Δt entsteht.

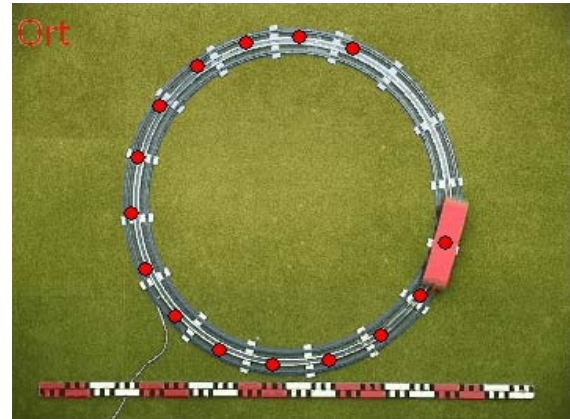


Abb. 1: gestempelte Ortsmarken



Abb. 2: gestempelter Ortsvektor des Wagens

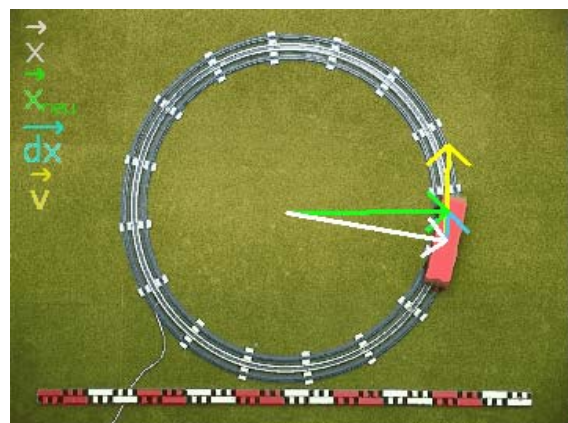


Abb. 3: Zur Herleitung der Geschwindigkeit

Durch diese Visualisierung kann der Schüler erkennen, dass die Geschwindigkeit immer in Richtung der Ortsänderung zeigt und versteht so den vektoriellen Charakter dieser Größe besser. Die Geschwindigkeit wird dadurch von Beginn an als Vektor gesehen und Fehlvorstellungen können vermieden beziehungsweise korrigiert werden. Die Be-

trachtung von der Bahnkurve und $\vec{x}$ besitzt zudem den Vorteil, dass klar zwischen den Größen Ort und Weglänge unterschieden wird. Außerdem wird eine einfache Differenzierung geübt und die Einführung der Beschleunigung vorbereitet. Genauso wie hier aus $\Delta\vec{x}$ nun $\vec{v}$ wird, wird später aus $\Delta\vec{v}$ die Beschleunigung $\vec{a}$ (siehe Abb. 4).

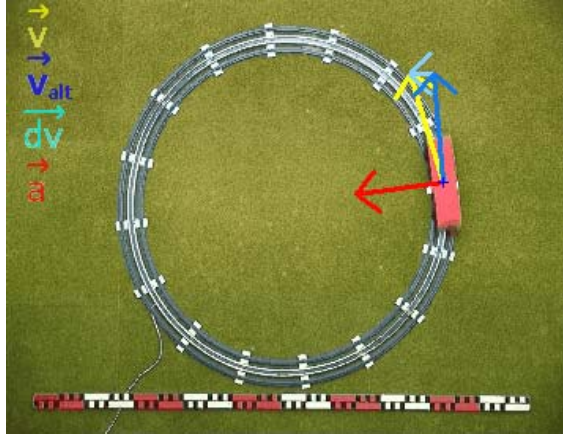


Abb. 4: Zur Herleitung der Beschleunigung

In Abb. 4 beschreibt der rote Pfeil die Beschleunigung und ist annähernd parallel zum türkisen Pfeil, der die Geschwindigkeitsänderung visualisiert. Er setzt sich aus der aktuellen Geschwindigkeit (gelber Pfeil) und der alten Geschwindigkeit (dunkelblauer Pfeil) zusammen. Beim Abspielen des dazugehörigen Projekts erkennt man deutlich, dass die Beschleunigung bei konstantem Tempo immer nach innen in den Kreis zeigt und im Idealfall sogar Richtung Kreismittelpunkt gerichtet ist.

Auch den Beschleunigungsvektor kann man nun wieder stempeln. Das ist ganz besonders dann interessant, wenn das Tempo des Wagens variiert und die Beschleunigung neben der radialen Komponente noch eine tangentiale Komponente besitzt. Wird das Tempo der Eisenbahn erhöht, so ist die Beschleunigung nicht genau zum Kreismittelpunkt gerichtet, sondern besitzt eine Komponente in Vorwärtsrichtung der Bewegung. (siehe Abb. 5).

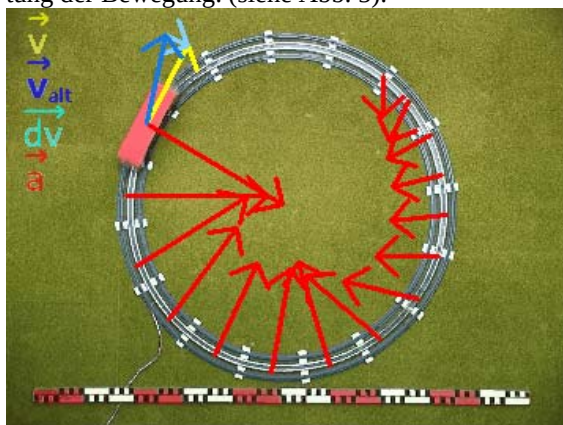


Abb. 5: Gestempelte Beschleunigung bei steigendem Tempo

4. Verschiedene Einsatzmöglichkeiten

Die Videos mit den dynamischen Darstellungen können mit Hilfe von „measure Dynamics“ recht unterschiedlich in Unterricht eingesetzt werden. Ein Video kann im Unterricht mit der Software manuell oder automatisch analysiert werden, was in Gruppenarbeit im Computerraum oder von einer Person im Fachraum geschehen kann. Anschließend können die gewünschten Darstellungen erstellt oder einfacher aus einer Liste (Filter) zugeschaltet werden. Da alle Einstellungen mit allen Darstellungen als ein „Projekt“ abgespeichert werden können, kann bei weiteren Beispielen auch einfach ein solches Projekt geöffnet werden. Eine erneute Analyse ist dann nicht mehr nötig und das Projekt kann als Lehrvideo mit allen voreingestellten Repräsentationen genutzt werden.

Schließlich kann das Video auch mit den ikonisch dynamischen Repräsentationen als avi-Datei exportiert werden und so von jedermann ohne die Originalsoftware verwendet und als Lehrvideo gezeigt werden.

5. Weitere Beispiele

5.1 Das Fadenpendel

Das Fadenpendel ist ein komplexer physikalischer Vorgang, der selbst von manchen Lehrern nicht in seiner Gänze verstanden wird. Besonders schwierig an der Bewegung des Fadenpendels ist die Betrachtung der Beschleunigung. Die Richtung der Beschleunigung setzt sich aus einer tangentialen und einer radialen Komponente zusammen. Der Anteil dieser beiden Teile ändert sich mit dem periodischen Verlauf des Pendels (siehe Abb. 6a bis 6d). An den Umkehrpunkten und dem Ruhepunkt kann sogar eine exakte Aussage über die Zusammensetzung der Beschleunigung gemacht werden. Die Radialbeschleunigung ist am Ruhepunkt maximal und am Umkehrpunkt Null. Bei der Tangentialbeschleunigung verhält es sich genau umgekehrt: Sie ist am Umkehrpunkt des Pendels maximal und im Ruhepunkt besitzt sie ihr Minimum (siehe Abb. 6a und 6c).

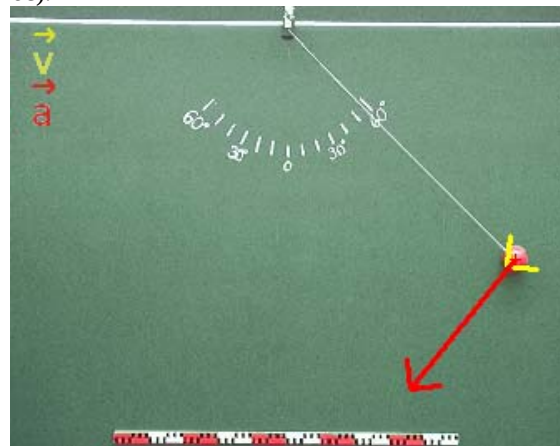


Abb. 6a: Geschwindigkeit und Beschleunigung im Umkehrpunkt (60° Auslenkung)

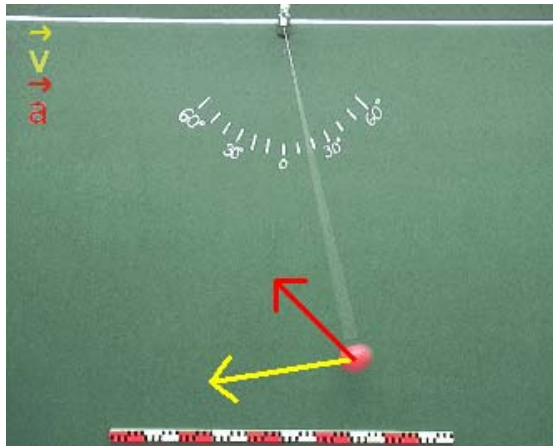


Abb. 6b: Fadenpendel kurz vor dem Ruhepunkt

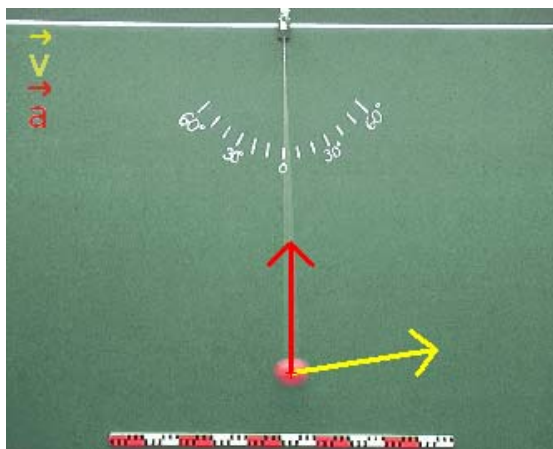


Abb. 6c: Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Fadenpendels im Ruhepunkt

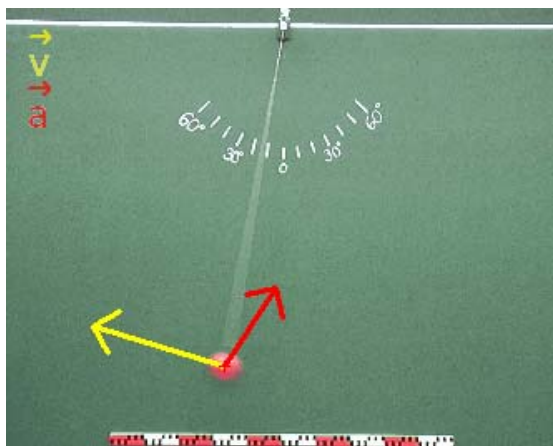


Abb. 6d: Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Fadenpendels kurz nach dem Ruhepunkt

5.2 Impuls bei zweidimensionalem Stoßvorgang

Eine weitere Einsatzmöglichkeit der Videoanalyse ist die Impulsbetrachtung zweier Pucks auf einem Luftkissentisch. Durch die dynamische Darstellungsmöglichkeit können die einzelnen Geschwindigkeiten der Pucks vor und nach dem Zusammenstoß dargestellt werden (siehe Abb. 7a und 7b).

Neben der Geschwindigkeit wäre es zusätzlich möglich, die Impulse der Pucks $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ dynamisch als Pfeile darstellen zu lassen. Außerdem ist es sinnvoll, sich die Beträge der beiden Geschwindigkeiten (siehe Abb. 7c) und der beiden Impulse in Zeit-Graphen anzuschauen.

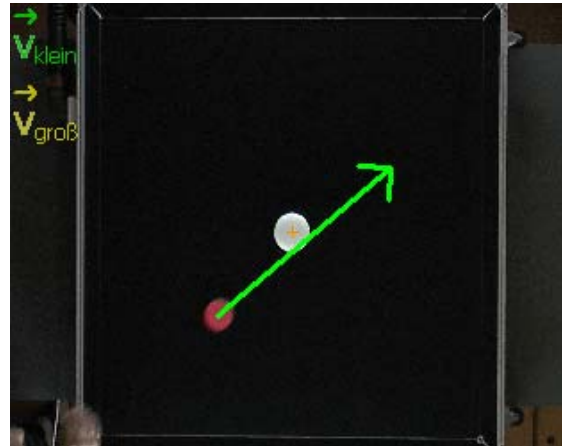


Abb. 7a: Geschwindigkeit zweier Pucks vor dem Zusammenstoß (Masseverhältnis von 1:1,77)



Abb. 7b: Geschwindigkeiten zweier Pucks nach dem Zusammenprall (Masseverhältnis von 1:1,77)

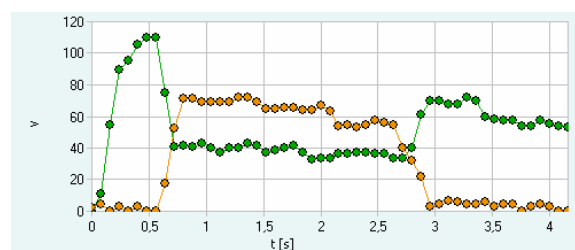


Abb. 7c: Zeitlicher Verlauf des Betrags der Geschwindigkeiten der beiden Pucks in cm/s (berechnet in measure Dynamics)

5.3 Berg- und Talfahrt

Die Analyse einer Berg- und Talfahrt eines Autos eignet sich sehr gut, um mit Schülern den Zusammenhang zwischen Oberflächenform und Beschleunigung zu erarbeiten. Es zeigt sich zunächst, dass im niedrigsten Punkt der Bahn die Beschleunigung senkrecht nach oben zeigt (siehe Abb. 8a).

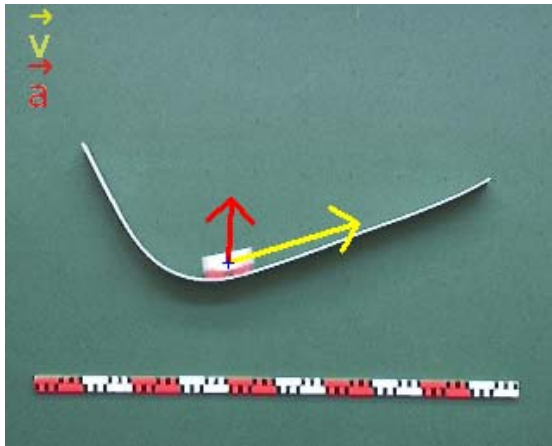


Abb. 8a: Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Wagens im tiefsten Punkt der Bahn

Außerdem erkennt man, dass beim Schnellerwerden Geschwindigkeit und Beschleunigung in gleiche Richtung weisen (siehe Abb. 8c) und beim Bremsvorgang entgegengesetzt gerichtet sind (siehe Abb. 8b).

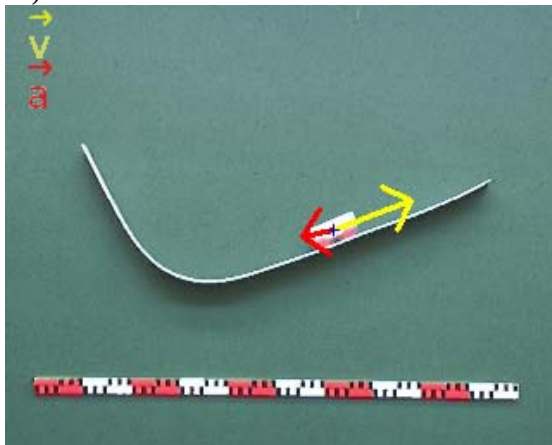


Abb. 8b: Geschwindigkeit und Beschleunigung beim Bremsvorgang

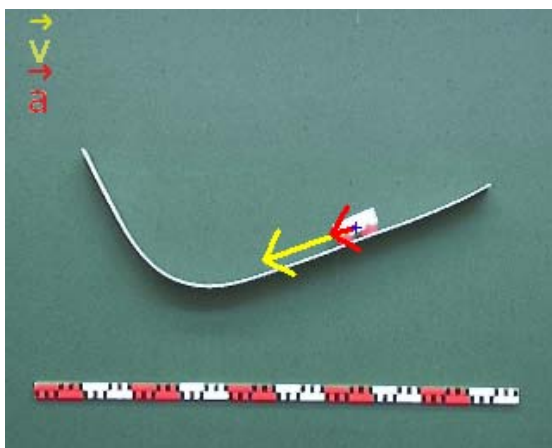


Abb. 8c: Geschwindigkeit und Beschleunigung beim Schnellerwerden

Interessant ist es auch, den zeitlichen Verlauf der kinetischen, potentiellen und gesamten Energie des Wagens zu betrachten (siehe Abb. 8d).

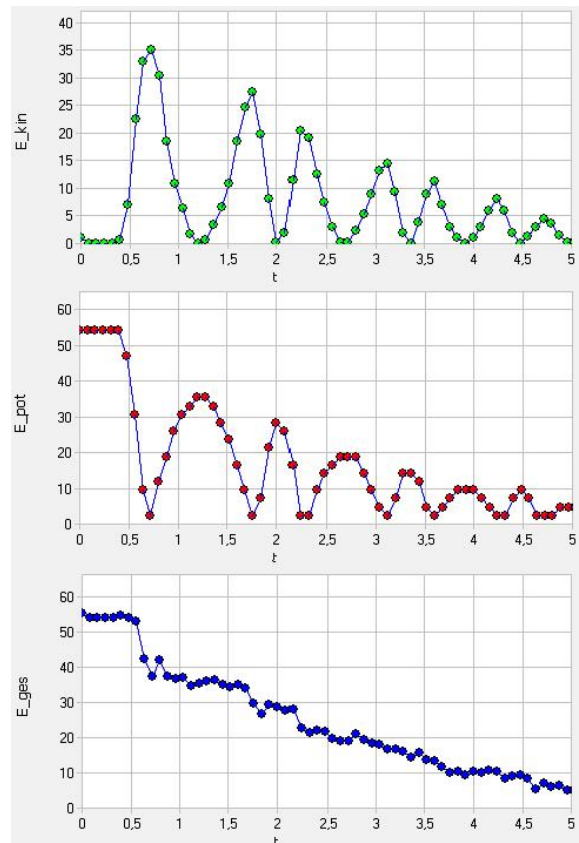


Abb. 8d: Zeitlicher Verlauf der kinetischen, potentiellen und gesamten Energie des Wagens (berechnet in measure Dynamics)

6. Weiteres auf der Tagungs-CD

Auf der Tagungs-CD befindet sich die vollständige Staatsexamensarbeit mit theoretischen Betrachtungen und weiteren Beispielen [5]. Außerdem befinden sich auf dieser Tagungs-CD zwei exportierte Videos als avi-Dateien, in denen die dynamischen Pfeile in das Video eingeblendet sind.

7. Literatur

- [1] BEINBRECH, C. (2003): Problemlösen im Sachunterricht der Grundschule, eine empirische Studie zur Gestaltung von Lehr-Lernumgebungen im Hinblick auf die Förderung des Problemlöseverhaltens im Sachunterricht, Dissertation zu Erlangung des akademischen Grades des Doktors in der Erziehungswissenschaft, Westfälischen Wilhelms-Universität Münster (http://miami.uni-muenster.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-1307/Diss_Beinbrech.pdf) (Stand 11/2007)
- [2] BENZ, M.; WILHELM, T. (2008): measure Dynamics – Ein Quantensprung in der digitalen Videoanalyse, In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A.; GRÖTZEBAUCH, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, auf dieser Tagungs-CD
- [3] HEUER, D. (1993): Computerunterstütztes Experimentieren – eine realistische Chance, Physik-Verstehen zu fördern. In: Behrendt, H. (Hrsg.):

Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Erfurt, September 1992, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, S. 130-132

- [4] MAYER, R. E. (2001): Multimedia Learning, 1. Auflage, Cambridge University Press, Cambridge
- [5] MICHEL, C. (2008): Videoanalyse zweidimensionaler Bewegungen mit dynamisch ikonischen Repräsentationen im Physikunterricht, In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A.; GRÖTZEBAUCH, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, auf dieser Tagungs-CD
- [6] SWELLER, J.; VAN MERRIENBOER, J. J. G.; PAAS, F. G. W. C. (1998): Cognitive Architecture and Instructional Design, In: Educational Psychology Review, Vol.10, Nr.3, Springer Science+Business Media B.V., S. 251- 292
- [7] WILHELM, T. (2005): Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung, Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 46, Berlin, Logos Verlag

8. Danksagung

Besonderer Dank gilt der Firma PHYWE und dem Entwicklungsleiter Dr. Markus Grumann für das zur Verfügung Stellen der Software und von Experimentiergeräten sowie dem Programmierer Dipl.-Phys. StR z.A. Michael Suleder für Hilfe bei Problemen und für das Umsetzen unserer Wünsche.

9. Adresse

Christine Michel, AR Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut der Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, Tel. 0931/888-5788,
chrimi@o2online.de
wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de
www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm

4.6 Schulbücher zur Mechanik

4.6.1 Mechanik in Realschulbüchern

Quelle:

FLIEßER, I.; WILHELM, T.: *Vergleich und Analyse der Sachstruktur von Realschulbüchern in Teilbereichen der Mechanik* - In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Hannover 2010, ISSN 2191-379X, 2010, www.phydid.de

Inhalt und Bezug zum Thema:

Für den Mechanikunterricht gibt es verschiedene Sachstrukturen. Da Schulbücher als „heimliche Lehrpläne“ gelten, werden Ergebnisse einer Analyse von Physikschulbüchern der 7. und 8. Jahrgangstufe der bayerischen Realschule vorgestellt. Dabei wurde u.a. betrachtet, inwiefern unterschiedliche Aspekte verschiedener Sachstrukturen bei der Einführung der Kraft und bei der Behandlung der Kinematik und Dynamik betont werden.

Insgesamt wurden erhebliche Unterschiede in den Schulbüchern festgestellt, nicht nur bezüglich der Gestaltung, sondern insbesondere in der Sachstruktur und dem Berücksichtigen von bekannten Fehlvorstellungen. In den Schulbüchern eines Verlages wird auf die Schülervorstellungen eingegangen und es werden neuere Sachstrukturen zumindest ansatzweise integriert. Das zeigt sich vor allem durch die behandelten zweidimensionalen Bewegungen und der damit verbundenen Hervorhebung der Richtung einer Bewegung, durch die konsequente Unterscheidung von Schnelligkeit und Geschwindigkeit, die Betonung der Geschwindigkeit als vektorielle Größe, die Verwendung von Ortsänderungs- und Geschwindigkeitsänderungsvektoren und den vorgeschlagenen Einsatz von Computermesswerterfassung und Videoanalyse.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Ich habe mir Inhalt und Konzept einer Staatsexamensarbeit überlegt, in der der Mechanikteil der verschiedenen Physikschulbücher der bayerischen Realschule verglichen wird. Für diese Staatsexamensarbeit habe ich per Aushang einen Studierenden gesucht. Schließlich habe ich dann mit Herrn Fließner zusammen gearbeitet und ihn intensiv beim Vergleich der Bücher betreut.

Vergleich und Analyse der Sachstruktur von Realschulbüchern in Teilbereichen der Mechanik

Ingo Fließner, Thomas Wilhelm

Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik der Physik, Am Hubland, 97074 Würzburg
ingofliessner@googlemail.com, wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de

Kurzfassung

Im Mechanikunterricht wird traditionell bei der Einführung der Kraft der statische Aspekt betont. Die dynamischen Aspekte sowie die kinematischen Größen werden dann meist nur anhand eindimensionaler Bewegungen behandelt. Seit knapp 40 Jahren werden jedoch bereits andere Sachstrukturen formuliert und weiterentwickelt – die aber bisher z.T. kaum Eingang in die Praxis gefunden haben.

Da Schulbücher als „heimliche Lehrpläne“ gelten, sollen Ergebnisse einer Analyse von Physikschulbüchern der 7. und 8. Jahrgangsstufe der bayerischen Realschule vorgestellt werden, bei der insbesondere die Sachstruktur der Mechanik analysiert wurde. Dabei wurde u.a. betrachtet, inwiefern unterschiedliche Aspekte verschiedener Sachstrukturen bei der Einführung der Kraft und bei der Behandlung der Kinematik und Dynamik betont werden. Es zeigt sich, dass es Unterschiede gibt und z.T. neue Ansätze integriert werden.

1. Einführung

Obwohl immer mehr neue Medien in den Physikunterricht Einzug halten, hat das Physikschulbuch immer noch seine Daseinsberechtigung. Schulbücher nehmen in der Lehre und der Forschung der Fachdidaktik Physik eine untergeordnete Stellung ein, obwohl sie oft als „heimliche“ Lehrpläne der Lehrer bezeichnet werden. Schulbuchautoren interpretieren die Aufgaben des Schulbuches verschieden, setzen unterschiedliche Schwerpunkte, verwenden andere Beispiele zur Veranschaulichung, betonen und gewichten den Inhalt von Zusammenhängen unterschiedlich und stellen Inhalte in einer anderen Reihenfolge dar. Dies kann bei Schülern zu einer Beeinflussung des Lernprozesses führen. Im Rahmen einer Staatsexamensarbeit [1] wurden Physikbücher für bayerische Realschulen von drei verschiedenen Verlagen für die 7. und 8. Jahrgangsstufe beschrieben, untersucht und verglichen:

- a) HÖRTER, Christian: Physik 7 (2001) und 8 (2002) – Realschule Bayern, Cornelsen Verlag (im Folgenden als B1-7 und B1-8 bezeichnet)
- b) ERNHOFER, Rupert et al.: Physik 7 (2. Auflage, 2005) und 8 (2003) – Newton, Oldenbourg Schulbuchverlag (im Folgenden als B2-7 und B2-8 bezeichnet)
- c) GEIPEL, Rudolf; REUSCH, Wolfgang: Physik 7 (2002) und 8 (2005), C.C. Buchners Verlag (im Folgenden als B3-7 und B3-8 bezeichnet)

Der Fokus der Untersuchung liegt auf der Einführung des Kraftbegriffes in der 7. Jahrgangsstufe und auf Bewegungen, die an bayerischen Realschulen in der 8. Jahrgangsstufe betrachtet werden.

2. Verwendete Analyse Kriterien

Bei der Untersuchung wurde zunächst auf die sieben Strukturelemente eines Schulbuches, die MERZYN [2] beschreibt, eingegangen. Der Text, das offensichtlichste und wichtigste Element eines Schulbuches, wurde mit einer geeigneten Lesbarkeitsformel, die FELDNER [3] vorstellt, analysiert. Beim Strukturelement Merkmalsstoff wurde darauf geachtet, wie dieser abgebildet und gekennzeichnet ist. Bei den Abbildungen, die sich in drei Hauptgruppen einteilen lassen, nämlich Fotos und bildhafte Zeichnungen, schematische Zeichnungen und Diagramme, wurde die Anordnung und Einbindung in den Text untersucht. Um einen Überblick über die Verwendung von Tabellen in den Schulbüchern zu bekommen, wurde deren Häufigkeit festgestellt. Bei den Experimentierangaben wurden die Schulbücher daraufhin analysiert, ob Experimentieranleitungen, also Anleitungen, mit denen die Schüler selbst experimentieren können, oder Experimentierbeschreibungen, die die experimentelle Idee in ihren Grundzügen darstellen, verwendet werden. Beim Strukturelement Aufgaben wurde eine Typisierung nach GODAU [4] vorgenommen, der den Aspekt der Lebensweltbezogenheit und der Schülerhandlungen betont. Bei den Leiteinrichtungen, die vor allem das Inhaltsverzeichnis und das Stichwortverzeichnis umfassen, wurden deren Gestaltung und die Formulierung der Überschriften analysiert.

Weiterhin wurden einzelne Kapitel zur Mechanik in der 7. und 8. Jahrgangsstufe in den drei Schulbüchern verglichen und vor allem auch auf den Umgang mit Schülervorstellungen, die in diesem Teil-

gebiet der Physik besonders ausgeprägt sind, geachtet. Ziel war es herauszufinden, ob die Schulbücher auf die Fehlvorstellungen zur Bewegungsrichtung, Tempo und Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft eingehen oder ob sie diese nur noch weiter fördern.

Außerdem wurden die ausgewählten Teilkapitel zur Mechanik daraufhin analysiert, welche Sachstruktur verwendet wurde. Es gibt Belege dafür, dass Lernschwierigkeiten auch durch die Sachstruktur des Unterrichts entstehen können [5]. Gerade die Geschwindigkeit, die Beschleunigung oder die Kraft lassen sich unterschiedlich einführen. Das von WIESNER, HOPF, WILHELM, WALTNER & TOBIAS konzipierte Mechanikkonzept [6 - 8] für die 7. Jahrgangsstufe des Gymnasiums, dessen Grundideen bereits mehrfach untersucht und immer weiter entwickelt wurden, fordert, die Mechanik von Anfang an an zweidimensionalen Bewegungen zu betonen und den Kraftbegriff dynamisch einzuführen. Es wurde also bei der Untersuchung der drei Schulbücher darauf geachtet, ob und inwiefern solche neueren Ansätze zur Einführung der Mechanik integriert werden.

3. Analyseergebnisse

3.1 Gestaltung der Schulbücher

Es ergaben sich bei der Untersuchung der Textschwierigkeit in den ausgewählten Kapiteln zum Teil große Unterschiede zwischen den drei Schulbüchern. So stellte sich heraus, dass B2-7 sprachlich eher für eine höhere Jahrgangsstufe geeignet ist, während B1-7 und B3-7 eine der Altersstufe gerechte Sprache verwenden.

Nach einer subjektiven Kategorisierung der Aufgaben wurde festgestellt, dass in der 7. Jahrgangsstufe in allen drei Büchern in den ausgewählten Kapiteln eher qualitative Denkaufgaben gestellt werden. In den Büchern für die 8. Jahrgangsstufe zeigt sich ein Zuwachs bei den mathematisch-rechnerischen Aufgaben.

Des Weiteren kann den Büchern B3-7 und B3-8 die klarste und konsequenteste Struktur innerhalb des Buches zugestanden werden.

3.2 Einführung der „Kraft“

Bei der Analyse der Sachstruktur und dem Umgang mit Schülervorstellungen erkennt man bei der Einführung der Kraft, dass alle drei Bücher entsprechend dem Lehrplan eher den statischen Aspekt der Kraft betonen. Weiterhin wird die Schülerfehlvorstellung „Kraft kann man haben“ durch die einführenden Betrachtungen der durch Muskelkraft verursachten Bewegungsänderungen oder Verformungen mehr oder weniger gefördert (in B2-7) oder aufgearbeitet (in B3-7). B2-7 geht explizit von der Muskelkraft aus und versucht, ausgehend von ihr weitere Kraftarten zu benennen. In B3-7 versucht die Überschrift „Hat allein der Starke Kraft?“ und auch die

Abbildung mit dem „kräftigen“ Obelix auf diese Fehlvorstellung einzugehen.

Beim Thema „Vergleich und Gleichheit von Kräften“ zeigt sich schon ein differenziertes Bild, da B3-7 den dynamischen Aspekt gleichberechtigt in Versuchen neben den statischen Aspekt stellt. In den anderen beiden Büchern wird entweder am Rande oder gar nicht darauf eingegangen. Untersucht man die Abschnitte auf Begünstigungen von Schülervorstellungen, so fällt der Satz in B2-7 auf: „Wie kann festgestellt werden, welcher von zwei Schülern über die größere Muskelkraft in den Armen verfügt?“, der sicherlich die Vorstellung der Schüler „Kraft zu haben“ unterstützt.

Beim Wechselwirkungsprinzip werden in B3-7 sehr originelle und anschauliche Versuche (z.B. Spülrauten- oder Milchdosenboot), die die Schüler motivieren, dargestellt. In B2-7 wird mit den Stativstangen und dem Spielzeugtruck das „nach hinten Wegschieben der Straße“ beim Anfahren eines Fahrzeugs sehr gut verdeutlicht. In B3-7 ist lobenswert, dass die Formulierung „Kraft = Gegenkraft“ sofort vom Gleichgewicht von Kräften abgegrenzt wird, indem daraufhin gewiesen wird, dass beim Wechselwirkungsprinzip die Kräfte an unterschiedlichen Körpern angreifen, wobei beim Gleichgewicht die Kräfte auf einen Körper wirken.

3.3 Thema „Bewegungen“

Beim Themenkomplex Bewegungen in der 8. Jahrgangsstufe stellt man fest, dass allein in B3-8 ein Kapitel zur Erfassung und Beschreibung von Bewegungen existiert. Die Behandlung der Bahnkurve einer Spiralbewegung (siehe Abb. 1) zu Beginn des Dynamikunterrichts macht deutlich, dass die Autoren die Absicht hatten, zweidimensionale Bewegungen und den Aspekt der Richtung zu betonen.

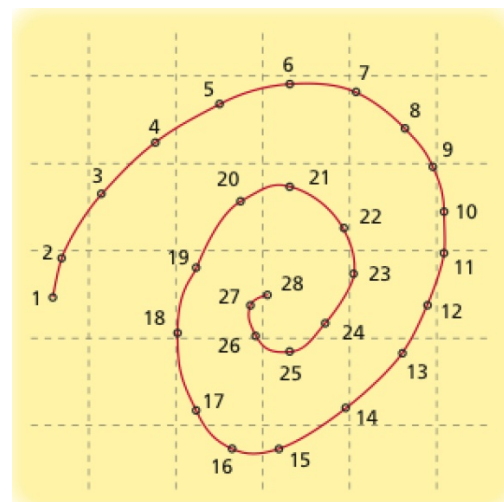


Abb.1: Zweidimensionale Bewegung aus B3-8

Außerdem wird in den Versuchen vorgeschlagen, die Mausebewegung mit einem Computerprogramm aufzuzeichnen beziehungsweise die Bewegung eines ferngesteuerten Modellautos von oben mit einer Videokamera zu filmen, um sich anschließend mit-

hilfe eines Videoanalyseprogramms die Bahnkurven mit Zeitmarken oder Wertetabellen erzeugen zu lassen. Diese Art der Messwerterfassung und der Analyse von Bewegungen findet man nur in diesem Schulbuch. Weiterhin wird schon ganz zu Beginn der Dynamik auf eine geeignete Wortwahl geachtet, um keine Schülerfehlvorstellungen zu erzeugen, denn es wird der Begriff *Schnelligkeit* verwendet, wenn man alltagssprachlich von der *Geschwindigkeit* sprechen würde.

Bei der Gegenüberstellung von B1-8, B2-8 und B3-8 beim Thema gleichförmige Bewegungen fällt als Erstes auf, dass in B3-8 die Themen „gleichförmige Bewegung“ und „Geschwindigkeit“ als zwei getrennte, aber aufeinander folgende Kapitel betrachtet werden. In B1-8 und B2-8 verschmelzen diese beiden Themen, wobei in B2-8 eher die gleichförmige Bewegung und in B1-8 die Geschwindigkeit eher im Mittelpunkt stehen. Nur in B3-8 wird außerdem explizit eine Verbindung zwischen der gleichförmigen Bewegung und dem Fehlen einer Kraft hergestellt.

B1-8 und B3-8 führen die Geschwindigkeit sinnvollerweise als Quotient der Wegdifferenz und der Zeitdifferenz ein:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad \{1\}$$

B2-8 verwendet dagegen in der Definition der gleichförmigen Bewegung die übervereinfachte Gleichung

$$v = \frac{s}{t}, \quad \{2\}$$

die eher zu Fehlvorstellung führt, und trägt damit nicht zu einem tieferen Verständnis des physikalischen Geschwindigkeitsbegriffs bei.

Betrachtet man den Umgang mit Schülervorstellungen, so bemerkt man, dass B1-8 und B2-8 es nicht schaffen, die Begriffe „Schnelligkeit“ bzw. „Tempo“ einerseits und „Geschwindigkeit“ andererseits konsequent und sauber zu trennen. Allein in B3-8 wird die Schnelligkeit als Geschwindigkeitsbetrag konsequent verwendet und mit dem im Alltag vom Tachometer im Auto oder am Fahrrad angezeigten Tempo in Verbindung gesetzt.

3.4 Geschwindigkeit als Vektor

Die beiden Bücher B1-8 und B2-8 haben ähnliche Vorgehensweisen, indem sie die Überlagerung der Strömungsgeschwindigkeit eines Flusses mit der des Schwimmers beim Überqueren des Flusses betrachten. Der vektorielle Charakter der Geschwindigkeit wird aber nur in diesem Kapitel kurz berücksichtigt, ansonsten fällt er im weiteren Dynamikunterricht nicht ins Gewicht.

Das Kapitel „Geschwindigkeit als Vektor“ wird dagegen in B3-8 sehr betont. Gerade auch mit den beiden Beispielen zu Beginn des Kapitels (Kreisbewegung im Kettenkarussell und Bewegung mit der

Rolltreppe) (siehe Abb. 2+3) wird anhand zweidimensionaler Bewegungen deutlich gemacht, dass die Geschwindigkeit im Gegensatz zur Schnelligkeit Vektorcharakter besitzt. Bemerkenswert ist, dass in diesen Abbildungen Ortsänderungsvektoren eingezeichnet werden, um die Verschiebungen sowohl bei der Kreisbewegung im Karussell, als auch bei der Rolltreppe hervorzuheben.

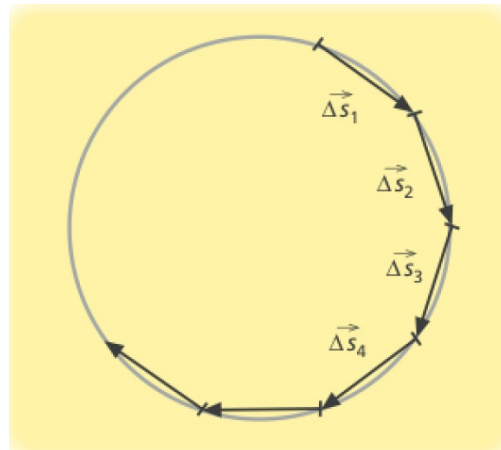


Abb.2: Ortsänderung bei der Fahrt im Karussell aus B3-8

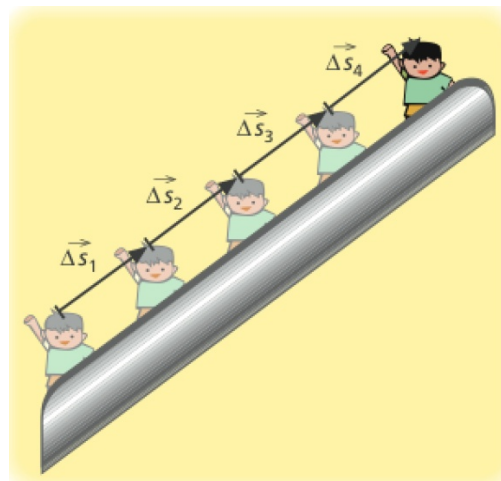


Abb.3: Verschiebungsvektoren bei der Fahrt mit der Rolltreppe aus B3-8

Weiterhin wird in B3-8 wieder wie in den vorherigen und den nachfolgenden Kapiteln klar zwischen Schnelligkeit und Geschwindigkeit unterschieden, um den Schülervorstellungen entgegenzutreten. Am Ende dieses Kapitels wird das Spiel „Autorennen mit Papier und Bleistift“ (entnommen aus [9] oder [10]) vorgestellt. Die Schüler erfahren hier spielerisch, dass es wichtig ist, bei Bewegungen den Betrag und die Richtung der Geschwindigkeit zu berücksichtigen. B3-8 zeigt so auf eine sehr ansprechende Art und Weise, dass es durchaus möglich ist, die Dynamik in der Realschule auch anhand zweidimensionaler Bewegungen zu behandeln und die Richtung der Geschwindigkeit zu betonen.

3.5 Bewegung unter Einwirkung einer konstanten Kraft

Auch beim Thema „gleichmäßig beschleunigte Bewegungen“ betrachten die Bücher B1-8 und B2-8 keine zweidimensionalen Bewegungen und vernachlässigen den vektoriellen Charakter der Geschwindigkeit. Zur Messwerterfassung werden dort eher altmodische Messwerterfassungsmöglichkeiten vorgeschlagen, wie Lichtschranken, Tropfwassersysteme, Metronom und Tachometer, während in B3-8 die Aufzeichnung der Bewegung mit einem Computermesswerterfassungssystem vorgeschlagen wird, da hier sofort und viel einfacher am Computer Messwerttabellen und Diagramme ausgegeben werden können.

Zu Beginn dieses Kapitels in B2-8 wird die konstante Motorkraft (hier stellt sich natürlich auch die Frage, ob sich das Auto selbst ohne Wechselwirkung mit der Umgebung beschleunigt) für die Beschleunigung eines Fahrzeugs bis zu einer gewissen Endgeschwindigkeit angesprochen. Dabei wird allerdings nicht erwähnt, dass hier die Luftreibungskraft dafür verantwortlich ist, dass das Fahrzeug nicht ständig weiter beschleunigt wird. Dies kann die Schülervorstellung fördern, dass eine konstante Kraft zu einer konstanten Geschwindigkeit führt.

Wie schon bei der gleichförmigen Bewegung ist auch bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung in B3-8 eine Zweiteilung vorhanden. Auf den ersten zwei Seiten geht es um die Geschwindigkeitsänderung unter der Einwirkung einer konstanten Kraft und auf den anderen beiden Seiten wird der zurückgelegte Weg behandelt. Dies stellt einen großen Unterschied zu den anderen beiden Büchern dar, da hier zuerst auf die Geschwindigkeitsänderung und dann erst auf den zurückgelegten Weg eingegangen wird. Schön ist, dass hier zu Beginn am Rande wiederholt wird, was die Ursache für die Veränderung eines Bewegungszustandes eines Körpers ist und dass man bei der Veränderung des Bewegungszustandes Betrag und Richtung unterscheiden muss. Es wird hervorgehoben, dass eine Kraft in oder gegen die Bewegungsrichtung zu einer Erhöhung oder Verringerung des Betrages der Geschwindigkeit führt, wobei eine Kraft senkrecht zur Bewegungsrichtung die Richtung der Geschwindigkeit ändert. Hier ist gut zu erkennen, dass man versucht, den Bogen zwischen dem in der 7. Jahrgangsstufe gelernten Kraftbegriff und der Dynamik zu spannen.

In Abb. 4 erkennt man, dass die Geschwindigkeitsvektoren bei einer konstanten Zugkraft um eine konstante Änderung $\Delta \vec{v}$ verlängert werden. Die Verwendung von $\Delta \vec{v}$ zeigt, dass in diesem Schulbuch neuere Sachstrukturen zumindest zum Teil integriert wurden.

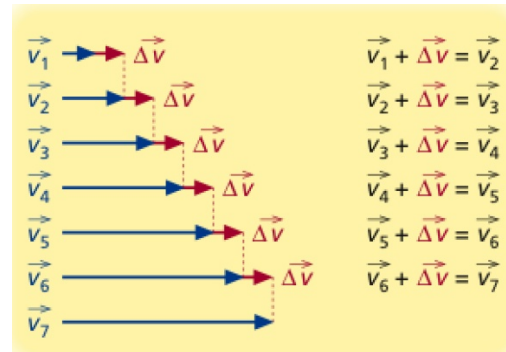


Abb.4: Geschwindigkeitsvektoren und ihre konstante Änderung bei konstanter Zugkraft aus B3-8

Im zweiten Teil von B3-8 wird außerdem erklärt, dass bei einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung der gleiche Weg zurückgelegt wird, wie bei einer gleichförmigen Bewegung mit der mittleren Geschwindigkeit v_m :

$$v_m = \frac{v_1 + v_2}{2} . \quad \{3\}$$

Dies ist eine einfachere und allgemeingültigere Anleitung zur Berechnung des Weges als mit der Gleichung

$$s = \frac{1}{2} a \cdot t^2 , \quad \{4\}$$

die nur für den Spezialfall gilt, dass zum Zeitpunkt 0 die Geschwindigkeit 0 ist.

Das Schulbuch B2-8 führt als einziges in einer Zusatzinformation die Beschleunigung als quantitative Größe ein, obwohl dies der Lehrplan nicht verlangt. Schließlich wird dort sogar die Gleichung {4} präsentiert.

4. Fazit

Insgesamt wurden erhebliche Unterschiede in den Schulbüchern festgestellt, nicht nur bezüglich der Gestaltung, sondern insbesondere in der Sachstruktur und dem Berücksichtigen von bekannten Fehlvorstellungen. So lässt sich feststellen, dass in B3-7 und B3-8 auf die Schülervorstellungen eingegangen wird und neuere Sachstrukturen zumindest ansatzweise integriert sind. Das zeigt sich vor allem durch die behandelten zweidimensionalen Bewegungen und der damit verbundenen Hervorhebung der Richtung einer Bewegung, durch die konsequente Unterscheidung von Schnelligkeit und Geschwindigkeit, die Betonung der Geschwindigkeit als vektorielle Größe, die Verwendung von Ortsänderungs- und Geschwindigkeitsänderungsvektoren und den geforderten Einsatz von Computermesswerterfassung und Videoanalyse. Man kann also sagen, dass es schon ein regulär für den Unterricht zugelassenes Physik-Schulbuch für die Realschule gibt, das zum Teil gleiche Ideen verwendet, wie das Mechanikkonzept, welches von WIESNER, HOPF, WILHELM, WALTNER & TOBIAS für die siebte Jahrgangsstufe des Gymnasiums entwickelt und empirisch untersucht wurde.

5. Literatur

- [1] FLIEBER, Ingo (2010): Vergleich und Analyse der Sachstruktur von Realschulbüchern im Themenbereich der Mechanik, Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg, www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/Realschulbuecher.pdf
- [2] MERZYN, Gottfried (1994): Physikschulbücher, Physiklehrer und Physikunterricht – Beiträge auf der Grundlage einer Befragung westdeutscher Physiklehrer, Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel, S. 17-24
- [3] FELDNER, Peter (1999): Leicht einsetzbare Verfahren zur Untersuchung der Sprachgestaltung unserer Schulbücher – Untersuchungsergebnisse bei Physik-Schulbüchern. In: Der Mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 1999, Nr. 1, S. 51-53
- [4] GODAU, Jürgen (1998): Übungsaufgaben in Schulbüchern. In: Unterricht Physik 1998, Nr. 48, S. 35-38
- [5] STARAUSCHEK, Erich (2010): Hat die physikalische Sachstruktur einen Einfluss auf das Lernen von Physik?. In: Höttecke, D. (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDGP in Dresden 2009, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 30, Lit-Verlag, Münster
- [6] HOPF, Martin; WALTNER, Christine; WILHELM, Thomas; WIESNER, Hartmut (2009): Konzeption einer Vergleichsstudie zur Mechanik in Jahrgangsstufe 7. In: Höttecke, D. (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDGP in Schwäbisch Gmünd 2008, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 29, Lit-Verlag, Münster
- [7] WILHELM, Thomas; WALTNER, Christine; HOPF, Martin; TOBIAS, Verena; WIESNER, Hartmut (2009): Der Einfluss der Sachstruktur im Mechanikunterricht – quantitative Ergebnisse zur Verständnis- und Interessenentwicklung. In: Nordmeier, V.; Oberländer, A.; Grötzebauch H. (Hrsg.): Didaktik der Physik – Bochum 2009, Lehmanns Media - LOB.de, Berlin
- [8] TOBIAS, Verena; WALTNER, Christine; HOPF, Martin; WILHELM, Thomas; WIESNER, Hartmut (2010): Dynamischer Mechanikunterricht - Ergebnisse einer quantitativen Vergleichsstudie - In: PhyDid-B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung
- [9] WILHELM, Thomas (2005): Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung, Logos Verlag, Berlin, S. 104
- [10] WILHELM, Thomas (2006): Zweidimensionale Bewegungen - Vergleich von vier verschiedenen Möglichkeiten der Messwerterfassung und Evaluationsergebnisse eines Unterrichtseinsatzes – In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Kassel 2006, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin

6. Dem Beitrag beigefügte Medien

- Ein pdf der Arbeit: FLIEBER, Ingo (2010): Vergleich und Analyse der Sachstruktur von Realschulbüchern im Themenbereich der Mechanik, Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg

4.6.2 Mechanik in Gymnasialbüchern

Quelle:

WILHELM, T.; KNEISEL, S.: *Vergleich und Analyse der Sachstruktur von Gymnasialschulbüchern im Anfangsunterricht Mechanik* – Erscheint in: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Münster 2011, www.phydid.de

Inhalt und Bezug zum Thema:

Es wird eine Untersuchung und ein Vergleich von sechs Physik-Schulbücher für die 7. Jahrgangsstufe des Gymnasiums in Bayern vorgestellt. Fünf Bücher sind von Schulbuchverlagen, eines aus dem Forschungsprojekt von Wiesner/Wilhelm/Tobias/Waltner/Hopf (siehe Kapitel 4.7 und 5. Anhang). Zum einen werden jeweils gestalterische Aspekte betrachtet, nämlich die sieben Strukturelemente Leiteinrichtungen, Text, Abbildungen, Tabellen, Merkstoff, Experimentieranleitungen und Aufgaben. Zum anderen wird der Umgang mit Schülervorstellungen betrachtet und geprüft, welche Sachstrukturen sich in den einzelnen Schulbüchern widerspiegeln, die Fehlvorstellungen vermeiden oder unterstützen.

Insgesamt lassen sich große Unterschiede feststellen. Einige Werke sind stark quantitativ ausgerichtet und setzen auf Graphen und auf Messtabellen. Die Messung der Textlesbarkeit weist zudem auf eine schwer verständliche Sprache hin. Die Sachstruktur der fünf zugelassenen Werke sind sehr ähnlich, aber der Anteil statischer Aspekte ist unterschiedlich.

Das Schulbuch aus dem Forschungsprojekt benutzt eine völlig abgeänderte Sachstruktur, bei der von zweidimensionalen Bewegungen ausgegangen wird und statt der Beschleunigung die Zusatzgeschwindigkeit eingeführt wird und alles konsequent dynamisch behandelt wird. Das Buch stellt zudem ein qualitatives Verständnis in den Vordergrund und verzichtet konsequent auf Graphen, mathematische Gleichungen, Messtabellen und Rechenaufgaben. Stattdessen wird hauptsächlich auf qualitative Denkaufgaben und logische Bilder mit Pfeilen für die physikalischen Größen zurückgegriffen und in diesem Zusammenhang die Videoanalyse verwendet.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Ich habe mir Inhalt und Konzept einer Staatsexamensarbeit überlegt, in der der Mechanikteil der verschiedenen Physikschulbücher der 7. Jahrgangsstufe des bayerischen Gymnasiums verglichen wird. Für diese Staatsexamensarbeit habe ich per Aushang einen Studierenden gesucht. Schließlich habe ich dann mit Herrn Kneisel zusammen gearbeitet und ihn intensiv beim Vergleich der Bücher betreut. Den Artikel habe ich allein auf der Basis der Staatsexamensarbeit geschrieben.

Vergleich und Analyse der Sachstruktur von Gymnasialschulbüchern im Anfangsunterricht Mechanik

Thomas Wilhelm, Steffen Kneisel

Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Am Hubland, 97074 Würzburg
wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de

Kurzfassung

Es wird eine Untersuchung und ein Vergleich von sechs Physik-Schulbüchern für die 7. Jahrgangsstufe in Bayern vorgestellt. Fünf Bücher sind von Schulbuchverlagen, eines aus dem Forschungsprojekt von Tobias/Waltner/Hopf/Wilhelm/Wiesner. Zum einen werden jeweils gestalterische Aspekte betrachtet, nämlich die sieben Strukturelemente Leiteinrichtungen, Text, Abbildungen, Tabellen, Merkstoff, Experimentieranleitungen und Aufgaben. Zum anderen wird der Umgang mit Schülervorstellungen betrachtet und geprüft, welche Sachstrukturen sich in den einzelnen Schulbüchern widerspiegeln, die Fehlvorstellungen vermeiden oder unterstützen. Insgesamt lassen sich große Unterschiede feststellen. Einige Werke sind stark quantitativ ausgerichtet und setzen auf Graphen und auf Messtabellen. Das Schulbuch aus dem Forschungsprojekt stellt dagegen mit einer völlig abgeänderten Sachstruktur ein qualitatives Verständnis in den Vordergrund und verzichtet konsequent auf Graphen, mathematische Gleichungen, Messtabellen und Rechenaufgaben.

1. Rahmenbedingungen

Seit Beginn des achtjährigen Gymnasiums beginnt Physik am bayerischen Gymnasium erstmals in der siebten Jahrgangsstufe. Das zweistündige Fach läuft unter der Bezeichnung „Natur und Technik, Schwerpunkt Physik“. Themen sind der elektrische Strom, die Einführung in die Mechanik und die Optik [1].

In der 7. Jahrgangsstufe geht es um eine qualitative Einführung der kinematischen Grundgrößen und der Kraft und in der 8. Klassenstufe folgt das Thema „Mechanische Energie“ (einschließlich Kraftwandler). Erst in der 9. Jahrgangsstufe folgt die Deutung von Bewegungsdiagrammen eindimensionaler Bewegungen und deren Beschreibung mit mathematischen Funktionen. Das wird in der 10. Jahrgangsstufe vertieft, wobei auch numerische Verfahren eine Rolle spielen.

2. Die untersuchten Schulbücher

Für die 7. Klassenstufe des Gymnasiums in Bayern sind fünf Physikbücher vom Kultusministerium zugelassen. Das sechste vorgestellte Buch wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes zum Mechanikunterricht der 7. Jahrgangsstufe erstellt [2-4]. Eine detaillierte Beschreibung dieser sechs Bücher mit einer vergleichenden Analyse der Gestaltung und Sachstruktur im Teilbereich der Mechanik findet sich in [5].

Das Buch „Impulse Natur und Technik: Schwerpunkt Physik, Jahrgangsstufe 7, Bayern“ - im Folgenden kurz „Impulse“ genannt - erschien 2005

beim Klett-Verlag. Es wurde auf Basis der Ausgabe Physik Mittelstufe bzw. Impulse Physik 1 sowie weiteren Regionalausgaben von insgesamt neun Autorinnen und Autoren erstellt.

Das Buch „Ikarus Natur und Technik Schwerpunkt: Physik 7“ - im Folgenden kurz „Ikarus“ genannt - erschien 2005 beim Oldenbourg Schulbuchverlages und stammt aus der Feder von Hermann Deger, Christian Gleixner, Rainer Pippig und Roman Worg. Dabei knüpfen sie sehr stark an den Band „Ikarus 5 - Naturwissenschaftliches Arbeiten“ aus der 5. Jahrgangsstufe an.

Das Buch „Natur und Technik Physik 7“ vom Cornelsen Verlag, verfasst von Angela Fösel, Helmut Hilscher, Anton Thanner, Silvia Fitz und Friedrich Wörten, das im Folgenden mit „NuTC“ bezeichnet wird, erschien 2005 im Cornelsen Verlag.

Das Buch „Natur und Technik Schwerpunkt: Physik Bayern 7 Gymnasium“ ist eine Koproduktion des DUDEN-PAETEC Schulbuchverlages in Berlin und des C. C. Buchners Verlages in Bamberg. Es wurde 2005 herausgegeben und verfasst von Lothar Meyer und Gerd-Dietrich Schmidt. Es wird im Folgenden mit „NuTDP“ abgekürzt.

Das Buch „Netzwerk Physik 7“ erschien 2005 beim Schroedel Schulbuchverlag und stammt von den Autoren Thomas Appel, Kerstin Sube, Gottfried Wolfermann und Martin Zieris. Es wird im Folgenden kurz „Netzwerk“ genannt.

Das Buch „Einführung in die Mechanik“, im Folgenden kurz „EidM“ genannt, entstand im Rahmen eines Forschungsprojektes von Hartmut Wiesner,

Martin Hopf, Thomas Wilhelm, Christine Waltner und Verena Tobias. Im Rahmen eines Design-Based-Research-Ansatzes wurden Konzepte und Ideen aus einigen vorhergehenden Forschungsarbeiten auf die gegebenen Rahmenbedingungen angepasst. Die erste Version des Buches entstand 2008, die dritte, überarbeitete Version von November 2009 ist downloadbar unter [6].

Alle Schulbuchverlage bieten zu ihren Büchern zusätzliche Materialien an, wie einen Lösungsband zu den Aufgaben der Bücher, Sammlungen von Arbeitsblättern und Kopiervorlagen und Softwareprogramme. Auch bei dem Forschungsprojekt erhielt jeder Lehrer eine DVD mit einer Simulationssoftware, einer Videoanalysesoftware, Arbeitsblättern, Bildern, Videos und weiteren Materialien. Auf diese Zusatzmaterialien soll hier aber nicht eingegangen werden.

Nur „Impulse“ und „EidM“ gelingt es mit 33 bzw. 34 Seiten (siehe Tab. 1) die Richtzahl einzuhalten, die für eine ausgeglichene, aber nicht überbelastende Unterrichtsarbeit mit dem Schulbuch ermittelt wurde [7]. Allerdings liegt das bei „Impulse“ auch an der größten Seitenfläche. Dass Ikarus so viele Seiten hat, liegt daran, dass sehr viele Aufgaben zur Auswahl gestellt werden sollen.

	Impulse	Ikarus	NuTC	NuTDP	Netzwerk	EidM
Verlag	Klett	Oldenbourg	Cornelsen	DUDEN-PAETEC & C.C. Buchner	Schroedel	-
Preis in €	19,50	19,45	18,50	18,95	16,50	0,00
Einband	Hard	Soft	Hard	Soft	Hard	Soft
Seiten Mechanik	33	73	50	43	45	34
Seitenfläche in cm ²	517	489	494	408	489	314

Tab.1: Die untersuchten Schulbücher

3. Strukturelemente

Beim Schulbuch bezeichnet man mit „Strukturelementen“ die charakteristischen zusammengeführten Teile, die eine bestimmte Funktion übernehmen, von der Stoffdarstellung bis hin zu seiner methodisch-didaktischen Darstellung. Merzyn [8] führt in Anlehnung an Meyendorf [9] die sieben wichtigsten Strukturelemente eines Physik-Schulbuches auf: Leiteinrichtungen, Text, Abbildungen, Tabellen, Merkmstoff, Experimentierangaben und Aufgaben.

3.1. Leiteinrichtungen

Die fünf Werke der Verlage haben ein Inhaltsverzeichnis, Gebrauchshinweise, ein Stichwortver-

zeichnis, z.T. ein Personenverzeichnis sowie in einem Fall ein physikalisches Fachwortregister Deutsch-Englisch, während das Werk „EidM“ mit Ausnahme des Inhaltsverzeichnisses darauf verzichtet.

Die Ausführlichkeit des Inhaltsverzeichnisses, die Verwendung von leitenden Symbolen, Kennfarben und strukturierenden Formatierungen ist sehr unterschiedlich. Herausgehoben sei, dass nur das Werk „Ikarus“ ansprechende Formulierungen für die Überschriften wählt und dabei durch eine einfallsreiche Wortwahl auffällt.

3.2. Text

Der Anteil der Seitenfläche, der durch Text genutzt wird, ist sehr unterschiedlich (siehe Tab. 2). Die Werke „NuTC“, „Impulse“ zeigen hier mit 44 % bzw. 41 % einen vergleichsweise hohen Anteil. „Ikarus“ legt weniger Wert auf schriftliche Stoffdarstellung und füllt durch viele ungenutzte Zwischenräume und große Abbildungen nur 20 % der Fläche mit Text, hat allerdings auch am meisten Seiten. Für diese Analyse wurden in etwa gleich viele Seiten aus dem Kapitel „Einführung der Kraft“ betrachtet und nur Fließtext ohne Abbildungsunterschriften berücksichtigt.

	Impulse	Ikarus	NuTC	NuTDP	Netzwerk	EidM
Nutzung der Seitenfläche durch Text in Prozent	41	20	44	36	28	32
Durchschnittliche Wortlänge pro Satz	12,2	12,8	11,9	12,9	15,5	13,0
Anteil drei- und mehrsilbriger Wörter in %	25,6	19,8	24,6	22,1	25,9	17,9
Klassenstufe nach Wiener Sachtextformel	8,6	7,1	8,2	7,8	9,5	6,7

Tab.2: Text in den Schulbüchern

Die sich allein auf formal-stilistische Oberflächenmerkmale beschränkende „4. neue Wiener Sachtextformel“ [10] ergibt für ausgewählte Texte bei dem Werk „EidM“ mit 6,7 den besten Lesbarkeitswert und entspricht der Zielgruppe des Buches. Dagegen führen die Messungen bei „Impulse“ bzw. „Netzwerk“ zu Lesbarkeitswerten von 8,6 bzw. 9,5, was vermuten lässt, dass die Texte sprachlich für die 7. Jahrgangsstufe zu schwer verständlich sind.

3.3. Abbildungen

Im Durchschnitt haben die Physikbücher 2,3 bis 3,4 Abbildungen pro Seite bei unterschiedlicher Seitenanzahl (siehe Tab. 3). Das Werk „EidM“ erweist sich mit durchschnittlich 2,6 Bildern pro Seite als

bildärmer, was z.T. daran liegt, dass weniger darstellende Bilder verwendet werden. Dafür werden mehr logische Bilder verwendet, wobei man hier genau beachten muss, welche Arten logischer Bilder verwendet werden: schematischen Zeichnungen bzw. ikonischen Darstellungen oder Diagramme. Es wird in „EidM“ lediglich ein Diagramm benutzt, bei dem es sich zudem noch um eine kartographische Darstellung handelt, also um keinen Linien-Graphen, wie sie fast ausschließlich in den Vergleichswerken zu finden sind. Damit ist „EidM“ das einzige Werk, das gemäß dem Lehrplan komplett auf Linien-Graphen zur Darstellung quantitativer Zusammenhänge verzichtet (der Lehrplan sieht dies für die neunte Jahrgangsstufe vor). Stattdessen wird im „EidM“ hauptsächlich auf logische Bilder in Form ikonischer Darstellungen der kinematischen Größen Geschwindigkeit bzw. Zusatzgeschwindigkeit durch Vektorpfeile zurückgegriffen. Außerdem werden häufig Stroboskopbildern zur Darstellung von Bewegungen verwendet. So werden bei „EidM“ auffallend viele Pfeile verwendet, um Bewegungsrichtungen hervorzuheben, während die in einigen anderen Werken vor allem beim Thema „Kräfteaddition“ verwendet werden.

	Impulse	Ikarus	NuTC	Nu-TDP	Netzwerk	EidM
Anzahl Abbildungen	112	166	160	142	141	90
Anzahl Abbildungen pro Seite	3,4	2,3	3,2	3,3	3,1	2,6
Anteil Abbildungen an Seitenfläche in %	20,1	19,6	17,5	14,9	18,9	17,5
Text-Bild-Verhältnis	2 : 1	1 : 1	2,5 : 1	2,5 : 1	1,5 : 1	2 : 1
Anteil darstellender Bilder in %	45	48	49	60	58	40
Anteil logischer Bilder in %	55	52	51	40	42	60
Anteil Graphen an Gesamtanzahl in %	13	7	8	4	9	1

Tab.3: Abbildungen in den Schulbüchern

Darstellende Bilder, insbesondere Fotografien, werden bei vielen Büchern gerne aus motivationalen und affektiven Gründen hauptsächlich auf den Einführungsseiten bzw. auf den Unterrichtsstoff ergänzenden Seiten eingesetzt. Dagegen werden die logischen Abbildungen, vor allem in Form von schematischen Zeichnungen, verstärkt bei den Versuchen

und Aufgabenstellungen zur Veranschaulichung eingesetzt.

Zwei Werke greifen durch Comics auf Abbildungen zurück, die erfahrungsgemäß bei Schülern besonders gut ankommen: bei „NuTC“ sind sie ausschließlich auf den Einführungsseiten zur Unterhaltung; bei „Ikarus“ sind viele darstellende Bilder, aber auch logische Bilder comicartige Zeichnungen. Diese sprechen die Schüler an und lockern den Unterricht auf moderne Art und Weise auf, besonders weil sie mit Themen gefüllt werden, die die Wirklichkeit der Schüler in den Mittelpunkt stellen und auf diese Weise auch Fragen provozieren.

3.4. Tabellen

Während einige Werke bei der Mechanik mehrere Tabellen einsetzen, nehmen diese im „Ikarus“ und in „EidM“ nur eine untergeordnete Rolle ein (siehe Tab. 4). Ein großer Teil dieser Tabellen sind Mess Tabellen, die man deshalb auch im Zusammenhang mit Diagrammen findet. Ansonsten werden in nahezu allen Werken Übersichtstabellen herangezogen, um typische Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte gegenüber zu stellen. Nur „Ikarus“ verdeutlicht dies anhand eines Zahlenstrahls.

	Impulse	Ikarus	NuTC	Nu-TDP	Netzwerk	EidM
Tabellen in Mechanik	10	6	13	17	14	2
davon Mess Tabellen	8	6	8	8	7	1

Tab.4: Tabellen in den Schulbüchern

3.5. Merksätze

Das Werk „EidM“ verwendet mit insgesamt 49 Merksätzen die meisten Merksätze, die aber nur auf 17 Merksätze verteilt werden (siehe Tab. 5). Die kürzesten Merksätze gibt es in „Netzwerk“, weil diese stichpunktartig angegeben werden. Im „Ikarus“ und in „EidM“ treten häufig „Je-desto-Beziehungen“ auf.

	Impulse	Ikarus	NuTC	Nu-TDP	Netzwerk	EidM
Merksätze	31	17	18	27	21	17
Wortanzahl pro Merksatz	14,3	12,0	13,2	12,8	11,8	13,5
Formeln im Merksatz zur Mechanik	6	10	4	10	7	3

Tab.5: Merksätze in den Schulbüchern

Die Merksätze sind bei allen Werken unregelmäßig verteilt, da inhaltliche Schwerpunkte gesetzt werden. In „Impulse“ finden sich viele Merksätze bei „Zusammensetzung von Kräften“. Bei „Ikarus“ gehören 21 der insgesamt 32 Merksätze zu den beiden Rand-

themen „Massenhafte Gravitation“ und „Kraftvolle Dehnungen“. Beim „NuTC“ nehmen Merksätze bei den kinematischen Basisgrößen „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ einen großen Stellenwert ein. Während „NuTDP“ Merksätze hauptsächlich im Zusammenhang mit „Kraftarten, Ursachen und Wirkungen“ und bei der „Zusammensetzung von Kräften“ gebraucht, setzt „Netzwerk“ insbesondere beim Thema „Gewichtskraft“ verstärkt auf diese.

Während bei „EidM“ für das Kapitel „Newtonsche Bewegungsgleichung“ sowie das Kapitel „Wenn mehrere Kräfte wirken“ insgesamt 11 bzw. 18 Merksätze herangezogen werden, wird in den drei dazwischen liegenden Kapiteln nur auf „Ein-Satz-Merkblöcke“ zurückgegriffen, so dass ein deutlicher Schwerpunkt gelegt wird.

„NuTDP“ und „Ikarus“ bedienen sich in den Merkblöcken mit zehn Gleichungen ausgesprochen oft der Formelsprache. Gleichungen werden in den Merksätzen besonders bei den beiden kinematischen Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung verwendet.

Einzige Ausnahme in dieser Hinsicht ist das Werk „EidM“, dem es gelingt, trotz der Ausführlichkeit, die es bezüglich des Gebrauchs von Merksatz an den Tag legt, nur in drei Fällen auf Formelsprache zurückzugreifen. Auffällig ist dabei, dass das Werk insbesondere bei der Verankerung der kinematischen Grundgrößen ohne Gleichungen auskommt.

3.6. Experimentieranleitungen

In „Impulse“ werden Experimente vor allem zu Beginn des Kapitels aufgeführt, die wohl hauptsächlich als Einstiegsversuche in den Unterricht vorgesehen sind.

Dagegen findet man die Versuchskomplexe im „Netzwerk“ immer am Ende von Abschnitten bzw. Kapiteln, die wohl den Zweck der Vertiefung und Verständniskontrolle erfüllen sollen.

Im „Ikarus“ treten die Experimentieranleitungen ausnahmslos gemeinsam mit den Aufgaben im Bereich „Anregungen und Anwendungen“ auf und werden umfangreich ausgeführt. Eine Unterscheidung von Experimenten und Aufgaben findet nicht statt.

„NuTDP“ fasst die Versuche im Block „Experimente“ zusammen, aber es werden nur zwei Seiten für die Darstellung von Versuchsanleitungen herangezogen.

In „NuTC“ spielen Experimentieranleitungen eine größere Rolle. Es werden Versuche, die die Schüler mit einfachen Materialien auch außerhalb der Schule erproben können, unterschieden von Experimenten, deren Durchführung aufgrund neuartiger bzw. gefährlicher Gerätschaften eher für das Physiklabor vorgesehen ist. Damit wird großer Wert auf das selbstständige Experimentieren der Schüler gelegt.

Im „EidM“ sind die Versuche ausschließlich in den Basistext eingebunden und es gibt nicht wie in „Im-

pulse“ und „Netzwerk“ noch Experimentierangaben in einem separaten Abschnitt. Dafür werden die Versuche im „EidM“ durch fettgedruckte Symbole sowie deutliche Freiräume herausgearbeitet.

3.7. Aufgaben

Auf den ersten Blick sieht man große Unterschiede in der Anzahl der Aufgaben (siehe Tab. 6). Jedoch enthält z.B. „Netzwerk“ im Vergleich zu „Ikarus“ deutlich weniger Teilaufgaben. Im „Ikarus“ überzeugt die Gestaltung der Aufgaben mit ausführlichen Texten und großen zeichnerischen Darstellungen.

„Impulse“ und „NuTC“ haben weniger Aufgabenstellungen, die lebensweltliche oder gesellschaftlich relevante Bezüge herstellen und an die alltäglichen Erfahrungen der Schülerinnen und Schüler anknüpfen. Dagegen wird im „EidM“ verstärkt auf Aufgaben zurückgegriffen, die an die Lebenswelt der Schüler anknüpfen, insbesondere aus dem Bereich Sport. Anwendungsaufgaben, die reale Situationen nachstellen, lassen sich im „EidM“ zum großen Teil auf die vielen Stroboskopbilder zurückführen, die auch bei den Aufgabenstellungen zur Darstellung von realen Bewegungsabläufen herangezogen werden.

	Im- pulse	Ika- rus	NuTC	Nu- TDP	Netz- werk	EidM
Anzahl Aufgaben	47	82	76	72	103	61
Formale Aufgaben	32	36	48	32	52	23
Formale Aufgaben mit Anknüpfung an die Lebenswelt der Schüler	13	36	23	32	44	30
Anwendungsaufgaben, die reale Situation nachstellen	2	10	5	8	7	8

Tab.6: Kategorisierung der Aufgaben unter dem Aspekt Lebensweltbezogenheit

Unter dem Aspekt Schülerhandlungen stellt sich „NuTC“ als vielseitig heraus, was sich insbesondere an der Aufgabenvielfalt hinsichtlich der äußeren Form erkennen lässt (Lückentexte, Auswahlaufgaben, Fehlersuchen, oder physikalische Fehler in einem Drehbuchtext finden und die Geschichte fort-schreiben). In „Ikarus“ und „NuTDP“ überwiegen die mathematisch-rechnerischen Aufgaben gegenüber den qualitativen Denkaufgaben (siehe Tab. 7), es werden viel Beobachtungs- und Erkundungsaufgaben verwendet und fächerübergreifend die Informatik einbezogen. Bei den Experimentieraufgaben lässt sich ein hoher Wert im „Ikarus“ darauf zurück-führen, dass die Versuche nicht wie in den Vergleichswerken von den Aufgaben getrennt werden,

sondern hier gemeinsam dargestellt werden. Bei „EidM“ fällt auf, dass das Aufgabenangebot keinerlei mathematisch-rechnerische Aufgaben anbietet. Dafür gibt es viele grafisch-zeichnerische Aufgaben, in denen bestimmte Größen durch entsprechende Vektorpfeile dargestellt werden.

	Im- pulse	Ika- rus	NuTC	Nu- TDP	Netz- werk	EidM
Wissen abfragende Aufgaben	12	4	12	4	16	13
Mathematisch-rechnerische Aufgaben	9	28	22	30	43	0
Grafisch-zeichnerische Aufgaben	6	8	18	7	17	14
Qualitative Denkaufgaben	19	14	29	28	44	25
Experimentelle Aufgaben	2	27	11	0	5	5
Beobachtungs- und Erkundungsaufgaben	1	18	2	12	2	2

Tab.7: Kategorisierung der Aufgaben unter dem Aspekt Schülerhandlungen

Große Unterschiede gibt es in der Ausführlichkeit der Darstellung der Aufgaben; im „NuTDP“ werden für die kompletten 72 Aufgaben lediglich acht Seiten in Anspruch genommen, während „Ikarus“ zum Teil für ein einziges Kapitel fünf Seiten für Aufgaben heranzieht. Eine Aufgabenstufung bzw. eine Kennzeichnung der Aufgaben nach Schwierigkeitsgrad findet man nur „NuTDP“ und „Ikarus“; im „Ikarus“ werden außerdem so genannte „Pflichtaufgaben“ deutlich hervorgehoben. Nur in „Netzwerke“, „NuTC“ und „NuTDP“ werden viele Musteraufgaben herangezogen, wobei das in „Netzwerk“ und „NuTC“ nur Rechenaufgaben sind. Typische Lernaufgaben als Arbeitsaufträge zur Initiierung und Unterstützung des Lernprozesses [11] lassen sich kaum finden. Englischsprachige Aufgaben werden nirgends aufgegriffen.

4. Sachstrukturen

Die fünf in Bayern zugelassenen Werke haben alle eine ähnliche Sachstruktur. Nur „EidM“ hat eine deutlich andere Sachstruktur, die aber ebenso konform zum bayerischen Lehrplan ist.

4.1. Kinematische Grundgrößen

Die fünf in Bayern zugelassenen Werke führen alle die Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung eindimensional ein, d.h. die vektorielle Geschwindigkeit wird auf den Geschwindigkeitsbetrag (= Tempo) reduziert und die Beschleunigung auf dessen Änderung. Nur „NuTDP“ und „Netzwerk“ be-

schreiben zunächst Bewegungen mithilfe der Grundgrößen Zeit und Ort. „Impulse“ und „NuTDP“ führen die Geschwindigkeit extrem reduziert durch $v = s/t$ ein und gehen erst bei der Beschleunigung auf den Differenzcharakter mit $a = \Delta v / \Delta t$ („Impulse“) bzw. $a = \Delta v / t$ („NuTDP“) ein. „Ikarus“, „NuTC“ und „Netzwerk“ betonen dagegen korrekt den Differenzcharakter: $v = \Delta s / \Delta t$ bzw. $a = \Delta v / \Delta t$. Die Gleichungen werden z.T. über entsprechende Messwerte und Diagramme eingeführt und dann fast nur bei Rechenbeispielen verwendet.

In „EidM“ werden zunächst zweidimensionale Bewegungen beobachtet und beschrieben. Dann wird das Tempo $v = \Delta s / \Delta t$ (= Geschwindigkeitsbetrag) eingeführt und die Richtung der Bewegung - dargestellt durch einen Pfeil - behandelt. Erst danach werden die beiden Begriffe zum Geschwindigkeitsbegriff zusammengefasst - immer durch einen Pfeil dargestellt. Die Geschwindigkeitsänderung in einem Zeitintervall wird dann als „Zusatzgeschwindigkeit“ als eigenständige Größe und als Elementarisierung der Beschleunigung eingeführt; auf die Beschleunigung wird dagegen verzichtet. Zentral ist dabei der senkrechte Stoß gegen eine rollende Kugel. Erst danach werden die Überlegungen der Stoßversuche auf den Grenzfall eindimensionaler Bewegungen übertragen.

4.2. Einführung des Kraftbegriffs

Die fünf in Bayern zugelassenen Werke führen alle den Kraftbegriff eindimensional ein, während „EidM“ wieder zweidimensionale Bewegungen betrachtet. Allen sechs Werken gemeinsam ist, dass sie Kräfte über ihre Wirkungen einführen. Aber nur „Ikarus“ und „EidM“ führen sie gemäß den Lehrplanvorgaben ausschließlich als Ursache von Bewegungsänderungen ein, während die Werke „Impulse“, „NuTC“, „NuTDP“ und „Netzwerk“ auch auf die Eigenschaft von Kräften ansprechen, Körper zu verformen. „Impulse“ und „Netzwerk“ heben wenigstens deutlich hervor, dass auch zur Änderung der Bewegungsrichtung Kräfte nötig sind.

„EidM“ hat bereits bei der Behandlung der Zusatzgeschwindigkeit von einer „Einwirkung“ gesprochen. Dieser Begriff „Einwirkung“ wird dann durch die Verschmelzung von Einwirkungsstärke und Einwirkungsrichtung zum Kraftbegriff erweitert. Es wird also erst eine Vorstellung von „Kraft“ mit einer anderen Vokabel aufgebaut, damit die Schüler nicht spontan den Alltagsbegriff von Kraft assoziieren. Die Alltagsvorstellungen der Schüler und die vielfältigen Bedeutung von Kraft im Alltagsgebrauch wird deshalb im Gegensatz zu anderen Schulbüchern am Anfang bewusst nicht angesprochen.

4.3. Newtonsche Grundgleichung

Die fünf in Bayern zugelassenen Werke behandeln das zweite Newtonsche Axiom (newtonsche Grundgleichung, Grundgesetz der Mechanik) in der diffe-

rentiellen Form $F = m \cdot a$. „Netzwerk“ zeigt mithilfe von Messreihen Proportionalitäten von Kraft und Beschleunigung sowie von Masse und Beschleunigung auf. „Impulse“ trifft zunächst qualitative Aussagen über die Zusammenhänge zwischen Kraft F , Masse m und Beschleunigung a . „NuTDP“ verweist nur kurz auf Je-desto-Zusammenhänge, die sich in Untersuchungen ergeben hätten. „Ikarus“ und „NuTC“ gelangen über Anwendungsbeispiele letztlich zur dieser newtonschen Grundgleichung.

In „EidM“ wird das zweite Newtonsche Axiom in der elementarisierten integralen Form $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ eingeführt, die an anderer Stelle auch Kraftstoßgleichung genannt wird. Sie hat einen sehr großen Stellenwert und wird sehr ausführlich behandelt. Letztlich wird sie als Zusammenfassung aller Einflussfaktoren auf die Zusatzgeschwindigkeit eingeführt, die auf qualitative Art und Weise durch Plausibilitätsüberlegungen an einfachen Beispielen und didaktisch sinnvolle Je-desto-Beziehungen dargestellt werden. Dass diese Form der Newtonschen Bewegungsgleichung ins Zentrum der Sachstruktur gerückt wurde, zeigt sich auch im ausführlichen Kapitel „Anwendungen der Newtonschen Bewegungsgleichung“.

Auf den Massebegriff wird im „Ikarus“, „Netzwerk“ und „EidM“ beim newtonschen Grundgesetz nicht näher eingegangen. Masse tritt lediglich als ein „Einflussfaktor“ auf die Beschleunigung oder Zusatzgeschwindigkeit in Erscheinung und es wird nicht wie in „Impulse“ und „NuTDP“ der Unterschied zwischen träger und schwerer Masse behandelt.

4.4. Statik und Verformungen

Der entsprechende Lehrplan möchte eine dynamische Behandlung von Kräften. Die Themen Kräfteaddition, Kräftezerlegung, Dehungs-Kraft-Diagramm und Hooke'sches Gesetz standen deshalb zunächst nur am Ende. Bei einer späteren Kürzung des Lehrplans entfiel sogar die Kräftezerlegung und das Hooke'sche Gesetz.

Das Thema „Kräftezerlegung“ wird in allen fünf zugelassenen Werken nach wie vor mit vielen statischen Beispielen behandelt, was u.a. daran liegt, dass sie vor der Lehrplankürzung erstellt wurden. Auch das Thema „Schiefe Ebene“ wird mit Ausnahme des Werkes „NuTC“ in diesem Zusammenhang aufgegriffen. Nur in „EidM“ kommt dieses Thema nicht mehr vor.

Auch dem Thema Kräfteaddition wird mit Ausnahme der Werke „EidM“ und „NuTC“ in allen Werken viel Aufmerksamkeit geschenkt. In „EidM“ findet die Statik am wenigsten Beachtung. Selbst die Kräfteaddition und das Kräftegleichgewicht werden vor allem an dynamischen Situationen betrachtet.

Das rein statische Thema „Kraft und Verformung“ nimmt in den meisten Werken mit Ausnahme von „NuTC“ und „EidM“ einen großen Raum ein. Ver-

formungen und das Dehungs-Kraft-Diagramm werden in „EidM“ sogar ganz weggelassen, um der z.T. festgestellten Überbetonung dieses Themas durch die Lehrkräfte entgegen zu wirken.

Im „Netzwerk“ nehmen unter allen Vergleichswerken statische Überlegungen und Verformungen den größten Stellenwert ein. Formänderungen und das Hooke'sche Gesetz werden sogar noch vor dem Kapitel „Newton'sche Gesetze“ behandelt. „Impulse“ liegt in der Vorgehensweise sehr nahe beim „Netzwerk“. Auch „Ikarus“ stellt beim Gesetz von Hooke quantitative Betrachtungen in den Vordergrund. „NuTDP“ behandelt sogar den Unterschied zwischen plastischer und elastischer Verformung.

5. Fazit

Insgesamt lassen sich große Unterschiede zwischen den Schulbüchern feststellen. Die Bücher „Impulse“ und „Netzwerke“ sind z.B. stark quantitativ ausgerichtet und setzen auf Graphen und auf Messtabellen. Die Messung der Textlesbarkeit weist zudem auf eine schwer verständliche Sprache hin. Die Sachstruktur der fünf zugelassenen Werke sind sehr ähnlich, aber der Anteil statischer Aspekte ist unterschiedlich.

Das Schulbuch „EidM“ aus dem Forschungsprojekt benutzt dagegen eine völlig abgeänderte Sachstruktur, bei der von zweidimensionalen Bewegungen ausgegangen wird, bei der statt der Beschleunigung die Zusatzgeschwindigkeit eingeführt wird und alles konsequent dynamisch behandelt wird. Das Buch stellt zudem ein qualitatives Verständnis in den Vordergrund und verzichtet konsequent auf Graphen, mathematische Gleichungen, Messtabellen und Rechenaufgaben. Stattdessen wird hauptsächlich auf qualitative Denkaufgaben und logische Bilder mit Pfeilen für die physikalischen Größen zurückgegriffen.

Eine große Forschungsstudie zeigte, dass ein Physikunterricht mit dem Buch „EidM“ und dessen zweidimensional-dynamischem Unterrichtskonzept signifikant mehr fachliches Verständnis bei den Schülern liefert als ein Unterricht mit einem Buch der Schulbuchverlage mit deren Unterrichtskonzept [12+13]. Die hier aufgezeigten Unterschiede haben also eine Auswirkung auf das Verständnis der Schüler.

6. Literatur

- [1] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung: Jahrgangsstufen-Lehrplan, Jahrgangsstufe 7, Natur und Technik
<http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26436>
- [2] Wiesner, Hartmut; Tobias, Verena; Waltner, Christine; Hopf, Martin; Wilhelm, Thomas; Sen, Ahmet Ilhan (2010): Dynamik in den Mechanikunterricht - In: PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung,

- <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/116/207>
- [3] Hopf, Martin; Waltner, Christine; Wilhelm, Thomas; Wiesner, Hartmut (2009): Konzeption einer Vergleichsstudie zur Mechanik in Jahrgangsstufe 7 - In: Höttecke, D. (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDGP in Schwäbisch Gmünd 2008, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 29, Lit-Verlag, Münster
- [4] Waltner, Christine; Tobias, Verena; Wiesner, Hartmut; Hopf, Martin; Wilhelm, Thomas (2010): Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Dynamik in der Mittelstufe In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 59, Nr. 7, S. 9 - 22
- [5] Kneisel, Steffen: (2010): Vergleichende Analyse der Gestaltung und Sachstruktur von Gymnasialbüchern der 7. Jahrgangsstufe im Teilbereich der Mechanik, Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg, <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Mechanikbuecher.htm>
- [6] Waltner, Christine; Tobias, Verena; Hopf, Martin; Wilhelm, Thomas; Wiesner, Hartmut (2010): Einführung in die Mechanik. In: PhyDid-B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/111/224>
- [7] Ludwig, Margrit; Sittig Horst (1981): Möglichkeiten einer effektiveren Gestaltung des Physikunterrichts durch den Einsatz des Lehrbuches. In: Physik in der Schule, Nr. 5, S. 189-195
- [8] Merzyn, Gottfried (1994): Physikschulbücher, Physiklehrer und Physikunterricht. Beiträge auf der Grundlage einer Befragung westdeutscher Physiklehrer, Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel, Kiel,
- [9] Meyendorf, Gerhard (1976): Schulbücher wirksam für Bildung und Erziehung nutzen. In: Physik in der Schule, Nr. 9, S. 364-368
- [10] Bamberger, Richard; Vanecek, Erich: Lesen - Verstehen - Lernen - Schreiben. Jugend und Volk, Wien; Diesterweg, Frankfurt, 1984
- [11] Leisen, Josef: Lernaufgaben als zentrales Element der Aufgabenkultur. In: www.aufgabenkultur.studienseminarkoblenz.de/seiten/1%20Artikel%20zur%20Aufgabenkultur/Aufgabenkultur%20im%20mathematisch-naturwissenschaftlichen%20Unt%85.pdf
- [12] Tobias, Verena (2010): Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht. Die Wirksamkeit einer Einführung über zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen, Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 105, Logos-Verlag, Berlin,
- [13] Wilhelm, Thomas; Tobias, Verena; Waltner, Christine; Hopf, Martin; Wiesner, Hartmut (2011): Zweidimensional-dynamische Mechanik – Ergebnisse einer Studie - In: Höttecke, D. (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDGP in Potsdam 2010, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 31, Lit-Verlag, Münster

4.7 Überprüfung eines Mechanikkonzeptes mit Videoanalyse in der Sekundarstufe I

4.7.1 Konzeption der Studie

Quelle:

HOPF, M.; WALTNER, C.; WILHELM, T.; WIESNER, H.: *Konzeption einer Vergleichsstudie zur Mechanik in Jahrgangsstufe 7* - In: HÖTTECKE, D. (Hrsg.): *Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung*, Jahrestagung der GDGP in Schwäbisch Gmünd 2008, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 29, Lit-Verlag, Münster, 2009, ISBN 978-3-643-10010-8, S. 259 – 261

Inhalt und Bezug zum Thema:

Vor dem Hintergrund nachhaltiger Erfolglosigkeit des Physikunterrichts und besonders auch des Mechanikunterrichts erscheint dringender Handlungsbedarf für die Physikdidaktik. Bisherige Studien zeigten, dass sich verschiedene Unterrichtsmethoden nur wenig auf die Lernleistung der Schüler auswirken, die Auswirkungen unterschiedlicher Sachstrukturen sind allerdings – wie verschiedene Indizien nahe legen – schwerwiegender. In einer vergleichenden Untersuchung, deren Konzeption hier vorgestellt wird, wird nun der Einfluss der Sachstruktur auf das Lernen der Newtonschen Mechanik untersucht. Der traditionelle Zugang zur Mechanik anhand linearer Bewegungen wird mit einer Sachstruktur, die von zweidimensionalen Bewegungen direkt zur Dynamik überleitet, verglichen. Für die zweite Sachstruktur, die Geschwindigkeit als Vektorgröße einführt, erweist sich die Videoanalyse als äußerst hilfreich. Für diese Studie wurden ein Lehrtext (siehe Anhang), Videoaufnahmen von Experimenten, passende Videoanalysen sowie ein Simulationsprogramm produziert. Das Mechanikkonzept ist also eine Kombination des Wiesnerschen Kraftstoßkonzeptes mit den Möglichkeiten der Videoanalyse und mit dynamisch dargestellten Vektorpfeilen.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Der Anlass für die Durchführung dieser Studie waren u.a. die positiven Ergebnisse der Studie von Florian Schüller und mir (siehe 4.4) sowie die neuen Möglichkeiten, die sich durch die Videoanalyse mit „measure dynamics“ ergaben (siehe 1.4). Entscheidend dafür, diese Studie durchzuführen, waren auch Gespräche zwischen Herrn Hopf und mir auf Didaktik-Tagungen. Die vier genannten Autoren haben gemeinsam an dem Konzept des Mechanikunterrichts, der Konzeption der Studie und dem Inhalt und der Art des Lehrtextes (siehe Anhang) gerungen. Ich habe es geschafft, dass die Lehrmittelfirma PHYWE für alle Schulen, die an der gesamten Studie beteiligt sind, kostenlos eine erweiterte Schullizenz von „measure dynamics“ für Lehrer und Schüler zur Verfügung stellte.

Martin Hopf¹
 Christine Waltner²
 Thomas Wilhelm³
 Hartmut Wiesner²

¹Universität Wien
²Universität München
³Universität Würzburg

Konzeption einer Vergleichsstudie zur Mechanik in Jahrgangsstufe 7

Hintergrund

Die Newtonsche Mechanik zählt nach wie vor zu einem der schwierigsten Inhaltsgebiete der Schulphysik. Empirische Studien zeigen immer wieder, dass Unterricht hier kaum zur Wissensentwicklung der Jugendlichen beiträgt (z. B. Wilhelm, 2008).

Hierfür lassen sich verschiedene Ursachen angeben: Neben den immer wieder benannten Defiziten des deutschen Physikunterrichts besteht ein Hauptgrund in den dokumentierten Schülervorstellungen zur Mechanik. Daneben finden sich aber Belege dafür, dass Lernschwierigkeiten auch durch die Sachstruktur des Unterrichts entstehen können. Bekannt ist z. B. dass die übliche Einführung in die Kinematik über eindimensionale Betrachtung von Bewegungen erhebliche Schwierigkeiten für die Lernenden bereitet (Wodzinski, 1996).

Im Rahmen einer Vergleichsstudie soll nun der Einfluss der Sachstruktur auf den Wissenserwerb untersucht werden. Dabei wird im Rahmen eines Design-Based Research (DBR) – Ansatzes (Hopf & Wiesner, 2007) eine bereits mehrfach untersuchte Sachstruktur (Jung, Reul & Schwedes, 1977) für den Unterricht in der Sekundarstufe weiterentwickelt und ihre Wirksamkeit mit der einer traditionellen Sachstruktur verglichen. Bei einer DBR-orientierten Forschungsagenda geht es dabei zunächst nicht darum, einzelne Faktoren der Wirkungszusammenhänge des Physiklernens zu identifizieren. Anspruch ist – ausgehend von Problemen der Praxis – tragfähige Lösungen für den Physikunterricht zu identifizieren. Gelingt es in einem ersten Schritt, „funktionierende“ Lernumgebungen zu entwickeln, so kann in weiteren Schritten genauer analysiert werden, ob einzelne Faktoren zu identifizieren sind, die den Erfolg bedingen.

Die Einführung eines neuen Lehrplans in Bayern schafft sehr gute Voraussetzungen für das geplante Vorhaben: Dort ist eine erste, dynamische Einführung in die Mechanik in der 7. Jahrgangsstufe vorgesehen. Damit sind nicht nur die organisatorischen Rahmenbedingungen für die geplante Untersuchung vorhanden, darüber hinaus empfinden viele Lehrkräfte diese Vorgabe als problematisch und hoffen auf Vorschläge aus der Fachdidaktik. Das vorgestellte Vorhaben hat zum Ziel, diese Probleme der Praxis zu bearbeiten und gleichzeitig wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen.

Sachstrukturen

Neben einer Einführung in die Mechanik, die von statischen Kräften ausgeht und erst viel später zur Dynamik übergeht, hat sich in den letzten Jahren eine andere Sachstruktur etabliert. Dabei werden anhand linearer Bewegungen Geschwindigkeit und Beschleunigung eingeführt. In der Regel wird hierfür nur sehr wenig Unterrichtszeit verwendet. Danach wird dann sehr schnell zu den Newtonschen Gesetzen übergeleitet. Dieser Sachstruktur gegenübergestellt wird eine, die die Mechanik von vornherein im Zweidimensionalen betrachtet. Dazu wird zunächst die Geschwindigkeit als Vektorgröße eingeführt. Hier erweisen sich moderne Formen der Messwertgewinnung (Videoanalyse) als äußerst hilfreich. Aus der genauen Analyse von Bewegungen wird anschließend die „Zusatzgeschwindigkeit“ $\Delta \vec{v}$ als Kernbegriff des Lehrgangs erarbeitet. Die Erkenntnis, dass eine Einwirkung auf einen Körper immer eine Zusatzgeschwindigkeit bewirkt, führt unmittelbar zu einer Formulierung der Newtonsche Bewegungsgleichung in ihrer ursprünglichen Form $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$. Durch deren Verwendung ist es möglich, komplexe

Bewegungen des Alltags ohne Rückgriff auf den Begriff der Beschleunigung zu diskutieren. Diese Sachstruktur zeigte bereits in ersten Voruntersuchungen deutliche Verbesserungen beim Verständnis der Mechanik bei Probanden aus 7. Klassen.

Materialentwicklung

Um die beiden Sachstrukturen miteinander vergleichen zu können, war es notwendig, entsprechende Unterrichtsmaterialien zu entwickeln. Dazu wurde zunächst basierend auf verschiedenen Vorarbeiten ein Lehrtext für Schülerinnen und Schüler erstellt (Hopf, Waltner, Wilhelm & Wiesner, 2008). Dabei wurde versucht, einen Schulbuch-ähnlichen Stil zu verwenden, um hier möglichst wenig Unterschiede zu traditionellem Unterricht zu erreichen. Darüber hinaus wurden Videoaufnahmen von Experimenten, passende Videoanalysen sowie ein Simulationsprogramm produziert. Zudem ist die Erarbeitung von Arbeitsblättern geplant.

Vergleichende Studie

Zur Überprüfung der Wirksamkeit der verschiedenen Sachstrukturen wird in einer Kooperation der Universitäten Würzburg, München und Wien in den Schuljahren 2007/08 und 2008/09 eine vergleichende Untersuchung durchgeführt. Verfolgt werden dabei neben der Wissensentwicklung der Schülerinnen und Schüler deren Interesse und selbstbezogene Kognitionen. Dabei wird folgendes Untersuchungsdesign verwendet (Abb. 1).

2008:												
1	2	3	Kontrollgruppe				8	9	10	11	12	
Fragebögen		Materialienentwicklung						Erprobungsgruppe				
2009:												
	Schulung		Treatmentgruppe									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	

Abb. 1: Untersuchungsdesign

Um den Einfluss verschiedener Lehrpersonen möglichst auszuschalten, unterrichtet jede an der Hauptstudie beteiligte Lehrkraft sowohl in der Kontroll- als auch in der Experimentalgruppe. Dabei wurden von April bis Juli 2008 die Kontrollklassen unterrichtet; der Unterricht in den Experimentalklassen erfolgt im Zeitraum von April bis Juli 2009. Zur Einschätzung der Vergleichbarkeit der Probanden wird eine Subskala des KFT verwendet. In allen Klassen werden die Verläufe von Wissen und nicht kognitiven Merkmalen im Prä-Post-Follow-Up-Design verfolgt. Zur Dokumentation der Wissensentwicklung kommen dabei einerseits Items aus dem FCI zum Einsatz, andererseits wird auch ein selbstentwickelter Subtest zu Spezifika der neuen Sachstruktur verwendet. Daneben werden das fachspezifische Selbstkonzept, das allgemeine Interesse am Physikunterricht sowie die Selbstwirksamkeitserwartung erhoben. Angestrebt wird, vollständige Datensätze aus je 10 Klassen zu erhalten. Darüber hinaus wird in zufällig ausgewählten Unterrichtsstunden die Einschätzung des Unterrichtsgeschehens (Laukenmann, Bleicher, Fuss, Gläser-Zikuda, Mayring & Rhöneck, 2000) erfragt. Zwischen Januar und Februar 2009 werden die beteiligten Lehrpersonen auf die neue Sachstruktur geschult und mit dem entwickelten Material vertraut gemacht. Die Lehrkräfte erhalten dabei die entwickelten Schülertexte sowie entsprechendes Begleitmaterial (Videofilme, Videoanalysen, Simulationsprogramm, Arbeitsblätter). Weder für den Unterricht in der Kontrollklasse noch für den in der Treatmentklasse werden den Lehrkräften Vorschriften zur Durchführung gemacht. Die Ausgestaltung der einzelnen Stunden obliegt der einzelnen Lehrperson. Zur weiteren Kontrolle des Unterrichtsgeschehens werden die Lehrpersonen aber jeweils aufgefordert, ein

Unterrichtstagebuch zu führen. Durch dieses Vorgehen wird erwartet, dass die methodische Gestaltung des Unterrichts über den Untersuchungszeitraum nur wenig variiert und z. B. das Ausmaß an schüleraktivierenden Unterrichtsmethoden oder die Verwendung des Experiments relativ konstant bleibt.

Zur Überprüfung der Praxistauglichkeit des Schülertextes erproben Lehrkräfte aus dem Großraum Würzburg zu Beginn des Schuljahrs 2008/09 die entwickelten Materialien im Unterricht und melden ihre Erfahrungen zurück. Darauf basierend wird dann eine zweite Version des Schülertextes formuliert.

Erste Ergebnisse und Ausblick

Die erste Phase der Hauptuntersuchung ist erfolgreich abgeschlossen. Datensätze aus 16 Klassen liegen vor und werden momentan ausgewertet. Auffällig ist die geringe Variation der Sachstruktur in den vorgelegten Unterrichtstagebüchern der Lehrkräfte. Bis auf kleine Abweichungen (z. B. die Reihenfolge, in der Federkraft bzw. Schwerkraft behandelt werden) unterrichten alle beteiligten Lehrerinnen und Lehrer nach der gleichen, traditionellen Sachstruktur. Im Durchschnitt verwenden sie 20,5 Unterrichtsstunden für diese Einführung in die Mechanik. Erste Rückmeldungen zeigen, dass die Lehrkräfte den Lernerfolg ihrer Schülerinnen und Schüler als überaus kritisch einschätzen.

Erstaunlich großes Interesse besteht an der Erprobung des entwickelten Materials. Entgegen der ursprünglichen Planung (von ca. 3 bis 5 teilnehmenden Lehrkräften) beteiligen sich aktuell an diesem Untersuchungsteil 15 Lehrpersonen mit 20 Schulklassen. Hier ist zu erwarten, dass nach Einarbeitung der Anregungen aus dieser Erprobung weitgehend ausgereiftes und praxiserprobtes Unterrichtsmaterial für die Hauptstudie zur Verfügung gestellt werden kann.

Begleitend zur beschriebenen quantitativen Vergleichsstudie wird darüber hinaus im Rahmen einer Promotionsarbeit die Entwicklung von Einstellungen und Wissen der Lernenden und Lehrenden qualitativ untersucht.

Danksagung

Besonderer Dank gilt Verena Tobias, Christine Michel, Alex Rachel, Florian Schüller, Barbara Scherzer, Anne Zimmer und A. Ilhan Sen für ihre wertvollen Beiträge. Teile der Forschungsarbeiten wurden durch die Unterstützung des Lehrerbildungszentrums der LMU München ermöglicht.

Literatur

- Hopf, M., Waltner, C., Wilhelm, T., & Wiesner, H. (2008). Einführung in die Mechanik. München, Würzburg.
- Hopf, M., & Wiesner, H. (2007). Paradigmen für physikdidaktische Forschung - ein Rück- und Ausblick: Physikdidaktik und Design-Based Research. In: Kolling, S. (Hrsg.), Beiträge zur Experimentalphysik, Didaktik und computergestützten Physik. Berlin: Logos, 37-58
- Jung, W., Reul, H., & Schwedes, H. (1977). Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3-6. Diesterweg.
- Laukenmann, M., Bleicher, M., Fuss, S., Gläser-Zikuda, M., Mayring, P., & Rhöneck, C. (2000). Eine Untersuchung zum Einfluss emotionaler Faktoren auf das Lernen im Physikunterricht. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 6 139-155
- Wilhelm, T. (2008). Mechanik - zweidimensional und multicodal. In: Nordmeier, V. (Hrsg.), Didaktik der Physik. Berlin: Lehmanns Media
- Wodzinski, R. (1996). Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht. LIT.

4.7.2 Konzeption des Mechanikkonzeptes

Quelle:

WALTNER, C; TOBIAS, V.; WIESNER, H.; HOPF, M.; T. WILHELM: *Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Dynamik in der Mittelstufe* - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 59, Nr. 7, 2010, S. 9 – 22

Inhalt und Bezug zum Thema:

Seit den Anfängen des Physikunterrichts bis mindestens in die 1980er Jahre wurde in der Sekundarstufe I über die Statik in die Mechanik eingeführt und in der Sekundarstufe II wurde erst Kinematik, dann Dynamik behandelt – aber fast nur eindimensional. In den letzten beiden Jahrzehnten wurde die Statik zurückgedrängt, so dass nun in der Sekundarstufe I die eindimensionale Kinematik dominiert und in der Weiterführung die Beschleunigung und die Gleichung $F = m \cdot a$ eine wichtige Rolle spielen. Neben der statischen und eindimensional-kinematischen Einführung gibt es seit den 1970er Jahren zwei Zugänge, die stark dynamisch orientiert sind: Der Karlsruher Physikkurs mit Impulsströmen, der keine empirischen Erfolge vorweisen kann, und das Wiesnersche Kraftstoßkonzept, das empirische Erfolge vorweisen kann. Dieses wurde weiterentwickelt und mit neuen Medien wie der Videoanalyse aufbereitet. Grundideen sind, die Geschwindigkeit vektoriell anhand zweidimensionaler Bewegungen und die Mechanik dynamisch über die Kraftstoßgleichung $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ einzuführen. Der Artikel beschreibt dieses Unterrichtskonzept. Man sieht dabei: Geeignete Möglichkeiten, eine Bewegung im Rahmen des Schulunterrichts aufzuzeichnen und adäquat darzustellen, bietet die Erstellung von Videos, in die (mit Hilfe einer Videoanalysesoftware) Geschwindigkeits- und Geschwindigkeitsänderungspfeile eingezeichnet werden, sowie die Erstellung von Stroboskopbildern, die ebenso mit Hilfe einer Videoanalysesoftware aus Videos möglich ist.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Für die gemeinsame Mechanikstudie wurde ein Lehrtext in Form eines Schulbuches (siehe Anhang) geschrieben, das gleichzeitig die Konzeption des Unterrichtskonzeptes festlegte. Dieser Text wurde gemeinsam geschrieben (wobei auch Ideen aus den Arbeiten aus 4.4 und 4.5 eingingen) und mehrfach überarbeitet, wobei auch Erfahrungen und Rückmeldungen aus der Würzburger Erprobungsgruppe eingingen (siehe 4.7.3). Der Artikel ist eng an dieses gemeinsame Schulbuch angelegt bzw. beschreibt dessen Vorgehen. Um auch für andere Bundesländer geeignet zu sein, geht er etwas über den bayerischen Lehrplan für die siebte Jahrgangsstufe hinaus.

Weitere Veröffentlichung:

Eine ausführlichere Beschreibung des Unterrichtskonzeptes mit ausführlicher Beschreibung der didaktischen Leitvorstellungen und vielen Unterrichtsmaterialien erscheint als Buch:

WIESNER, H.; WILHELM, T.; RACHEL, A.; WALTNER, C; TOBIAS, V.; HOPF, M.; *Mechanik I: Kraft und Geschwindigkeitsänderung*, Reihe Unterricht Physik, Aulis-Verlag, 2011

Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Dynamik in der Mittelstufe

Ch. Waltner, V. Tobias, H. Wiesner, M. Hopf, Th. Wilhelm

1. Grundlegende Entscheidungen und Ziele für eine Einführung in die Dynamik

In diesem Beitrag wird eine Einführung in die Mechanik beschrieben, die über viele Jahre in mehreren Zyklen mit Untersuchungen von Lernprozessen und Lernschwierigkeiten, darauf aufbauenden Weiterentwicklungen der Lernumgebungen und Evaluationen entstanden ist (s. [1] für einen Überblick über die Entwicklungsphasen seit 1970). Nachdem in den letzten Jahren eine sorgfältige empirische Untersuchung dieser Konzeption durchgeführt worden ist [2], mit der gezeigt werden konnte, dass deutliche Verbesserungen gegenüber verbreiteten Einführungen mit starker Betonung der Statik, der Kinematik und des Beschleunigungsbegriffs und einer Beschränkung auf eindimensionale Bewegungen erzielt worden sind, erscheint uns eine erneute Beschreibung des Konzeptes sinnvoll, die zudem einige neue methodische Verfeinerungen enthält.

Ein wesentlicher Anstoß für den letzten Entwicklungszyklus war die Verschiebung der Einführung in die Mechanik in die 7. Klasse im Zuge der Umstellung auf das 8jährige Gymnasium in Bayern und die dadurch artikulierte Forderung von Lehrkräften, geeignete Unterrichtsmaterialien zur Verfügung gestellt zu bekommen. Die früheren fachmethodischen Entscheidungen wurden beibehalten:

- a) Die Mechanik soll dynamisch eingeführt werden und zwar über die Kraftstoßgleichung, weil der verbreitete Weg über die Statik und die (eindimensionale) Kinematik Lernschwierigkeiten bestärkt und erzeugt (s. z. B. [3]–[5] und das Vorwort in diesem Heft).
- b) Die Geschwindigkeit ist vektoriell (mindestens zweidimensional) einzuführen, um damit einen allgemein gültigen Beschleunigungsbegriff zu entwickeln.

Das Konzept über die Kraftstoßgleichung stellt die Vermittlung der folgenden grundlegenden Ideen in das Zentrum des Lehrgangs:

- Bewegungen werden durch die vektorielle Geschwindigkeit beschrieben (symbolisch – bzw. ikonisch – dargestellt durch Geschwindigkeitspfeile);
- eine Einwirkung, z. B. ein Stoß, fügt zu der Anfangsgeschwindigkeit eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ hinzu bzw. führt zu einer Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$ in Einwirkungs- bzw. Stoßrichtung (entsprechendes gilt umgekehrt);
- die Endgeschwindigkeit ergibt sich aus der vektoriellen Addition von Anfangsgeschwindigkeit und Zusatzgeschwindigkeit;
- die Größe der Zusatzgeschwindigkeit (Geschwindigkeitsänderung) hängt von der Stärke der Einwirkung und ihrer Dauer ab;

- bei gleicher Einwirkung bzw. gleichstarkem Stoß auf verschiedene Körper hängt $\Delta \vec{v}$ von einer Eigenschaft des gestoßenen Körpers ab, nämlich von seiner „Massigkeit“ (träge Masse);
- die Newtonsche Bewegungsgleichung wird in der Form

$$\vec{F} \Delta t = m \Delta \vec{v}$$

eingeführt; sie stellt eine Definitionsgleichung für die Kraft dar.

Die Kraft $\vec{F}$ über die Beziehung

$$\vec{F} \Delta t = m \Delta \vec{v}$$

zu definieren bzw. als physikalische Festlegung von Stärke und Richtung einer Einwirkung einzuführen ist eine der Möglichkeiten die Grundbeziehungen der Mechanik zu strukturieren (s. Mach 1912, Eisenbud, 1958; Westphal, 1967, Weinstock, 1961 [6]–[9]).

Eine logisch konsistente Durchführung greift dabei auf den Impulserhaltungssatz als empirisches Gesetz zurück, der auch die Messvorschrift für die träge Masse liefert.

Die obige Definition der Kraft ist aber unvollständig und wäre nutzlos (s. Feynman [10]), wenn Kräfte nicht auch von

$$\vec{F} \Delta t = m \Delta \vec{v}$$

Inhaltsverzeichnis des Mechaniklehrgangs

1. Zielsetzung der Mechanik

2. Beschreibung und Darstellung von Bewegungen

2.1 Die Abhängigkeit der Bewegung vom Bezugssystem

2.2 Aufzeichnung von Bewegungen

3. Der vektorielle Geschwindigkeitsbegriff

4. Die Zusatzgeschwindigkeit (bzw. Geschwindigkeitsänderung)

4.1 Folge eines Kraftstoßes

4.2 Zweidimensionale Konstruktionen

4.3 Eindimensionale Konstruktionen

5. Die Newtonsche Bewegungsgleichung

5.1 Einwirkungsstärke und Zusatzgeschwindigkeit

5.2 Einwirkungsstärke und Zusatzgeschwindigkeit

5.3 Masse und Zusatzgeschwindigkeit

5.4 Die Newtonsche Bewegungsgleichung

6. Anwendung der Newtonschen Bewegungsgleichung

6.1 Alltagsanwendungen

6.2 Beharrungsprinzip

7. Wechselwirkungsprinzip (Impulserhaltungssatz)

8. Kraftgesetz und -arten

8.1 Die Gravitationskraft

8.2 Kräfteaddition

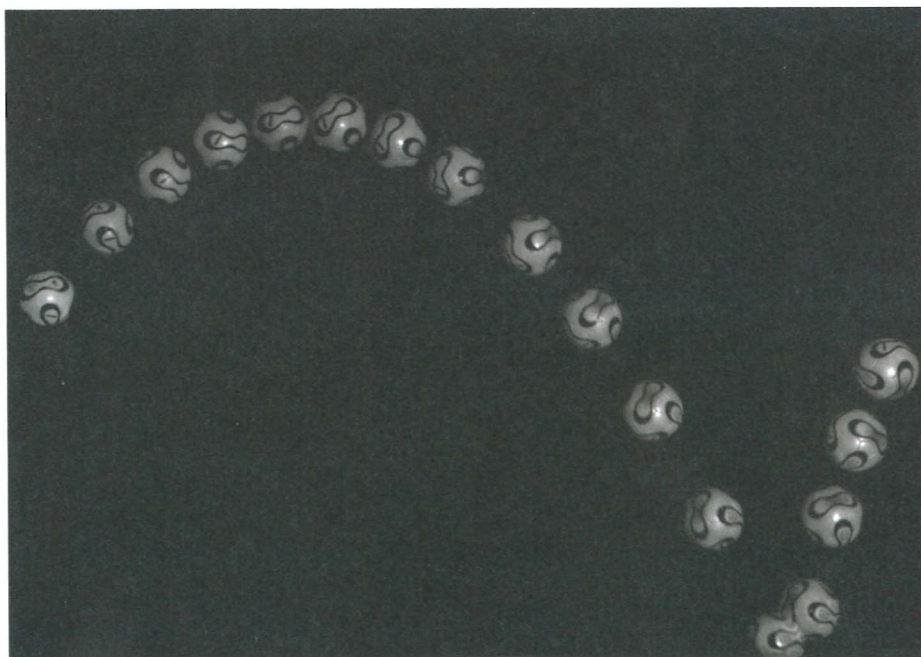
8.3 Kräftegleichgewicht

8.4 Messung von Kräften mit der Kompensationsmethode (Federkraft)

8.5 Weitere Kraftarten

Tab. 1: Inhaltsverzeichnis des Mechaniklehrgangs

Abb. 1: Stroboskopbild eines springenden Fußballs



unabhängige Eigenschaften hätten. Diese Eigenschaften legen die speziellen Kraftgesetze (z. B. $\vec{F}_G = m\vec{g}$ oder $\vec{F}_F = -D\Delta\vec{x}$) fest. Diese können prinzipiell mithilfe von $\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$ experimentell gefunden werden. Sind sie bekannt, können mit ihnen wiederum theoretische Voraussagen über die Bewegung von Objekten gemacht werden.

Die (integrale) Produktform $\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$ ermöglicht den Schülern plausible Je-desto-Beziehungen zu formulieren, die ihnen wenig Schwierigkeiten bereiten. Z. B. ist eine einfache Folgerung, dass bei gleich starker Einwirkung und Masse die Geschwindigkeitsänderung (Zusatzgeschwindigkeit) umso größer ist, je länger die Einwirkung erfolgt. Auf den für Schüler schwierigen und missverständlichen Beschleunigungsbegriff kann zunächst verzichtet werden.

2. Beschreibung des Lehrgangs

„Einführung in die Mechanik“

2.1 Übersicht über die Unterrichtseinheiten

Ausgehend von einer Lehrgangsstruktur, wie sie in [11]-[14] berichtet wurde, erprobte und evaluierte Sen im Rahmen einer Vergleichsuntersuchung eine überarbeitete Fassung in Ankara (mit deutlicher Überlegenheit des dynamischen Zugangs [15]). Eine weitere gründliche Überarbeitung und Anpassung an die Rahmenbedingungen in Bayern wurde im Rahmen einer umfassenden Studie in den Jahren 2007-2010 überprüft. In Abschnitt 3 werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Der derzeitige Unterrichtsvorschlag (als Schülertext abrufbar unter <http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/aktuelles/mechanik/index.html>) umfasst die in Tab. 1 aufgeführten Unterrichtseinheiten. Je nach länderspezifischen zeitlichen Vorgaben können die Kapitel 7 und 8 mehr oder weniger ausführlich behandelt werden. Der Grad an Formalisierung kann je nach Klassenstufe angepasst werden.

2.2 Beschreibung einzelner Unterrichtseinheiten

Einheit 1: Zielsetzung der Mechanik

Eine Motivation in Form eines Ausblicks steht am Anfang des Lehrgangs. Es wird beschrieben, mit welcher Art von Phänomenen sich der Inhaltsbereich der Mechanik befasst. Fragestellungen zu Bewegungen und Bewegungsänderungen, insbesondere der Zusammenhang der Einwirkung auf einen Gegenstand und seiner daraus resultierenden Bewegungsänderung, werden behandelt. Mit den Gesetzen der Mechanik kann man Bewegungsänderungen voraussagen oder umgekehrt eine Einwirkung erschließen. Einen geeigneten

Kontext dafür bieten zum Beispiel Ballsportarten wie Fußball, Volleyball etc.

Einheit 2: Beschreibung und Darstellung von Bewegungen

Einheit 2.1: Die Abhängigkeit der Bewegung vom Bezugssystem

Anhand von einigen Beispielen wird verdeutlicht, dass eine eindeutige Beschreibung von Bewegungen voraussetzt, dass man das Bezugssystem festlegt. Z.B. sieht die Fallbewegung von Schneeflocken von einem Auto aus betrachtet ganz anders aus als vom Straßenrand beobachtet. Im ersten Fall scheinen die Schneeflocken fast horizontal auf den Beobachter zuzukommen, im zweiten schweben sie bei Windstille senkrecht zum Boden.

Einheit 2.2: Aufzeichnungen von Bewegungen

Um die Bewegung eines Gegenstandes zu beschreiben, muss zu bestimmten Zeitpunkten, festgestellt werden, wo sich der Gegenstand befindet. Als Einstiegsbeispiel dient die Flugroute eines Storchs, die im Internet aktuell abrufbar ist (<http://www.fr.ch/mhn/de/weisstorch/max.htm>). Dabei wird diskutiert, dass die Bewegung umso genauer beschrieben ist, je näher die Zeitpunkte der Ortsmessung zusammen liegen.

Geeignete Möglichkeiten eine Bewegung im Rahmen des Schulunterrichts aufzuzeichnen und adäquat darzustellen bietet die Erstellung von Stroboskopbildern (Abb.1), Videos und Serienbildern. Die Schüler und Schülerinnen sollen dabei verstehen, dass eine gleiche Zeitdauer zwischen zwei Aufnahmen sinnvoll für eine Analyse der Bewegung ist.

Einheit 3: Der vektorielle Geschwindigkeitsbegriff¹

Die Geschwindigkeit $\vec{v}$ eines Gegenstandes setzt sich zusammen aus dessen Tempo und Bewegungsrichtung. Sie kann durch einen Vektor bzw. einen Pfeil dargestellt werden. Seine Richtung gibt die Bewegungsrichtung, sein Betrag bzw. seine Länge gibt das Tempo der Bewegung an.

In einem ersten Schritt wird den Schülerinnen und Schülern bewusst gemacht, dass sie zur genauen Beschreibung einer Bewegung sowohl das Tempo, als auch die Richtung angeben müssen. Dazu eignet sich beispielsweise ein Spiel, bei dem eine Person mit verbundenen Augen ein ferngesteuertes Auto auf einer vorgegebenen Bahn lenkt und dabei von einer weiteren Person die entsprechenden Anweisungen erhält. Die Vektor/Pfeilnotation wird eingeführt. Geschwindigkeitsvektoren bzw. –

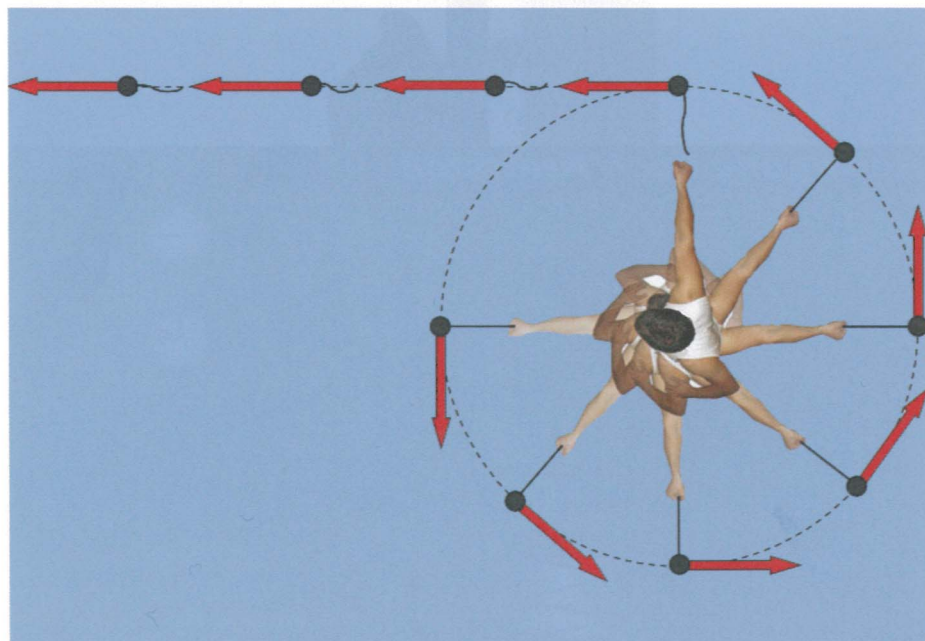


Abb. 2: Stroboskopbild eines springenden Fußballs mit eingezeichneten Geschwindigkeitsvektoren



Abb. 3: Aufgabe zur Unterscheidung von Tempo und Geschwindigkeit: Welche Autos haben die gleiche Geschwindigkeit und welche das gleiche Tempo?

Abb. 4: Geschwindigkeitspfeile beim Hammerwurf



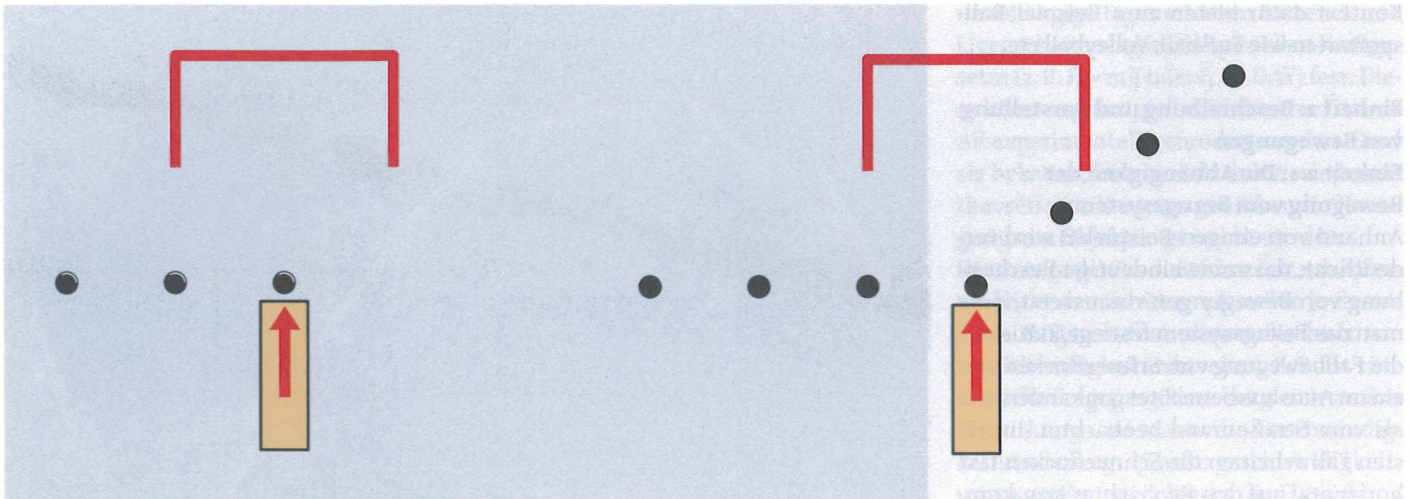


Abb. 5: Stroboskopbild der simulierten Torschussübung

pfeile können von den Schülerinnen und Schülern entsprechend in die Stroboskopbilder eingetragen werden (Abb. 2). Anhand von Aufgaben wird der Unterschied zwischen den Begriffen Geschwindigkeit

und Tempo eingeübt. Zum Beispiel sollen Autos mit gleicher Geschwindigkeit gekennzeichnet werden (Abb. 3). Bereits an dieser Stelle wird mit den Schülerinnen und Schülern diskutiert, dass sich die Ge-

schwindigkeit bei einer Kreisbewegung ständig ändert (Abb. 4).

Einheit 4: Die Zusatzgeschwindigkeit

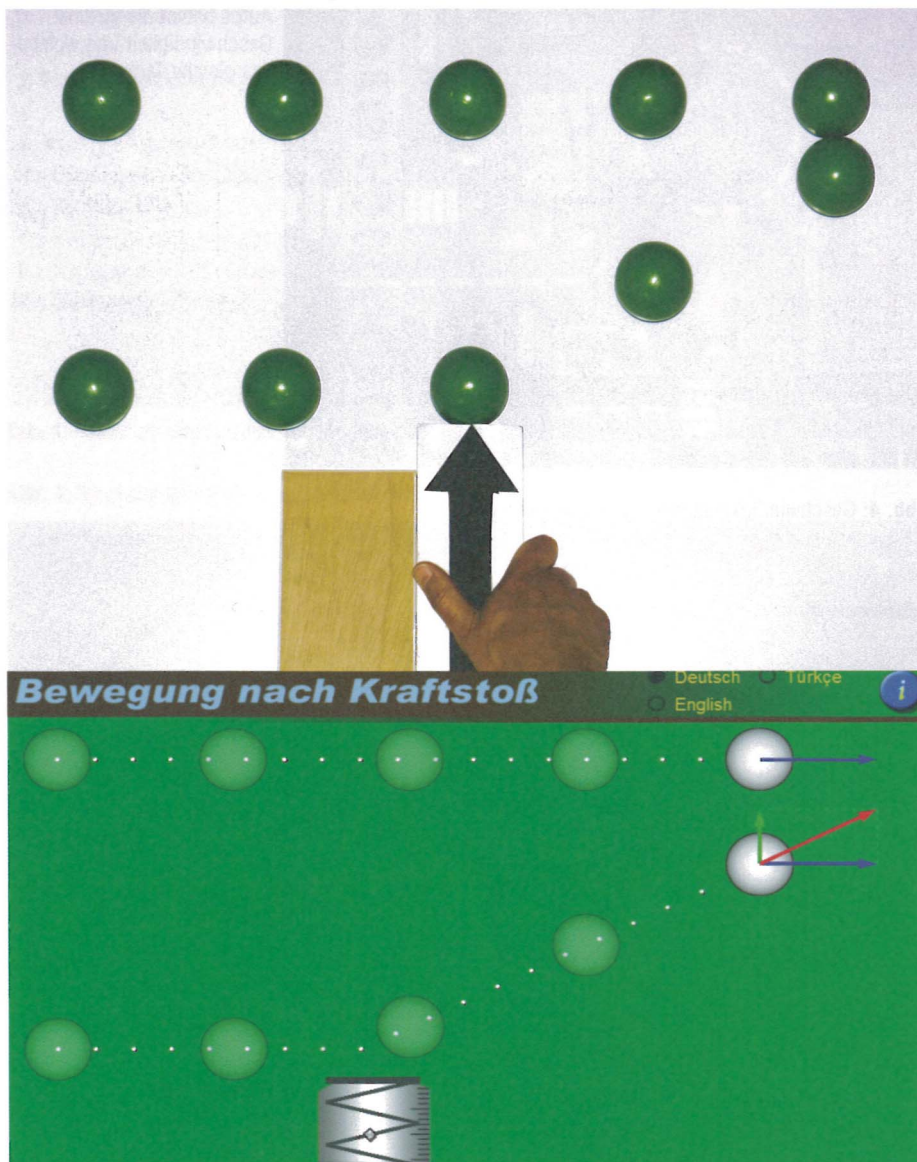
Die für die Mechanik grundlegende Idee, dass eine Einwirkung zu einer Geschwindigkeitsänderung/Zusatzgeschwindigkeit führt und umgekehrt eine beobachtete Geschwindigkeitsänderung auf eine Einwirkung schließen lässt, wird erarbeitet.

Als Einstieg in die Problematik wird eine Torschussübung herangezogen: Ein parallel zum Tor rollender Ball (Abb. 5) wird senkrecht zur ursprünglichen Geschwindigkeit gekickt. In einem Versuch wird dies im Klassenzimmer simuliert. Als Ball eignet sich eine schwere Kugel, die durch ein Brett senkrecht zur Anfangsbewegung mit der Hand gestoßen wird. Wegen der sehr verbreiteten Schülervorstellung, dass Kraft und Geschwindigkeit gleiche Richtung haben, ist für die Schülerinnen und Schüler verblüffend, dass die Kugel sich nicht in Stoßrichtung weiterbewegt und damit das Tor verfehlt.

Woran liegt das? Der Grund ist, dass die Kugel nach dem Stoß in einem gewissen Sinn zwei Bewegungen gleichzeitig ausführt. Die Bewegung in der Anfangsrichtung wird beibehalten. Zusätzlich wird eine Bewegung in der Stoßrichtung ausgeführt. Letztere wird als Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ eingeführt. Zur Veranschaulichung des Zusammenhangs von Anfangs-, Zusatz- und Endgeschwindigkeit wird ein weiterer Stoßversuch durchgeführt. Man lässt zwei identische Kugeln auf einer Unterlage mit gleicher Anfangsgeschwindigkeit nach rechts rollen, nur eine der beiden Kugeln wird senkrecht zur Bewegungsrichtung gestoßen (Abb. 6a und 6b).

Die gestoßene Kugel trifft immer auf die andere Kugel. Deutlich wird dabei, dass beide Kugeln zu jedem Zeitpunkt mit der

Abb. 6: Stroboskopbild zum Stoßversuch (real und als Computersimulation)



gleichen Geschwindigkeit (blau) nach rechts rollen und die gestoßene Kugel zusätzlich eine Geschwindigkeit in Stoßrichtung erhält (grün).

Dass eine senkrecht zur Anfangsrichtung gestoßene Kugel, ihre Anfangsgeschwindigkeit beibehält und in Stoßrichtung eine zusätzliche Geschwindigkeitskomponente erhält, kann durch folgenden Videofilm (Abb. 7, abrufbar unter: www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/aktuelles/mechanik/index.html) veranschaulicht werden. Bei diesem Film können durch entsprechende Kamerastellungen neben der Draufsicht, die beiden Seitenansichten eingeblendet werden. In diesen Perspektiven können die Geschwindigkeitskomponenten, Anfangs- und Zusatzgeschwindigkeit, jeweils einzeln beobachtet werden.

Die Endgeschwindigkeit der gestoßenen Kugel setzt sich durch Vektoraddition aus der Anfangs- und der Zusatzgeschwindigkeit zusammen (Abb. 8). Daneben kann durch Vektorsubtraktion aus der Anfangs- und der Endgeschwindigkeit, die Zusatzgeschwindigkeit und damit die Richtung der Einwirkung ermittelt werden. Diese Verknüpfung schreibt man in Anlehnung an die übliche Addition:

$$\vec{v}_E = \vec{v}_A + \Delta\vec{v}.$$

Nach Üben einiger Konstruktionsbeispiele (siehe Arbeitsblatt 1) für den senkrechten Stoß, sowie der Verallgemeinerung auf schräge Stöße werden anschließend eindimensionale Fälle untersucht.

Einheit 5:

Newtonschen Bewegungsgleichung

In diesem Unterrichtsabschnitt geht es darum, den Zusammenhang zwischen den Aspekten Einwirkungsstärke, -richtung und -dauer, Geschwindigkeitsänderung und Masse zu diskutieren. In einer dafür entwickelten Computersimulation (s. Abb. 6b, abrufbar unter www.didaktik.physik.uni-muenchen.de, Unterrichtsmaterialien zur Mechanik)) können die einzelnen Einflussfaktoren auf die Zusatzgeschwindigkeit variiert und die daraus folgende Bewegungsänderung beobachtet werden.

Einheit 5.1: Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit

Aus dem bisherigen Unterricht ist den Schülern bekannt, dass durch eine Einwirkung eine durch $\Delta\vec{v}$ beschriebene Zusatzbewegung hinzukommt und diese in Richtung der Einwirkung erfolgt.

In diesem Abschnitt werden Einwirkungsstärke und Einwirkungsrichtung als

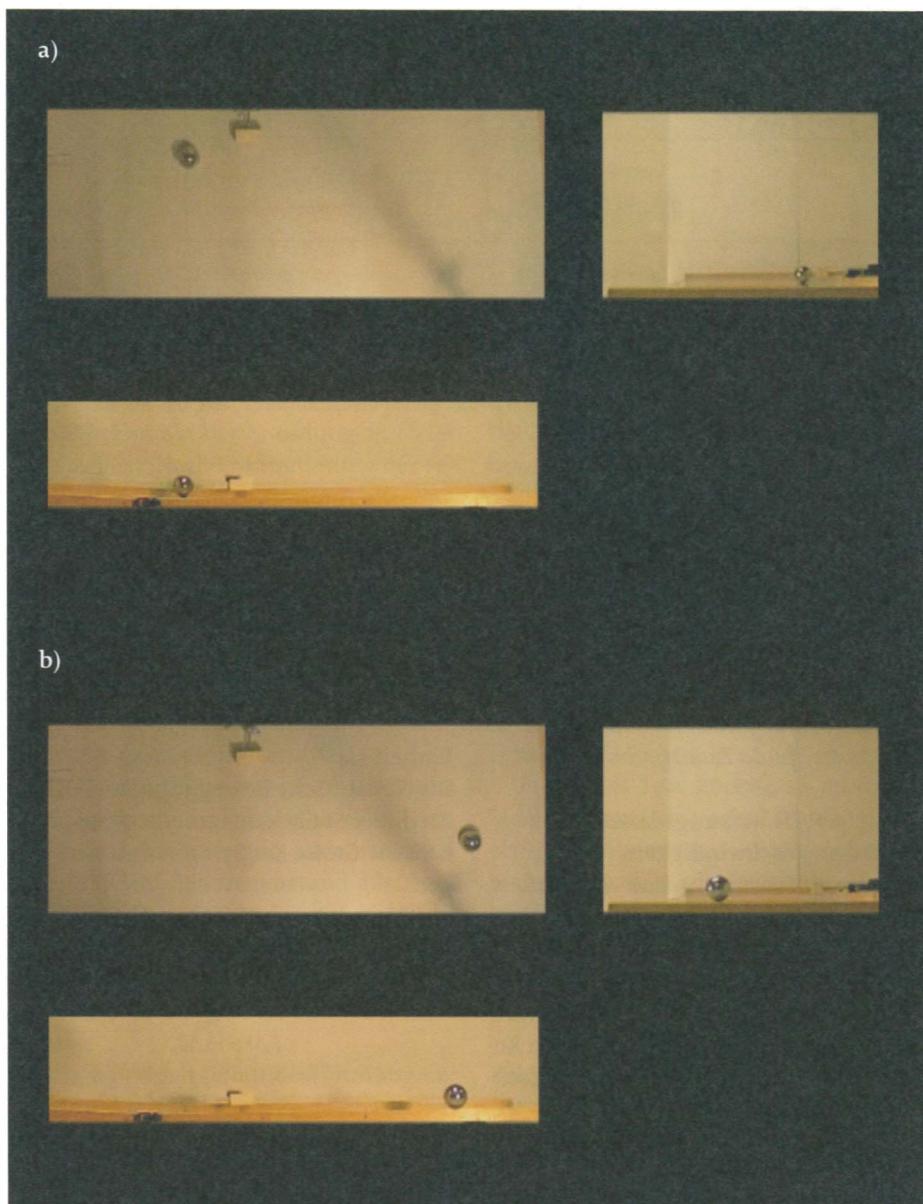
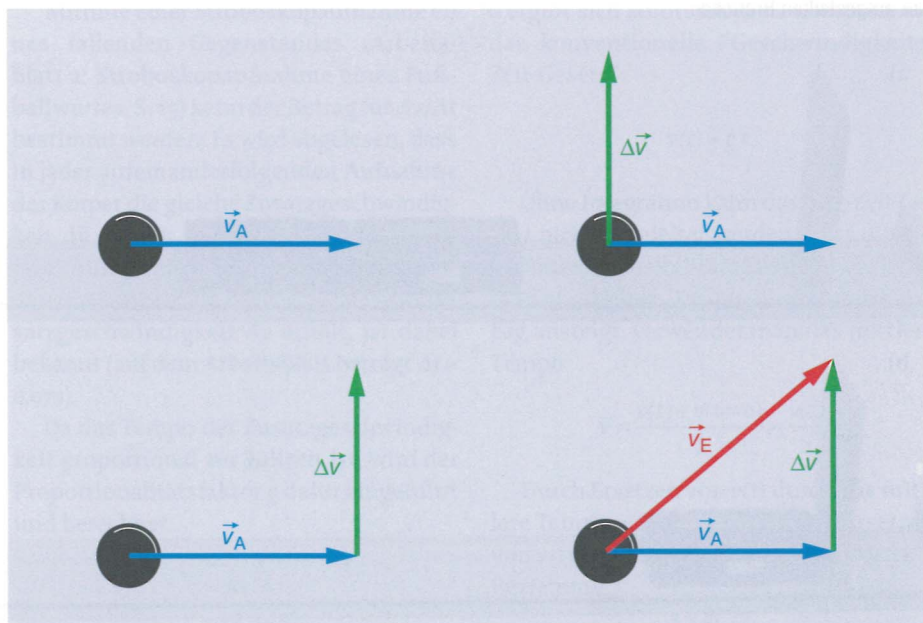


Abb. 7: Kugelstoß aus drei verschiedenen Perspektiven (screenshot von Video): Zusatzgeschwindigkeit (rechts) und Anfangsgeschwindigkeit (unten). (a) vor dem Stoß, (b) nach dem Stoß

Abb. 8: Vektorielle Addition der Anfangs- und der Zusatzgeschwindigkeit



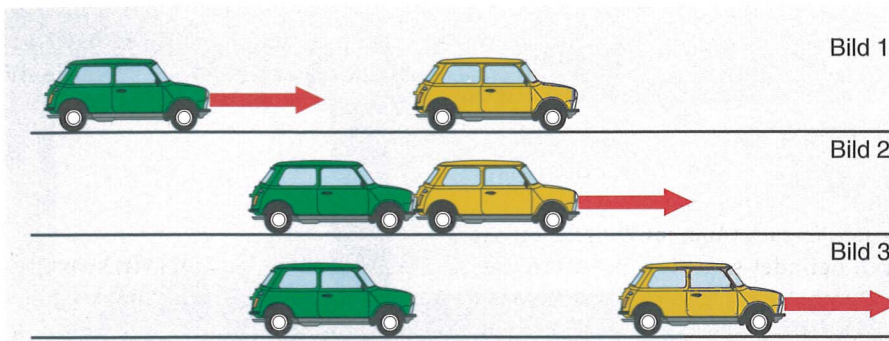


Abb. 9: Nach dem Zusammenstoß hat das zweite Auto genau die Geschwindigkeit, die das erste vor dem Crash hatte

Kraft eingeführt und der Zusammenhang zwischen Kraft und Zusatzgeschwindigkeit erarbeitet:

- Je größer die Einwirkungsstärke einer Kraft ist, die auf einen Körper ausgeübt wird, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit, die der Körper erhält. (Gleichwertig ist hier und bei den folgenden Je-desto-Aussagen die Formulierung: „... desto länger ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit.“)

Einheit 5.2: Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit

- Je länger die Einwirkungsdauer einer Kraft ist, die auf einen Gegenstand ausgeübt wird, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit. Dieser Zusammenhang kann durch die Einwirkung eines Gebläses (Fön, Ventilator) auf die Bewegung einer rollenden Kugel veranschaulicht werden (am einfachsten anhand der Simulation).

Einheit 5.3:

Masse und Zusatzgeschwindigkeit

- Je größer die Masse eines Gegenstandes ist, auf den eine Kraft ausgeübt wird, desto kleiner ist das

Tempo der Zusatzgeschwindigkeit, die der Körper erhält.

Intuitiv gleich starke Stöße werden auf unterschiedlich schwere Kugeln bzw. Bälle ausgeübt und die Bewegung jeweils beobachtet.

Einheit 5.4:

Die Newtonsche Bewegungsgleichung

An dieser Stelle kann nun die neue physikalische Größe Kraft präzise definiert werden.

Sie wird durch die folgende Gleichung, die die obigen Je-desto-Beziehungen enthält, physikalisch festgelegt:

$$\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$$

Das Vorgehen, eine physikalische Größe durch eine formale Definition festzulegen, kann mit den Schülerinnen und Schülern als eine Methode in den Naturwissenschaften diskutiert werden. Die Zweckmäßigkeit der Definition muss sich erst erweisen.

Einheit 6: Anwendungen der Newtonschen Bewegungsgleichung

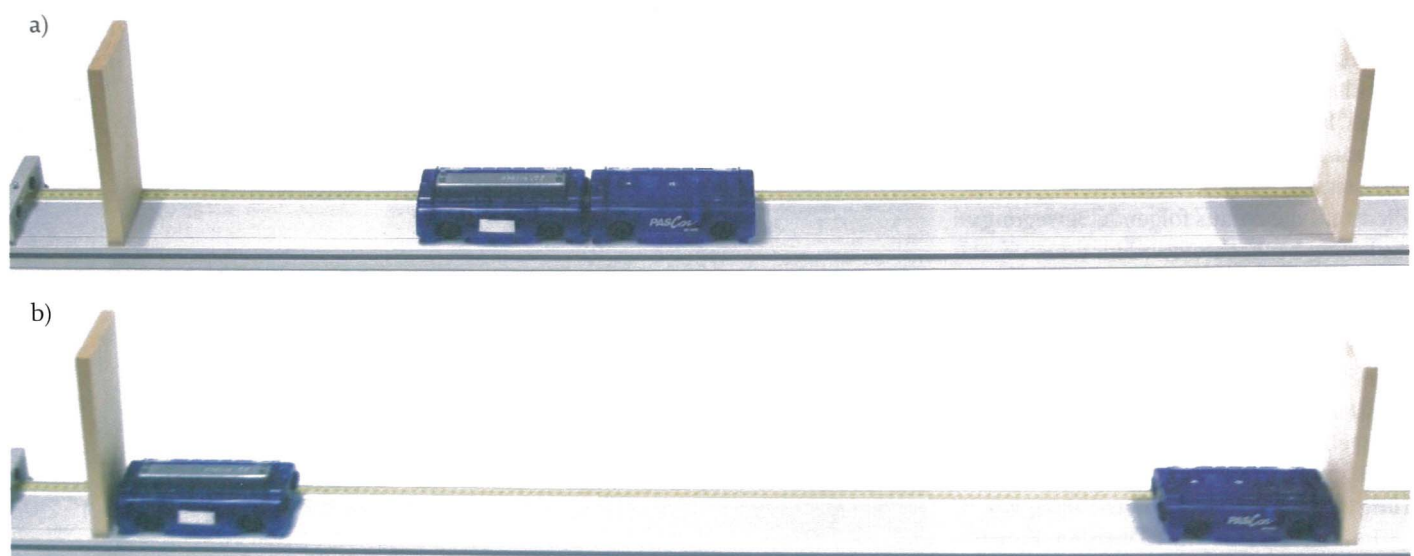
Einheit 6.1: Alltagsanwendungen

Die Newton'sche Bewegungsgleichung wird anhand einiger Beispiele aus dem Alltag diskutiert: Muss der Torwart eine größere Kraft auf den Fußball ausüben um ihn zu stoppen oder zu fausten? Wie verringert die Knautschzone das Verletzungsrisiko der Insassen bei einem Autounfall? Warum werden Formel-1-Rennwagen möglichst leicht gebaut? Warum sollte man beim Abgang vom Reck in die Knie gehen? (siehe Arbeitsblatt 3: Sprung von einem Stuhl auf eine Kraftmessplatte auf S. 16 und Arbeitsblatt 4: Argumentieren mit der Newtonschen Bewegungsgleichung auf S. 17)

Einheit 6.2: Beharrungsprinzip (Trägheitssatz)

Wenn auf einen Körper keine Kraft ausgeübt wird, dann folgt aus der Newtonschen Bewegungsgleichung, dass der Körper keine Zusatzgeschwindigkeit erhält, sich seine Geschwindigkeit also nicht ändert. Beispielsweise verliert ein Lastwagen ein ungesichertes Paket, wenn er um die Kurve fährt, da auf das Paket keine (Zentripetal-) Kraft ausgeübt wird und es daher keine Zusatzgeschwindigkeit in radialer Richtung erhält. Dagegen muss auf den Lkw eine Kraft ausgeübt worden sein. Für Schülerinnen und Schülern ist nicht leicht nachzuvollziehen, dass die Straße die Kraft, die die Zusatzgeschwindigkeit für die Kurvenfahrt ermöglicht, auf den Lkw ausübt (siehe Wechselwirkung). Genauso wirkt auch auf die Funken bei einer schneidenden Flex keine Kraft und sie bewegen sich tangential zum runden Schneideblatt weg.

Abb. 10: Versuch zur Impulserhaltung – das Massenverhältnis ist 1:2. (a) unmittelbar vor der Enttarretierung der Feder, (b) unmittelbar vor der Berührung der aufgestellten Brettchen



Einheit 7: Das Wechselwirkungsprinzip und der Impulserhaltungssatz

Sowohl das Wechselwirkungsprinzip als auch der Impulserhaltungssatz können mithilfe des folgenden Versuchs plausibel gemacht werden.

Auf ein ruhendes Spielzeugauto (2) fährt ein gleich gebautes Auto (1) mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_{1A}$ auf. Man beobachtet, dass das auffahrende Auto (1) stehen bleibt und das Auto (2) mit genau der Geschwindigkeit wegfährt, die Auto (1) vor dem Zusammenstoß hatte (Abb. 9):

$$\vec{v}_{2E} = \vec{v}_{1A} \quad (*)$$

Die Geschwindigkeiten beider Autos haben sich geändert, also hat Auto (1) auf Auto (2) eine Kraft $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ ausgeübt und umgekehrt Auto (2) auf Auto (1) die Kraft $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$. Unter der obigen Voraussetzung

$$m_1 = m_2 = m$$

und gleiche Einwirkungsauern Δt auf beide Autos können beide Kräfte mithilfe der Bewegungsgleichung angegeben und miteinander verglichen werden. Unter Berücksichtigung von (*) und

$$\vec{v}_{1E} = 0 \text{ und } \vec{v}_{2A} = 0$$

ist

$$\begin{aligned}\vec{F}_{2 \rightarrow 1} \Delta t &= m_1 \Delta \vec{v}_1 = m(-\vec{v}_{1A}) \\ \vec{F}_{1 \rightarrow 2} \Delta t &= m_2 \Delta \vec{v}_2 = m \vec{v}_{1A} \quad (**)\end{aligned}$$

Daraus folgt $\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = -\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ als formale Aussage für das Wechselwirkungsprinzip. Diese Aussage gilt auch für den allgemeinen Fall, dass $m_1 \neq m_2$ ist (dann sind die beiden Zusatzgeschwindigkeiten ebenfalls nicht gleich groß).

Wechselwirkungsprinzip: Übt ein Körper 1 auf einen Körper 2 eine Kraft $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ aus, so übt Körper 2 auf Körper 1 gleichzeitig eine gleichgroße, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ aus.

Betont und in Beispielen eingeübt werden muss, dass die beiden Kräfte

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} \text{ und } \vec{F}_{2 \rightarrow 1}$$

an verschiedenen Körpern angreifen! Anwendungsbeispiele für das Besprechen im Unterricht sind Anfahren, Bremsen, Laufen, Anziehen und Abstoßen von Magneten, ...

Aus den beiden Gleichungen (**) folgt mit

$$\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = -\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$$

der Impulserhaltungssatz:

$$m_1 \vec{v}_1 = -m_2 \vec{v}_2.$$

Eine einfache aber für die Schülerinnen und Schüler sehr überzeugende Bestätigung für die Impulserhaltung liefert der folgende Versuch (Abb. 10). Zwischen zwei Wagen befindet sich eine gespannte Feder. Durch Zusatzgewichte ist das Massenverhältnis der Wagen 1:2 (oder auch 1:3) eingestellt. Zwei Brettchen werden so aufgestellt, dass ihr Abstandsverhältnis vom Mittelpunkt der Anordnung 2:1 (oder auch 3:1) ist. Nach Entarretierung der Feder werden beide Brettchen durch die Wagen gut hörbar zum selben Zeitpunkt umgestoßen, weil nach Impulserhaltungssatz der leichte Wagen die doppelte Endgeschwindigkeit hat wie der schwerere Wagen.

**Einheit 8: Kraftgesetze und Kraftarten
Einheit 8.1: Gravitationskraft**

Losgelassene Gegenstände erhalten eine Zusatzgeschwindigkeit senkrecht zum Erdboden, also muss ein anderer Körper eine Kraft auf den Gegenstand ausüben, die senkrecht zum Erdboden hin wirkt. Mit den Schülerinnen und Schülern wird geklärt, dass dies die Gravitationskraft ist, die die Erde auf alle Gegenstände in ihrer Nähe ausübt.

Zur experimentellen Bestimmung der Gravitationskraft der Erde wird von der Newtonschen Bewegungsgleichung ausgegangen:

$$\begin{aligned}\vec{F} \Delta t &= m \Delta \vec{v} \quad | : \Delta t \\ \vec{F} &= m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (1)\end{aligned}$$

Mithilfe einer Stroboskopaufnahme eines fallenden Gegenstandes (Arbeitsblatt 2: Stroboskopaufnahme eines Fußballwurfes, S. 15) kann der Betrag für $\Delta v / \Delta t$ bestimmt werden: Es wird abgelesen, dass in jeder aufeinanderfolgenden Aufnahme der Körper die gleiche Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ erhält. Die Zeitspanne zwischen zwei Aufnahmen, also die Einwirkungs-dauer Δt , innerhalb der der Körper die Zusatzgeschwindigkeit Δv erhält, ist dabei bekannt (auf dem Arbeitsblatt beträgt $\Delta t = 0,075$ s).

Da das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit proportional zur Fallzeit ist, wird der Proportionalitätsfaktor g dafür eingeführt und berechnet:

$$\begin{aligned}g &= \Delta v / \Delta t \\ &= 10 \text{ m/s}^2\end{aligned}$$

Berücksichtigt man, dass die Zusatzgeschwindigkeit eine vektorielle Größe ist, muss auch g ein Vektor sein, der wie $\Delta \vec{v}$ senkrecht nach unten zum Erdboden hin zeigt:

$$\vec{g} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (2)$$

Einsetzen von $\vec{g} = \Delta \vec{v} / \Delta t$ in (1) liefert den Ausdruck für die Gravitationskraft der Erde:

$$\vec{F}_E = m \vec{g}.$$

Die Gravitationskraft der Erde $\vec{F}_E$ ist proportional zur Masse des fallenden Gegenstandes. Die Kraft $\vec{F}$, die einwirken muss, um einem Körper in der Zeit Δt die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ zu geben, ist ebenfalls proportional zur Masse m . Daher ist die Zusatzgeschwindigkeit pro Zeit unabhängig von der Masse. Deutlich wird dies, wenn man den Ausdruck für die Gravitationskraft $\vec{F}_E$ in der Newtonsche Bewegungsgleichung für $\vec{F}$ einsetzt.

Ein erster Test könnte so aussehen: Man lässt zwei kleine Stahlkugeln gleichzeitig fallen, von denen eine zwei bis dreimal so schwer ist wie die andere. Man beobachtet, dass beide Kugeln gleichzeitig auf dem Fußboden auftreffen, also die gleiche Zusatzgeschwindigkeit pro Zeit erhalten hat.

**Folgerungen für den freien Fall
(Bewegungsgleichungen)**

Die Bewegungsgleichungen für den freien Fall können deduktiv aus der Newtonschen Bewegungsgleichung und dem Ausdruck für die Gravitationskraft auf der Erde hergeleitet werden.

Durch Auflösen von Gleichung (2) und Einsetzen der Anfangsbedingung $v(t=0) = 0$ ergibt sich sofort für die z-Komponente das konventionelle "Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz":

$$v(t) = g t.$$

Ohne Integration kann das Weg-Zeit-Gesetz nicht abgeleitet werden. Aber mithilfe einer Plausibilitätsüberlegung kann man es erhalten. Da das Tempo gleichmäßig ansteigt, verwendet man das mittlere Tempo

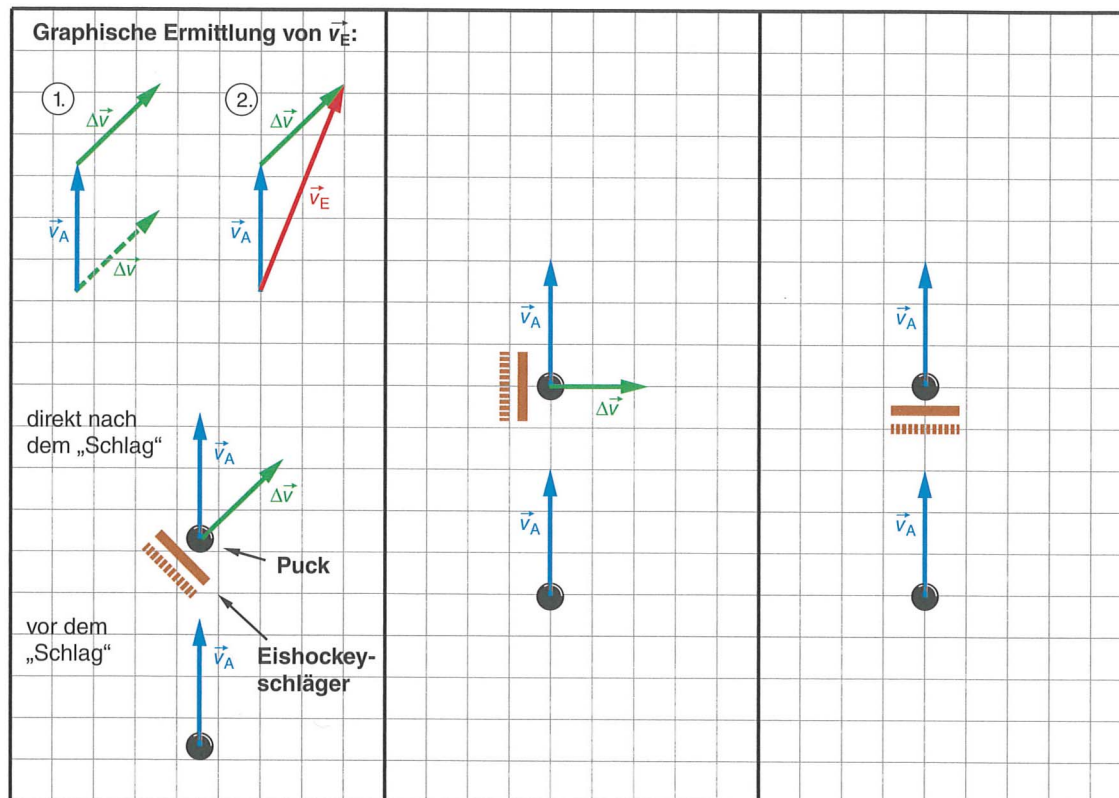
$$\bar{v} = \frac{v(t) + v(t=0)}{2} = \frac{v(t)}{2}.$$

Durch Ersetzen von $v(t)$ durch das mittlere Tempo $v(t)/2$ in $s = v(t) t$ und Ersetzen von $v(t)$ durch $g t$, erhält man die korrekte Beziehung

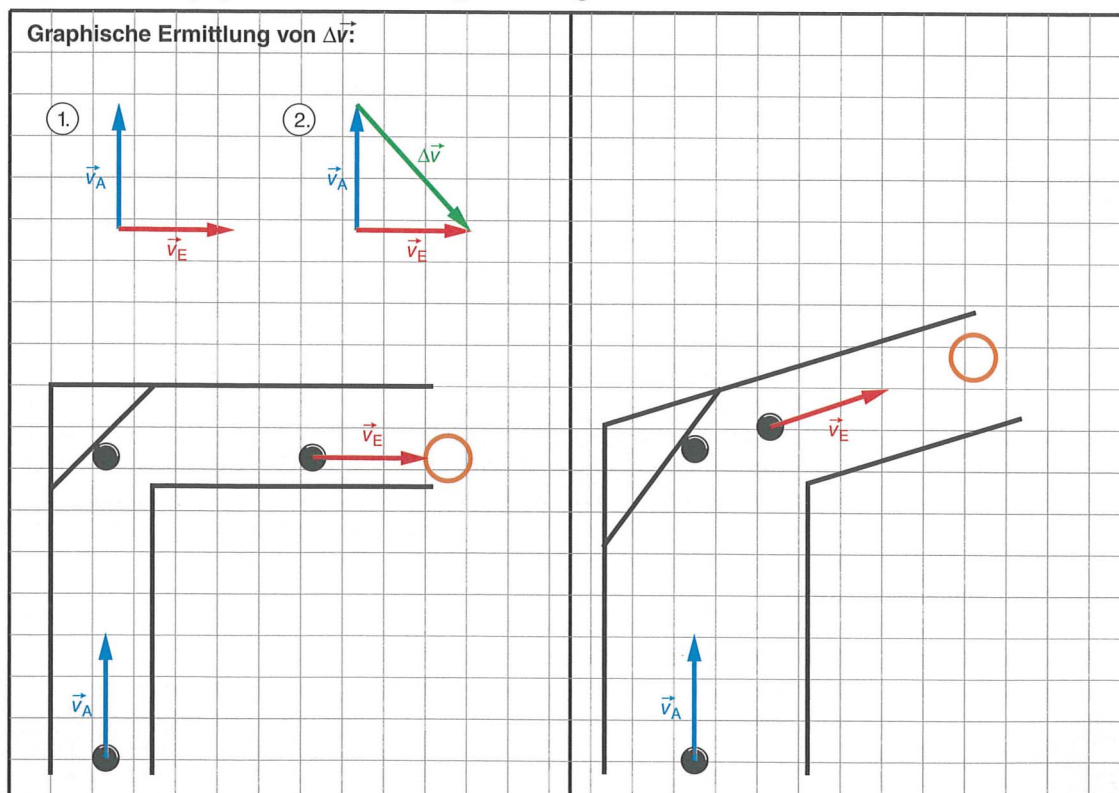
$$s = g t^2 / 2.$$

Arbeitsblatt Nr. 1

Eishockey: Beim Eishockey schlagen die Spieler den Puck, der dabei zur Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ erhält. Die erreichten Endgeschwindigkeiten können bis zu 170 km/h betragen. Im Folgenden sind Situationen dargestellt, in denen der Puck unterschiedliche Zusatzgeschwindigkeiten $\Delta\vec{v}$ erhält. Ermittle jeweils graphisch den Pfeil der Endgeschwindigkeit $\vec{v}_E$, wenn jedes Mal gleich stark gegen den Puck geschlagen wird.



Minigolf: Hast du schon einmal Minigolf gespielt? Ziel dieses Spieles ist es, den Ball mit möglichst wenigen Schlägen ins Loch zu befördern. Manchmal ist es dabei hilfreich, den Ball gegen die Bande zu schlagen, so dass eine Ablenkung in die richtige Richtung erfolgt. Bestimme graphisch, welche Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ der Ball dabei von der Bande erhält.

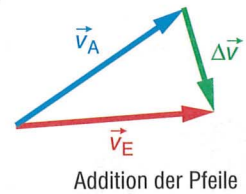


Arbeitsblatt Nr. 2

Stroboskopaufnahme eines Fußballwurfes: Im unteren Bild ist eine Stroboskopaufnahme eines Fußballwurfes zu sehen. Zwischen zwei Aufnahmen liegen immer 0,07 Sekunden. Weiter sind in drei Fällen die Geschwindigkeitspfeile bei zwei aufeinanderfolgenden Fußbällen eingezeichnet. (Maßstab: $1 \text{ cm} \hat{=} 0,7 \text{ m/s}$)

Die Zusatzgeschwindigkeit, welche der Ball zwischen zwei Zeitpunkten bekommt, bestimmt man folgendermaßen:

1. Markiere die Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ mit einem blauen Stift.
2. Markiere die Endgeschwindigkeit $\vec{v}_E$ mit einem roten Stift.
3. Nun verschiebe den Pfeil der Endgeschwindigkeit in den Pfeilfuß der Anfangsgeschwindigkeit.
4. Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ zeigt von der Pfeilspitze von $\vec{v}_A$ zur Pfeilspitze von $\vec{v}_E$.

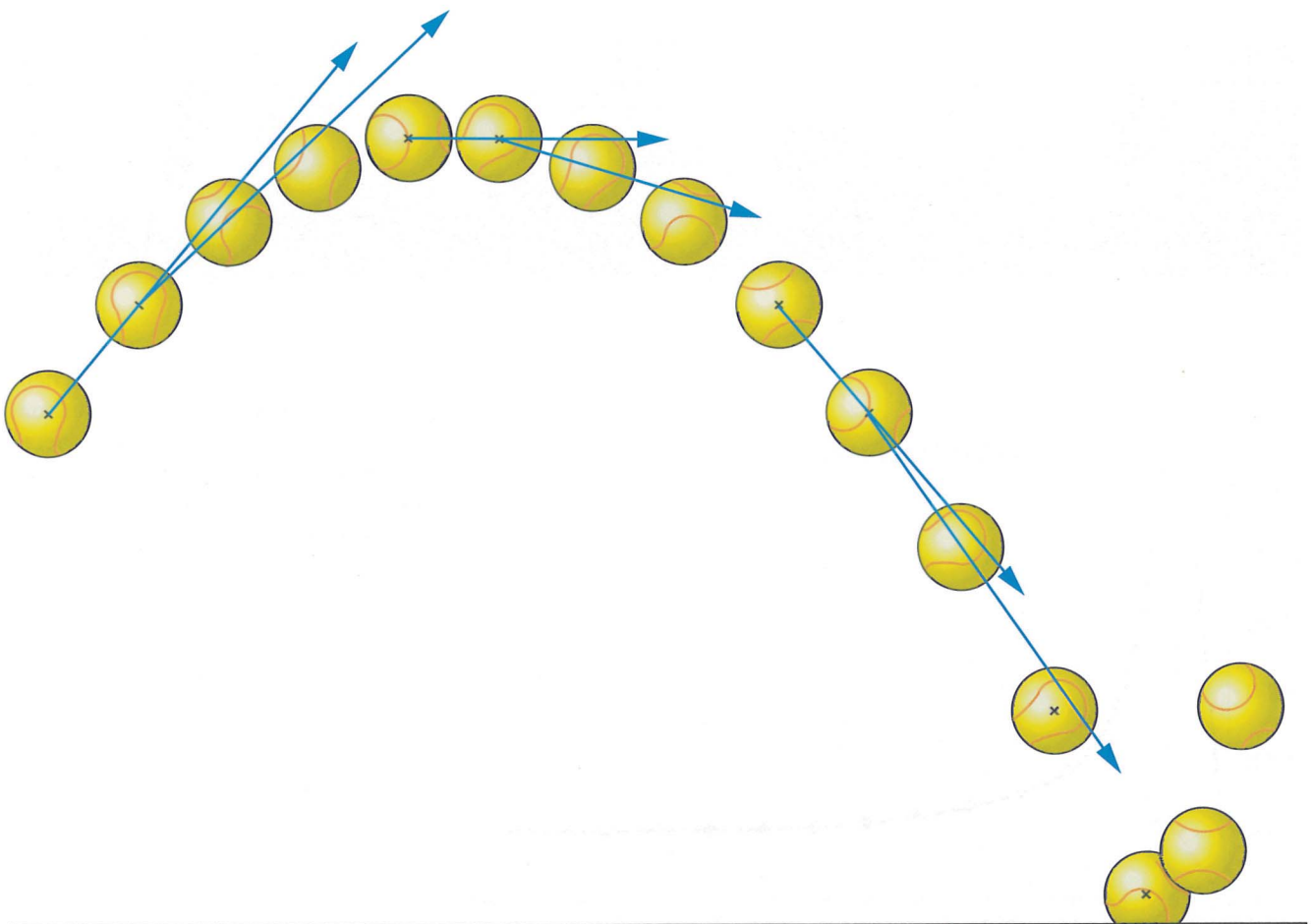


Aufgabe 1:

- a) Konstruiere nun den Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit in den drei Fällen.
- b) Bestimme mit Hilfe des Maßstabs das Tempo der drei Zusatzgeschwindigkeiten.
- c) Vergleiche die drei Pfeile der Zusatzgeschwindigkeit bezüglich Tempo und Richtung.
- d) Da der Ball eine Zusatzgeschwindigkeit erhält, muss auf den Ball durch einen anderen Körper eine Kraft ausgeübt werden. Diskutiere mit deinem Nachbarn, welcher Körper die Kraft ausübt und in welche Richtung sie ausgeübt wurde.

Aufgabe 2:

Berechne nun den Wert des Faktors $\vec{g} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$.

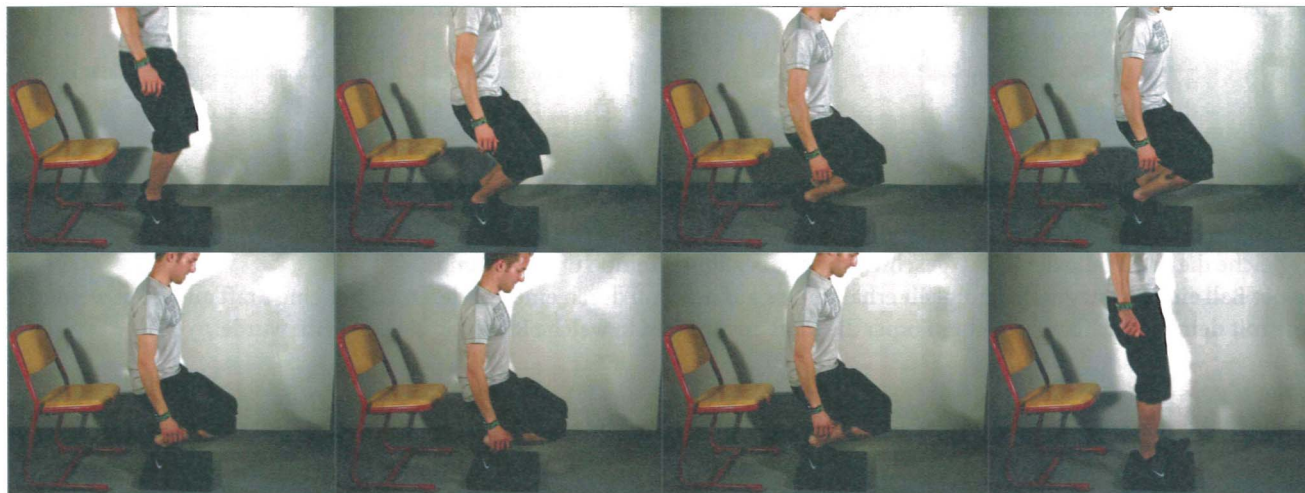


Arbeitsblatt Nr. 3

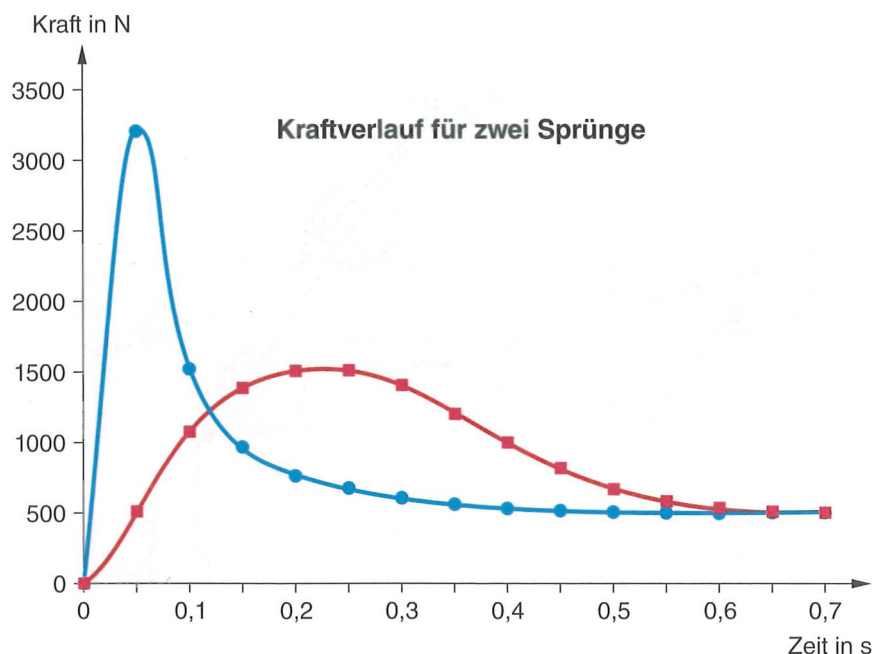
Sprung von einem Stuhl auf eine Kraftmessplatte: Die Fotoserien zeigen zwei unterschiedliche Sprünge auf eine Kraftmessplatte. Eine Kraftmessplatte zeichnet die Kräfte, die auf sie ausgeübt werden, über eine bestimmte Zeit auf. Daraus kann man ablesen, zu welchem Zeitpunkt welche Kraft ausgeübt wurde.

Es wurde der Kraftverlauf für zwei verschiedene Sprünge aufgezeichnet.

1. Sprung: Aufkommen „mit in die Knie zu gehen“



2. Sprung: Aufkommen „möglichst ohne in die Knie zu gehen“



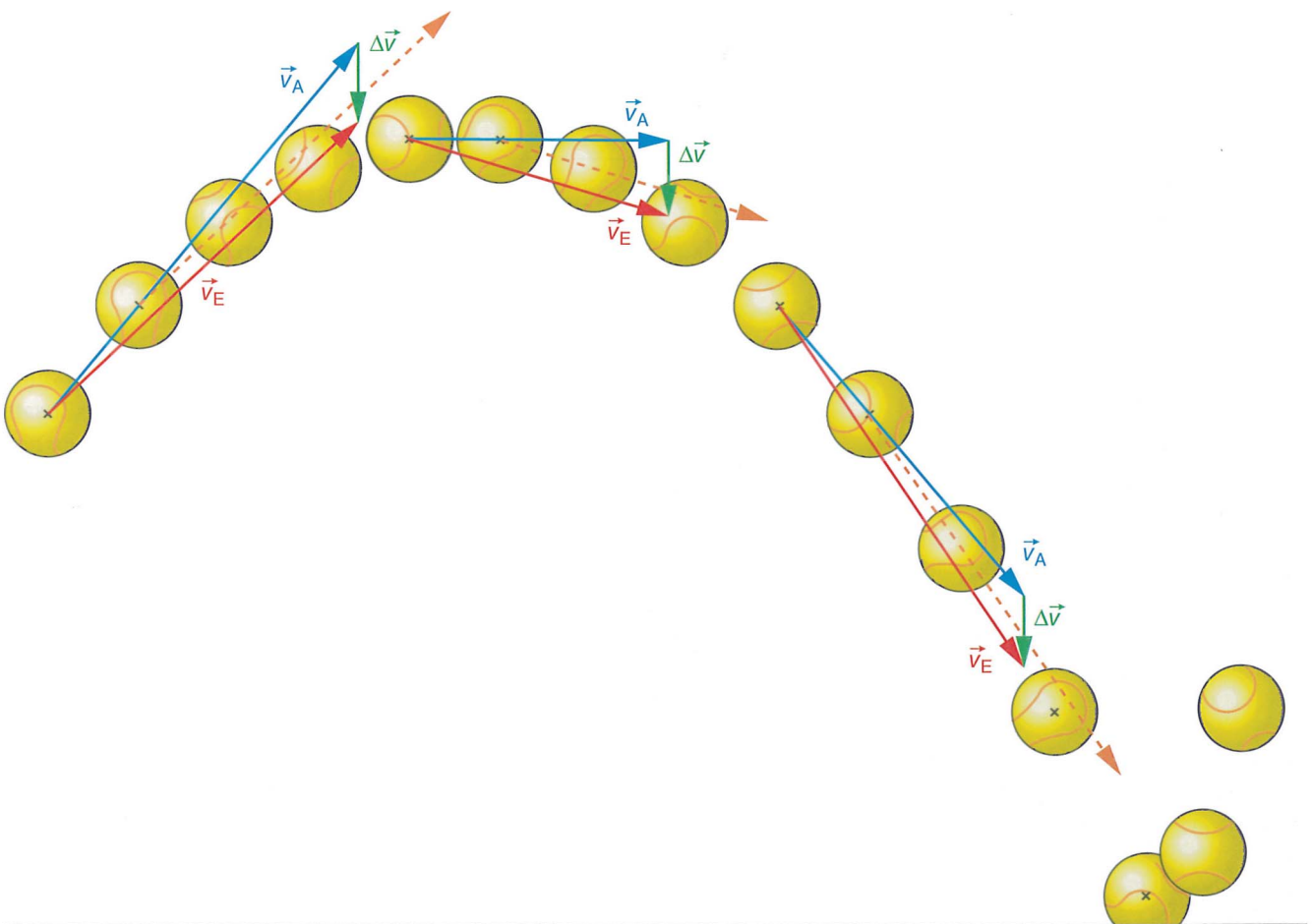
Überlege welcher Kraftverlauf zu welchem Sprung gehört. Begründe mit der Newtonschen Bewegungsgleichung, warum bei einem der beiden Sprünge die Kraft auf die Kraftmessplatte viel größer ist, als bei dem anderen Sprung.

Arbeitsblatt Nr. 4

Argumentieren mit der Newtonschen Bewegungsgleichung:

Verwende zum Argumentieren in den folgenden Aufgaben immer die Newtonsche Bewegungsgleichung:

1. Warum ist es so wichtig, beim Autofahren den Sicherheitsgurt anzulegen?
2. Erkläre, warum ein Airbag bei einem Unfall die Überlebenschancen von Fahrer und Beifahrer erhöht.
3. Erkundige dich, was beim Auto eine Knautschzone ist. Begründe, wozu sie hilfreich ist
4. Erkläre, weshalb in der Formel 1 bei einem Rennen Reifenstapel als Bande verwendet werden.
5. Mountainbiker fahren oft „Fullies“. Schau nach, was das bedeutet und erkläre, warum das beim Downhill hilfreich ist.
6. Beim Klettern ist es für den Stürzenden angenehmer, wenn er „dynamisch“ gesichert wird. Schau nach, wie man „dynamisch“ sichert und begründe, warum das angenehmer ist.

Lösung zur Aufgabe 1. a) des Arbeitsblattes Nr. 2

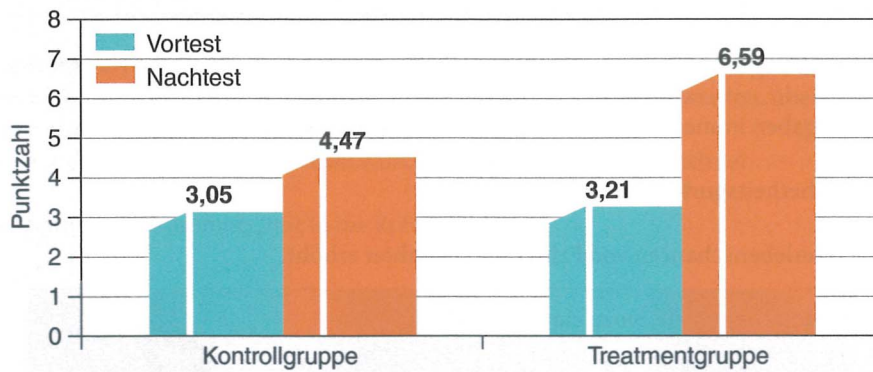


Abb. 11: Mittelwerte der Items zum allgemeinen Mechanik-Grundverständnis der Multiple Choice Tests

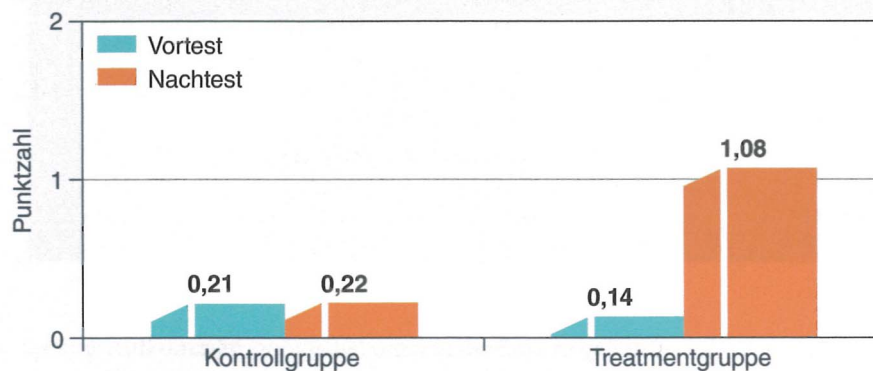


Abb. 12: Mittelwerte der Items zum zweidimensional-dynamischen Konzept der Multiple Choice Tests

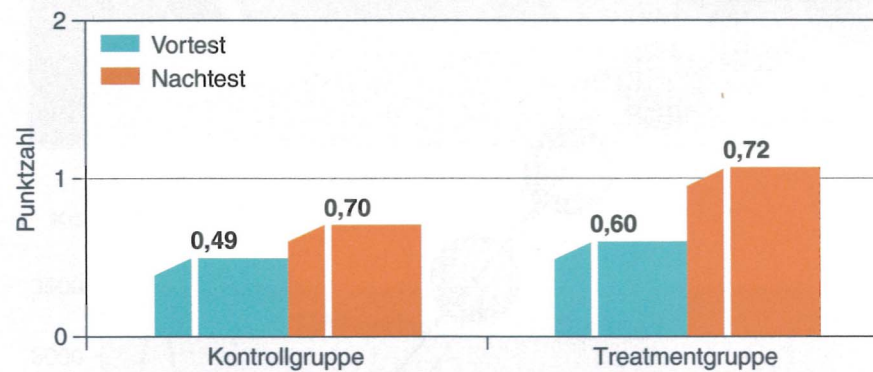


Abb. 13: Mittelwerte der Items zum traditionellen Konzept der Multiple Choice Tests

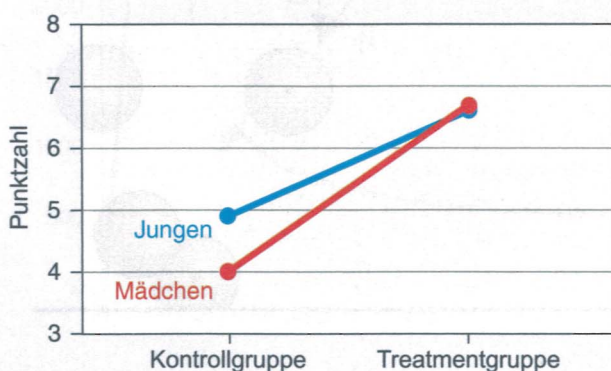


Abb. 14: Mittelwerte der Items zum allgemeinen Mechanik-Grundverständnis der Nach-Multiple Choice Tests

Als ein weiterer Schritt kann das allgemeine Gravitationsgesetz und in diesem Zusammenhang die Gravitationskraft von Himmelskörpern aufeinander angesprochen werden. Beispiele sind die Gravitationskraft zwischen Sonne und Erde und anderen Planeten, zwischen Erde und Mond, Satellitenbahnen, der Gravity-Tractor (s. [16], in diesem Heft), Gezeiten usw. Die Diskussion unterschiedlicher Fallbewegungen kann zur Besprechung der Luftreibung überleiten.

Einheit 8.2: Addition von Kräften

Nachdem alle Kräfte identifiziert wurden, die an einem Körper angreifen, werden diese mittels Vektoraddition (analog zur Addition der Geschwindigkeitsvektoren) zur resultierenden Kraft aufsummiert.

Einheit 8.3: Kräftegleichgewicht

Besprochen wird der Fall, dass auf einen Körper gleichzeitig zwei Kräfte ausgeübt werden, die den gleichen Betrag haben, aber entgegengesetzt wirken, z. B. ein Fallschirmspringer oder ein Fahrradfahrer, die sich mit gleich bleibendem Tempo bewegen.

Auf den Radfahrer wirkt die Antriebskraft und in entgegengesetzte Richtung die Reibungskraft. Der Radfahrer ändert seine Geschwindigkeit nicht, da die resultierende Kraft

$$\vec{F}_{\text{res}} = \vec{0}$$

ist. Umgekehrt erhält man auch aus der Bewegungsgleichung durch Einsetzen der resultierenden Kraft

$$\vec{F}_{\text{res}} = \vec{0}$$

das beobachtete Ergebnis, die Zusatzgeschwindigkeit ist null.

Ist die Anfangsgeschwindigkeit Null, bleibt bei Kräftegleichgewicht der Körper weiterhin in Ruhe. Zur Übung können die Schülerinnen und Schüler z. B. physikalisch korrekt begründen, warum ein Glas auf dem Tisch in Ruhe stehen bleibt, wenn doch die Gravitationskraft nach unten zieht.

Einheit 8.4: Messung von Kräften mit der Kompensationsmethode:

Beispiel Federkraft

Mithilfe der Newtonschen Bewegungsgleichung können unbekannte Kräfte bestimmt werden, wie es beispielsweise bei der Gravitationskraft erfolgt ist.

Eine einfachere, oft praktizierte Möglichkeit besteht darin, eine bekannte, gut kontrollierbare Kraft so entgegen der noch

unbekannten Kraft angreifen zu lassen, das Kräftegleichgewicht besteht. Typischerweise wird so der formale Ausdruck für die Federkraft mithilfe der bereits bekannten Gravitationskraft bestimmt.

Einheit 8.5: Weitere Kraftarten

In diesem Zusammenhang können weitere Kraftarten qualitativ angesprochen werden. Ausgehend von der Beobachtung, dass ein Körper seine Geschwindigkeit ändert, also eine Zusatzgeschwindigkeit erhalten hat, wird gefolgert, dass ein zweiter Körper auf den ersten Körper eine Kraft ausgeübt hat.

Diese Wechselwirkungspartner sollten jeweils identifiziert und so die Kraftarten klassifiziert werden (z. B. magnetische oder elektrische Wechselwirkung, Reibungskräfte, usw.).

3. Ergebnisse einer Vergleichsuntersuchung

Für den Inhaltsbereich der Mechanik sind laut Lehrplan in der siebten Jahrgangsstufe am bayerischen Gymnasium etwa 20 Unterrichtsstunden vorgesehen. An der aktuellen Studie nahmen 5 Lehrkräfte mit ihren Klassen teil. Sie unterrichteten im Schuljahr 08/09 nach dem traditionellen Konzept als Kontrollgruppe ($N = 140$), und im Schuljahr 09/10 nach dem zweidimensional-dynamischen Konzept als Treatmentgruppe ($N = 97$), so dass die Konstanz der Lehrpersonen in Kontroll- und Treatmentgruppe gesichert ist. Insgesamt ergab dies eine Stichprobe von $N = 237$ Schülerinnen und Schülern.

Es fand ein Vortreffen der Lehrpersonen statt, bei dem der ausgearbeitete Lehrtext als Klassensatz zur Verfügung gestellt wurde. Außerdem erhielten sie eine DVD mit weiteren Materialien, wie Arbeitsblättern, Filmen und einer Simulation, die passend zum zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept ausgearbeitet wurden.

Für die Unterrichtsgestaltung (Methoden und Medien, sowie zeitliche Einteilung) wurden den beteiligten Lehrpersonen keinerlei Empfehlungen gegeben.

Durch dieses Design sollte eine Feldstudie in wirklichkeitsnahe Rahmen gewährleistet werden (wobei durch den Verzicht auf eine Schulung der Lehrkräfte die lernförderlichen Möglichkeiten des Lehrgangs nicht vollständig ausgeschöpft werden konnten). Es sollte die Wirksamkeit des Lehrgangs unter realistischen Bedingungen angegeben werden.

Es wurde jeweils das gleiche Erhebungsinstrument – ein Multiple Choice Test – zu zwei Messzeitpunkten als Vortest (vor der

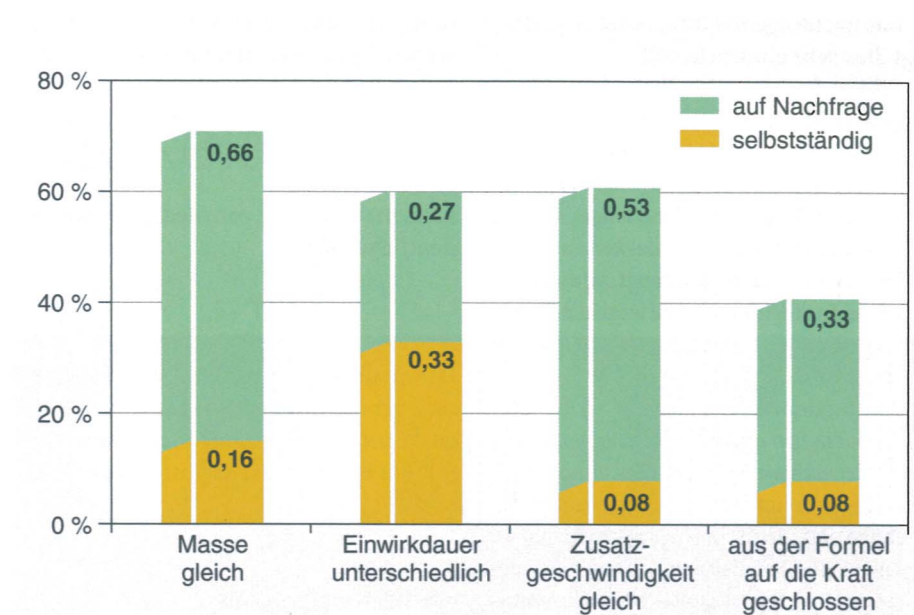


Abb. 15: Lösungshäufigkeiten zur Anwendungsaufgabe der Schülerin

gesamten Unterrichtseinheit) und Nachtest (nach der gesamten Unterrichtseinheit zur Mechanik) eingesetzt, der in [17] veröffentlicht ist. Enthalten waren 13 Items zum allgemeinen Mechanik-Grundverständnis, größtenteils dem FCI entnommen, sowie jeweils zwei Items zu spezifischen Inhalten des zweidimensional-dynamischen und des traditionellen Konzeptes, die gesondert ausgewertet wurden.

Es ergab sich das in den Abbn. 11-13 dargestellte Bild. In den Vortests bestanden keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. In den Nachtests war der Lernerfolg bei den Aufgaben zum allgemeinen Mechanik-Grundverständnis in der Treatmentgruppe gegenüber der Kontrollgruppe mit einer großen Effektstärke höchst signifikant besser. Ein höchst signifikanter Unterschied ist erwartungsgemäß bei den Aufgaben zum zweidimensional-dynamischen Konzept nachweisbar, da die Inhalte dieser Items lediglich in der Treatmentgruppe behandelt wurden. Es ist allerdings kein Unterschied bei den Aufgaben zum traditionellen Konzept festzustellen, die nur in der Kontrollgruppe Gegenstand des Unterrichts waren.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Aufgaben zum allgemeinen Mechanik-Grundverständnis nach Geschlecht ergibt (Abb. 14): In der Kontrollgruppe waren die Jungen den Mädchen im Nachtest signifikant überlegen; in der Treatmentgruppe waren diese Unterschiede nicht vorhanden.

In dem schriftlichen Mechaniktest waren keine Aufgaben zur Newtonschen Bewegungsgleichung (NBG) in der integralen Form

$$\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$$

enthalten. Deshalb wurden zusätzlich zu den Multiple Choice Tests mit zufällig ausgewählten Schülerinnen und Schülern ($N = 52$), die nach dem zweidimensional-dynamischen Konzept unterrichtet worden waren, Interviews zu Zusatzgeschwindigkeit und Kraft sowie dem Umgang mit der NBG durchgeführt [18]. Es war verblüffend, wie diese Konzepte durch die Siebtklässler auf Alltagssituationen angewendet werden konnten. In einer Aufgabenstellung sollten z.B. zwei Situationen verglichen werden: zwei Rennwagen kommen von der Fahrbahn ab. Der eine Wagen fährt in eine Betonmauer (Situation 1), der andere Wagen in einen Reifenstapel (Situation 2). Gefragt wurde nach den unterschiedlichen Auswirkungen auf die Fahrer der Wagen. Der Mehrzahl der Befragten gelingt es, die Größen Masse, Einwirkdauer und Zusatzgeschwindigkeit richtig auf die Situation zu übertragen. Mehr als 60% der Befragten können – zum Teil selbstständig, zum Teil auf Nachfrage – auch angeben, dass die Massen und Zusatzgeschwindigkeiten in beiden Situationen gleich groß sind, und die Einwirkdauer in der zweiten Situation größer ist als in der ersten Situation. Nachdem der Vergleich dieser Variablen geklärt war, konnten insgesamt weniger (gut 40%) aber dennoch relativ viele Schülerinnen und Schüler aus der Gleichung durch mathematische Argumentation (!) richtig schließen, dass dann die Kraft in der zweiten Situation kleiner ist als in der ersten Situation (Abb. 15).

Das nachfolgende Interviewbeispiel belegt dies sehr eindrucksvoll.

I: Gibt es da unterschiedliche Auswirkungen auf die Fahrer?

S: Ja, also das (zeigt auf Mauer) gibt nicht nach, also das ist etwas Festes. Da (zeigt auf die Reifen) ist die Einwirkungsdauer länger, denn die Reifen geben ja nach. Und das kann man sich hiermit auch gut merken (zeigt auf die aufgeschriebene Gleichung), weil wenn die Einwirkungsdauer größer ist, dann muss die Kraft ja kleiner sein.

I: Warum denn?

S: Wenn das hier gleich bleibt (zeigt auf m und Δv der rechten Seite der Gleichung), dann muss das (zeigt auf die rechte Seite der Gleichung) das Gleiche sein wie das (zeigt auf die linke Seite der Gleichung). Und wenn das (zeigt auf Δt) jetzt größer wird, dann muss das (zeigt auf $\vec{F}$) kleiner werden, sonst bleibt es nicht gleich.

I: Ja, genau. Ist das hier jeweils gleich auf der rechten Seite in den beiden Fällen?

S: Ja, weil, es ist ja das gleiche Auto, also auch gleiche Masse. Und Sie haben ja gesagt, die Geschwindigkeit war auch gleich, und die Zusatzgeschwindigkeit – wenn das dieselbe Situation ist – auch.

Besonders erfreulich ist, dass auch die beteiligten Lehrkräfte durchweg von positiven Erfahrungen mit der unterrichtlichen Umsetzung des Konzeptes berichten. Fast alle Lehrkräfte wollen in ihrem Mechanikunterricht auch zukünftig nach dem zweidimensional-dynamischen Konzept vorgehen. Ein Beispiel für eine Aussage eines Lehrers:

„Man kann viele Dinge sehr gut thematisieren, die nie richtig klar waren. Bei Berechnungen tun sich die Schülerinnen und Schüler zwar schwer, dafür können sie Sachverhalte aus ihrem Umfeld mit physikalischen Konzepten erklären – besser als alle anderen Klassen zuvor. Vor allem ist der nebulöse Kraftbegriff anhand der Zusatzgeschwindigkeit greifbarer. [...]“

Ich werde sicherlich große Teile meines Mechanikunterrichtes wieder an diesem Konzept orientieren. Vor allem hat es auch mir Spaß gemacht.“

4. Schlussbemerkungen

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Newtonsche Bewegungsgleichung in der Form

$$\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$$

bei den Schülern im Gegensatz zur Form

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

zum besserem Verständnis der Mechanik führt. Man betont damit u.a. die Beziehung

zwischen der Kraft und der Geschwindigkeitsänderung. Die Beziehung zwischen $\vec{F}$ und $\Delta\vec{v}$ (genauer

$$\vec{F} \sim \Delta\vec{v}$$

kann man mithilfe von Medien besser verdeutlichen als

$$\vec{F} \sim \vec{a}.$$

Der qualitative („Je-Desto“-Beziehungen) und der quantitative Umgang (notwendiger Verzicht auf Infinitesimalrechnung) ist mit der Bewegungsgleichung in der Form

$$\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$$

erheblich einfacher als

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

Auf die für das Verständnis der Mechanik wesentliche Unterscheidung von velocity and speed muss von Anfang an größter Wert gelegt werden, und dies ist nach unseren Erfahrungen mit einer konsequent vektoriellen Einführung erreichbar. Damit wird das Auftreten verbreiteter Misskonzepte stark reduziert. So benutzen besonders bei der Kurvenfahrt viele Schüler aus der Kontrollgruppe die falsche Vorstellung, dass das Auto immer dieselbe Geschwindigkeit hat, wenn es z.B. mit 40 km/h in die Kurve hineinfährt und damit auch wieder hinausfährt. Diese falsche Vorstellung trat bei den Versuchsgruppen sehr selten auf.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Behandlung zweidimensionaler Bewegungen bei den Schülern auf keinen Widerstand gestoßen ist. Auch bei den Lehrkräften wurde eine breite Akzeptanz nach eigenen Erfahrungen in der unterrichtlichen Umsetzung erreicht. ■

Literatur

- [1] Wiesner, H., Tobias, V., Waltner, C., Hopf, M., Wilhelm, T., Sen, A.: Dynamik in den Mechanikunterricht, PhyDid B (2010)
- [2] Tobias, V.: Newtonsche Mechanik im Anfangsunterricht – Die Wirksamkeit einer Einführung über die zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen, Universität München 2010.
- [3] Jung, W., Reul, H., Schwedes, H.: Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3-6. Diesterweg, Frankfurt am Main, 1975
- [4] Jung, W.: Mechanik für die Sekundarstufe I. Diesterweg, Frankfurt am Main 1980
- [5] Jung, W., Wiesner, H., Engelhardt, P.: Vorstellungen von Schülern über Begriffe der Newton-

schen Mechanik. Empirische Untersuchungen und Ansätze zu didaktisch-methodischen Folgerungen. Verlag Barbara Franzbecker, Bad Salzdetfurth 1981

[6] Mach E.: Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch kritisch dargestellt, F. A. Brockhaus, Leipzig, 9. Aufl. 1933

[7] Eisenbud, L.: On the classical laws of motion. American Journal of Physics, 26 (1958), 144-159

[8] Weinstock, R.: Laws of classical motion: What's F? What's m? What's a? American Journal of Physics, 29 (1961), 698-702.

[9] Westphal, W.: Die Grundlagen der Dynamik und Newton 2. Axiom. Physikalische Blätter, 48 (1967), 558-561.

[10] Feynman, R.: Feynman-Vorlesungen über Physik, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 2007

[11] Wiesner, H.: Zum Einführungsunterricht in die Newtonsche Mechanik: Statisch oder dynamisch? In: Naturwissenschaften im Unterricht, Heft 22 (1994), S.16-23

[12] Wodzinski, R., Wiesner, H.: Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Beschreibung von Bewegungen und Geschwindigkeitsänderungen, in: Physik in der Schule, (1994) S.164-168

[13] Wodzinski R., Wiesner H.: Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Zusatzbewegung und Newtonsche Bewegungsgleichung, in: Physik in der Schule, (1994) S.202-207

[14] Wodzinski, R., Wiesner, H.: Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Die Newtonsche Bewegungsgleichung in Anwendungen und Beispielen, in: Physik in der Schule, (1994) S.331-335

[15] Hopf, M., Sen, A., Waltner, C., Wiesner, H.: Dynamischer Zugang zur Mechanik, in: Nordmeier, V., Grötzebach, H., (Hrsg.): Lehmanns Media, Didaktik der Physik – Berlin, Berlin 2008

[16] Tobias, V., Wiesner, H., Burkert, A.: Bedrohung aus dem All? in: Praxis der Naturwissenschaften-Physik in der Schule, in diesem Heft

[17] Wilhelm, T., Waltner, C., Hopf, M., Tobias, V., Wiesner, H.: Der Einfluss der Sachstruktur im Mechanikunterricht – quantitative Ergebnisse zu Verständnis- und Interessensentwicklung, in: Nordmeier, V., Grötzebach, H., (Hrsg.): Didaktik der Physik – Bochum, Lehmanns Media, Berlin 2009

[18] Jetzinger, F., Tobias, V., Waltner, C., Wiesner, H.: Dynamischer Mechanikunterricht – Ergebnisse einer qualitativen Interviewstudie, PhyDidB (2010)

Anschrift der Verfasser

Dr. Christine Waltner, Dr. Verena Tobias, Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner, Prof. Dr. Martin Hopf, Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Universität München, Theresienstraße 37, 80333 München, E-Mail: hartmut.wiesner@physik.uni-muenchen.de

4.7.3 Quantitative Ergebnisse der Erprobungsgruppe

Quelle:

WILHELM, T.; WALTNER, C.; HOPF, M.; TOBIAS, V.; WIESNER, H.: *Der Einfluss der Sachstruktur im Mechanikunterricht - quantitative Ergebnisse zur Verständnis- und Interessenentwicklung* - In: NORDMEIER, V.; GRÖTZEBAUCH, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik - Bochum 2009*, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2009, ISBN 978-3-86541-371-0

Inhalt und Bezug zum Thema:

In einer vergleichenden Untersuchung wird der Einfluss der Sachstruktur auf das Lernen der Newtonschen Mechanik in der Jahrgangsstufe 7 untersucht. Der traditionelle eindimensionale Zugang zur Mechanik wird mit einer Sachstruktur, die von zweidimensionalen Bewegungen direkt zur Dynamik überleitet, verglichen. Zentraler Aspekt ist dabei die Einführung der Geschwindigkeitsänderung als eigenständige Größe und die Verwendung der integralen Form der Newtonschen Bewegungsgleichung. Damit ist es möglich, dynamische Aspekte ohne Einführung der Beschleunigung zu diskutieren.

In einer Kontrollgruppe im Raum München wurde 2008 die Mechanik in herkömmlicher Weise unterrichtet; die gleichen Lehrer unterrichten 2009 nach dem veränderten Konzept (Treatmentgruppe). Um die Lehrermaterialien und das Schülerbuch vorher auf Unterrichtstauglichkeit zu testen, hat eine Erprobungsgruppe von 14 Lehrern in 19 Klassen in Unterfranken nach dem veränderten Konzept unterrichtet. Untersucht wird jeweils die Verständnis- sowie die Interessensentwicklung der Jugendlichen.

Es werden die ersten quantitativen Testergebnisse der Erprobungsgruppe mit denen der Kontrollgruppe verglichen.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Das Konzept des Mechanikunterrichts und die Konzeption der Studie wurden gemeinsam diskutiert und beschlossen. Ich habe die 14 Lehrer der Würzburger Erprobungsgruppe gesucht, geschult und betreut und mit ihnen engen Kontakt gehalten. Die nicht-kognitiven Items des Tests hat im Wesentlichen Herr Hopf erstellt, während ich im Wesentlichen die Items des fachlichen Verständnistests ausgewählt, zusammengestellt und formatiert habe. Die Eingabe der Daten erfolgte durch Hilfskräfte, die Analyse für diesen Vergleich von Kontrollgruppe und Erprobungsgruppe habe ich allein gemacht.

Der Einfluss der Sachstruktur im Mechanikunterricht - quantitative Ergebnisse zur Verständnis- und Interessenentwicklung

Thomas Wilhelm*; Christine Waltner⁺; Martin Hopf[°];
Verena Tobias⁺; Hartmut Wiesner⁺

* Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Am Hubland, D-97074 Würzburg,

⁺ Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Theresienstr. 37, 80333 München,

[°] Österreichisches Kompetenzzentrum für Didaktik der Physik, Währinger Straße 17,
A-1090 Wien

Kurzfassung

In einer vergleichenden Untersuchung wird der Einfluss der Sachstruktur auf das Lernen der Newtonschen Mechanik in der Jahrgangsstufe 7 untersucht. Der traditionelle eindimensionale Zugang zur Mechanik wird mit einer Sachstruktur, die von zweidimensionalen Bewegungen direkt zur Dynamik überleitet, verglichen. Zentraler Aspekt ist dabei die Einführung der Geschwindigkeitsänderung als eigenständige Größe und die Verwendung der integralen Form der Newtonschen Bewegungsgleichung. Damit ist es möglich, dynamische Aspekte ohne Einführung der Beschleunigung zu diskutieren.

In einer Kontrollgruppe wurde 2008 die Mechanik in herkömmlicher Weise unterrichtet; die gleichen Lehrer unterrichten 2009 nach dem Konzept mit neuer Sachstruktur (Treatmentgruppe). Um die Lehrermaterialien und das Schülerbuch vorher auf Unterrichtstauglichkeit zu testen, hat eine Erprobungsgruppe von 14 Lehrern bereits jetzt in 19 Klassen nach dem Konzept mit neuer Sachstruktur unterrichtet. Untersucht wird jeweils die Verständnis- sowie die Interessensentwicklung der Jugendlichen.

Es werden die ersten quantitativen Testergebnisse der Erprobungsgruppe mit denen der Kontrollgruppe verglichen.

1. Ein Mechanikkonzept mit anderer Sachstruktur

Die Newtonsche Mechanik zählt nach wie vor zu einem der schwierigsten Inhaltsgebiete der Schulphysik. Empirische Studien zeigen immer wieder, dass die meisten Schüler auch nach dem Physikunterricht den newtonschen Kraftbegriff nicht verstanden haben [1]. Die Gründe für diese großen Lernschwierigkeiten in der Mechanik sind sicher zahlreich. Ein Hauptgrund besteht in den dokumentierten Schülervorstellungen zur Mechanik, die sehr stabil sind. Daneben finden sich aber Belege dafür, dass Lernschwierigkeiten auch durch die Sachstruktur des Unterrichts entstehen können.

Sinnvoll ist die Entwicklung, die Mechanik früher und qualitativer zu unterrichten. So fordert der Lehrplan für das bayerische achtjährige Gymnasium, dass bereits in der siebten Jahrgangsstufe eine erste, dynamische Einführung in die Mechanik stattfindet. Hierfür wurde im Rahmen eines „Design-Based Research“-Ansatzes [2+3] eine Sachstruktur weiterentwickelt, die bereits mehrfach untersucht wurde. Allen Vorarbeiten gemeinsam ist, dass in der Mechanik von Anfang an zweidimensionale Bewegungen betrachtet werden, die vektorielle Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ betont wird und der Kraftbegriff dynamisch eingeführt wird. Dazu liegen Konzepte

und Evaluationen für die Grundschule [4], die Sekundarstufe I [5-11] und die Sekundarstufe II [1] vor.

Lange Zeit wurde in die Mechanik eingeführt, indem man von statischen Kräften ausging und erst viel später zur Dynamik überging. Zurzeit wird dagegen meistens anhand eindimensionaler Bewegungen Geschwindigkeit und Beschleunigung eingeführt, wofür in der Regel nur sehr wenig Unterrichtszeit verwendet wird. Danach wird schnell zu den Newtonschen Gesetzen übergeleitet.

Dadurch wird unterstützt, dass viele Schüler Geschwindigkeit auf eine Betragsgröße reduzieren, die man mit Tempo bezeichnen könnte. Beim physikalischen Geschwindigkeitsbegriff handelt es sich dagegen um eine vektorielle Größe. In dem entwickelten Konzept wird schon bei der Einführung der Geschwindigkeit von zweidimensionalen Bewegungen ausgegangen, um im Unterricht den vektoriellen Charakter der Größe Geschwindigkeit von Anfang an deutlich zu machen. Die Schüler lernen, Geschwindigkeit mit einem Pfeil darzustellen. Dessen Länge gibt wie ein Tachometer das Tempo an; dessen Richtung, die Richtung, in der sich der Körper bewegt oder weiterbewegen würde, wenn er nicht daran gehindert wird. Hier erweisen sich moderne Formen der Messwertgewinnung mittels Videoanalyse als äußerst hilfreich, wenn die Software auto-

matisch die Geschwindigkeitspfeile in das Video einblenden kann [12+13].

In dem neuen Konzept wird als nächstes die „Zusatzgeschwindigkeit“ $\Delta \vec{v}$ (= „Geschwindigkeitsänderung“) als eigenständige Größe eingeführt, die angibt, wie sich die Geschwindigkeit in einem Zeitintervall Δt ändert. Die Erkenntnis, dass eine Einwirkung auf einen Körper immer eine Zusatzgeschwindigkeit bewirkt, führt unmittelbar zu einer Formulierung der Newtonsche Bewegungsgleichung in der Form $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$.

Die integrale Form des zweiten Newtonschen Axioms $\int \vec{F} dt = m \cdot \Delta \vec{v}$ (für konstantes m) wird also hier

in elementarisierter Form $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ verwendet. Die differentielle Form des zweiten Newtonschen Axioms $\vec{F} = m \dot{\vec{v}}$ heißt in elementarisierter

Form $\vec{F} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ und ist für Schüler etwas schwieriger, da sie einen Quotienten statt nur Produkte enthält.

Durch die Verwendung der Gleichung $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ ist es möglich, komplexe Bewegungen des Alltags ohne Einführung des Begriffs „Beschleunigung“ zu diskutieren.

2. Design der Studie

Im Rahmen einer Vergleichsstudie soll nun der Einfluss der Sachstruktur auf den Verständniserwerb der Newtonschen Mechanik untersucht werden und die Wirksamkeit dieser Sachstruktur mit der traditionellen Sachstruktur verglichen werden [14]. Die Einführung eines neuen Lehrplans in Bayern schafft sehr gute Voraussetzungen für das geplante Vorhaben. Um die beiden Sachstrukturen miteinander vergleichen zu können, wurde zunächst basierend auf die verschiedenen Vorarbeiten ein Lehrtext für Schüler erstellt [15]. Dabei wurde versucht, einen Schulbuch-ähnlichen Stil zu verwenden, um hier möglichst wenig Unterschiede zu traditionellem Unterricht zu erreichen. Darüber hinaus wurden Videoaufnahmen von Experimenten, passende Videoanalysen sowie ein Simulationsprogramm produziert.

Um den Einfluss verschiedener Lehrpersonen möglichst auszuschalten, unterrichtet jede an der Hauptstudie beteiligte Lehrkraft sowohl in der Kontroll- als auch in der Treatmentgruppe. Bereits von April bis Juli 2008 haben die Lehrkräfte die Kontrollklassen der siebten Jahrgangsstufe in Oberbayern (Raum München) in herkömmlicher Weise unterrichtet, ohne das neue Konzept zu kennen. Im Folgejahr 2009 unterrichten dieselben Lehrer dann zur gleichen Jahreszeit nach dem veränderten Konzept die Treatmentklassen (Zeitraum von April bis Juli 2009) (siehe Abb. 1, rot). Um die Lehrermaterialien und das Schülerbuch vorher auf Unterrichtstauglichkeit zu testen, wurde das Material von einer Gruppe aus 14 Lehrkräften von September bis Dezember 2008

in Unterfranken (Raum Würzburg) in 19 Klassen im Unterricht erprobt (siehe Abb. 21, grün).

2008:												
1	2	3	4	Kontrollgruppe				8	9	10	11	12
Fragebögen			Materialienentwicklung				Schulung Erprobungsgruppe					
2009:												
			Schulung Treatmentgruppe									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	

Abb. 1: Zeitplan und Design der Studie

Zur Einschätzung der Vergleichbarkeit der Probanden wird eine Subskala des KFT verwendet. Um das Verständnis der newtonschen Mechanik zu erheben, wurde ein Verständnistest entwickelt. Daneben werden das fachspezifische Selbstkonzept, das allgemeine Interesse am Physikunterricht sowie die Selbstwirksamkeitserwartung erhoben. In allen Klassen werden die Verläufe von Wissen und nicht kognitiven Merkmalen im Prä-Post-Follow-Up-Design verfolgt. Darüber hinaus wird in zufällig ausgewählten Unterrichtsstunden die Einschätzung des Unterrichtsgeschehens [21] erfragt.

Ende März 2009 werden die beteiligten Lehrpersonen auf die neue Sachstruktur geschult und mit dem entwickelten Material vertraut gemacht. Die Lehrkräfte erhalten dabei die entwickelten Schülertexte sowie entsprechendes Begleitmaterial (Videofilme, Videoanalysen, Simulationsprogramm, Arbeitsblätter).

Weder für den Unterricht in der Kontrollgruppe, der Erprobungsgruppe noch für den in der Treatmentgruppe wurden den Lehrkräften Vorschriften zur Durchführung gemacht. Die Ausgestaltung der einzelnen Stunden obliegt der einzelnen Lehrperson. Zur weiteren Kontrolle des Unterrichtsgeschehens werden die Lehrpersonen aber jeweils aufgefordert, ein Unterrichtstagebuch zu führen. Durch dieses Vorgehen wird erwartet, dass die methodische Gestaltung des Unterrichts sowohl in der Kontroll- als auch in der Experimentalphase des Untersuchungszeitraums vergleichbar ist und z. B. das Ausmaß an schüleraktivierenden Unterrichtsmethoden oder die Verwendung des Experiments relativ konstant bleibt.

Begleitend zur beschriebenen quantitativen Vergleichsstudie wird darüber hinaus im Rahmen einer Promotionsarbeit die Entwicklung von Einstellungen und Wissen der Lernenden und Lehrenden qualitativ untersucht [22].

3. Vergleich von Kontroll- und Erprobungsgruppe

Kontroll- und Erprobungsgruppe wurden zwar von verschiedenen Lehrern zu verschiedenen Jahreszeiten in verschiedenen Räumen Bayerns unterrichtet, dennoch soll hier ein erster Vergleich stattfinden, der natürlich nicht die gleiche Aussagekraft hat, wie der Vergleich zwischen Kontroll- und Treatmentgruppe.

Für die hier vorgelegte Auswertung wurden nur Schüler herangezogen, die jeweils an Prä- und Post-

test teilnahmen. So liegen aus der Kontrollgruppe Datensätze von 422 Schülern aus 18 Klassen vor. Auffällig ist die geringe Variation der Sachstruktur in den vorgelegten Unterrichtstagebüchern der Lehrkräfte. Bis auf kleine Abweichungen (z. B. die Reihenfolge, in der Federkraft bzw. Schwerkraft behandelt werden) unterrichten alle beteiligten Lehrerinnen und Lehrer nach der gleichen, traditionellen Sachstruktur.

Beim letzten Themenkomplex eines Schuljahres besteht die Gefahr, dass durch unvorhergesehene Unterrichtsausfälle weniger Unterrichtsstunden als geplant zur Verfügung stehen. So erging es auch einigen Lehrern der Kontrollgruppe, so dass vor allem die Federkraft in einigen Fällen nicht mehr unterrichtet werden konnte, was aber unproblematisch ist, da diese in keinem Test abgefragt wird. Für einen Vergleich der verwendeten Unterrichtszeit wird deshalb nur der Mechanikunterricht ohne die unwichtige Federkraft (mit dem Hookeschen Gesetz) betrachtet. Im Durchschnitt verwendeten die Lehrer der Kontrollgruppe **19,0** Unterrichtsstunden für die Einführung in die Mechanik ohne Federkraft (Standardabweichung 3,6) (mit Federkraft 20,0 Stunden). Aus der Erprobungsgruppe lagen bis zu dieser Auswertung die Posttest-Daten erst von 13 Klassen mit 331 Schülern vor. Der Follow-Up-Test wurde noch nicht gestellt. Beim ersten Themenkomplex eines Schuljahres besteht die Gefahr, dass er zu ausführlich unterrichtet wird. Laut Unterrichtstagebuch verwendeten die Lehrer im Durchschnitt **20,7** Unterrichtsstunden für die Einführung in die Mechanik ohne Federkraft (Standardabweichung 3,6) (mit Federkraft 22,2 Stunden). D.h. die Unterrichtszeit war in beiden Gruppen ähnlich.

4. Der Verständnistests

Um das Verständnis der Schüler für die Begriffe Geschwindigkeit und Kraft zu überprüfen, wurden 14 qualitative Verständnisaufgaben eingesetzt (siehe Anhang). Die Items sollten valide und reliabel sein und sie sollten so schwer zu lösen sein, dass es nicht zu Deckeneffekten kommt. 12 Items sollten so sein, dass unabhängig vom Unterrichtskonzept die Lehrer bestätigen können, dass die Aufgaben zu den Kernthemen des Unterrichts passen, sie also nach dem Unterricht lösbar sein sollten und von den Lehrern als sinnvoll akzeptiert werden. Um all dies sicher zu stellen, wurde hier auf Items zurückgegriffen, die sich bereits in anderen Studien bewährt haben (siehe Tab. 1). Dies waren Items aus der ersten Version des FCI-Tests von Hestenes et al. [16] sowie Items von Schüller et al. [11]. Zu diesen Items liegen bereits Vergleichswerte von Wilhelm [1, 17, 18], Schüller et al. [11] und Galmbacher [19] aus anderen Studien in Bayern vor.

Zwei Items (Nr. 5 und Nr. 9) wurden passend zur neuen Sachstruktur gewählt, so dass hier die Schüler, die nach dem neuen Konzept unterrichtet wurden, bessere Ergebnisse erzielen müssten. Item 6

entstammt Jung et al. [4] und Item 5 ist angelehnt an Flores et al. [20], wobei nur „Geschwindigkeitsänderung“ gegen „Zusatzgeschwindigkeit“ ausgetauscht wurde.

Es wurde darauf verzichtet, noch weitere Items zu verwenden, um die Gesamtlänge des Messinstruments in vertretbarem Rahmen zu halten.

Item	Situation Thema	Quelle, Autor	bisheriger Einsatz in Bayern
1.	Schleuderball, Newton1	FCI 1, Hestenes [16]	Wilhelm A4 [1] Schüller Nr. 4 [11] Galmbacher 3.8 [19]
2.	Stroboskop, v	FCI 1, Hestenes [16]	Wilhelm A20 [1] Galmbacher 1.9 [19]
3.	Autos, F	Schüller	Schüller Nr. 3 [11]
4.	Zusammenstoß, Newton3	FCI 1, Hestenes [16]	Wilhelm A2 [1] Galmbacher 1.4 [19]
5.	Mond, $\Delta \vec{v}$	Flores [20]	Wilhelm Nr. 6 [18] Schüller Nr. 6 [11]
6.	Wagen, F	Jung [4]	Galmbacher 2.5 [19+11] Schüller Nr. 2 [11]
7.	Kick, Superposit.	FCI 1, Hestenes [16]	Wilhelm A6 [1]
8.	Kick2, Superpos	FCI 1, Hestenes [16]	Wilhelm A7 [1]
9.	Tempo vs. $\vec{v}$	Schüller [11]	Schüller Nr. 1 [11]
10. abc	Fußball, F	Schüller [11]	Schüller Nr. 14 [11]
11.	Schieben Newton3	FCI 1, Hestenes [16]	Wilhelm A13 [1]
12.	Wurf, F	FCI 1, Hestenes [16]	Wilhelm A5 [1]

Tab. 1: Literaturangaben zu den Items des Verständnistests

In der Regel müssen die Schüler eine mögliche Antwort auswählen, wobei auch nur eine richtig ist. Nur bei Item 6 sollen alle richtigen Antworten gewählt werden, was alle drei waren. Beim Item 9 soll entgegen dem Original nur eine Antwort ausgewählt werden, obwohl es zwei richtige gibt.

5. Ergebnisse beim Verständnistest in Kontroll- und Erprobungsgruppe

Im Folgenden wird zwischen den 12 Kernaufgaben unterschieden, die den Kerninhalt jedes Mechanikunterrichts betreffen, und den beiden Items (Nr. 5 und 9), die spezielle zusätzliche Inhalte der neuen Sachstruktur abprüfen.

5.1 Kernaufgaben

Bei den 12 Kernaufgaben sind die oberbayerischen Kontrollklassen im Prätest etwas besser als die unterfränkischen Erprobungsklassen, was aber nicht signifikant ist (auf 5%-Niveau). Beim Posttest, beim

Item	Kontrollgruppe 18 Klassen, 422 Schüler				Erprobungsgruppe 13 Klassen, 331 Schüler			
	Vortest	Nachtest	Zugewinn	relativ. Zugewinn	Vortest	Nachtest	Zugewinn	relativ. Zugewinn
1	37 %	56 %	20 %	31 %	31 %	52 %	21 %	30 %
2	20 %	21 %	1 %	1 %	16 %	24 %	8 %	10 %
3	51 %	59 %	8 %	17 %	43 %	54 %	11 %	19 %
4	8 %	26 %	18 %	19 %	8 %	26 %	18 %	19 %
6	1 %	3 %	2 %	2 %	1 %	3 %	2 %	2 %
7	37 %	40 %	4 %	6 %	36 %	83 %	47 %	74 %
8	19 %	21 %	2 %	2 %	18 %	28 %	10 %	12 %
10a	1 %	8 %	7 %	7 %	1 %	23 %	22 %	22 %
10b	6 %	21 %	15 %	16 %	12 %	53 %	41 %	46 %
10c	2 %	6 %	4 %	4 %	4 %	25 %	21 %	22 %
11	10 %	24 %	14 %	16 %	7 %	20 %	13 %	14 %
12	6 %	6 %	0 %	0 %	3 %	5 %	1 %	1 %
Ø 1	16 %	24 % *	8 % *	9 % *	15 %	33 % *	18 % *	21 % *
5	8 %	6 %	-2 %	-2 %	5 %	11 %	7 %	7 %
9	15 %	12 %	-3 %	-4 %	12 %	61 %	49 %	56 %
Ø 2	12 %	9 % *	-3 % *	-3 % *	8 %	36 % *	28 % *	30 % *

Tab. 2: Anteile richtiger Antworten beim Verständnistest in Kontrollgruppe und Erprobungsgruppe
(*: signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen auf 0,1%-Niveau)

Zugewinn und beim relativen Zugewinn (bezogen auf den möglichen Zugewinn) sind dann aber umgekehrt die Erprobungsklassen signifikant besser (auf 0,1%-Niveau) (siehe Tab. 2). Beim Posttest ergibt das eine Effektstärke von 0,58, beim Zugewinn von 0,63 und beim relativen Zugewinn von 0,61. Das bedeutet, dass die Erprobungsgruppe mehr fachliches Verständnis erreichte.

Dieser Unterschied ist aber nicht bei allen Items gleich. Bei den Items 1, 3, 4, 6, 11 und 12 ist die Erprobungsgruppe nur geringfügig besser. Dies betrifft z.B. die Trägheitsbewegung, die Bedeutung der Masse bei einer beschleunigenden Kraft, das dritte Newtonsche Axiom oder den senkrechten Wurf nach oben. Bei den Items 2, 7, 8, 10a, 10b, 10c gibt es dagegen sehr große Unterschiede. Hier geht es um die Geschwindigkeit als Ortsänderung (2), die Superposition von Geschwindigkeiten (7+8) und die Richtung von Kräften, die für eine Bewegungsänderung nötig sind (10 a, b, c).

Bei Item 7 ist der Anteil richtiger Antworten in der Erprobungsgruppe (83 %) nicht nur viel größer als in der Kontrollgruppe (40 %), sondern auch deutlich größer als bei herkömmlich unterrichteten Elftklässlern (33 %) [1].

Bei den letzten Aufgaben (10 a, b, c) waren viele Schüler nicht in der Lage, eine Kraftrichtung anzugeben. Ansonsten wurde neben der richtigen Kraftrichtung vor allem eine Kraft in Bewegungsrichtung angegeben, so dass man annehmen kann,

dass an die Kraft gedacht wurde, die ein Körper besitzt, die man auch Wucht, Schwung oder innere Kraft nennen könnte (aristotelische Vorstellung) (siehe Tab. 3). Diese Fehlvorstellung kam im Posttest in der Erprobungsgruppe seltener vor als in der Kontrollgruppe, während die richtige Antwort in der Erprobungsgruppe zwei- bis viermal so häufig wie in der Kontrollgruppe genannt wurde (siehe Tab. 3).

Items	richtig		Kraft in Bewegungsrichtung	
	KGr.	EGr.	KGr.	EGr.
10a langsamerwerdend	8 %	23 %	5,7 %	2 %
10b schnellerwerdend	21 %	53 %	-	-
10c Richtungsänderung	6 %	25 %	29 %	23 %

Tab. 3: Posttestergebnisse bei den Items 10 a, b, c

Vergleicht man diese Posttestwerte mit denen des Prätests (siehe Tab. 4), stellt man fest, dass sich bei der langsamerwerdenden Fußballbewegung im Item 10a in der Erprobungsgruppe auch die Anzahl der aristotelischen Antworten im Gegensatz zur Kontrollgruppe abnahm. Bei der Fußballbewegung mit Richtungsänderung im Item 10c nehmen bei herkömmlichen Unterricht die aristotelischen Antworten sogar zu.

Items \ Prätest	richtig		Kraft in Bewegungsrichtung	
	KGr.	EGr.	KGr.	EGr.
10a langsamerwerdend	1 %	1 %	5,5 %	8 %
10b schnellerwerdend	6 %	12 %	-	-
10c Richtungsänderung	2 %	4 %	15 %	22 %

Tab. 4: Prätestergebnisse bei den Items 10 a, b, c

5.2 Konzeptbezogene Aufgaben

Bei den zwei Aufgaben, die Begriffe des neuen Konzeptes verwenden (Tempo, Zusatzgeschwindigkeit), sind die oberbayerischen Kontrollklassen im Prätest signifikant besser (auf 5%-Niveau). Interessanterweise verschlechtern sie sich hier aber durch den Unterricht (nicht signifikant, 5%-Niveau), während sich die Schüler der Erprobungsgruppe sehr stark verbessern (signifikant auf 0,1%-Niveau), so dass sie beim Posttest signifikant besser sind (auf 0,1%-Niveau) mit einer sehr großen Effektstärke von 1,07. Das ergibt auch beim Zugewinn und beim relativen Zugewinn sehr große signifikante Unterschiede (auf 0,1%-Niveau). Die Effektstärke beim Zugewinn beträgt 0,93.

Im Item 9 geht es um die Unterscheidung zwischen den Begriffen „Tempo“ (=Geschwindigkeitsbetrag) und „Geschwindigkeit“. Vor dem Unterricht gibt es hier kaum Unterschiede zwischen den beiden Gruppen: für zwei Drittel der Schüler sind Tempo und Geschwindigkeit das Gleiche. Der herkömmliche Unterricht in der Kontrollgruppe führt bei diesem Item nicht zu einer Veränderung in der Beantwortung. In der Erprobungsgruppe kommt es dagegen zu starken Veränderungen und nur noch 7 % der Schüler halten Tempo und Geschwindigkeit für das Gleiche (siehe Tab. 5). Wir schließen daraus, dass die Unterscheidung zwischen den Begriffen „Tempo“ und „Geschwindigkeit“ leicht zu verstehen ist.

Antworten \ Gruppe	Kontrollgruppe	Erprobungsgruppe
2 Körper möglich mit: $\vec{v}$ gleich, $ \vec{v} $ verschieden	17 %	19 %
Tempo $ \vec{v} $ = Geschwindigkeit $\vec{v}$	64 %	7 %
2 Körper möglich mit: $ \vec{v} $ gleich, $\vec{v}$ verschieden	10 %	34 %
Wenn $\vec{v}$ gleich, dann auch Richtung gleich.	2 %	27 %

Tab. 5: Ergebnisse des Posttests bei Item 9 zu Tempo $|\vec{v}|$ und Geschwindigkeit $\vec{v}$

6. Ergebnisse zu nicht-kognitiven Merkmalen in Erprobungs- und Kontrollgruppe

Außer dem fachlichen Verständnis wurden auch nicht-kognitive Merkmale der Schüler erhoben. Der

Test, der als Prä-, Post- und Follow-Up-Test eingesetzt wurde, enthielt eine Skala aus acht Items (Nr. 1, 3, 5, 6, 9, 10, 12, 13) zum situationsunabhängigen fachspezifischen Selbstkonzept nach Helmke [23] sowie eine Skala zum allgemeinen Interesse am Physikunterricht mit Items aus PISA 2000 (Nr. 2 und 7) [24] und eigenen Items (Nr. 4, 8, 11) (siehe Anhang).

Darüber hinaus wurde die Selbstwirksamkeitserwartung der Probanden mit einem in Analogie zur in PISA 2003 [25] verwendeten Skala erhoben (siehe Anhang). Die Schüler sollten angeben, wie sicher sie glauben, bestimmte Aufgaben im Physikunterricht lösen zu können. Dabei findet sich auch ein Item zum Ablesen von Zeit-Orts-Diagrammen, was nur im herkömmlichen Unterricht der Kontrollklassen unterrichtet wurde.

Für eine Faktorenanalyse liefert der Scree-Test von Catell zwei Faktoren, die genau den beiden Subskalen „Fachspezifisches Selbstkonzept/Interesse“ und „Selbstwirksamkeitserwartung“ entsprechen.

6.1 Selbstkonzept und Interesse

Da der Prätest in der Erprobungsgruppe (im Gegensatz zur Kontrollgruppe) bereits in der ersten Physikstunde im Leben der Schüler gestellt wurde, war diese Erhebung des fachspezifischen Selbstkonzepts sehr problematisch, da die Schüler das Schulfach Physik noch nicht kannten. So hat fast ein Drittel der Schüler der Erprobungsgruppe nicht alle Items beantwortet. Deshalb werden hier nur die Posttestwerte verglichen.

Für die Items wurde eine fünfstufige Likert-Skala verwendet und die dann z.T. so umskaliert, dass 1 einem geringen und 5 einem hohen Selbstkonzept/Interesse entspricht. Da die Antworten der einzelnen Items hoch korrelieren, ergibt sich für die 13 Items eine hohe Reliabilität mit einem Cronbachs Alpha von 0,91. Als Maß für einen ersten Vergleich wurde dann der Durchschnitt der 13 Items verwendet. Im Posttest findet sich in der Erprobungsgruppe ein etwas besseres Ergebnis beim fachspezifischen Selbstkonzept und Interesse (siehe Tab. 6). Der Unterschied ist allerdings nicht signifikant (5%-Niveau).

Interessanter sind die zwei Subskalen. Die acht Items zum situationsunabhängigen fachspezifischen Selbstkonzept nach Helmke [23] haben eine Reliabilität von 0,91, es gibt aber keinen signifikanten Unterschied zwischen Kontrollgruppe und Erprobungsgruppe (siehe Tab. 6). Die fünf Items zum allgemeinen Interesse am Physikunterricht mit Items aus PISA 2000 [24] haben eine Reliabilität von 0,76 und einen signifikanten Unterschied zwischen Kontrollgruppe und Erprobungsgruppe (1%-Niveau) mit einer Effektstärke von 0,23. Man könnte also vermuten, dass das größere fachliche Verständnis in der Erprobungsgruppe auch zu mehr Interesse am Physikunterricht führt.

Skala	Selbst-konzept	Inter-esse	gesamt
Anzahl Items	8	5	13
Reliabilität	0,91	0,76	0,91
Kontrollgruppe N=422	3,40	2,88*	3,20
Erprobungs- gruppe N=331	3,42	3,08*	3,29

Tab. 6: Erreichte Durchschnittswerte beim Posttest
(*: Signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen auf 1%-Niveau)

6.2 Selbstwirksamkeitserwartung

Für die Items zur Selbstwirksamkeitserwartung wurde eine vierstufige Likert-Skala verwendet und die dann so umskaliert, dass 1 einer geringen und 4 einer hohen Erwartung entspricht. Da die Antworten der einzelnen Items hoch korrelieren, ergibt sich für die sechs Items eine hohe Reliabilität mit einem Cronbachs Alpha von 0,70 im Prätest und 0,68 im Posttest. Als Maß für die Selbstwirksamkeitserwartung wurde dann der Durchschnitt der sechs Items verwendet.

Sowohl in der Kontroll- als auch in der Erprobungsgruppe gibt es signifikante Veränderungen von Prä- zu Posttest (0,1%-Niveau). Außerdem zeigt die Erprobungsgruppe sowohl im Prätest als auch im Posttest ein etwas besseres Ergebnis (siehe Tab. 7). Der Unterschied ist im Prätest nicht signifikant, allerdings im Posttest signifikant (5%-Niveau). Die Effektstärke liegt im Posttest bei 0,24. Das kann man so interpretieren, dass die Schüler der Erprobungsgruppe sich bei mechanischen Aufgaben mehr zutrauen.

Zeitpunkt		Prätest	Posttest
Gruppe	Gültiges N	406	409
	Mittelwert	2,34 °	2,79 * °
Erprobungs- gruppe N=331	Gültiges N	297	321
	Mittelwert	2,41 °	2,92 * °

Tab. 7: Erreichte Durchschnittswerte beim Test zur Selbstwirksamkeitserwartung (*: Signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen auf 5%-Niveau)
(°: Signifikanter Unterschied zwischen Prä- und Posttest auf 0,1%-Niveau)

Nun ist aber zu bedenken, dass recht unterschiedliche Aufgaben formuliert wurden. Beim Prätest gibt es bis auf ein Item keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen, aber beim Posttest gibt es bis auf ein Item signifikante Unterschiede (0,5%-Niveau) (siehe Tab. 8). Die Schüler der Kontrollgruppe trauen sich beim Rechnen und beim Dia-

gramm Lesen mehr zu, was in diesem Unterricht sicher mehr behandelt wurde. Die Schüler der Erprobungsgruppe trauen sich dagegen beim Erklären, Kräfte Zeichnen und Bewegungen Vorhersagen mehr zu, was aus didaktischer Sicht als wichtiger zu betrachten ist.

Item \ Gruppe	Kontroll- gruppe	Erprobungs- gruppe
Fallgeschwindigkeit ausrechnen	2,52	2,48
Durchschnitts- geschwindigkeit berechnen	3,06 *	2,83 *
Zeit-Orts- Diagramm lesen	3,04 *	2,81 *
Satellitenbewegung erklären	2,76 *	2,98 *
Kraft auf Fußball einzeichnen	2,76 *	3,22 *
Bewegung vorhersagen	2,58 *	3,21 *

Tab. 8: Erreichte Durchschnittswerte bei einzelnen Items des Tests zur Selbstwirksamkeitserwartung (*: Signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen auf 0,5%-Niveau)

6.3 Situatives Unterrichtserleben

Außerdem wurde in zufällig ausgewählten Unterrichtsstunden die Einschätzung des Unterrichtsgeschehens mit neun Items erfragt. Dazu wurden sieben Items aus einem Fragebogen zum situativen Unterrichtserleben verwendet, der in der Arbeitsgruppe von Philipp Mayring an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg entwickelt wurde [21]. Es handelt sich dabei um drei Items zum situativen Interesse und vier Items zum situativen Wohlbefinden [21, S. 143, Tab. 1]. Diese Faktoren „situatives Interesse“ und „situatives Wohlbefinden“ können auch zu einem Konstrukt „positives situatives Unterrichtserleben“ zusammengefasst werden. Ergänzt wurden noch zwei eigene Items zur Verständlichkeit des erlebten Unterrichts. Leider konnten diese Tests noch nicht ausgewertet werden.

7. Fazit und Ausblick

Die Schüler der Erprobungsgruppe zeigen im Posttest signifikant mehr fachliches Verständnis, signifikant mehr Interesse am Fach Physik und eine signifikant höhere Selbstwirksamkeitserwartung. Aber es werden zwei Gruppen verglichen, in denen verschiedene Lehrer an verschiedenen Orten zu unterschiedlichen Jahreszeiten die Mechanik unterrichtet haben.

Besonders interessant ist deshalb der noch ausstehende Vergleich der Kontrollgruppe mit der Treatmentgruppe. Von Interesse sind auch die geplante Analyse des situativen Unterrichtserlebens und die Abhängigkeit der Ergebnisse von den Werten des Intelligenztests. Auch Zusammenhänge zwischen

den Ergebnissen der einzelnen Tests können interessant sein.

8. Literatur

- [1] WILHELM, T. (2005): Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung, Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 46, Logos-Verlag, Berlin, ISBN 3-8325-1046-X
- [2] HOPF, M.; WIESNER, H. (2007). Paradigmen für physikdidaktische Forschung - ein Rück- und Ausblick: Physikdidaktik und Design-Based Research. In: Kolling, S. (Hrsg.), Beiträge zur Experimentalphysik, Didaktik und computergestützten Physik. Logos-Verlag, Berlin, S. 37-58
- [3] HOPF, M.; WIESNER, H. (2008): Design-Based Research – In: Höttecke, D. (Hrsg.): Kompetenzen, Kompetenzmodelle, Kompetenzentwicklung, Jahrestagung der GDCP in Essen 2007, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 28, Lit-Verlag, Münster, S. 68 – 70
- [4] JUNG, W.; REUL, H.; SCHWEDES, H. (1977): Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3 – 6, Beiträge zur Methodik und Didaktik der Physik, Diesterweg, Frankfurt am Main
- [5] SPILL, L.; WIESNER, H. (1988): Zur Einführung des dynamischen Kraftbegriffs in der Sekundarstufe I. Bericht über Unterrichtsversuche - In: Kuhn, W. (Hrsg.): Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1988 Gießen (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 412 – 417
- [6] WIESNER, H. (1994): Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Mechanik. Schülervorstellungen, Lernschwierigkeiten und fachdidaktische Forschungen – In: Physik in der Schule 32, Nr. 4, S. 122 – 127
- [7] WODZINSKI, R.; WIESNER, H. (1994): Einführung in die Mechanik über die Dynamik. Beschreibung von Bewegungen und Geschwindigkeitsänderungen – In: Physik in der Schule 32, Nr. 5, S. 164 - 169
- [8] WODZINSKI, R.; WIESNER, H. (1994): Einführung in die Mechanik über die Dynamik. Zusatzbewegung und Newtonsche Bewegungsgleichung – In: Physik in der Schule 32, Nr. 6, S. 202 – 207
- [9] WODZINSKI, R. (1996): Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht, Lit Verlag, Münster
- [10] HOPF, M.; SEN, A. I.; WALTNER, C.; WIESNER, H. (2008): Dynamischer Zugang zur Mechanik – In: Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [11] SCHÜLLER, F.; WILHELM, T. (2008): Mechanik in Jahrgangsstufe 7 - Zweidimensional und multimedial – In: Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin, ISBN 978-3-86541-317-8
- [12] MICHEL, C.; WILHELM, T. (2008): Lehrvideos mit dynamisch ikonischen Repräsentationen zu zweidimensionalen Bewegungen – In: Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin
- [13] WILHELM, T. (2008): Mechanik - Zweidimensional und multimedial – In: Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin, 2008, ISBN 978-3-86541-317-8
- [14] HOPF, M.; WALTNER, C.; WILHELM, T.; WIESNER, H. (2009): Konzeption einer Vergleichsstudie zur Mechanik in Jahrgangsstufe 7 - In: Höttecke, D. (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDCP in Schwäbisch Gmünd 2008, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 29, Lit-Verlag
- [15] HOPF, M.; WALTNER, C.; WILHELM, T.; WIESNER, H. (2008): Einführung in die Mechanik, München, Würzburg, unveröffentlicht
- [16] HESTENES, D.; WELLS, M.; SWACKHAMER, G. (1992): Force Concept Inventory – In: The physics teacher 30, S. 141 – 158
- [17] WILHELM, T. (2005): Verständnis der newtonschen Mechanik bei bayerischen Elftklässlern - Ergebnisse beim Test „Force Concept Inventory“ in herkömmlichen Klassen und im Würzburger Kinematik-/Dynamikunterricht – In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule PhyDid 2/4, 2005, www.phydid.de, S. 47 – 56
- [18] WILHELM, T. (2007): Vektorverständnis und vektoriell Kinematikverständnis von Studienanfängern – In: Nordmeier, V.; Oberländer, A.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Regensburg 2007, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2007, ISBN 978-3-86541-255-3
- [19] GALMBACHER, M. (2008): Lernen mit dynamisch-ikonischen Repräsentationen aufgezeigt an Inhalten zur Mechanik, Dissertation, Universität Würzburg, <http://www.opus-bayern.de/univuerzburg/volltexte/2008/2927>, 2008
- [20] FLORES, S.; KANIM, S.; KAUTZ, C. (2004): Student use of vectors in introductory mechanics - In: American Journal of Physics 72, Nr. 4, S. 460 – 468
- [21] LAUKENMANN, M.; BLEICHER, M.; FUSS, S.; GLÄSER-ZIKUDA, M.; MAYRING, P.; RHÖNECK, C. (2000): Eine Untersuchung zum Einfluss emotionaler Faktoren auf das Lernen im Physikunterricht. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 6, S. 139–155

- [22] TOBIAS, V.; HOPF, M., WALTNER, C., WILHELM, T., WIESNER, H. (2009): Der Einfluss der Sachstruktur im Mechanikunterricht - qualitative Ergebnisse einer Befragung von Lehrkräften und SchülerInnen - In: Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.), Didaktik der Physik – Bochum 2009, Lehmanns Media, Berlin
- [23] HELMKE, A. (1992): Determinanten der Schulleistung: Forschungsstand und Forschungsdefizit – In: Nold, G. (Hrsg.), Lernbedingungen und Lernstrategien, Tübingen, Narr, S. 23-34
- [24] KUNTER, M.; SCHÜMER, G.; ARTELT, C.; BAUMERT, J.; KLIEME, E.; NEUBRAND, M.; PRENZEL, M.; SCHIEFELE, U.; SCHNEIDER, W.; STANAT, P.; TILLMANN, K.-J.; WEIß, M. (2002): Pisa 2000 - Dokumentation der Erhebungsinstrumente, MPI für Bildungsforschung, Berlin, ISBN 3-87985-086-0
- [25] RAMM, G.; PRENZEL, M.; BAUMERT, J.; BLUM, W.; LEHMANN, R.; LEUTNER, D.; NEUBRAND, M.; PEKRUN, R.; ROLFF, H.-G.; ROST, J.; SCHIEFELE, U. (HRSG.) (2006): PISA 2003 Dokumentation der Erhebungsinstrumente, Waxmann, Münster / New York / München / Berlin, ISBN-10: 3-83091-606-X

9. Adressen

AR Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut der Universität Würzburg, Am Hubland, D-97074 Würzburg, Tel. 0931/31-85788,

wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de
www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm

Dr. Christine Waltner, Verena Tobias, Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Universität München, Theresienstr. 37, D-80333 München, Tel. 089/2180-2020

christine.waltner@physik.uni-muenchen.de
verena.tobias@physik.uni-muenchen.de
hartmut.wiesner@physik.uni-muenchen.de
<http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik>

Prof. Dr. Martin Hopf, Universität Wien, Österreichisches Kompetenzzentrum für Didaktik der Physik Währinger Straße 17, A-1090 Wien, Tel: 0043-1/4277-71110

martin.hopf@univie.ac.at
<http://aeccp.univie.ac.at/>

10. Anhang

Im Folgenden findet man den verwendeten Test (Quellen siehe oben im Text).

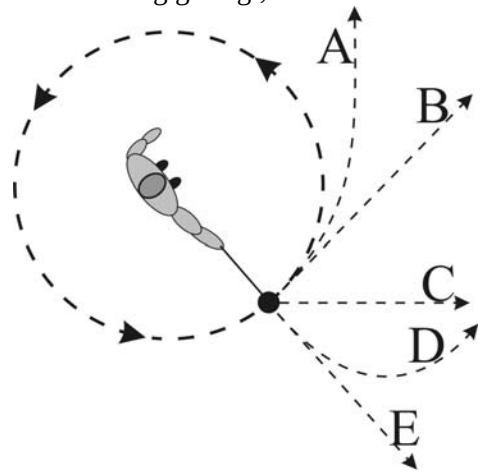
Trage hier bitte nur die Anfangsbuchstaben deines Vor- und Nachnamens ein. (z.B. Lisa Musterfrau = L M)	 Vorname	 Nachname
Trage hier bitte nur deinen Geburtstag ein (z.B. 30 , wenn du am 30.12.1996 Geburtstag hast).	 Geburtstag	
Kreuze bitte an, welches Geschlecht du hast (weiblich = w / männlich = m).	☐ Weiblich	☐ Männlich

	Denke an das Fach Physik im Allgemeinen...	trifft gar nicht zu	trifft kaum zu	teils- teils	trifft etwas zu	trifft völlig zu
1.	Ich traue mir im Fach Physik viel zu.	☐	☐	☐	☐	☐
2.	Mir macht Physikunterricht Spaß.	☐	☐	☐	☐	☐
3.	Das Fach Physik fällt mir nicht schwer.	☐	☐	☐	☐	☐
4.	Es gibt viele Themen im Physikunterricht, die mir egal sind.	☐	☐	☐	☐	☐
5.	Ich denke, dass ich im Fach Physik immer alles schaffen werde.	☐	☐	☐	☐	☐
6.	Das Fach Physik liegt mir nicht.	☐	☐	☐	☐	☐
7.	Ich lerne in Physik etwas, das für mich sehr wichtig ist.	☐	☐	☐	☐	☐
8.	Physik ist für mich das wichtigste Fach.	☐	☐	☐	☐	☐
9.	Für das Fach Physik habe ich einfach keine Begabung.	☐	☐	☐	☐	☐
10.	Das Fach Physik werde ich nie richtig verstehen.	☐	☐	☐	☐	☐
11.	Physikunterricht finde ich sehr interessant.	☐	☐	☐	☐	☐
12.	Ich glaube, dass ich das Fach Physik nie durchschauen werde.	☐	☐	☐	☐	☐
13.	Das Fach Physik kann ich einfach nicht verstehen.	☐	☐	☐	☐	☐

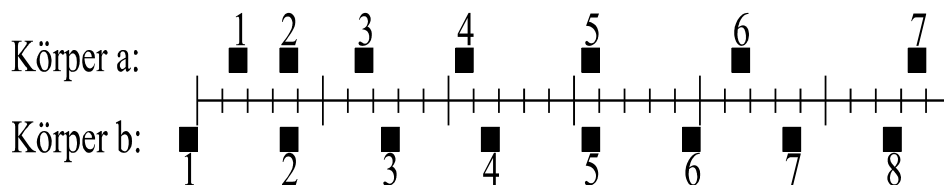
	Wie sicher glaubst du, folgende Aufgaben im Physikunterricht lösen zu können?	Sehr sicher	Sicher	Nicht sehr sicher	Gar nicht sicher
1.	Erklären, weshalb Satelliten um die Erde kreisen und nicht ins Weltall wegfiegen.	☐	☐	☐	☐
2.	Ausrechnen, mit welcher Geschwindigkeit ein Turmspringer ins Wasser eintaucht.	☐	☐	☐	☐
3.	Die Kraft auf einen Fußball einzeichnen.	☐	☐	☐	☐
4.	Die Durchschnittsgeschwindigkeit beim Radfahren berechnen.	☐	☐	☐	☐
5.	Aus einem Zeit-Orts-Diagramm ablesen, wo sich ein Gegenstand gerade befindet.	☐	☐	☐	☐
6.	Vorhersagen, wie ein Kick die Bewegung eines Fußballs beeinflusst.	☐	☐	☐	☐

1. Ein schwerer Ball ist am Faden befestigt und wird, wie in der Abbildung gezeigt, im Kreis horizontal herum geschwungen. An dem gekennzeichneten Punkt reißt plötzlich der Faden. Der Vorgang wird von oben betrachtet: Welchen Weg nimmt der Ball, nachdem der Faden gerissen ist?

- ☐ A
☐ B
☐ C
☐ D
☐ E



2. Die Abbildung zeigt die Positionen zweier Körper im zeitlichen Abstand von jeweils 0,2s. Die Körper bewegen sich nach rechts.



Haben die beiden Körper irgendwann einmal die gleiche Geschwindigkeit?

- ☐ Nein
☐ Ja, zum Zeitpunkt 2
☐ Ja, zum Zeitpunkt 5
☐ JA, zu den Zeitpunkten 2 und 5
☐ Ja, irgendwann im Zeitintervall von 3 und 4

3. Ein leichter Smart und ein schwerer Ferrari beschleunigen beide aus der Ruhe auf 100 km/h und brauchen dazu beide genau 6,5 Sekunden, haben also die gleiche durchschnittliche Beschleunigung.

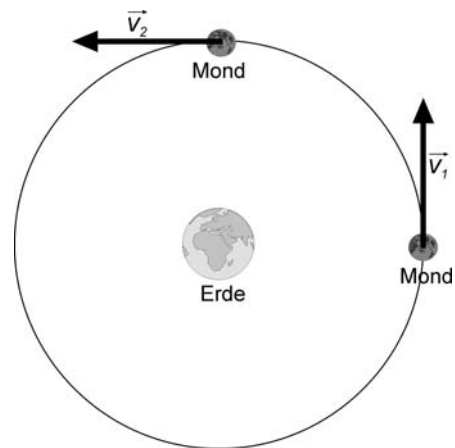
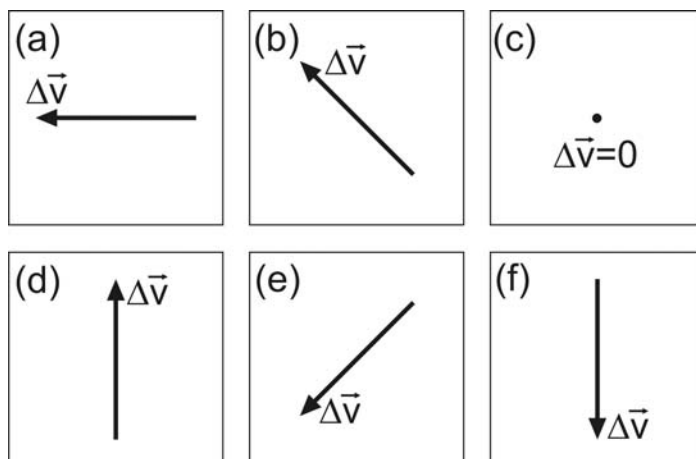
Auf welches Auto wirkt dabei eine größere Kraft?

- ☐ Auf den Smart
☐ Auf den Ferrari
☐ Auf beide wirkt die gleiche Kraft, da sie die gleiche Beschleunigung haben



4. Stelle dir einen Frontalzusammenstoß zwischen einem Lastwagen (LKW) und einem Kleinwagen (PKW) vor. Für den Zeitraum des Zusammenpralls gilt:
- ☐ Der LKW übt eine größere Kraft auf den PKW aus als der PKW auf den LKW.
 - ☐ Der PKW übt eine größere Kraft auf den LKW aus als der LKW auf den PKW.
 - ☐ Die beiden Fahrzeuge üben keine Kräfte aufeinander aus. Der PKW wird einfach deshalb zerdrückt, weil er dem LKW im Wege ist.
 - ☐ Der LKW übt eine Kraft auf den PKW aus, aber der PKW übt keine Kraft auf den LKW aus.
 - ☐ Der LKW übt die gleiche Kraft auf den PKW aus wie der PKW auf den LKW.

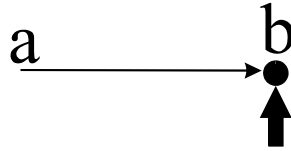
5. Der Mond
Die Zeichnung rechts zeigt den Ort des Mondes zu zwei Zeitpunkten, die ungefähr sieben Tage auseinander liegen. Welche Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ erhält der Mond in diesen sieben Tagen? Bitte ankreuzen.



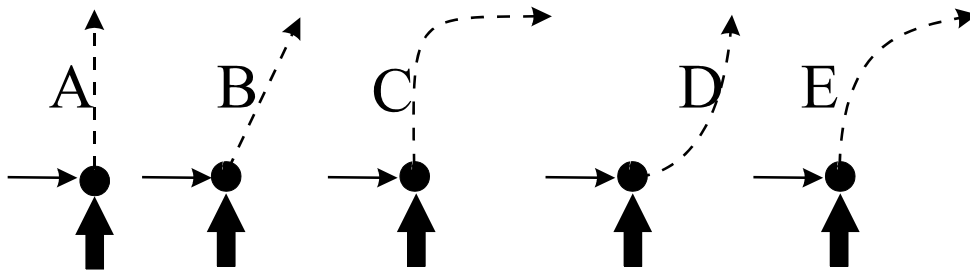
6. Stimmt das?
Antons Vater behauptet: „Ich kann meinen Wagen beschleunigen, ohne das Gas zu verändern.“
Antons Vater fährt ...
- ☐ einen Berg hinab.
 - ☐ einen Berg hinauf.
 - ☐ durch die Kurve.

Kreuze alle Aussagen an, die deiner Meinung nach richtig sind!

Den folgenden Fragen liegt folgende Situation zugrunde: Die Abbildung zeigt eine Scheibe, die mit konstanter Geschwindigkeit auf einer reibungsfreien horizontalen Oberfläche (Tisch) von Punkt „a“ nach Punkt „b“ gleitet. Wenn die Scheibe „b“ erreicht, erhält sie einen kurzzeitigen horizontalen „Kick“ in Richtung des dicken Pfeils.



7. Welche der gezeigten Bahnkurven beschreibt die Bewegung der Scheibe **nach** dem „Kick“? Kreuze den entsprechenden Buchstaben an.



8. Wie groß ist das Tempo der Scheibe, **nachdem** sie den „Kick“ bekommen hat?
- ☐ Gleich groß wie das Tempo v_0 vor dem „Kick“.
 - ☐ So groß wie das Tempo v , das von dem „Kick“ bewirkt wird und unabhängig von v_0 ist.
 - ☐ So groß wie die Summe von v_0 und v .
 - ☐ Kleiner als v_0 und auch als v .
 - ☐ Größer als v_0 und auch als v , aber kleiner als die Summe der beiden.

9. Tempo und Geschwindigkeit:

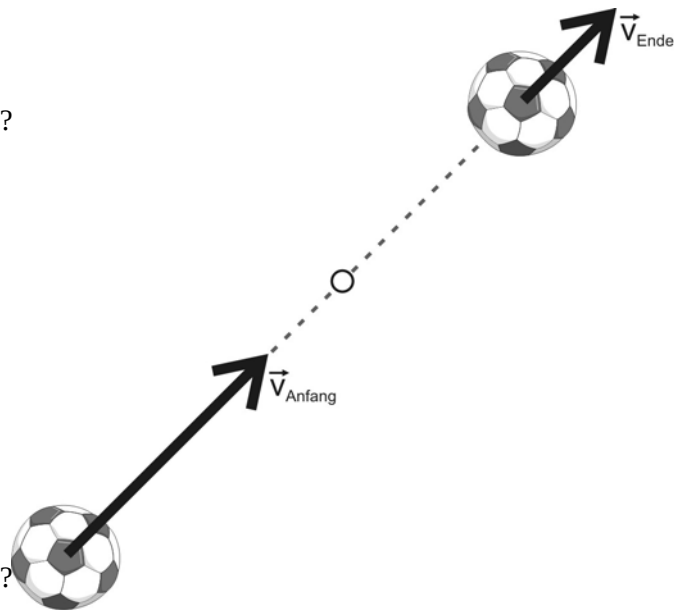
Kreuze die eine Aussage an, die dir am sinnvollsten erscheint.

- ☐ Zwei Körper können sich mit gleichem Tempo, aber unterschiedlicher Geschwindigkeit bewegen.
- ☐ Zwei Körper können sich mit gleicher Geschwindigkeit, aber unterschiedlichem Tempo bewegen
- ☐ Tempo und Geschwindigkeit sind das Gleiche.
- ☐ Bewegen sich zwei Körper mit gleicher Geschwindigkeit, so bewegen sie sich automatisch auch in die gleiche Richtung.

10. Unten siehst du jeweils die Geschwindigkeit eines Balles zu zwei Zeitpunkten.
Gib jeweils an, ob in der Zwischenzeit eine Kraft auf den Ball ausgeübt werden musste oder ob sich die Bewegung auch ohne Kraft so verändern konnte. Wenn du glaubst es muss eine Kraft wirken, so zeichne ihre Richtung an den markierten Stellen (Punkt zwischen den Fußbällen) ein:

Muss hier eine Kraft wirken?

- ☐ Ja
☐ Nein



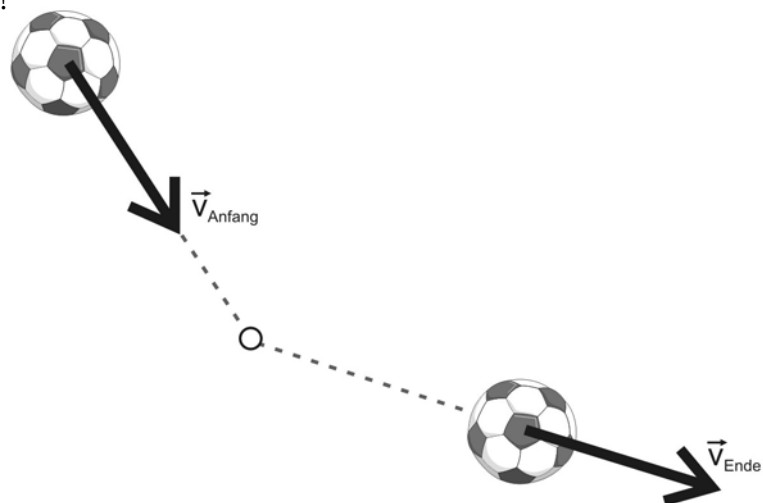
Muss hier eine Kraft wirken?

- ☐ Ja
☐ Nein

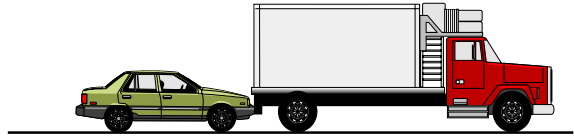


Muss hier eine Kraft wirken?

- ☐ Ja
☐ Nein



11. Ein LKW bleibt mit Motorschaden liegen und wird von einem Kleinwagen (Auto) zur nächsten Tankstelle geschoben. Während das Auto beschleunigt, um beim Schieben auf eine bestimmte Geschwindigkeit zu kommen, gilt:



- ☐ Die Stärke der Kraft, mit der das Auto gegen den LKW drückt, ist genauso groß wie die Kraft, mit der der LKW gegen das Auto drückt.
- ☐ Die Stärke der Kraft, mit der das Auto gegen den LKW drückt, ist kleiner als die Kraft, mit der der LKW gegen das Auto drückt.
- ☐ Die Stärke der Kraft, mit der das Auto gegen den LKW drückt, ist größer als die Kraft, mit der der LKW gegen das Auto drückt.
- ☐ Der Motor des Autos läuft; daher übt das Auto eine Kraft aus, während es gegen den LKW drückt. Aber der LKW-Motor läuft nicht; daher kann der LKW nicht gegen das Auto drücken.
- ☐ Weder der LKW noch das Auto üben eine Kraft aus. Der LKW wird einfach deshalb nach vorne geschoben, weil er dem Auto im Wege steht.

12. Ein Junge wirft eine Stahlkugel senkrecht nach oben. **Alle Effekte von Luftreibungskräften sollen außer Acht gelassen werden.**

Welche Kraft bzw. Kräfte wirken auf die Kugel während ihrer Flugphase, also nachdem sie die Hand des Jungen verlassen hat und bevor sie auf den Boden trifft?

- ☐ Das Gewicht der Kugel vertikal nach unten, zusammen mit einer stetig abnehmenden nach oben gerichteten Kraft.
- ☐ Keine der genannten Kräfte. Die Kugel fällt zur Erde zurück, weil das ihrem natürlichen Verhalten entspricht.
- ☐ Eine stetig abnehmende nach oben gerichtete Kraft für den Zeitraum nach dem Verlassen der Hand bis zum höchsten Punkt. Danach wirkt eine stetig zunehmende Gravitationskraft nach unten, wenn sich das Objekt der Erde nähert.
- ☐ Eine konstante nach unten gerichtete Gravitationskraft, zusammen mit einer nach oben gerichteten Kraft, die stetig abnimmt, bis die Kugel ihren höchsten Punkt erreicht. Danach wirkt nur die konstante nach unten gerichtete Gravitationskraft.
- ☐ Nur eine konstante nach unten gerichtete Gravitationskraft.

4.7.4 Qualitative Ergebnisse der Erprobungsgruppe

Quelle:

TOBIAS, V.; HOPF, M.; WALTNER, C.; WILHELM, T.; WIESNER, H.: *Der Einfluss der Sachstruktur im Mechanikunterricht - qualitative Ergebnisse einer Befragung von Lehrkräften und SchülerInnen* - In: NORDMEIER, V.; GRÖTZEBAUCH, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik - Bochum 2009*, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2009, ISBN 978-3-86541-371-0

Und:

TOBIAS, V.; WALTNER, C.; HOPF, M.; WILHELM, T.; WIESNER, H.: *Sachstruktur im Mechanikunterricht - Wie gehen Lehrkräfte damit um?* In: Höttecke, D. (Hrsg.): *Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDGP in Dresden 2009*, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 30, Lit-Verlag, Münster, 2010

Inhalt und Bezug zum Thema:

An den vorhandenen Lernschwierigkeiten der Newtonschen Mechanik ansetzend wurde ein Unterrichtskonzept für die 7. Jahrgangsstufe des Gymnasiums weiterentwickelt, welches von zweidimensionalen Bewegungen zu dynamischen Betrachtungen überleitet. Es wird in einer breit angelegten integrativen Studie der Einfluss der verschiedenen Sachstrukturen auf die Entwicklung von Einstellungen und Wissen untersucht. Dabei werden eine quantitative und eine qualitative Erhebung durchgeführt, wobei das Augenmerk dieses Beitrages auf dem qualitativen Forschungsvorhaben durch Befragungen von Lehrkräften sowie von Schülerinnen und Schülern liegt. Es bestehen erste Eindrücke aus Interviews mit einer Erprobungsgruppe: Berichtet wird über die Leistungen der Lernenden sowie die Erfahrungen der Lehrkräfte mit den unterschiedlichen Sachstrukturen.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Das Konzept des Mechanikunterrichts und die Konzeption der Studie wurden gemeinsam diskutiert und beschlossen. Ich habe die 14 Lehrer der Würzburger Erprobungsgruppe gesucht, geschult und betreut und mit ihnen engen Kontakt gehalten. Frau Tobias hat dann nach dem Unterricht die Lehrkräfte sowie Schüler interviewt.

Der Einfluss der Sachstruktur im Mechanikunterricht Qualitatives Forschungsvorhaben im Rahmen einer integrativen Studie

Verena Tobias¹, Martin Hopf², Christine Waltner¹,
Thomas Wilhelm³, Hartmut Wiesner¹

¹Universität München, ²Universität Wien, ³Universität Würzburg

Kurzfassung

- Die Schwerkraft setzt ein, wenn die Kraft nachlässt. -

Anhand ähnlicher Äußerungen von Schülerinnen und Schülern wurde inzwischen in zahlreichen Studien die komplexe Problematik beim Lehren und Lernen der Newtonschen Mechanik dargestellt. Bislang ist allerdings wenig nachgewiesen, wie nachhaltige Effekte zur Verbesserung des Unterrichtserfolges erzielt werden können.

An den vorhandenen Lernschwierigkeiten ansetzend, wurde ein Unterrichtskonzept für die 7. Jahrgangsstufe des Gymnasiums weiterentwickelt, welches von zweidimensionalen Bewegungen zu dynamischen Betrachtungen überleitet. Es wird in einer breit angelegten integrativen Studie der Einfluss der verschiedenen Sachstrukturen auf die Entwicklung von Einstellungen und Wissen untersucht. Dabei werden eine quantitative und eine qualitative Erhebung durchgeführt, wobei das Augenmerk dieses Beitrages auf dem qualitativen Forschungsvorhaben durch Befragungen von Lehrkräften sowie von Schülerinnen und Schülern liegt. Es bestehen erste Eindrücke aus Interviews mit einer Erprobungsgruppe: Berichtet wird über die Leistungen der Lernenden, sowie die Erfahrungen der Lehrkräfte mit den unterschiedlichen Sachstrukturen.

1. Einleitung

Isaac Newton wird heute insbesondere mit einem modernen Kraftbegriff $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ assoziiert, der sich allerdings allmählich über die Jahrhunderte herausgebildet hat.

Insofern erscheint es bemerkenswert, dass auf einer Briefmarke, die die deutsche Post 1993 anlässlich des 350sten Geburtstages dieses prominenten Physikers herausgegeben hat, die Bewegungsgleichung in einer Fassung angegeben ist, die Newtons Formulierung am ehesten entspricht: $\Delta(m\vec{v}) = \vec{F}\Delta t$

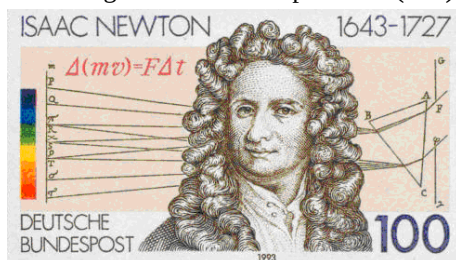


Abb. 1 Briefmarke zu Ehren Isaacs Newtons

Speziell diese integrale Form wird in dem Unterrichtskonzept verwendet, das im Folgenden vorgestellt wird.

2. Lernschwierigkeiten

In der Vergangenheit haben zahlreiche nationale und internationale Erhebungen gezeigt, dass der konventionelle Mechanikunterricht nahezu wirkungslos ist. Es soll an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen werden, es sei nur eine TIMSS-Aufgabe für die Sekundarstufe II beispielhaft angeführt: Es ist die Bewegung eines springenden Balls (bei vernachlässigtem Luftwiderstand) dargestellt.

Als Aufgabenstellung sollte in den Punkten P, Q und R die Richtung der Beschleunigung eingezeichnet werden.

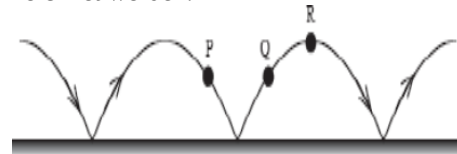


Abb. 2 TIMSS Aufgabe zur Beschleunigung

Die Lösungswahrscheinlichkeit deutscher Schülerinnen und Schüler beträgt 07%. (GK 02%, LK 14%, Int. 16%) [1]

Es zeigen sich hier insbesondere Schwierigkeiten bei Fragestellungen, die ein konzeptionelles Verständnis (im Gegensatz zum mathematischen Formelwissen) abprüfen.

Es wurden in diesem Zusammenhang unterschiedliche Ursachen ausgemacht:

-sachbedingte Lernschwierigkeiten

Ein Teil der Lernschwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler sind sachbedingt, d.h. in der Komplexität der Lerninhalte begründet.

-innenbedingte Lernschwierigkeiten

Zu innenbedingten Lernschwierigkeiten zählen Interesse und Motivation, ebenso wie die vorunterrichtlichen Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern, die in der Vergangenheit in der fachdidaktischen Forschung eingehend untersucht wurden. [2]

-außenbedingte Lernschwierigkeiten

Zu außenbedingten Lernschwierigkeiten gehört unter anderem ein unangemessenes Unterrichtsangebot. Es gibt Hinweise darauf, dass der übliche schulische Zugang über die Kinematik mit starker Betonung statischer Aspekte lernhinderlich wirken kann. [3],[4]

3. Interventionsansatz

Die dieser Arbeit zugrunde liegende Intervention setzt an am dritten Gesichtspunkt der Unterrichtsangebote. Es handelt sich um eine Variation der Sachstruktur des Mechanikunterrichtes. Hierunter verstehen wir die thematische Aufbereitung, die sich durch Rekonstruktion aus der Sachstruktur der Fachwissenschaft Physik ergibt, wobei die Lernvoraussetzungen der Schülerinnen und Schüler berücksichtigt werden.

Vor diesem Hintergrund wurde immer wieder ein dynamischer Unterrichtszugang vorgeschlagen. Da das Konzept für die siebte Jahrgangsstufe des Gymnasiums an anderer Stelle veröffentlicht ist [z.B. 5], sollen nur noch die allgemeinen Rahmenvorstellungen aufgezeigt werden.

Geschwindigkeits- und Kraftbegriff werden vektoriell gefasst.

Angeknüpft wird an die allgemein einsichtige Idee:
Von nichts kommt nichts,... oder:
Ohne Einwirkung keine Änderung,...

Die Kraft $\vec{F}$ bewirkt eine Änderung in der Geschwindigkeit, eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$. Dieser Begriff wird als eigenständige Bezeichnung eingeführt (nicht nur als Geschwindigkeitsänderung im gängigen Sinn). Es handelt sich um eine Elementarisierung der Beschleunigung für den Unterricht der Unterstufe.

Als Schlüsselphänomen dient die kurzzeitige, senkrechte Einwirkung auf die Bewegung einer rollenden Kugel: Der Körper erhält eine Zusatzgeschwindigkeit in Richtung der Einwirkung. Aus Anfangs- und Zusatzgeschwindigkeit wird mit einer Pfeilkonstruktion die Endgeschwindigkeit bestimmt.

Diese Situation ist als Experiment sowie als Simulation zugänglich [6]: Es können die Stärke und Richtung der Einwirkung ebenso variiert werden, wie die Anfangsgeschwindigkeit und die Masse der Kugel. (In einem zweiten Modus mit einem Ventilator anstelle der Feder lässt sich auch die Einwirkdauer verändern.)

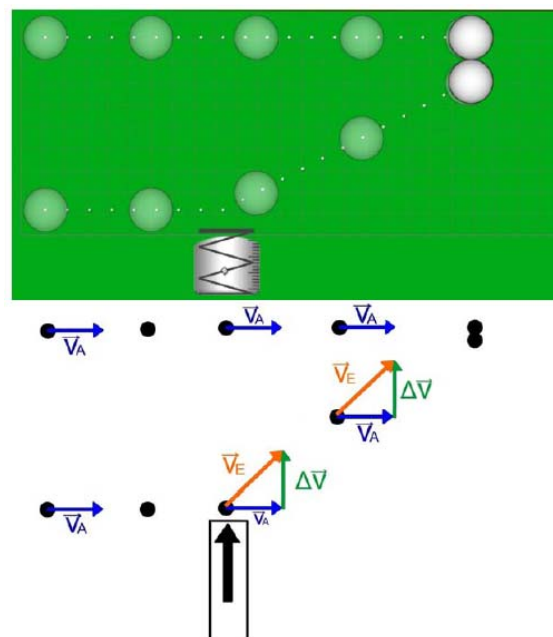


Abb. 3 Simulation und schematisches Pfeilbild

Als Ergebnis für die Lernenden ergibt sich: Je größer die Kraft ist, desto größer ist die Zusatzgeschwindigkeit (bei jeweils gleicher Einwirkdauer und Masse).

Je länger die Kraft ausgeübt wird, desto größer ist die Zusatzgeschwindigkeit (bei jeweils gleicher Kraft und Masse).

Je größer die Masse des Körpers ist, desto kleiner ist die Zusatzgeschwindigkeit (bei jeweils gleicher Kraft und Einwirkdauer).

Aus diesen Je-Desto Beziehungen wird dann die Bewegungsgleichung in der Form $m \cdot \Delta\vec{v} = \vec{F} \cdot \Delta t$ entwickelt.

4. Forschungsdesign

Der Interventionsansatz versteht sich als Design-Based-Research Projekt: Ein Ansatz, der den „credibility gap“ zwischen fachdidaktischer Theorie und Praxis zu überbrücken sucht, indem im ingenieurwissenschaftlichen Sinne eine konkrete Problemstellung in enger Zusammenarbeit mit den Anwendern des Produktes, den Lehrkräften erarbeitet wird. In einer spiraligen Entwicklung werden erste Entwürfe der Lernumgebung immer wieder evaluiert und verbessert. Darüber hinaus wird das Design zum Ausgangspunkt für die Weiterentwicklung der fachspezifischen Lehr-Lerntheorie im Bereich der Newtonschen Mechanik. [7]

Gräsel und Pachmann betonen, dass solche symbiotische Strategien, bei denen die Lehrpersonen an der Entwicklung und Erprobung von Unterrichtsinhalten und -materialien aktiv beteiligt sind, ein hohes Maß Akzeptanz erwarten lassen. [8]

Kline identifiziert insbesondere zwei Barrieren für die Akzeptanz durch die Lehrpersonen, nämlich zum einen Unsicherheiten, die Realisierung betreffend, zum anderen Überzeugungen, den Lernprozess betreffend, so dass eine angemessene Anpassung der Unterrichtsgestaltung als unnötig und unsinnig empfunden wird. [9]

Nach Guskeys Modell der Lehrerfortbildung sind Wirksamkeitserfahrungen im Unterricht die Voraussetzung, dass Lehrkräfte ein Konzept nachhaltig annehmen. [10] Wir möchten diese Wirksamkeitserfahrungen ermöglichen!

VanKeer und Verhaeghe bekräftigen, dass sich dabei die Unterstützung durch Fortbildung auf ein praktisch realisierbares Maß beschränken lässt ohne das Unterrichtskonzept zu beeinträchtigen. [11]

Das aktuelle Forschungsvorhaben ist folgendermaßen gestaltet:

Die Erhebung wird als integrative Studie durchgeführt: In einer quantitativen Studie werden standardisierte Schülertests eingesetzt; in der qualitativen Studie werden Leitfadenterviews durchgeführt. Diese Interviews werden mit den Lehrkräften in ca. 40 Minuten telefonisch, mit den Schülerinnen und Schülern in ca. 30 min persönlich abgehalten.

Alle Lehrkräfte, sowie einige Schülerinnen und Schüler der Würzburger Gruppe wurden nach Abschluss der Unterrichtseinheit interviewt.

Die Lehrkräfte der Münchner Gruppe werden zweimal interviewt: Ein erstes Interview findet statt bevor sie das dynamische Konzept unterrichtet haben, ein zweites danach. Die Schülerinterviews finden nach Abschluss des Lehrgangs statt. Darüber hinaus werden Unterrichtsbeobachtungen in den Schlüsselstunden des Kurses vorgenommen.

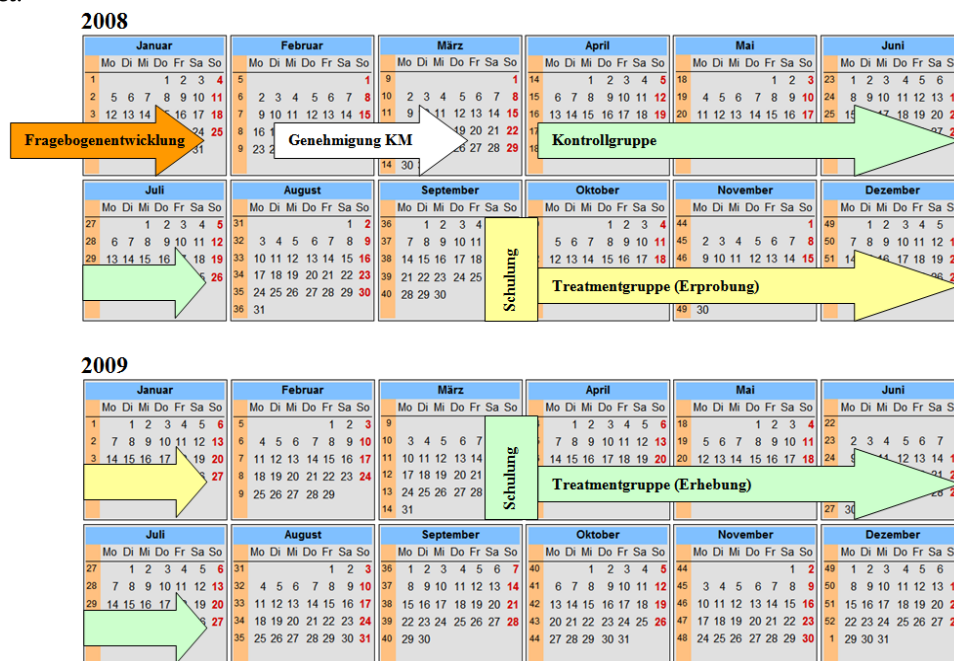


Abb. 4 Zeitplan der integrativen Studie

Die Lehrpersonen werden einmal geschult und bekommen dann das ausgearbeitete Unterrichtsmaterial als Klassensatz zur Verfügung gestellt. Im Zeitplan ist die Erprobung gelb, die Erhebung grün eingezeichnet.

An der Erprobung nahmen 15 Lehrkräfte mit 20 Klassen aus dem Raum Würzburg teil. Sie wurden einmal geschult, und unterrichteten im Herbst 2008 nach dem dynamischen Konzept zur Evaluation der Materialien und Instrumente.

An der eigentlichen Erhebung nehmen 10 Lehrkräfte mit 14 Klassen aus dem Raum München teil. Sie unterrichteten im Sommer 2008 nach dem statischen Konzept. Sie werden ebenso einmal geschult, und unterrichten im Sommer 2009 nach dem dynamischen Konzept, so dass die Konstanz der Lehrpersonen in Kontroll- und Treatmentgruppe gesichert ist.

5. Forschungsfragen

Als Forschungsfragen des qualitativen Teils der Untersuchung wurden formuliert:

- Wie beurteilen Lehrkräfte das zweidimensional-dynamische Mechanikkonzept?
- Wie realisieren Lehrkräfte das zweidimensional-dynamische Mechanikkonzept?
- Kennen die Lehrpersonen die Lernschwierigkeiten in der Mechanik?
- Erkennen die Lehrpersonen diese Lernschwierigkeiten in der Mechanik als den fachdidaktischen Ausgangspunkt des Konzeptes?
- Inwiefern bedingt dies die Akzeptanz des Mechanikkonzeptes?

- Inwiefern beeinflusst das Unterrichten nach dem zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept die fachdidaktischen Kompetenzen der Lehrerinnen und Lehrer?
- Inwiefern beeinflusst das Unterrichten nach dem zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept die bereichsspezifischen Überzeugungen der Lehrerinnen und Lehrer?
- Inwiefern beeinflusst die Gesamtintervention die konzeptionelle Begriffsbildung der Schülerinnen und Schüler im Bereich der Newtonschen Mechanik, insbesondere das Verständnis von Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft, sowie des Bewegungs- und Beharrungsprinzips.

6. Erste Ergebnisse

Es kann derzeit von den Interviews der Erprobungsgruppe berichtet werden.¹ Dabei ergeben sich interessante Einblicke in das Verständnis der Geschwindigkeit: Die Schülerinnen und Schüler haben den zweidimensionalen Geschwindigkeitsbegriff gut erfasst, d.h. dass die Geschwindigkeit sowohl Tempo als auch Richtung beinhaltet. Dies führt zu erstaunlichen Ergebnissen im Hinblick auf die Kurvenfahrt mit konstantem Tempo. (Eine Aufgabenstellung die sich in höheren Klassen als sehr schwer herausgestellt hat. [12]) Den Befragten war klar, dass sich die Geschwindigkeit immer ändert, da sich die Richtung der Geschwindigkeit ändert.

Auch alle bisher befragten Lehrpersonen bewerten die Einführung einer zweidimensionalen Geschwindigkeit positiv.

Einige Lehrpersonen berichten von begrifflichen Schwierigkeiten bei der Umsetzung: Es sei ihnen schwer gefallen Geschwindigkeit und Tempo (als den Geschwindigkeitsbetrag) trennscharf anzuwenden. Es deutet sich hier eine Entwicklung an, in der fachdidaktischen Kompetenz (im Sinne eines gesteigerten Problembewusstseins), die es nun weiterzuverfolgen gilt.

Weiterhin geben alle befragten Lehrkräfte an, den zweidimensionalen Geschwindigkeitsbegriff in ihren Unterricht adaptieren zu wollen. Es deutet sich hier eine Entwicklung an, in den bereichsspezifischen Überzeugungen, die es nun ebenfalls weiterzuverfolgen gilt.

Ein differenzierteres Bild ergibt sich im Hinblick auf das Bewegungsgesetz ohne Beschleunigungsbegriff:

Nur eine der befragten Lehrpersonen verzichtet vollständig darauf, die Beschleunigung einzuführen. Die anderen befragten Lehrpersonen verzichten nicht darauf, die Beschleunigung einzuführen, wobei die Begründung dreimal im Lehrplan und einmal im Begriff Beschleunigung selbst gesehen wird.

Dabei ist es interessant, die Argumentationen der ersten Lehrperson (die auf die Einführung der Beschleunigung verzichtet) und der letzten Lehrperson (die nicht auf die Einführung der Beschleunigung verzichtet und dies mit dem Begriff begründet) gegenüber zu stellen.

„Viele Schüler können mit dem Begriff der Beschleunigung nichts anfangen. Geschwindigkeitsänderung ist in den Köpfen eher vorstellbar, denn bei der Beschleunigung brauchen wir die Geschwindigkeitsänderung auf eine bestimmte Zeit bezogen.“

„Ich finde die Beschleunigung ist den Schülern aus dem Alltag bekannt, damit können sie was anfangen. Das merken sie sich: Kraft ist Masse mal Beschleunigung.“

Dies sind Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen der Bewertung des Unterrichtskonzeptes und der Kenntnis der Lernschwierigkeiten. Es gilt, diese Frage vor den Hintergrund der aktuellen Diskussion über das fachdidaktische Wissen der Lehrkräfte weiter zu verfolgen.

7. Literatur

- [1] <http://www.mpib-berlin.mpg.de/TIMSSIII-Germany/> (Stand 6/2007)
- [2] MÜLLER, Rainer et al. (2004): Schülervorstellungen in der Physik, Köln
- [3] WODZINSKI, Rita (1996): Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Mechanik im Anfangsunterricht, Münster
- [4] JUNG, Walter et al. (1992): Untersuchungen von Lernschwierigkeiten, Schülervorstellungen u. Lernprozessen bei der Einführung in die Newtonsche Mechanik, DFG-Abschlussbericht. Frankfurt a.M.
- [4] HOPF, Martin et al. (2008): Dynamischer Zugang zur Mechanik, in: Nordmeier, V. (Hg.): CD zur Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der DPG, Berlin
- [5] Download der Simulation unter: <http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materilien/themen/mechanik/index.html>
- [6] REINMANN, Gabi (2005): Innovation ohne Forschung – Ein Plädoyer für den Design-Based Research Ansatz, in: Unterrichtswissenschaft 33(1).S.52-69
- [7] GRÄSEL, Cornelia et al. (2004): Implementationsforschung – oder: der steinige Weg, Unterricht zu verändern, in: Unterrichtswissenschaft 32(3).S.196-214
- [8] KLINE, Frank et al. (1992): Implementing learning strategy instruction in class settings: A research perspective, in: Pressley, M. et al. (Hg.): Promoting academic competence and literacy in school, San Diego, S.361-406

¹ Es sind derzeit sechs Schülerinterviews und fünf Lehrerinterviews ausgewertet.

- [9] GUSKEY, Thomas (1986):
Staff Development and the Process of
Teacher Change,
in: Educational Researcher 15 (5). S.5-12
- [10] VANKEER, Hilde et al. (2005):
Comparing two teacher development
programms for innovating reading
comprehension instruction with regard to
teachers' experiences and student
outcomes, in: Teaching and Teacher
Education 21. S.543-562
- [11] JUNG, Walter et al. (2004):
Wie wenden Schüler Physik an zur
Erklärung alltäglicher Erscheinungen?
Untersuchungen am Beispiel der
klassischen Mechanik,
in [2], S.127-139

8. Autoren

Verena Tobias
Didaktik der Physik
Institut für Physik
Universität München
Theresienstraße 37
80333 München

Email: verena.tobias@physik.uni-muenchen.de

Die anderen Autoren sind durch den angegeben
Kontakt ebenfalls erreichbar.

Verena Tobias¹
 Christine Waltner¹
 Martin Hopf²
 Thomas Wilhelm³
 Hartmut Wiesner¹

¹Universität München

²Universität Wien

³Universität Würzburg

Sachstruktur im Mechanikunterricht -Wie gehen Lehrkräfte damit um?

Der Interventionsansatz

Im Rahmen einer integrativen Studie wird ein Unterrichtskonzept für die Mechanik in der 7. Jahrgangsstufe des Gymnasiums erprobt, welches von zweidimensionalen Bewegungen zu dynamischen Betrachtungen überleitet, wie in der Vergangenheit immer wieder vorgeschlagen (Jung et al., 1977). Da das Konzept (z.B. Hopf et al., 2008) sowie erste Ergebnisse (Wilhelm et al., 2009; Tobias et al., 2009) an anderer Stelle veröffentlicht sind, werden hier nur noch die allgemeinen Rahmenvorstellungen aufgezeigt. Angeknüpft wird an die allgemein einsichtige Idee „Von nichts kommt nichts“ oder „Ohne Einwirkung keine Änderung“: Die Einwirkung einer Kraft $\vec{F}$ führt zu einer Änderung der Geschwindigkeit: der Körper erhält eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$. Dabei wird die Geschwindigkeit als Kombination von Tempo und Richtung der Bewegung definiert. Durch die Darstellung mit Pfeilen wird aus Anfangs- und Zusatzgeschwindigkeit die Endgeschwindigkeit bestimmt. Die drei intuitiv einleuchtenden Je Desto Beziehungen zwischen Kraft, Einwirkdauer, Masse und Zusatzgeschwindigkeit münden dann in der Bewegungsgleichung in der integralen Form $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta\vec{v}$, die zur argumentativen Analyse verschiedener Situationen angewendet wird und als Definitionsgleichung für die Kraft aufzufassen ist.

Das Forschungsdesign

Der Interventionsansatz versteht sich als Design-Based-Research Projekt: Ein Ansatz, der den „credibility gap“ zwischen fachdidaktischer Theorie und Praxis zu überbrücken sucht, indem im ingenieurwissenschaftlichen Sinne eine konkrete Problemstellung in enger Zusammenarbeit mit den Anwendern des Produktes, den Lehrkräften erarbeitet wird. Darüber hinaus wird das Design zum Ausgangspunkt für die Weiterentwicklung der fachspezifischen Lehr-Lerntheorie im Bereich der Newtonschen Mechanik (Gräsel, 2004).

Das aktuelle Forschungsvorhaben ist folgendermaßen gestaltet: Es fand ein Vortreffen der Lehrpersonen statt, bei dem ihnen das ausgearbeitete Unterrichtsmaterial (Schülerlehrtext als Klassensatz, Arbeitsblätter, Filme und Simulationen) zur Verfügung gestellt wurde. An der Vorstudie nahmen 15 Lehrkräfte mit 20 Klassen aus dem Raum Würzburg teil. Sie unterrichteten im Herbst 2008 nach dem dynamischen Konzept zur Evaluation der Materialien und Instrumente im Hinblick auf die Hauptstudie. An der Hauptstudie nahmen 10 Lehrkräfte mit 14 Klassen aus dem Raum München teil. Sie unterrichteten im Sommer 2008 nach dem klassischen Konzept und im Sommer 2009 nach dem neuen Konzept, so dass die Konstanz der Lehrpersonen in Kontroll- und Treatmentgruppe gesichert ist.

Berichtet wird hier über die Ergebnisse einiger ausgewählter Forschungsfragen der Vorstudie im Raum Würzburg, die im Hinblick auf die Entwicklung der Erhebungsinstrumente für die Hauptstudie ausgewertet wurden.

Ausgewählte Forschungsfragen der qualitativen Studie

Aus den Ergebnissen der standardisierten Schülertest kann konstatiert werden, dass die Schülerinnen und Schüler der Würzburger Erprobungsgruppe ihren Altersgenossen der Münchener Kontrollklassen im fachlichen Abschlusstest hoch signifikant überlegen waren, mit einer großen Effektstärke von $d = 0,8$. Vor diesem Hintergrund stellt sich aber auch die

Frage nach der Realisierung und Bewertung des Konzeptes der zweidimensionalen Dynamik durch die beteiligten Lehrpersonen. Folgenden Fragestellungen wurde nachgegangen:

1. *Wie realisieren Lehrkräfte das zweidimensional-dynamische Mechanikkonzept?*
2. *Wie beurteilen Lehrkräfte das zweidimensional-dynamische Mechanikkonzept?*

Zu 1: Während der unterrichtlichen Umsetzung wurde von den beteiligten Lehrerinnen und Lehrern ein tabellarisches Tagebuch über die Inhalte der einzelnen Mechanikstunden geführt. Aus diesen Aufzeichnungen ist ersichtlich, dass in der Vorstudie durchschnittlich 22,8 Unterrichtsstunden für die Mechanik verwendet wurden. Die angegebenen Werte variieren zwischen 17 und 26 Stunden.

Bei genauerer Betrachtung ist außerdem auffällig, dass die konzeptspezifischen Inhalte unterschiedlich viel Zeit einnahmen. So schließt beispielsweise eine Lehrkraft bereits in der 7. Stunde, eine andere Lehrkraft erst in der 17. Stunde die Newtonsche Bewegungsgleichung mit Anwendungen ab. Auch die Unterrichtszeit zum Einüben der Pfeilbilder schwankt stark: Vier Lehrpersonen verwenden jeweils eine eigene Unterrichtsstunde zum Bestimmen der Zusatzgeschwindigkeit und der Endgeschwindigkeit. Fünf Lehrpersonen benutzen eine extra Unterrichtsstunde für die Pfeilbilder zu eindimensionalen Bewegungsänderungen (Änderungen des Tempos ohne Änderungen der Richtung) als Spezialfälle. In sechs Tagebüchern finden sich eigene Einheiten zum Begriff der Beschleunigung. Von einer Lehrerin wurde direkt nach der Zusatzgeschwindigkeit die Beschleunigung über drei Stunden besprochen. Wenn dann die „Newtonsche Bewegungsgleichung“ angeschlossen wird, ist sicherlich fraglich, ob die vom Konzept vorgesehene Form in angemessenem Maße unterrichtet wurde. Diese feineren Informationen sind den Aufzeichnungen der Lehrkräfte nicht immer zu entnehmen.

Die Frage wurde in der Hauptstudie daher detaillierter untersucht. Als Erhebungsinstrument wurde zusätzlich das Videographieren einer Unterrichtsstunde eingeplant, um Informationen über die Konzepttreue in der unterrichtlichen Umsetzung zu erhalten. Dazu wurde die Einführung der Newtonschen Bewegungsgleichung ausgewählt, da die vorangegangenen Kapitel des Lehrgangs in dieser Unterrichtsstunde zusammenfließen und sie den Kern des Lehrgangs darstellt. Bei diesen Unterrichtsbesuchen wurde auch die Berücksichtigung der Beschleunigung erfragt. Hierbei war nicht nur interessant, ob die Lehrkräfte die Beschleunigung ergänzend einführen, sondern auch aus welchen Gründen sie dies tun.

Zu 2: Nach Abschluss des Mechaniklehrgangs wurden die beteiligten Lehrerinnen und Lehrer der Vorstudie in Leitfadeninterviews zu ihrer Bewertung des Konzeptes befragt. Aus organisatorischen Gründen war ein Gespräch mit nur 12 von 15 Lehrkräften möglich. Dabei wurden die konzeptspezifischen Inhalte wie folgt beurteilt:

a) Alle zwölf befragten Lehrkräfte hielten den zweidimensionalen Geschwindigkeitsbegriff mit Tempo und Richtung für sinnvoll und für verständlich!

b) Im Hinblick auf die Newtonsche Bewegungsgleichung ergab sich ein etwas differenzierteres Bild: Zehn Lehrpersonen befanden die Formulierung der integralen Form als sinnvoll, z.B.: *„Dieser Ansatz ist für mich sogar sehr gut geeignet! Mit der Newtonschen Bewegungsgleichung sind sie ganz gut umgegangen; sie konnten die Phänomene erklären. Ich fand das sogar so gut, dass ich das dann auch in der zehnten Klasse gemacht habe. Und ich glaube, dass das auch denen geholfen hat.“* Nur zwei Lehrpersonen fanden die Formulierung nicht sinnvoll, z.B.: *„Ich finde, es ist kein Problem die Beschleunigung einzuführen, denn damit können die Schülerinnen und Schüler aus ihrem Alltag etwas anfangen. Kraft ist Masse mal Beschleunigung, das ist logisch, das merken die sich.“*

Dieses Zitat rückt die Kenntnis – oder vielmehr die Nichtkenntnis – von Lernschwierigkeiten in der Mechanik in den Blickpunkt, die der Konzeption des Lehrgangs zugrunde liegen; insbesondere die Präkonzepte der Lernenden zum Beschleunigungs- und Kraftbegriff. Es ergibt sich also die Frage nach einem Zusammenhang zwischen der Akzeptanz des Konzeptes sowie der Kenntnis der Lernschwierigkeiten, als eine Facette der

fachdidaktischen Kompetenz der Lehrkräfte. Im Verlauf des Interviews wurden unterschiedliche formale und konzeptuelle Lernschwierigkeiten von den Lehrpersonen angesprochen: Als formale Lernschwierigkeiten wurden fehlende mathematische Kenntnisse genannt (7-mal), außerdem wurden falsche Sprechweisen (1-mal) ebenso beklagt wie Schwierigkeiten beim Umrechnen von Einheiten (3-mal) oder beim Umgang mit gültigen Ziffern (2-mal). Auch die Unterscheidung von Zahlen und Größen falle vielen Lernenden schwer (3-mal). Auch konzeptuelle Lernschwierigkeiten wurden geäußert: 10-mal im Zusammenhang mit dem Geschwindigkeitsbegriff, 8-mal beim Beschleunigungsbegriff, 9-mal beim Kraftbegriff, 6-mal bei der Reibung, 3-mal bei der Unterscheidung von Masse und Gewicht und 6-mal bei der Unterscheidung von Wechselwirkung und Gleichgewicht von Kräften. Dabei wurden von einer einzelnen Lehrperson zwischen zwei und acht konzeptuelle Lernschwierigkeiten zur Sprache gebracht. Um die Akzeptanz des Konzeptes in einen Zusammenhang mit der Kenntnis der Lernschwierigkeiten durch die Lehrpersonen zu bringen, wurden drei Gruppen gebildet: Sechs der zwölf Lehrpersonen stimmen dem Lehrgang uneingeschränkt zu (Gruppe 1). Den Lehrpersonen der Gruppe 1 waren durchschnittlich 5,2 konzeptuelle Lernschwierigkeiten bekannt. Vier der zwölf Lehrpersonen stimmen dem Lehrgang eingeschränkt zu (Gruppe 2); sie geben an, die vektorielle Geschwindigkeit, sowie die Konzepte der Zusatzgeschwindigkeit und der Bewegungsgleichung beizubehalten. Allerdings werden von dieser Gruppe Modifikationen vorgenommen. Eine Lehrerin möchte bei der Unterscheidung zwischen Geschwindigkeit und Tempo in Zukunft zügiger vorgehen. Eine andere Lehrerin wird wieder mehr Wert auf mathematische Fertigkeiten wie das Umstellen der Formeln oder das Umrechnen der Einheiten legen. Zwei weitere Lehrkräfte wollen zwar nach eigenen Angaben die Bewegungsgleichung in der Darstellung des Lehrgangs beibehalten, im Anschluss jedoch die Beschleunigung und die entsprechende Bewegungsgleichung zusätzlich stärker hervorheben. Den Lehrpersonen der Gruppe 2 waren durchschnittlich 3,8 konzeptuelle Lernschwierigkeiten bekannt. Zwei der zwölf Lehrpersonen (Gruppe 3) werden das Konzept nach eigener Einschätzung nicht fortführen. Besonders bemerkenswert ist, dass aber selbst diese Lehrkräfte eine Akzeptanz des vektoriellen Geschwindigkeitsbegriffes für künftigen Unterricht angeben. Diesen Lehrerinnen und Lehrern waren im Durchschnitt 2,5 konzeptuelle Lernschwierigkeiten bekannt.

Auch in dieser Forschungsfrage ergaben sich einige Konsequenzen für die Hauptstudie. So geben die Nennungen formaler Lernschwierigkeiten einen Hinweis auf die Zielsetzungen der Lehrerinnen und Lehrer im Unterricht. In den Interviews der Hauptstudie wurden deshalb Fragen nach den Lernzielen stärker berücksichtigt wie auch Fragen nach den Lernschwierigkeiten.

Ausblick

In der Hauptstudie wurden der bereits überarbeitete Interviewleitfaden und das zusätzliche Erhebungsinstrument (Videographie einer Unterrichtsstunde) eingesetzt. Über Ergebnisse der Hauptstudie wird in Kürze berichtet werden.

Literatur

1. Jung, Walter et al. (1977): *Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3-6*, Diesterweg
2. Hopf, Martin et al. (2008): *Dynamischer Zugang zur Mechanik*, in: Nordmeier, V. (Red.): Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG, Didaktik der Physik, Lehmanns Media
3. Wilhelm, Thomas et al. (2009): *Der Einfluss der Sachstruktur im Mechanikunterricht- Quantitative Ergebnisse zur Verständnis- und Interessensentwicklung*. Tobias, Verena et al. (2009): *Der Einfluss der Sachstruktur im Mechanikunterricht- Qualitative Forschungsvorhaben im Rahmen einer integrativen Studie*. beide in: Nordmeier V. (Red.): Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG, Didaktik der Physik, Lehmanns Media
4. Gräsel, Cornelia et al. (2004): *Implementationsforschung-oder: der steinige Weg, Unterricht zu verändern*, in: Unterrichtswissenschaft 32 (3). S. 196 – 214

4.7.5 Ergebnisse der Vergleichsstudie

Quelle:

TOBIAS, V.; WALTNER, C.; HOPF, M.; WILHELM, T.; WIESNER, H.: *Dynamischer Mechanikunterricht - Ergebnisse einer quantitativen Vergleichsstudie* - In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Hannover 2010, 2010, <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/111/130>

WILHELM, T.; TOBIAS, V.; WALTNER, C.; HOPF, M.; WIESNER, H.: *Zweidimensional-dynamische Mechanik – Ergebnisse einer Studie* - In: Höttecke, D. (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDGP in Potsdam 2010, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 31, Lit-Verlag, Münster, 2011

Inhalt und Bezug zum Thema:

Im Rahmen einer Studie wurde das zweidimensional-dynamische Unterrichtskonzept für die 7. Jahrgangsstufe des Gymnasiums, das gut zur Videoanalyse passt, evaluiert. Zehn Lehrpersonen unterrichteten im Sommer 2008 als Kontrollgruppe nach dem herkömmlichen Konzept und im Sommer 2009 als Treatmentgruppe nach dem neuen Konzept. Bei den Aufgaben zum Grundverständnis ergibt sich zwischen Kontroll- und Treatmentgruppe ein höchst signifikanter Unterschied mit mittlerer Effektstärke. D.h. durch den Unterricht nach zweidimensional-dynamischem Lehrgang wurde ein signifikant besserer Lernerfolg erreicht. In Kontroll- und Treatmentgruppe sind die Jungen erwartungsgemäß den Mädchen im Vorwissen hoch bzw. höchst signifikant überlegen. Diese Unterschiede bleiben in der Kontrollgruppe bestehen oder wachsen sogar an, während es in der Treatmentgruppe nach dem Unterricht keine signifikanten Unterschiede mehr gibt, die Mädchen also aufholen.

In der Kontrollgruppe korreliert die Zahl der Mechanik-Lernschwierigkeiten, die eine Lehrkraft im Interview nennen kann, wie erwartet positiv mit dem Lernerfolg, d.h. Schüler von Lehren mit hohen Kenntnissen zeigen mehr Verständnis. Überraschenderweise lag hier aber in der Treatmentgruppe kein Zusammenhang vor, d.h. diese Kenntnisse der Lehrkräfte spielen für das Verständnis der Lernenden keine Rolle mehr. Das erwartete Ergebnis, dass die Anzahl gehaltener Unterrichtsstunden ein Prädiktor für den Lernerfolg ist, konnte lediglich in der Treatmentgruppe festgestellt werden. In der Kontrollgruppe lag dieser Zusammenhang erstaunlicherweise nicht vor; mehr Unterrichtszeit führte nicht zu besseren Schülerergebnissen.

Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Das Konzept des Mechanikunterrichts und die Konzeption der Studie wurden gemeinsam diskutiert und beschlossen. Die nicht-kognitiven Items des Tests hat im Wesentlichen Herr Hopf erstellt, während ich im Wesentlichen die Items des fachlichen Verständnistests ausgewählt, zusammengestellt und formatiert habe. Die Eingabe der Daten erfolgte durch Hilfskräfte, die Analyse für diesen Vergleich erfolgte durch Frau Tobias im Rahmen ihrer Dissertation.

Dynamischer Mechanikunterricht - Ergebnisse einer quantitativen Vergleichsstudie

Verena Tobias*, Christine Waltner*, Martin Hopf⁺, Thomas Wilhelm[°], Hartmut Wiesner*

*Universität München, ⁺Universität Wien, [°]Universität Würzburg

Kurzfassung

Im Rahmen einer Studie mit quantitativen und qualitativen Erhebungen wurde ein Unterrichtskonzept für die 7. Jahrgangsstufe des Gymnasiums evaluiert, welches ausgehend von zweidimensionalen Bewegungen über dynamische Betrachtungen in die Newtonsche Mechanik einführt.

In der ersten Kohorte nahmen 10 Lehrpersonen mit 27 Klassen teil. Diese unterrichteten im Sommer 2008 als Kontrollgruppe nach dem herkömmlichen Konzept, und im Sommer 2009 als Treatmentgruppe nach dem zweidimensional-dynamischen Konzept. Innerhalb der quantitativen Erhebung wurde die Wissensentwicklung der Lernenden ebenso untersucht wie der Einfluss auf Interesse, Selbstkonzept und Selbstwirksamkeit im Bereich der Mechanik. Im Beitrag werden die Ergebnisse dieser quantitativen Vergleichsstudie dargestellt.

1. Einleitung

Dieser Beitrag wird eingeleitet mit Zitaten von Lehrerinnen und Lehrern, Zitaten von Schulpraktikern, die sich - nach einer Lehrplanänderung in Bayern - mit der Forderung konfrontiert sehen, in der siebten Jahrgangsstufe ein ohnehin schwieriges Gebiet, die klassische Mechanik, zu unterrichten. Warum wenden sich diese Lehrerinnen und Lehrer an die Fachdidaktik Physik?

„der erste Durchlauf ... mit diesem ... Schulbuch war eine mittlere Katastrophe ...“ (Lehrperson 1)

„... weil ich ... mit den Lehrbüchern ... nicht 100 % zufrieden war ...“ (Lehrperson 2)

„... weil ich eben nicht ... glücklich damit war, wie das die Bücher so machen, vor allem ... der Beschleunigungsbegriff, ... mit dem sich die Schüler ... schwer tun ...“ (Lehrperson 3)

Diese Zitate schildern sehr authentisch die Dringlichkeit der Situation. Lehrkräfte äußern ihre Unzufriedenheit mit der bestehenden Situation und dem angebotenen Material. Dem korrespondieren die wissenschaftlich wiederholt gut belegten Lernschwierigkeiten in der Mechanik. Nach wie vor verlässt eine Vielzahl der Schülerinnen und Schüler die Schule mit aristotelischen wenn nicht animistischen Ideen zu Bewegungen und Bewegungsänderungen.

2. Interventionsansatz

Es wurden unterschiedliche Ursachen ausgemacht [1]: Ein Teil der Lernschwierigkeiten ist sicherlich sachbedingt, d.h. in der Abstraktion der Lerninhalte von den alltäglichen Erfahrungen begründet.

Ein weiterer Teil sind sogenannte innenbedingte Lernschwierigkeiten, zu denen Interesse und Moti-

vation, ebenso wie die vorunterrichtlichen Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zählen.

Ein weiterer Teil sind sogenannte lehrbedingte Lernschwierigkeiten, die durch unangemessene Unterrichtsangebote und Darstellungsformen hervorgerufen werden. So gibt es Hinweise darauf, dass der übliche schulische Zugang über die Kinematik mit starker Betonung statischer Aspekte lernhinderlich wirkt. [2, 3]

Unser Interventionsansatz fußt auf der Ausarbeitung einer geeigneten Sachstruktur, die sowohl vorunterrichtliche Vorstellungen berücksichtigt als auch unangemessene Unterrichtsangebote vermeidet.

Dabei verfolgen wir eine Anknüpfungsstrategie, die der Sichtweise diSessas entspricht: Er geht davon aus, dass die vorunterrichtliche Vorstellungen (p-prims) weitgehend unstrukturiert und unverbunden vorliegen, sowie stark kontextabhängig aktiviert werden. Bei der Konstruktion von Lehr-Lernumgebungen kommt es demnach darauf an, geeignete Vorstellungen zu identifizieren und darauf aufbauend ein konsistentes konzeptuelles Verständnis anzubahnen. “Students have a richness of conceptual resources to draw on. Attend to their ideas and help them build on the best of them.” [4]

3. Konzeption des Lehrgangs

Angeknüpft wird an die allgemein einsichtige Idee:

„Von nichts kommt nichts“, oder: „Ohne Einwirkung keine Änderung“, physikalisch gesehen hat die Einwirkung eines Körpers auf einen anderen Körper hat eine Änderung der Geschwindigkeit zur Folge, oder. Dies wird im Lehrgang in folgender Form rekonstruiert: Wenn ein Körper auf einen anderen

Körper eine Kraft ausübt, erhält dieser Körper eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$.

Es werden Je-Desto Beziehungen betrachtet:

- je größer die Einwirkstärke bzw. die Einwirkdauer der Kraft, desto größer das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit,
- je größer die Masse des Körpers, desto kleiner das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit.

Darüber gelangt man zur Newtonschen Bewegungsgleichung in der integralen Form: $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$. Kraft und Geschwindigkeiten werden dabei zweidimensional eingeführt und durch Pfeile dargestellt.

Als Ankerbeispiel dient im Verlauf des Lehrgangs immer wieder die kurzzeitige, senkrechte Einwirkung auf die Bewegung einer rollenden Kugel: Der Körper erhält eine Zusatzgeschwindigkeit in Richtung der Einwirkung, die von Einwirkstärke, Einwirkdauer und der Masse des Körpers abhängt. Aus den Pfeilen der Anfangs- und Zusatzgeschwindigkeit wird graphisch der Pfeil der Endgeschwindigkeit bestimmt. (Eine Simulation zu diesem Ankerbeispiel – mit Möglichkeiten zur Variation von Einwirkungsstärke und -richtung, Einwirkungsdauer, sowie Masse - findet sich zum Download in [5].)

Für detailliertere Darstellungen des Konzeptes für die siebte Jahrgangsstufe des Gymnasiums in seiner Entwicklung siehe z.B. [6] oder [7].

4. Evaluation des Lehrgangs

Der Interventionsansatz versteht sich als Design-Based-Research Projekt: Ein Ansatz, der den „credibility gap“ zwischen fachdidaktischer Theorie und Praxis zu überbrücken sucht, indem im ingenieurwissenschaftlichen Sinne eine konkrete Problemstellung in enger Zusammenarbeit mit den Anwendern des Produktes, den Lehrkräften, erarbeitet wird. In einer spiraligen Entwicklung werden erste Entwürfe der Lernumgebung immer wieder evaluiert und verbessert. Darüber hinaus wird das Design zum Ausgangspunkt für die Weiterentwicklung der fachspezifischen Lehr-Lerntheorie im Bereich der Newtonschen Mechanik. [8]

Die „konkrete Problemstellung“, die dieses Design-Based-Research Projekt angeht, ist der Anfangsunterricht Mechanik in der siebten Jahrgangsstufe des Gymnasiums. Für diesen Inhaltsbereich sind laut Lehrplan etwa 20 Unterrichtsstunden vorgesehen. An der Hauptstudie nahmen 10 Lehrkräfte mit ihren Klassen teil. Sie unterrichteten im Sommer 2008 nach dem traditionellen Konzept als Kontrollgruppe (14 Klassen), und im Sommer 2009 nach dem zweidimensional-dynamischen Konzept als Treatmentgruppe (13 Klassen), so dass die Konstanz der Lehrpersonen in Kontroll- und Treatmentgruppe gesichert ist. Insgesamt ergab dies eine Stichprobe von N=521 Schülerinnen und Schülern.

Die Lehrpersonen wurden an einem Nachmittag innerhalb weniger Stunden geschult. Sie bekamen den ausgearbeiteten Lehrtext (Abb. 1) als Klassensatz zur Verfügung gestellt. Außerdem erhielten sie eine DVD mit weiteren Materialien, wie Arbeitsblättern, Filmen und einer Simulation, die passend zum zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept ausgearbeitet wurden.

Für die Unterrichtsgestaltung und die Unterrichtszeit wurden den beteiligten Lehrpersonen keinerlei Empfehlungen gegeben.

Durch dieses Design sollte eine Feldstudie in wirklichkeitsnahem Rahmen gewährleistet werden. Eine breite Implementation des Lehrgangs ist - im Erfolgsfall - unter gleichen Bedingungen sehr einfach realisierbar.



Abb.1: Das Titelblatt des Lehrtextes

In der Treatmentgruppe wurde eine qualitative Evaluation des Konzeptes mit Hilfe von Unterrichtsvideos sowie Lehrer- und Schülerinterviews durchgeführt (zu den Ergebnissen der Unterrichtsvideos siehe [9], der Schülerinterviews siehe [10]).

In der Treatment- und in der Kontrollgruppe wurde eine quantitative Erhebung durchgeführt. Zur Parallelisierung kam eine Teilskala des KFT zum räumlichen Vorstellungsvermögen zum Einsatz. Außerdem wurden tabellarische Unterrichtstagebücher und sowie statistische Tests zu kognitiven und nicht-kognitiven Variablen eingesetzt. Auf die Ergebnisse dieser statistischen Tests soll im Folgenden eingegangen werden.

Es wurde jeweils das gleiche Erhebungsinstrument – ein Multiple Choice Test – zu drei Messzeitpunkten als Vortest (Prae - Test) und Nachtest (Post - Test) sowie als zeitverzögerter Nachtest (Follow-Up - Test) eingesetzt, der in [11] veröffentlicht ist. (Der zeitverzögerte Nachtest fand drei Monate nach Abschluss des Unterrichts jeweils zu Beginn der achten Jahrgangsstufe statt.)

Enthalten waren 13 Items zum allgemeinen Mechanik-Grundverständnis, größtenteils dem FCI entnommen, sowie jeweils zwei Items zu spezifischen Inhalten des zweidimensional-dynamischen und des traditionellen Konzeptes, die gesondert ausgewertet wurden.

Außerdem wurden Interesse, Selbstkonzept und Selbstwirksamkeitserwartung der Schülerinnen und Schüler nach pisa-ähnlichen Skalen abgefragt.

5. Ergebnisse

Um den Einfluss des Unterrichtskonzeptes, also der Gruppenzugehörigkeit der Lernenden auf den Lernerfolg zu ermitteln, wurde ein Kovarianzanalyse¹ mit Messwiederholung auf zwei Stufen (Post - und Follow-Up - Test) berechnet.

Wenn ein Effekt durch die Gruppenzugehörigkeit festgestellt werden konnte, wurde dann anhand einer univariaten Varianzanalyse² für den Post - Test und für den Follow-Up - Test überprüft, auf welchen Messzeitpunkt diese zurückzuführen ist.

Im Vortest ließen sich bei keiner der drei Aufgaben-Gruppen – Grundverständnis, Aufgaben zum zweidimensional-dynamischen Konzept und Aufgaben zum traditionellen Konzept - signifikante Unterschiede zwischen Kontroll- und Treatmentgruppe feststellen, allerdings traten bei nicht-kognitiven Variablen sowie dem räumlichen Vorstellungsvermögen Unterschiede zu Tage, die mit $p < .10$ mindestens tendenziell signifikant waren. Als Konsequenz wurde bei den weiteren statistischen Analysen jeweils zunächst durch eine Regressionsanalyse ein möglicher Zusammenhang der Kontrollvariablen mit den zu untersuchenden abhängigen Variablen überprüft. Gegebenenfalls wird die entsprechende Kontrollvariable als Kovariate in der Kovarianzanalyse berücksichtigt.

Die deskriptiven Befunde der beiden Nachtests in Kontroll- und Treatmentgruppe sind in Tab. 1. zusammengefasst.

	Kontrollgruppe		Treatmentgruppe	
	M	SD	M	SD
kognitive Variablen im Nachtest				
vergleichbare Aufgaben	4.27	2.02	5.42	2.24
1d Aufgaben	2.10	1.63	2.49	1.77
2d Aufgaben	2.18	1.01	2.93	1.03
Aufgaben zum	.17	.41	.84	.56
2d-dynamischen Konzept				
Aufgaben zum	.67	.55	.61	.51
traditionellen Konzept				
	Kontrollgruppe		Treatmentgruppe	
	M	SD	M	SD
kognitive Variablen im zeitverzögerten Nachtest				
vergleichbare Aufgaben	4.11	2.00	5.06	2.32
1d Aufgaben	1.86	1.55	2.26	1.65
2d Aufgaben	2.25	1.06	2.80	1.07
Aufgaben zum	.22	.43	.85	.59
2d-dynamischen Konzept				
Aufgaben zum	.69	.53	.64	.52
traditionellen Konzept				

Tab.1: Die deskriptiven Befunde der beiden Nachtests in Kontroll- und Treatmentgruppe

Bei den zwei Items zum Unterricht nach zweidimensional-dynamischem Konzept ergab die Kovarianzanalyse (Abb. 2) erwartungsgemäß einen höchst sig-

nifikanten Einfluss mit einer großen Effektstärke durch die Gruppenzugehörigkeit der Lernenden: $F(1; 459) = 240.46$; $p < .001$; $\text{part}\eta^2 = .34$

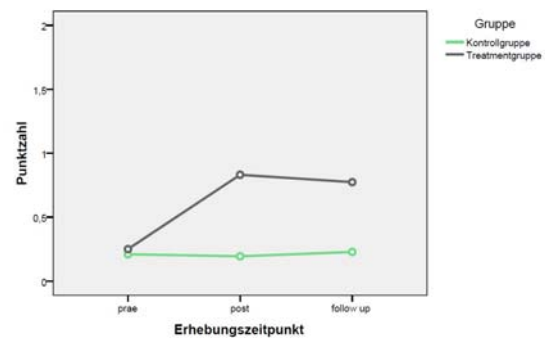


Abb.2: Die Ergebnisse der Items zum zweidimensional-dynamischen Konzept

Im der univariaten Varianzanalyse zeigte sich sowohl im Nachtest als auch im zeitverzögerten Nachtest ein höchst signifikanter Einfluss der Gruppe mit einer großen Effektstärke auf den Lernerfolg (post: $F(1; 9.78) = 90.10$; $p < .001$; $\text{part}\eta^2 = .90$; follow up: $F(1; 10.34) = 105.60$; $p < .001$; $\text{part}\eta^2 = .91$).

Bei den beiden Items zum Unterricht nach traditionellem Konzept ergab die Kovarianzanalyse (Abb. 3) allerdings keinen signifikanten Einfluss durch die Gruppenzugehörigkeit der Lernenden: $F(1; 449) = 2.50$; $p = .115$; $\text{part}\eta^2 = .01$

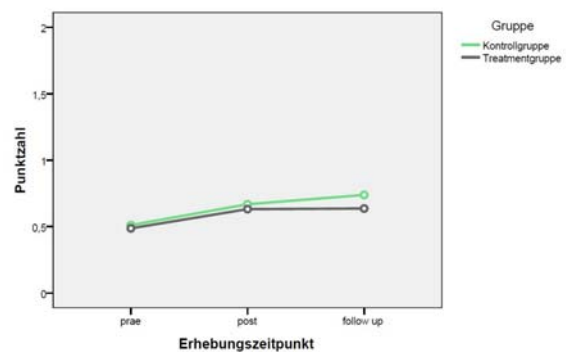


Abb.3: Die Ergebnisse der Items zum traditionellen Konzept

Durch die univariaten Varianzanalysen für beide Messzeitpunkte bestätigt sich dieser Befund (post: $F(1; 9.84) = .32$; $p = .583$; $\text{part}\eta^2 = .03$; follow up: $F(1; 10.29) = 2.00$; $p = .187$; $\text{part}\eta^2 = .16$).

Bezüglich der Aufgaben zum Grundverständnis (Abb. 4) erwies sich der feste Faktor „Gruppenzugehörigkeit“ als höchst signifikanter Prädiktor mit mittlerer Effektstärke für das Lernergebnis³:

¹ mit den festen Faktoren Gruppe, Geschlecht und Lehrperson
² mit den festen Faktoren Gruppe und Geschlecht sowie dem Zufallsfaktor Lehrperson

³ Durch die univariate Varianzanalyse bestätigte sich die Gruppenzugehörigkeit als (hoch) signifikanter Prädiktor für den Lernerfolg mit einer großen Effektstärke für beide Messzeitpunkte

$F(1; 449) = 30.86; p < .001; \text{part}\eta^2 = .06$

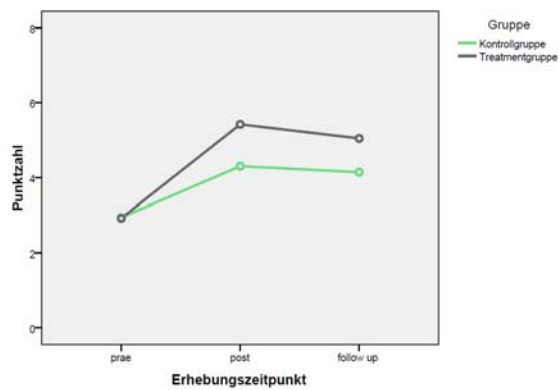


Abb. 4: Die Ergebnisse der Items zu den vergleichbaren Aufgaben

Es ergaben sich außerdem signifikante Effekte mit kleiner Effektstärke durch die Kontrollvariablen Vorinteresse ($F(1; 449) = 4.76; p = .030; \text{part}\eta^2 = .01$) und räumliches Vorstellungsvermögen ($F(1; 449) = 15.73; p < .001; \text{part}\eta^2 = .03$), sowie durch die festen Faktoren Lehrperson ($F(9; 449) = 6.21; p < .001; \text{part}\eta^2 = .11$) und Geschlecht ($F(1; 449) = 10.91; p = .001; \text{part}\eta^2 = .02$).

Außerdem gab es einen kleinen, aber signifikanten Interaktionseffekt zwischen Gruppe und Geschlecht ($F(1; 449) = 4.00; p = .046; \text{part}\eta^2 = .01$). Dieser Interaktionseffekt soll nun näher beleuchtet werden.

Sowohl in Kontroll- als auch in Treatmentgruppe waren die Jungen den Mädchen in ihrem Vorwissen hoch, bzw. höchst signifikant überlegen.

Während diese Unterschiede nach Unterricht in der Kontrollgruppe bestehen bleiben oder sogar anwachsen, sind nach Unterricht des zweidimensional-dynamischen Konzeptes in der Treatmentgruppe keine signifikanten Unterschiede zwischen den Geschlechtern feststellbar (Tab. 2). Die Mädchen holen also auf!

Zwischenfazit 1: Bei Unterricht nach zweidimensional-dynamischem Konzept sind im Gegensatz zum Unterricht nach traditionellem Konzept keine signifikanten Unterschiede zwischen den Geschlechtern im Lernerfolg feststellbar.

	Kontrollgruppe			Treatmentgruppe		
	Jungen	Mädchen		Jungen	Mädchen	
Vortest	3.18	2.68	**	3.13	2.53	***
Nachtest	4.62	3.94	**	5.57	5.18	n.s.
zeitverzögerter Nachtest	4.58	3.64	***	5.25	4.76	n.s.

Tab.2: Die Mittelwerte zu den Messzeitpunkten in Kontroll- und Treatmentgruppe nach Geschlechtern

(post: $F(1; 9.94) = 15.64; p = .003; \text{part}\eta^2 = .61$; follow up: $F(1; 9.78) = 5.37; p = .044; \text{part}\eta^2 = .35$).

Es konnte außerdem ein weiterer interessanter Zusammenhang zwischen zwei Unterrichtsmerkmalen und dem Lernerfolg in den beiden Gruppen hergestellt werden.

-Zunächst die Anzahl an Lernschwierigkeiten, die die einzelnen Lehrkräfte im Inhaltsbereich der Mechanik kennen:

Das erwartete Ergebnis, dass nämlich die Anzahl bekannter Lernschwierigkeiten positiv mit dem Lernerfolg korreliert, konnte durch Trendanalysen in der Kontrollgruppe nachgewiesen werden. Überraschend war es aber, dass dieser Zusammenhang in der Treatmentgruppe nicht vorlag (Tab. 3).

-Dann die Anzahl an Unterrichtsstunden, die die einzelnen Lehrkräfte für den Inhaltsbereich der Mechanik aufwenden:

Hier konnte das erwartete Ergebnis, dass nämlich die Anzahl gehaltener Unterrichtsstunden positiv mit dem Lernerfolg korreliert, lediglich in der Treatmentgruppe festgestellt werden. In der Kontrollgruppe lag dieser Zusammenhang erstaunlicherweise nicht vor (Tab. 3).

	Kontrollgruppe		Treatmentgruppe	
	LS	US	LS	US
vergleichbare Aufgaben	*	n.s.	n.s.	***
Aufgaben zum 2d-dynamischen Konzept	n.s.	n.s.	n.s.	**
Aufgaben zum traditionellen Konzept	*	n.s.	n.s.	n.s.

Legende
 LS Anzahl bekannter Lernschwierigkeiten
 US Anzahl gehaltener Unterrichtsstunden

Tab.3: Korrelation zwischen dem Lernerfolg und der Anzahl an bekannten Lernschwierigkeiten bzw. der Anzahl an gehaltenen Unterrichtsstunden in Kontroll- und Treatmentgruppe

Diese Ergebnisse bestätigen sich in den Inhaltsbereichen, die in den beiden Gruppen jeweils unterrichtet wurden: In der Kontrollgruppe ist der Einfluss der Anzahl bekannter Lernschwierigkeiten bei den Aufgaben zum traditionellen Konzept signifikant; in der Treatmentgruppe ist die Anzahl gehaltener Unterrichtsstunden bei den Aufgaben zum zweidimensional-dynamischen Konzept signifikant.

Zwischenfazit 2: Bei Unterricht nach zweidimensional-dynamischem Konzept relativiert sich der Einfluss der Anzahl an bekannten Lernschwierigkeiten. Es ergibt sich aber ein Einfluss der Anzahl an gehaltenen Unterrichtsstunden, der beim Unterricht nach traditionellem Konzept nicht nachgewiesen wurde.

6. Schluss

Und wie bewerten die beteiligten Lehrerinnen und Lehrer das zweidimensional-dynamische Unterrichtskonzept? Insgesamt kann man feststellen, dass die Akzeptanz des Konzeptes sehr hoch ist: Alle zehn beteiligten Lehrerinnen und Lehrer geben an,

das Konzept auch zukünftig unterrichten zu wollen – teilweise mit minimalen Modifikationen. Inzwischen fungieren einige Lehrerinnen und Lehrer auch als Multiplikatoren an ihren Schulen. Diese Akzeptanz des Konzeptes drückt sich durch folgende Aussagen aus:

„Das Neue gefällt mir ziemlich gut, weil man die Sachen in so eine Art Ganzheit stellen kann, die dann auch in der 9. und 10. weitergeht. ... Der zweidimensionale Einstieg ist erstmal gut für die Kinder. ... Die Newtonsche Bewegungsgleichung ... finde ich sehr gut ... das haben viele sogar ... benutzt, um immer zu argumentieren.“ (Lehrperson 4)

„Mit der Newtonschen Bewegungsgleichung sind sie eigentlich ganz gut umgegangen. ... da konnten sie Phänomene erklären. ... Also da war ich echt erstaunt ... sehr, sehr gut im Vergleich zu den Klassen vorher ... sogar so gut, dass ich das dann auch in der 10. Klasse mal zerteilt habe - die Beschleunigung - ... das hat auch denen geholfen. ...Prima!“ (Lehrperson 5)

Es konnte also eine nachhaltige Implementation in die Unterrichtspraxis erreicht werden, und zwar durch Wirksamkeitserfahrungen der Lehrerinnen und Lehrer in ihrem Unterricht mit einer nur sehr knappen Fortbildungsmaßnahme.

Außerdem lassen sich durch Sachstrukturen, die die vorunterrichtlichen Vorstellungen anknüpfend berücksichtigen, folgende Ergebnisse erzielen:

Der Einfluss des Unterrichtskonzeptes auf den Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler ist höchst signifikant. Die Lernenden erreichen ein größeres Verständnis der Mechanik, insbesondere erreichen Jungen und Mädchen ein gleich gutes Ergebnis. Die Bereitstellung von funktionierendem Unterrichtsmaterial wirkt direkt auf den Lernerfolg.

Durch die Anknüpfungsstrategie ergibt sich ein Einfluss der Anzahl gehaltener Unterrichtsstunden auf den Lernerfolg. Weiterhin relativiert sich ein Einfluss der Anzahl bekannter Lernschwierigkeiten auf den Lernerfolg. Die dargestellten Ergebnisse suggerieren, dass die übliche Messung der fachdidaktischen Kompetenz durch die Anzahl an bekannten Lernschwierigkeiten und unterrichtlichen Zugängen zu kurz gegriffen ist.

7. Literatur

- [1] JUNG, Walter et al. (1977):
Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3-6, Frankfurt am Main
- [2] WODZINSKI, Rita (1996):
Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Mechanik im Anfangsunterricht, Münster
- [3] JUNG, Walter et al. (1992):
Untersuchungen von Lernschwierigkeiten, Schülervorstellungen u. Lernprozessen bei der Einführung in die Newtonsche Mechanik, DFG-Abschlussbericht. Frankfurt a.M.
- [4] DISESSA, Andrea (2008):
A Bird's-Eye View of the "Pieces" vs. "Coherence" Controversy, in: Vosniadou, S. (Hg.): International Handbook of Research on Conceptual Change, New York
- [5] Download der Simulation unter:
<http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materilien/themen/mechanik/index.html>
- [6] HOPF, Martin et al. (2008):
Dynamischer Zugang zur Mechanik, in: Nordmeier, V. (Hg.): CD zur Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der DPG, Berlin
- [7] WIESNER, Hartmut et al. (2010):
Dynamik in den Mechanikunterricht, in: Nordmeier, V. (Hg.): PhyDid B, Beiträge zur Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der DPG
- [8] REINMANN, Gabi (2005):
Innovation ohne Forschung – Ein Plädoyer für den Design-Based Research Ansatz, in: Unterrichtswissenschaft 33 (1), S.52-69
- [9] BAUERNSCHUSTER, Johanna et al. (2010):
Dynamischer Mechanikunterricht – Die Umsetzung des Konzeptes durch die Lehrkräfte, in: Nordmeier, V. (Hg.): PhyDid B, Beiträge zur Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der DPG
- [10] JETZINGER, Franz et al. (2010):
Dynamischer Mechanikunterricht - Ergebnisse einer qualitativen Interviewstudie, in: Nordmeier, V. (Hg.): PhyDid B, Beiträge zur Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der DPG
- [11] WILHELM, Thomas, et al. (2009):
Der Einfluss der Sachstruktur im Mechanikunterricht - quantitative Ergebnisse zur Verständnis- und Interessensentwicklung, in: Nordmeier, V. (Hg.): CD zur Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der DPG, Berlin

Thomas Wilhelm¹
 Verena Tobias²
 Christine Waltner²
 Martin Hopf³
 Hartmut Wiesner²

¹Universität Augsburg
²LMU München
³Universität Wien

Zweidimensional-dynamische Mechanik - Ergebnisse einer Studie

Konzept und Unterrichtsmaterialien

Die Newtonsche Mechanik zählt nach wie vor zu einem der schwierigsten Inhaltsgebiete der Schulphysik. Gründe bestehen u.a. in den Schülervorstellungen, aber auch in der Sachstruktur des Unterrichts sowie in ungeeigneten Darstellungen der Zusammenhänge. Der Lehrplan für das bayerische achtjährige Gymnasium fordert bereits in der siebten Jahrgangsstufe eine erste, dynamische Einführung in die Mechanik. Hierfür wurde im Rahmen eines „Design-Based Research“-Ansatzes eine Sachstruktur weiterentwickelt, die bereits mehrfach untersucht wurde. Allen Vorarbeiten gemeinsam ist, dass in der Mechanik von Anfang an zweidimensionale Bewegungen betrachtet werden, die vektorielle Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ (= Geschwindigkeitsänderung) betont wird und der Kraftbegriff dynamisch eingeführt wird. Zurzeit wird aber üblicherweise anhand eindimensionaler Bewegungen Geschwindigkeit und Beschleunigung eingeführt, wofür in der Regel nur sehr wenig Unterrichtszeit verwendet wird. Danach wird schnell zu den Newtonschen Gesetzen übergeleitet.

In dem entwickelten Konzept wird schon bei der Einführung der Geschwindigkeit von zweidimensionalen Bewegungen ausgegangen und die Geschwindigkeit als vektorielle Größe, bestehend aus Tempo und Richtung, eingeführt, die mit einem Pfeil dargestellt wird. Hier ist eine digitale Videoanalyse von Bewegungen hilfreich, wenn die Software automatisch die Geschwindigkeitspfeile in das Video einblenden kann (wie in „measure dynamics“). Die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ wird als eigenständige Größe eingeführt und dient als Elementarisierung der - nicht explizit eingeführten - Beschleunigung. Das zweite newtonsche Axiom wird dann in der integralen Form $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ eingeführt.

Zu dem Unterrichtskonzept wurde ein Lehrtext im Stil eines normalen Schulbuches mit Experimentiervorschlägen und Aufgaben erstellt. Außerdem erhielten die Lehrkräfte Videoaufnahmen, passende Videoanalysen zu „measure dynamics“ sowie ein passendes Simulationsprogramm.

Design der Studie

In der Hauptstudie unterrichten die gleichen zehn Lehrkräfte zunächst in der Kontrollgruppe (Sommer 2008) und dann in der Treatmentgruppe (Sommer 2009). In der Vorstudie erprobten 14 Lehrkräfte in 19 Klassen die Lehrermaterialien und das Schülerbuch (Herbst 2008). In der Nachfolgestudie unterrichten nochmals acht Lehrkräfte in Kontrollgruppe (2009) und Treatmentgruppe (Frühjahr 2010). Sowohl in Haupt- als auch in Nachfolgestudie erhielten die teilnehmenden Lehrkräfte nur Materialien, aber keine Schulung.

An quantitativen Forschungsmethoden wurde ein fachlicher Verständnistest eingesetzt sowie Tests zum fachspezifischen Selbstkonzept, zum Interesse am Physikunterricht und zur Selbstwirksamkeitserwartung. Hierzu wurde in allen Gruppen jeweils ein Prätest vor dem Unterricht, ein Posttest nach dem Unterricht und ein FollowUp-Test nach drei Monaten durchgeführt. An qualitativen Forschungsmethoden wurden Lehrerinterviews und Schülerinterviews eingesetzt sowie die Videoanalyse einer ausgewählten Unterrichtsstunde. Außerdem führten die Lehrkräfte ein Unterrichtstagebuch.

Qualitative Ergebnisse

Sowohl in der Kontroll- als auch in der Treatmentgruppe konnte festgestellt werden, dass der Unterricht an den Lehrmitteln orientiert ist, d.h. an den gängigen Schulbüchern bzw. an dem Lehrtext, der in der Treatmentgruppe als Schulbuchersatz ausgehändigt worden war. In der Treatmentgruppe kann die unterrichtliche Umsetzung nach den Inhalten und deren Reihenfolge damit als konzepttreu gelten. So kann festgehalten werden, dass die Materialbereitstellung ein effektives Mittel bei der Implementation darstellt, da die Lehrpersonen sich bei der unterrichtlichen Umsetzung an den verfügbaren Büchern orientieren.

Die Schülerinterviews ergaben, dass die Beschreibung von Bewegungen durch den vektoriellen Geschwindigkeitsbegriff mit den Aspekten Tempo und Richtung den Lernenden keine Schwierigkeit bereitet. Auch die Darstellung dieser Aspekte durch die Länge und die Richtung des Geschwindigkeitspfeils kann angegeben und angewendet werden. Auf einer qualitativen Ebene sind die Zusammenhänge von Kraft, Masse, Einwirkdauer und Zusatzgeschwindigkeit von fast allen Lernenden verstanden. Sie wissen, wie die Zusatzgeschwindigkeit von den anderen Größen abhängt, und dass die Anfangs- sowie die Zusatzgeschwindigkeit zur Endgeschwindigkeit beitragen. Obwohl nur relativ wenige Lernende die Newtonsche Bewegungsgleichung in der integralen Form wiedergeben können, gelingt die argumentative Anwendung recht gut. Auf einer quantitativen Ebene sind die Konstruktionen von Zusatz- und Endgeschwindigkeit etwa durch die Hälfte der Lernenden anwendbar.

Ergebnisse im Verständnistest der Hauptstudie

Um das Verständnis der Schüler für die Begriffe Geschwindigkeit und Kraft zu überprüfen, wurden 17 qualitative Verständnisaufgaben eingesetzt. Die Items sollten so sein, dass sie von Lehrkräften als sinnvoll akzeptiert werden. Hierzu wurde auf Items zurückgegriffen, die sich bereits in anderen Studien bewährt haben. 13 Items passen zu beiden Unterrichtskonzepten, zwei zur neuen Sachstruktur. Zwei Items thematisieren die Beschleunigung, die nur im Unterricht nach dem traditionellen Konzept unterrichtet wird. Im Vortest waren jeweils keine signifikanten Unterschiede zwischen Kontroll- und Treatmentgruppe feststellbar.

Erwartungsgemäß ist der Einfluss der Gruppe bei den beiden Aufgaben zum neueren Konzept höchst signifikant mit großer Effektstärke. Überraschenderweise ist allerdings bei den beiden Aufgaben zum älteren Konzept kein Unterschied nachweisbar. Diese Inhalte zur Beschleunigung werden in beiden Gruppen gleich schlecht angeeignet. Bei den vergleichbaren 13 Aufgaben zum Grundverständnis ergibt sich zwischen Kontroll- und Treatmentgruppe ein höchst signifikanter Unterschied mit mittlerer Effektstärke. D.h. durch den Unterricht nach zweidimensional-dynamischem Lehrgang wurde ein signifikant besserer Lernerfolg erreicht.

In Kontroll- und Treatmentgruppe sind die Jungen erwartungsgemäß den Mädchen im Vorwissen hoch bzw. höchst signifikant überlegen. Diese Unterschiede bleiben in der Kontrollgruppe bestehen oder wachsen sogar an. In Treatmentgruppe gibt es dagegen nach dem Unterricht keine signifikanten Unterschiede mehr, die Mädchen holen also auf.

Im Lehrerinterview wurde festgestellt, wie viele Lernschwierigkeiten in der Mechanik die einzelnen Lehrkräfte kennen. In der Kontrollgruppe korreliert diese Zahl wie erwartet positiv mit dem Lernerfolg, d.h. die Schülerinnen und Schüler von Lehren mit hohen Kenntnissen zeigen auch mehr Verständnis. Überraschenderweise lag hier aber in der Treatmentgruppe kein Zusammenhang vor, d.h. diese Kenntnisse der Lehrkräfte spielen für das Verständnis der Lernenden keine Rolle.

Das erwartete Ergebnis, dass die Anzahl gehaltener Unterrichtsstunden ein Prädiktor für den Lernerfolg ist, konnte lediglich in der Treatmentgruppe festgestellt werden. In der Kontrollgruppe lag dieser Zusammenhang erstaunlicherweise nicht vor; mehr Unterrichtszeit führte nicht zu besseren Schülerergebnissen.

Ergebnisse im Verständnistest der Nachfolgestudie

In der Nachfolgestudie wurde die Hauptstudie nochmals mit fünf anderen Lehrkräften wiederholt. Dabei ließen sich die Ergebnisse des Verständnistests gut reproduzieren. Die Lernenden schnitten hier sogar noch besser ab. Dies könnte an dem Einfluss der weiter verbesserten Materialien liegen, aber auch an der anderen gewählten Jahreszeit.

Außerdem gab es drei erfahrene Lehrkräfte, die zum zweiten Mal nach dem Konzept unterrichten. Auch bei ihnen waren die Schülerleistungen beim zweiten Mal hoch signifikant besser als beim ersten Mal. Dies könnte ebenso an den verbesserten Materialien liegen, an der anderen Jahreszeit oder an der größeren Erfahrung der Lehrkräfte mit dem Konzept.

Nicht-kognitive Merkmale

Im Hinblick auf die nicht-kognitiven Variablen „Interesse“ und „Selbstkonzept“ konnten keine Effekte durch die Zugehörigkeit der Lernenden zur Kontroll- bzw. zur Treatmentgruppe festgestellt werden. Allerdings gab es bei der Selbstwirksamkeitserwartung abhängig von der Art der Aufgabe signifikante Unterschiede zwischen Kontroll- und Treatmentgruppe. Eine itemspezifische Analyse ergab, dass die Schülerinnen und Schüler der Treatmentgruppe sich selbst höchst signifikant kompetenter fühlen beim Einzeichnen einer Kraft, beim Vorhersagen einer Bewegung und beim Erklären einer Bewegung, was aus didaktischer Sicht wichtige Kompetenzen sind. Die Schülerinnen und Schüler der Kontrollgruppe fühlen sich dagegen selbst signifikant kompetenter beim Rechnen und beim Diagramme-Lesen. Beides sind aber keine Inhalte des Lehrplans, wurden aber im herkömmlichen Unterricht behandelt.

Lehrerakzeptanz

Nach den Erfahrungen im eigenen Unterricht konnte eine hervorragende Akzeptanz des zweidimensional-dynamischen Lehrgangs durch die Lehrpersonen erreicht werden. Zehn der zwölf Lehrkräfte der Vorstudie, sowie alle zehn Lehrkräfte der Hauptstudie resümieren, das erprobte Konzept auch in Zukunft in ihrem Unterricht umzusetzen. Die vektorielle Geschwindigkeit sowie die integrale Bewegungsgleichung wurden für sinnvoll und für verständlich gehalten, wobei die Bewertung beim ersten Punkt noch positiver war. Die Lehrpersonen sehen durch den Lehrgang Vorteile für das Verständnis der Schülerinnen und Schüler, insbesondere im Hinblick auf die Begriffsbildung von Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsänderung und Kraft.

Besonders diejenigen Lehrerinnen und Lehrer, welche eine gewisse Anzahl an konzeptionellen Lernschwierigkeiten in der Mechanik kennen, adaptieren das Konzept ohne Einschränkungen. Andere Lehrerinnen und Lehrer, die weniger konzeptionelle Lernschwierigkeiten in der Mechanik kennen, adaptieren das Konzept dagegen mit leichten Einschränkungen.

Die Gruppierung der Schülerinnen und Schüler entsprechend der Akzeptanz des Konzeptes mit und ohne Einschränkung durch die Lehrkräfte ergibt verschiedene Verläufe in den Nachtestergebnissen über die Messzeitpunkte (signifikant, kleine Effektstärke): So scheinen die Inhalte bei den Lehrerinnen und Lehrern nachhaltiger angeeignet zu werden, die das Konzept ohne Vorbehalte akzeptieren.

Fazit

Das neue Unterrichtskonzept liefert in den Treatmentgruppen (ohne echte Lehrerschulung und ohne Lehrer-Coaching!) signifikant mehr fachliches Verständnis bei den Lernenden, wobei die Überlegenheit der Jungen gegenüber den Mädchen ausgeglichen wird.

Literatur

Verena Tobias: Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht. Die Wirksamkeit einer Einführung über zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen, Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 105, Logos-Verlag, Berlin, 2010

5. Anhang

Quelle:

HOPF, M.; TOBIAS, V.; WALTNER, C.; WILHELM, T.; WIESNER, H. Einführung in die Mechanik, München, Würzburg, gedruckt in großer Stückzahl in Eigenregie, 3. Auflage Dezember 2009,

veröffentlicht unter:

www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/veroeffentlichung/MechanikbuchAuflage3.pdf

und

www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialien/inhalt_materialien/mechanikkonzept_mechanik.pdf

und

www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/111/224 (als Zusatzdatei zu: TOBIAS, V.; WALTNER, C.; HOPF, M.; WILHELM, T.; WIESNER, H.: Dynamischer Mechanikunterricht - Ergebnisse einer quantitativen Vergleichsstudie - In: PhyDid-B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 2010)

Inhalt und Bezug zum Thema:

Für die Mechanikstudie aus Kapitel 4.7 wurde ein Lehrtext in Form eines Schulbuches geschrieben, das gleichzeitig die Konzeption des Unterrichtskonzeptes festlegte. In diesem Schülertext werden Stroboskopbilder, die mit dem Videoanalyseprogramm „measure dynamics“ erzeugt wurden.

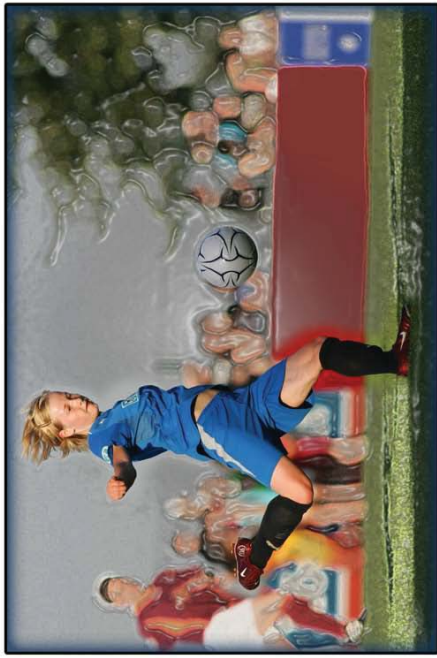
Bemerkung nach §6 (4) Satz 5 (Gemeinsame Arbeiten mehrerer Verfasser):

Dieser Schülertext wurde gemeinsam geschrieben (wobei auch Ideen aus den Arbeiten aus 4.4 und 4.5 eingingen) und mehrfach überarbeitet, wobei auch Erfahrungen und Rückmeldungen aus der Würzburger Erprobungsgruppe eingingen (siehe 4.7.3). Wer welchen Anteil an dem Schulbuch schrieb, ist nicht mehr feststellbar.

Weitere Veröffentlichung:

Eine ausführlichere Beschreibung des Unterrichtskonzeptes mit ausführlicher Beschreibung der didaktischen Leitvorstellungen und vielen Unterrichtsmaterialien auf DVD (einschließlich dieses Schulbuches, vieler Videoanalyseprojekte und mit Einblendungen exportierter Videos) erscheint als Buch:

WIESNER, H.; WILHELM, T.; RACHEL, A.; WALTNER, C.; TOBIAS, V.; HOPF, M.; *Mechanik I: Kraft und Geschwindigkeitsänderung*, Reihe Unterricht Physik, Aulis-Verlag, 2011



Einführung in die Mechanik

Einführung in die Mechanik

Inhaltsverzeichnis:

1. Flanke – Kopfball – Tor!!!
2. Die Beschreibung und Darstellung von Bewegungen
3. Wie schnell? Wohin?
 - 3.1 Tempo
 - 3.2 Richtung
 - 3.3 Geschwindigkeit
4. Die Zusatzgeschwindigkeit
 - 4.1 Zusatzgeschwindigkeit als Folge einer Einwirkung
 - 4.2 Konstruktion der Endgeschwindigkeit
 - 4.3 Konstruktion der Zusatzgeschwindigkeit
 - 4.4 Sonderfall: Eindimensionale Bewegungen
5. Die Newtonsche Bewegungsgleichung
 - 5.1 Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit
 - 5.2 Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit
 - 5.3 Masse und Zusatzgeschwindigkeit
 - 5.4 Die Newtonsche Bewegungsgleichung
6. Anwendungen der Newtonschen Bewegungsgleichung
 - 6.1 Alltagsanwendungen
 - 6.2 Das Beharrungsprinzip
7. Das Wechselwirkungsprinzip
8. Kraftarten
 - 8.1 Gravitationskraft
 - 8.2 Magnetische Kraft
 - 8.3 Elektrische Kraft
 - 8.4 Reibungskraft
9. Wenn mehrere Kräfte wirken
 - 9.1 Kraftfeile aneinander hängen
 - 9.2 Kräftegleichgewicht

Autoren:

C. Waltner, V. Tobias, M. Hopf, T. Wilhelm, H. Wiesner

Fotos und Bilder

M. Bubb, R. Lubinski

Titelfoto und Fußballbilder:

FFC Wacker München

Fotograf: Markus Römer

1. Flanke – Kopfball – Tor!!!



1. Anna und Marie beim Kopfball

Erfolgreichen Stürmerinnen und Stürmern gelingt es, eine Flanke mit einem Kopfstoß ins Tor zu lenken (Bild 1). Gekonnt ändern sie durch diese Einwirkung die ursprüngliche Bewegungsrichtung des Balles, so dass er ins gegnerische Tor fliegt.

Innerhalb der Physik befasst sich der Bereich der Mechanik mit dem Zusammenhang zwischen der Einwirkung auf einen Gegenstand und der Auswirkung auf seine Bewegung: Er kann dadurch schneller und langsamer werden oder auch seine Richtung verändern.

Bewegungsänderungen haben immer eine Ursache: Trifft der geflankte Ball tatsächlich ins Tor, so ist dies der Erfolg der köpfenden Spielerin. Sie darf sich feiern lassen!

Mit den Gesetzen der Mechanik kann man Bewegungen voraussagen, wenn man die Einwirkung kennt: Wird z. B. der Ball im Tor landen, wenn ein Fußballspieler mit einer gewissen Stärke und Richtung köpft? Umgekehrt ist es auch möglich die Einwirkung zu erschließen, wenn man die Bewegung beobachtet: Mit welcher Stärke und Richtung hat z. B. der Fußballspieler geköpft, wenn der Ball im Tor landet?

Um Fragestellungen dieser Art wird es in den nächsten Kapiteln gehen.



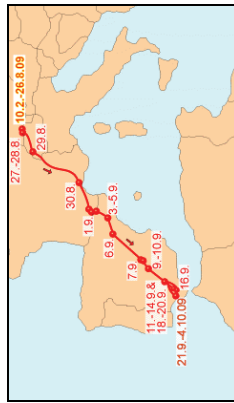
2. Die Darstellung und Beschreibung von Bewegungen



2.1 Weißstorch „Max“ mit einem kleinen Sender

Störche fliegen zum Überwintern in den Süden. Um den Zug der Störche zu verfolgen, wurde ein großes Forschungsprojekt gestartet:

Schon kurz nach der Geburt wurde der Weißstorch Max mit einem kleinen Sender ausgestattet (Bild 2.1). Nun kann in regelmäßigen Abständen der Aufenthaltsort von Max bestimmt und in eine Landkarte eingetragen werden (Bild 2.2).



2.2 Flugroute von Max bis 4.10.2009

Die Forschung zum Zug der Störche zeigt ein typisches Beispiel, wie Bewegungen aufgezeichnet werden.

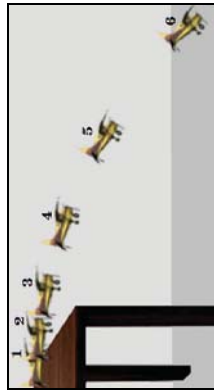
Beschreibung einer Bewegung:

Um die Bewegung eines Gegenstands zu beschreiben, muss zu bestimmten Zeitpunkten festgestellt werden, wo sich der Gegenstand befindet. Sowohl der Zeitpunkt der Messung als auch der Ort des Gegenstandes müssen dabei möglichst genau festgehalten werden. Die Bewegung wird dabei umso genauer beschrieben, je näher die Zeitpunkte zusammen liegen und umso präziser Ort und Zeit bestimmt worden sind.

Stroboskopbilder

Den Ort eines Gegenstands kann man auch mit einem Fotoapparat bestimmen. Dazu macht man in festen Zeitabständen immer wieder ein Foto. (Der Fotoapparat darf sich dabei nicht bewegen.) Wenn diese Fotos übereinandergelegt werden, entsteht ein sogenanntes **Stroboskopbild** (SB).

In Bild 2.3 ist die Bewegung eines Spielzeugfliegers abgebildet. Dabei wurde immer nach 0,1 Sekunden ein neues Bild gemacht. Damit du das besser erkennst, sind die einzelnen Bilder nummeriert. Jetzt ist die Flugroute des Fliegers sehr genau beschrieben. Du kannst auch erkennen, wann der Flieger am schnellsten war: Zwischen den Punkten 5 und 6 liegt der größte Abstand. Da zwischen zwei Punkten immer 0,1 Sekunden vergangen sind, war er hier am schnellsten. Insgesamt war das 0,5 Sekunden nach dem Start. Das erkennst du daran, dass es sich um das 5. Bild handelt und damit 5mal 0,1 Sekunden seit dem Start vergangen sind.



2.3 Stroboskopbild eines Spielzeugfliegers, zwischen zwei Aufnahmen liegen immer 0,1 Sekunden

Aufgaben

- ① Beschreibe, wie die Bewegung des Störches Max aufgezeichnet wurde.
- ② Erläutere, weshalb aus dem Bild 2.2 nicht die exakte Flugroute von Max ablesbar ist.
- ③ In Bild 2.4 siehst du das Stroboskopbild eines Fußballs.



2.4 Stroboskopbild eines Fußballs, zwischen zwei Aufnahmen liegen immer 0,04 Sekunden

- a) Beschreibe die Bewegung des Balls. Entscheide, ob die Bewegung am linken oder am rechten Bildrand angefangen hat.
- b) Wann war der Fußball am schnellsten? Wann war er am langsamsten? Kannst du den genauen Zeitpunkt nach dem ersten Aufprall angeben?

- ④ Statt immer wieder neue Fotos zu machen, kannst du auch einen Videofilm drehen. Eine Videokamera funktioniert nämlich genauso: Alle 0,04 Sekunden wird ein neues Bild aufgenommen. Das siehst du, wenn du einen Videofilm bildweise ablaufen lässt. Dann kannst du z. B. einen Ablauf wie in Bild 2.5 erkennen.



2.5 Bewegung einer Trampolinspringerin, zwischen zwei Aufnahmen liegen immer 0,04 Sekunden

- a) Betrachte irgendeinen Film Bild für Bild und beschreibe eine der Bewegungen, die du dort erkennen kannst.
- b) Erstelle ein Stroboskopbild dieser Bewegung. Klebe dazu eine Plastikfolie über den Bildschirm. Wähle dir dann einen Punkt auf dem Gegenstand aus und markiere ihn mit Folienstift. Gehe jetzt ein Bild weiter im Film und markiere den Punkt erneut.
- c) Erkläre, wann sich der von dir ausgewählte Gegenstand am schnellsten und wann am langsamsten bewegt.

3. Wie schnell? Wohin?

Du hast bereits gelernt, wie Bewegungen beschrieben werden: Zu festgelegten Zeitpunkten wird der Ort des Gegenstands bestimmt. Manchmal reicht das aber nicht. Darum geht es bei folgendem Spiel:

V1: „Blindes Fangen in Zeitlupe“
„Jäger“, „Gejagter“ und zwei Assistenten spielen mit. Der Jäger muss den Gejagten fangen. Aber so wäre das zu einfach! Deshalb werden dem Jäger die Augen verbunden. Damit er trotzdem eine Chance hat den Gejagten zu fangen, sagen die Assistenten dem Jäger, wo er hinlaufen soll. Außerdem darf der Gejagte nur in Zeitlupe gehen.

V2: Ein fernsteuerbares Auto soll entlang einer vorgegebenen Route (Bild 3.1) fahren. Wenn du die Fernsteuerung bedienst, darfst du dabei nicht auf die Strecke schauen, sondern nur auf die Anweisungen deiner Mitschüler hören.



3.1 Ferngesteuertes Auto auf einer vorgegebenen Route

Beobachtung: Bei beiden Versuchen erhältst du Anweisungen wie „rechts“, „links“, „mehr links“, „geradeaus“, „schneller“ oder „stopp“ usw. Es kommt also nicht nur darauf an, wie schnell, sondern auch wohin sich der Jäger bzw. das Auto bewegt.

Dieses Ergebnis kann man verallgemeinern: Um die Bewegung eines Gegenstands zu beschreiben, muss man an jedem Punkt der Bewegung angeben, **wie schnell und wohin** er sich fortbewegt.

3.1 Tempo

Der Begriff **Tempo** beschreibt in der Physik, wie schnell sich ein Gegenstand bewegt. Das Tempo wird mit dem Buchstaben v bezeichnet und entweder in der Einheit $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ oder $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ angegeben. Dabei sind

$$36 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 36 \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Du hast bestimmt auch schon einmal gesehen, wie das Tempo eines Fahrrades oder eines Autos auf einem Tachometer (Bild 3.2) angezeigt wird.



3.2 Tacho eines Fahrrades und eines Autos

Meistens steht aber kein Tacho zur Verfügung. Trotzdem kannst du das Tempo eines Gegenstands ganz einfach bestimmen: Dabei musst du dir immer einen Anfangs- und einen Endpunkt aussuchen, zwischen denen du das Tempo bestimmen möchtest. Messe nun die Zeit, die der Gegenstand benötigt, um diese Strecke zurückzulegen. Dann kannst du das Tempo als Quotient von zurückgelegter Strecke und dafür benötigter Zeit berechnen.

In der Formel wird die zurückgelegte Strecke mit Δs , die dafür benötigte Zeit mit Δt bezeichnet. (Das Symbol Δ wird verwendet, weil sowohl die Strecke als auch die Zeit sich auf den Unterschied zwischen Anfangs- und Endpunkt beziehen.)

$$\text{Tempo} = \frac{\text{zurückgelegte Strecke}}{\text{dafür benötigte Zeit}}$$

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Beispiele

a) *Tempo eines Skaters*

Thomas fährt bei der Blade-Night mit. Für die 18,7 km benötigt er 1,5 h. Sein Tempo ist dann (im Durchschnitt):

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{18,7 \text{ km}}{1,5 \text{ h}} = 12,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

b) *Tempo beim 100 m-Lauf*

Am 16.8.2009 lief der Jamaikaner Usain Bolt in Berlin einen neuen Weltrekord (Bild 3.3). Er sprintete die 100 m in 9,58 s. Sein Tempo war (im Durchschnitt):

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{100 \text{ m}}{9,58 \text{ s}} = 10,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Das sind 37,6 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$.



3.3 Usain Bolt

Bei einem solchen Rennen werden auch die Reaktionszeiten und die Zwischenzeiten der Sprinter aufgezeichnet.

Anhand der Tabelle 1 kannst du das Tempo der drei Erstplatzierten auf verschiedenen Streckenabschnitten berechnen.

Auf welchem Streckenabschnitt erreichte Usain Bolt das größte Tempo? Wie groß war es?

Welches war das größte Tempo, das seine beiden Konkurrenten auf einem Streckenabschnitt erreichten? An welcher Stelle wurde es erreicht?

Platz	Läufer	Reaktionszeit	20m	40m	60m	80m	100m
1	Usain Bolt	0,146 s	2,89 s	4,64 s	6,31 s	7,92 s	9,58 s
2	Tyson Gay	0,144 s	2,92 s	4,70 s	6,39 s	8,02 s	9,71 s
3	Asafa Powell	0,134 s	2,91 s	7,71 s	6,42 s	8,10 s	9,84 s

Tabelle 1 Zeitmessungen für einen 100 m Lauf für verschiedenen Streckenabschnitte

c) Tempomessung

Du kannst eine ähnliche Tempomessung auch selbst durchführen. Um zum Beispiel das Tempo eines Fahrradfahrers zu bestimmen, benötigst du eine Stoppuhr und ein Maßband. Markiere eine Strecke (z. B. 10 m) auf dem Schulhof. Sobald das Fahrrad die erste Markierung durchfährt, startest du die Stoppuhr und stoppst sie, wenn das Fahrrad die zweite Markierung durchfährt. Dann kannst du das Tempo ausrechnen.

d) Tempo des Spielzeugfliegers

Betrachte noch einmal die Stroboskopaufnahme des Spielzeugfliegers (Bild 2.3). Du siehst auf Anhieb, dass der Flieger von Punkt 5 zu Punkt 6 die größte Strecke zurückgelegt hat. Das sind ungefähr 18 mm im Bild, das aber verkleinert ist: Der Flieger ist im Bild nur 5 mm, in Wirklichkeit aber 20 cm groß. Damit kannst du ausrechnen, wie lang die Flugstrecke Δs von Punkt 5 zu Punkt 6 war:

$$\Delta s = (20 \text{ cm} : 5 \text{ mm}) \cdot 18 \text{ mm}$$

$$\Delta s = 72 \text{ cm} = 0,72 \text{ m}$$

Weil du weißt, dass der Flieger für diese Strecke genau $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ gebraucht hat, kannst du jetzt das Tempo berechnen:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{0,72 \text{ m}}{0,1 \text{ s}} = 7,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

e) Tempo in Natur und Technik

In der Natur und der Technik gibt es ganz unterschiedlich schnelle Bewegungen. Ein Überblick ist in Bild 3.4 abgedruckt.

Wie schnell ist ungefähr ... ?	
Eine Schnecke	0,0008 m/s oder 0,003 km/h
Ein Fledgänger	1,5 m/s oder 5,5 km/h
Ein Ausfahrer	7 m/s oder 25 km/h
Ein Regentropfen	11 m/s oder 40 km/h
Ein Rumpfler	25 m/s oder 90 km/h
Ein Auto	33 m/s oder 120 km/h
Ein Flugzeug	250 m/s oder 900 km/h
Der Schall	340 m/s oder 1220 km/h
Eine Geschwindigkeit	800 m/s oder 2900 km/h
Das Licht	300 000 000 m/s oder 1 080 000 000 km/h

3.4 Tempo in Natur und Technik

3.2 Richtung

Du hast schon gelernt, dass es zur Beschreibung einer Bewegung nicht ausreicht, den Ort und das Tempo anzugeben, genauso wichtig ist die **Richtung**, in welche die Bewegung erfolgt. Das siehst du z. B. bei Navigationssystemen (Bild 3.5).



3.5 Vorschlag einer Änderung der Bewegungsrichtung

Die Bewegungsrichtung wird mit einem Pfeil angegeben.



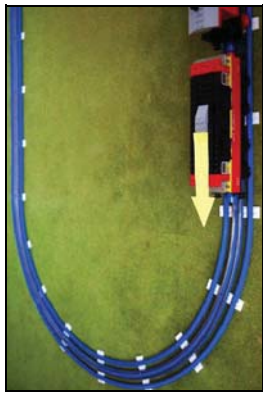
3.6 Pfeile bei verschiedenen Fahrzeugen

Betrachte Bild 3.6 genau: Welche Fahrzeuge bewegen sich in die gleiche Richtung? Zum Beispiel haben die drei Autos mit den gelben Pfeilen die gleiche Bewegungsrichtung. Beachte aber, dass diese Autos nicht unbedingt das gleiche Ziel haben.

Umgekehrt haben die vier Autos, die auf den Kreislaufzufahren, das gleiche Ziel, aber alle verschiedene Bewegungsrichtungen!

Die Bewegungsrichtung kann sich immer wieder ändern. In Bild 3.7 fährt eine Spielzeuglokomotive auf einem Rundkurs. Zur

Veranschaulichung ist ein Pfeil aus Papier ausgeschnitten und aufgeklebt worden. Zunächst zeigt der Pfeil nach links, in der Kurve dreht er sich dann so lange, bis er nach rechts zeigt. In der nächsten Kurve verändert sich der Pfeil erneut so lange, bis er wieder nach links zeigt.



3.7 Pfeil auf einer Modelleisenbahn

Aufgaben

- ① Erkläre, was bei einer Bewegung außer den Orten noch angegeben werden muss.
- ② Erkläre, wie du das Tempo eines ferngesteuerten Autos mit einem Experiment bestimmen kannst.
- ③ Finde heraus, wie ein Fahrradtacho das Tempo misst. Überlege dir ein Experiment, um herauszufinden, ob der Tacho das richtige Tempo anzeigt.
- ④ Beim 400-m-Lauf starten die Athleten von ganz unterschiedlichen Positionen (Bild 3.8). Erkläre, weshalb nur so ein fairer Wettkampf möglich ist.



3.8 Leichtathletik-Mittelstanzrennen

- ⑤ Beim Biathlon-Verfolgungsrennen starten die Läufer in der gleichen Reihenfolge und mit dem gleichen zeitlichen Abstand, mit dem sie am Tag vorher beim Sprint ins

Ziel gekommen sind. Der Sieger des Sprints startet also als erster. Der Zweitplatzierte des Sprints darf auch als zweiter in die Loipe, und zwar genau nach Ablauf der Zeit, die er am Tag zuvor zurücklag. Bei den Olympischen Spielen in Turin siegte der Deutsche Sven Fischer im Sprint und war dabei 2 min 11 s schneller als sein Teamkamerad Michael Greis. Am Ende des Verfolgungsrennens am nächsten Tag kam Sven Fischer nur 1 min 4s vor Michael Greis ins Ziel. Wer von den beiden hatte beim 12,5 km langen Verfolgungsrennen ein größeres (Durchschnitts-) Tempo?

⑥ a) Martin behauptet: „Immer wenn die Pfeile zweier bewegter Gegenstände die gleiche Richtung haben, haben sie auch das gleiche Ziel.“ Erkläre Martin, warum er nicht Recht hat.

b) Matthias sagt: „Haben zwei Autos das gleiche Ziel, dann zeigen ihre Pfeile auch in die gleiche Richtung“. Auch Matthias hat nicht Recht. Warum?

Für Spezialisten:

Bisher haben wir die Bewegungen so beschrieben, wie du sie bezüglich der Erdoberfläche beobachten kannst. Dies ist auch für alle vorgestellten Fälle zweckmäßig.

Grundsätzlich können die gleichen Bewegungen aber ganz unterschiedlich aussehen, wenn du sie von verschiedenen Standpunkten aus beschreibst.

Stelle dir vor:

An einem windstillen Wintertag schweben Schneeflocken langsam senkrecht zur Erde hinunter. Aus einem fahrenden Auto siehst du aber etwas ganz anderes: Die Schneeflocken bewegen sich (vom fahrenden Auto aus beschrieben) nahezu horizontal und nicht mehr senkrecht zur Straße. Zur Beschreibung von Bewegungen gehört also eigentlich, in einem ersten Schritt festzulegen, von welchem Standpunkt aus die Bewegung beschrieben wird.

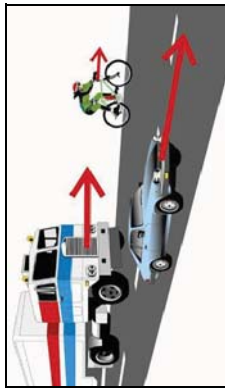
3.3 Geschwindigkeit

Du hast bereits gelernt, wie du die Richtung einer Bewegung darstellen kannst: Du zeichnest einfach einen Pfeil. Du hast aber auch gelernt, dass das Tempo und die Richtung angegeben werden müssen, um eine Bewegung zu beschreiben. Wie könnte man das nun darstellen?

Eine Möglichkeit wäre es, zu jedem Pfeil das Tempo dazuzuschreiben. Es gibt aber eine einfachere Methode:

Man kann den Pfeil unterschiedlich lang zeichnen. Je größer das Tempo, desto länger der Pfeil. (Ähnlich ist das auch bei der Lautstärkeregelung einer Stereoanlage: Je lauter der Ton, desto höher die Balken der Anzeige.)

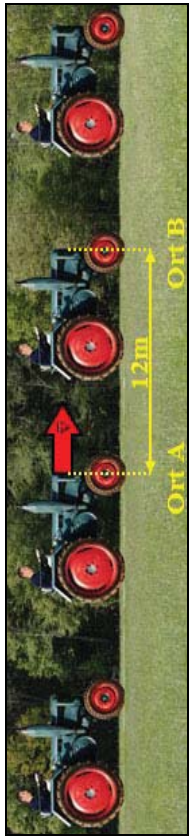
In Bild 3.9 sind die Pfeile entsprechend eingezeichnet. Alle drei Fahrzeuge haben unterschiedliches Tempo aber die gleiche Bewegungsrichtung.



3.9 Geschwindigkeitspfeile verschiedener Fahrzeuge

In der Physik werden die beiden Informationen Tempo und Richtung zusammengefasst: Die **Geschwindigkeit** $\vec{v}$ eines Gegenstands setzt sich zusammen aus seinem Tempo und seiner Bewegungsrichtung. Sie wird durch einen **Geschwindigkeitspfeil** dargestellt. Seine Richtung gibt die Richtung der Bewegung, seine Länge gibt das Tempo der Bewegung an.

Geschwindigkeit $\vec{v}$ — Tempo — Richtung



3.10 Stroboskopbild eines Traktors mit Geschwindigkeitspfeil

Um die Begriffe Tempo und Geschwindigkeit nicht zu verwechseln, schreibt man immer einen kleinen Pfeil über den Buchstaben, wenn die Geschwindigkeit $\vec{v}$ gemeint ist, dagegen schreibt man nie einen Pfeil über den Buchstaben, wenn das Tempo v gemeint ist. Der kleine Pfeil erinnert dich daran, dass die Geschwindigkeit aus Tempo und Bewegungsrichtung besteht. Zwei Geschwindigkeiten sind nur dann gleich, wenn sie das gleiche Tempo und die gleiche Richtung haben! (Die Geschwindigkeitspfeile sind dann gleich lang und zeigen in die gleiche Richtung.)

Beachte: Im Alltag wird oft „Geschwindigkeit“ gesagt, wenn eigentlich das Tempo gemeint ist. In der Physik besteht jedoch ein wichtiger Unterschied. Du musst immer genau überlegen, ob es um die Geschwindigkeit oder das Tempo geht!

Beispiele

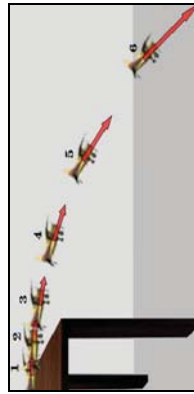
a) *Tempo und Geschwindigkeitspfeil*
Mit Geschwindigkeitspfeilen kann man das Tempo ganz genau angeben. Dazu ist ein Maßstab notwendig. So kannst du das Tempo des Sportwagens aus Bild 3.9 leicht herausfinden, wenn du weißt, dass 1 mm im Bild einem Tempo von 10 km/h entspricht: Der Geschwindigkeitspfeil des Sportwagens ist 1,7 cm lang. Deswegen hat der Sportwagen das Tempo 170 km/h.

b) *Geschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild*

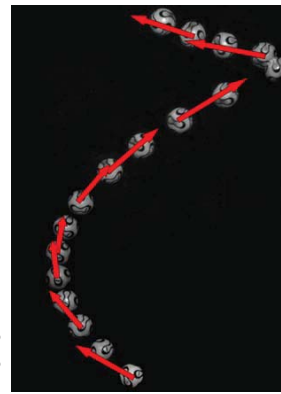
-Umkehrt kann man (mit einem vorgegebenen Maßstab) auch Geschwindigkeitspfeile in Stroboskopbildern einzeichnen. So soll z.B. der Maßstab für Bild 3.10 so sein, dass 1 mm einem Tempo von 2 m/s entspricht. Zuerst wählst du die Orte aus, an

denen du die Geschwindigkeit bestimmen möchtest. Danach errechnest du das Tempo. Der Traktor benötigt zwischen Ort A und Ort B ($\Delta s = 12 \text{ m}$) 2 s und hat somit ein Tempo von 6 m/s. Deswegen zeichnest du an den Punkt A einen Geschwindigkeitspfeil von 3 mm Länge, der in Richtung des Ortes B zeigt.

-Wie du merkst, ist dieses Verfahren recht mühsam. Es ist praktisch, dass es Computerprogramme gibt, die Geschwindigkeitspfeile direkt in Stroboskopbildern einzeichnen: Betrachte die Bilder 3.11 und 3.12: In das Stroboskopbild der Bewegung des Fliegers und des Fußballers sind die Geschwindigkeitspfeile eingezeichnet. Du erkennst, dass sich sowohl Tempo als auch Richtung ständig ändern.



3.11 Geschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild des Spielzeugfliegers



3.12 Geschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild des Fußballers

c) *Fluglotsen bei der Arbeit*

Ein Fluglotse (Bild 3.13) beobachtet auf seinem Kontrollschirm die Bewegungen zweier Flugzeuge, deren Flugbahnen sich offensichtlich schneiden werden.



3.13 Fluglotse bei der Arbeit

Von 13:17 Uhr bis 13:18 Uhr haben sich die beiden Flugzeuge wie in Bild 3.14 bewegt. Muss der Lotse die Piloten warnen? Nein, die Flugzeuge stoßen bei diesen Bewegungen nicht zusammen, obwohl sich die Flugbahnen kreuzen. Denn B fliegt deutlich schneller als A. (Bild 3.15)



3.14 Geschwindigkeitspfeile der beiden Flugzeuge



3.15 Geschwindigkeitspfeile der beiden Flugzeuge

Aufgaben

① Erläutere den Unterschied zwischen Geschwindigkeit und Tempo.

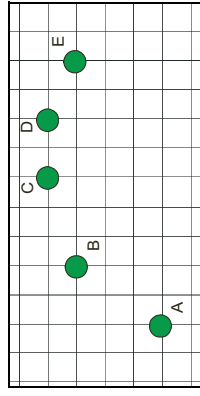
② Zeichne ein Bild, in das du zwei Autos mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten $\vec{v}_1$ und $\vec{v}_2$ und außerdem zwei LKWs mit gleicher Geschwindigkeit $\vec{v}_3$ und $\vec{v}_4$ einzeichnest!

③ Zeichne jeweils drei Fahrräder mit

a) gleicher Bewegungsrichtung aber unterschiedlichen Geschwindigkeiten $\vec{v}$,
b) gleichem Tempo v , aber unterschiedlichen Geschwindigkeiten $\vec{v}$!

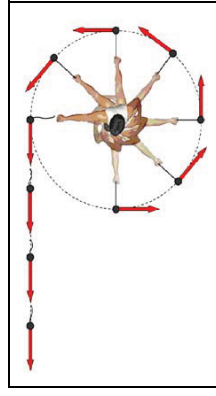
④ Zeichne die Geschwindigkeitspfeile für Flugzeuge, die
a) mit 610 km/h nach Nordwesten,
b) mit 470 km/h nach Süden,
c) mit 380 km/h nach Osten fliegen. (1 cm entspricht dabei 100 km/h)

⑤ Übertrage das Stroboskopbild (Bild 3.16) ins Heft. Zeichne Geschwindigkeitspfeile an den Punkten A, B, C und D. Die Zeit zwischen zwei Bildaufnahmen beträgt eine Sekunde.



3.16 Stroboskopbild

⑥ Betrachte die Stroboskopbilder in den Bildern 3.17 und 3.18. Beschreibe jeweils, wie sich die Geschwindigkeit im Verlauf der Bewegung verändert!



3.17 Geschwindigkeitspfeile beim Hammerwurf



3.18 Geschwindigkeitspfeile beim Rundkurs

4. Die Zusatzgeschwindigkeit

4.1 Die Zusatzgeschwindigkeit als Folge einer Einwirkung



4.1 Anna beim Torschuss

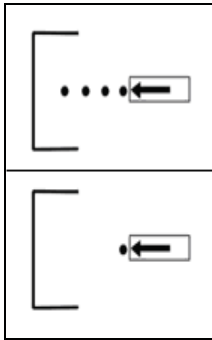
Im Fußballtraining werden verschiedene Situationen geübt. Bei der ersten Übung zum Elfmeterschießen sollen die Spielerinnen und Spieler den Ball aus der Ruhe so ankickern, dass das Tor getroffen wird. Bei der nächsten Übung wird der Ball den Spielerinnen und Spielern von der Seite (parallel zum Tor) zugespielt (Bild 4.1) und soll wieder genauso angekickert werden, wie eben beim Elfmeterschießen. Allerdings darf der Ball nicht gestoppt werden.

V1: Probiert die beiden Übungen paarweise auf dem Sportplatz aus.

V2: Simuliert die beiden Übungen mit einem kleinen Versuch: Nimmt eine Kugel (z.B. eine Marmor), baut aus Stiften ein Tor und versetzt der Kugel einen Stoß, indem ihr sie mit einem Lineal anschnippt. Führt ebenfalls beide Übungen durch.

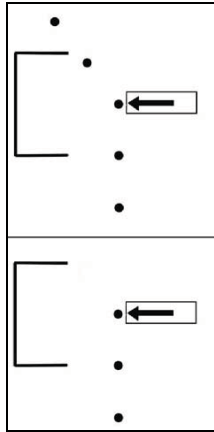
Was könnt ihr jeweils feststellen? Landet der Ball bzw. die Kugel bei beiden Übungen im Tor? Wir simulieren ebenfalls mit einer Kugel und stoßen sie beide Male mit einem Brett in Pfeilrichtung (Bilder 4.2 und 4.3).

Beobachtung: Bei der ersten Übung landet die Kugel immer im Tor.



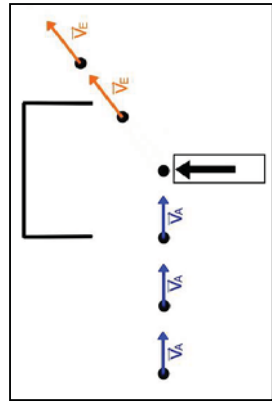
4.2 Stroboskopbild für Übung 1

Bei der zweiten Übung verfehlt die senkrecht zur Bewegungsrichtung gestoßene Kugel das Tor (Bild 4.3).



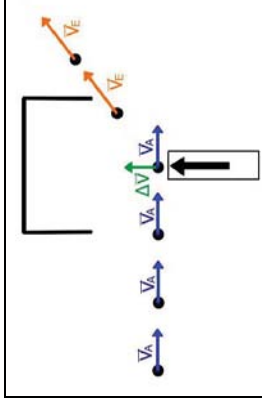
4.3 Stroboskopbild für Übung 2

Woran liegt das? Der Grund ist, dass die Kugel nach dem Stoß in einem gewissen Sinn zwei Bewegungen gleichzeitig ausführt: die Bewegung in der Anfangsrichtung wird beibehalten, zusätzlich wird eine Bewegung in der Stoßrichtung ausgeführt. Betrachten wir dies genauer: Die Geschwindigkeit vor dem Stoß nennen wir die Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ (blauer Pfeil), die Geschwindigkeit nach dem Stoß nennen wir die Endgeschwindigkeit $\vec{v}_E$ (oranjer Pfeil) (Bild 4.4).



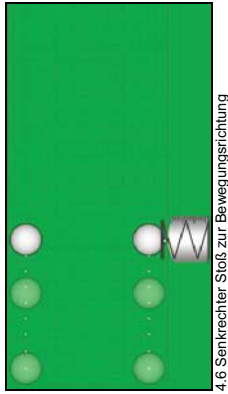
4.4 Anfangs- und Endgeschwindigkeit der Kugel

Was ist beim Stoßen passiert? Durch den Stoß erhält die Kugel eine **Zusatzgeschwindigkeit** $\Delta \vec{v}$. Der Pfeil der **Zusatzgeschwindigkeit** $\Delta \vec{v}$ zeigt in die gleiche Richtung wie der Stoß (Bild 4.5).

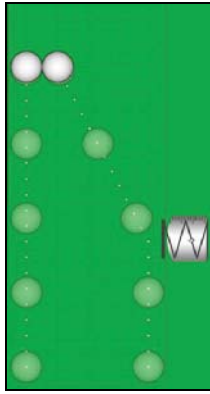
4.5 Die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ zeigt in Stoßrichtung.

Du kannst dir das so vorstellen: Die Kugel bewegt sich nach dem Stoß mit $\vec{v}_A$ weiter nach rechts und gleichzeitig zusätzlich mit der Geschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ auf das Tor zu. Die beobachtete Endgeschwindigkeit $\vec{v}_E$ ist aus $\vec{v}_A$ und $\Delta \vec{v}$ zusammengesetzt und zeigt schräg rechts am Tor vorbei.

V3: Wir lassen zwei identische Kugeln auf einer ebenen Unterlage mit gleicher Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ nach rechts rollen. Nur eine der beiden Kugeln wird senkrecht zur Bewegungsrichtung gestoßen. In Bild 4.6 ist dies anhand einer Computersimulation gezeigt.

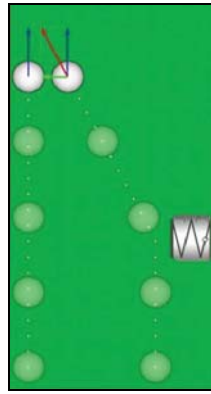


4.6 Senkrechter Stoß zur Bewegungsrichtung



4.7 Die Kugeln treffen sich nach einem senkrechten Stoß.

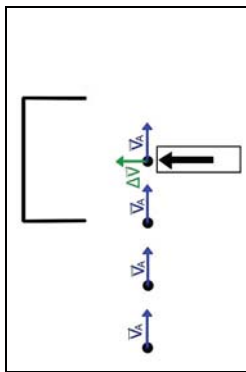
In eine Stroboskopaufnahme wie Bild 4.7 können die Geschwindigkeitspfeile für $\vec{v}_A$, $\Delta \vec{v}$ und $\vec{v}_E$ (wie in Kap. 3.3 beschrieben) eingezeichnet werden (Bild 4.8).

4.8 Zusammensetzung der Geschwindigkeitspfeile von $\vec{v}_A$, $\Delta \vec{v}$ und $\vec{v}_E$

Wie du die drei Geschwindigkeitspfeile richtig verknüpft wird im folgenden Abschnitt erklärt.

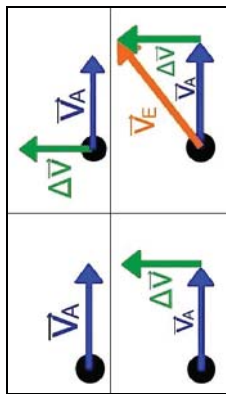
4.2 Konstruktion der Endgeschwindigkeit

Ausgangssituation: Manchmal kennst du die Anfangs- und die Zusatzgeschwindigkeit (wie in Bild 4.9) und möchtest die Endgeschwindigkeit konstruieren.



4.9 Anfangs- und Zusatzgeschwindigkeitspfeile sind gegeben. Der Pfeil der Endgeschwindigkeit ist gesucht.

Die Zusammensetzung von $\vec{v}_A$ und $\Delta\vec{v}$ kannst du mit den Geschwindigkeitspfeilen nachvollziehen (Bild 4.10).



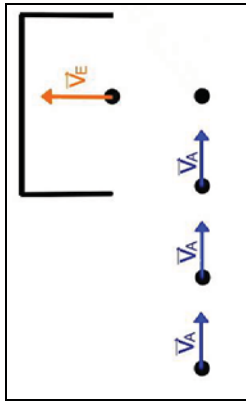
4.10 Konstruktion des Pfeils von $\vec{v}_E$

Konstruktion:

- Die Kugel hat eine bestimmte Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$.
- Durch den Stoß erhält die Kugel zur Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ eine bestimmte Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$, die in Richtung des Stoßes zeigt.
- Zur Zusammensetzung von $\vec{v}_A$ und $\Delta\vec{v}$ hängst du $\Delta\vec{v}$ an die Pfeilspitze von $\vec{v}_A$.
- Verbindest du den Pfeilfuß von $\vec{v}_A$ mit der Pfeilspitze von $\Delta\vec{v}$, so erhältst du den Pfeil der Endgeschwindigkeit $\vec{v}_E$.

4.3 Konstruktion der Zusatzgeschwindigkeit

Ausgangssituation: Manchmal kennst du die Anfangs- und die Endgeschwindigkeit, (wie in Bild 4.11) und möchtest die Zusatzgeschwindigkeit konstruieren.



4.11 Anfangs- und Endgeschwindigkeitspfeile sind gegeben. Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit ist gesucht.

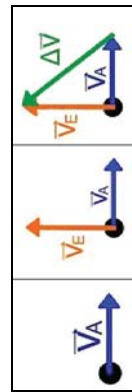
V4: Anna trifft nach einer Flanke ihrer MitspielerIn häufig ins Tor. In welche Richtung kickt sie dann den Ball (Bild 4.12)?



4.12 Anna beim Torschuss nach Flanke

Es ist nach der Richtung des Stoßes gefragt. Du weißt jetzt schon, dass dieser in die gleiche Richtung wie der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ zeigt. Du musst also den Pfeil von $\Delta\vec{v}$ herausfinden, wobei die Geschwindigkeitspfeile $\vec{v}_A$ und $\vec{v}_E$ bekannt sind (Bild 4.11).

Die Bestimmung von $\Delta\vec{v}$ aus $\vec{v}_A$ und $\vec{v}_E$ kannst du wieder mit den Geschwindigkeitspfeilen nachvollziehen (Bild 4.13):



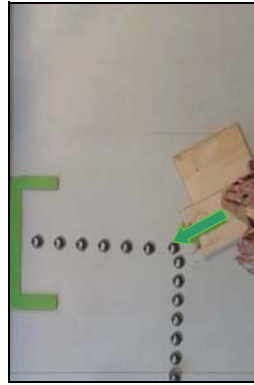
4.13 Konstruktion des Pfeils von $\Delta\vec{v}$

Konstruktion:

- Die Kugel hat eine bestimmte Geschwindigkeit $\vec{v}_A$.
- Nach dem Stoß soll der Geschwindigkeitspfeil $\vec{v}_E$ direkt in Torrichtung zeigen. Gesucht ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$.
- Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ wird wieder an die Pfeilspitze von $\vec{v}_A$ gehängt und muss auf die Pfeilspitze von $\vec{v}_E$ zeigen.

Auflösung zu V4:

Der grüne Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ zeigt in die Richtung, in die Anna den Ball kicken muss, damit dieser direkt im Tor landet (Bild 4.14).



4.14 Der grüne Pfeil zeigt in die gesuchte Stoßrichtung.

Durch eine **Einwirkung** erhält ein Körper eine **Zusatzgeschwindigkeit** $\Delta\vec{v}$. Die Richtung der Einwirkung und die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit sind gleich.

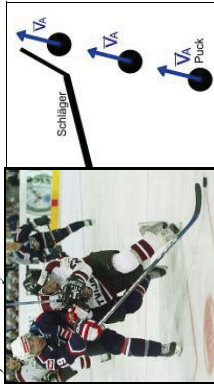
Die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ wird durch einen Pfeil dargestellt. Der Pfeil von $\Delta\vec{v}$ zeigt von der Pfeilspitze von $\vec{v}_A$ zur Pfeilspitze von $\vec{v}_E$.

Konstruktionstipp: Wenn du einen der Geschwindigkeitspfeile konstruierst, dann kannst du die vorgegebenen Geschwindigkeitspfeile beliebig verschieben. Beachte, dass du dabei die Richtung und die Länge der Pfeile nicht veränderst.

So kannst du es dir vielleicht leichter merken: „Der Pfeil von $\Delta\vec{v}$ zieht die Pfeilspitze von $\vec{v}_A$ in die Pfeilspitze von $\vec{v}_E$ “.

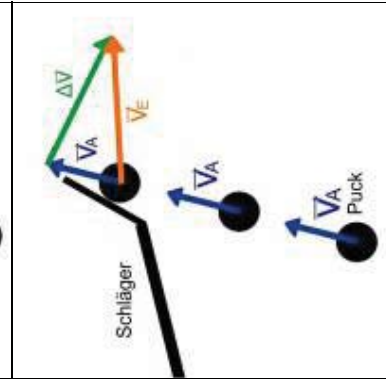
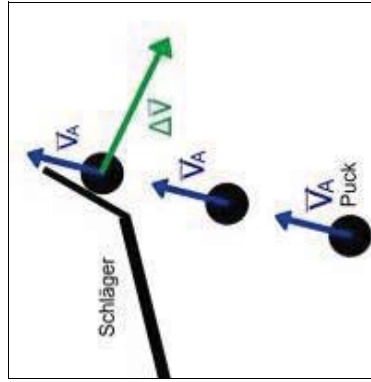
Beispiele

a) Eishockey

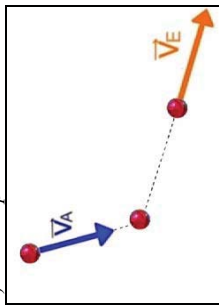


4.15 Eishockeyspieler

Ein Eishockeyspieler versetzt mit dem Schläger dem Puck einen Stoß und der Puck erhält damit eine Zusatzgeschwindigkeit (Bild 4.15). Bei bekannter Anfangsgeschwindigkeit und Zusatzgeschwindigkeit, lässt sich der Pfeil der Endgeschwindigkeit konstruieren (Bild 4.16):

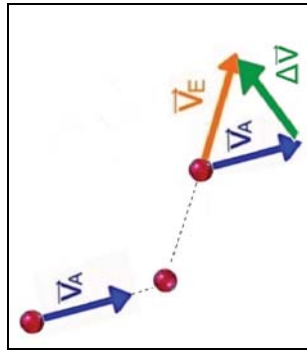
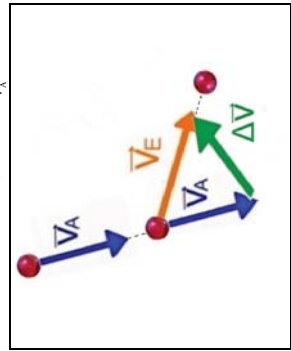


4.16 Konstruktion von $\vec{v}_E$

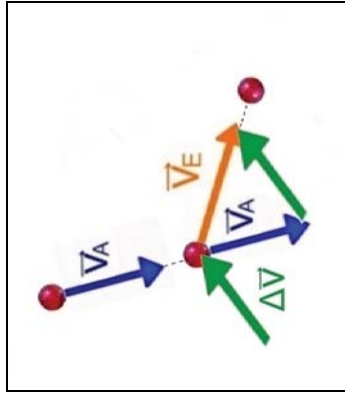
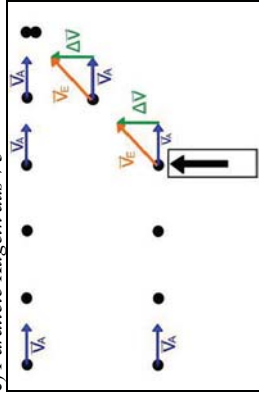
b) *Murmelspiel*

4.17 Geschwindigkeiten beim Murmelspiel

Welche Zusatzgeschwindigkeit hat die rote Murmel in Bild 4.17 an der markierten Stelle erhalten? Um die Zusatzgeschwindigkeit für die Murmel zu ermitteln, werden die gegebenen Pfeile $\vec{v}_A$ und $\vec{v}_E$ verschoben und der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ durch die Verbindung der Pfeilspitzen von $\vec{v}_A$ und $\vec{v}_E$ eingezeichnet. Dabei kommt es nicht darauf an, an welcher Stelle im Bild du die Konstruktion anfertigst. Die Richtung und die Länge der Zusatzgeschwindigkeit, die du erhältst, sind jeweils gleich. (Bild 4.18, Bild 4.19).

4.18 Konstruktion von $\Delta\vec{v}$; der Vektor $\vec{v}_A$ wird verschoben4.19 Konstruktion von $\Delta\vec{v}$; die Vektoren $\vec{v}_A$ und $\vec{v}_E$ werden verschoben

Da die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit gleich sind, weißt du nun auch in welche Richtung auf die Murmel eingewirkt wurde. (Bild 4.20)

4.20 Die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ ist die Richtung, in die die Murmel gestoßen wurde.c) *Parallele Kugeln aus V3*

4.21 Die Zusatzgeschwindigkeit als „zusätzliche“ Geschwindigkeit

Um die Endgeschwindigkeit der gestoßenen Kugel aus V3 zu ermitteln hängst du wieder den Pfeil von $\Delta\vec{v}$ an die Pfeilspitze von $\vec{v}_A$ und verbindest den Pfeilfuß von $\vec{v}_A$ mit der Pfeilspitze von $\Delta\vec{v}$ (Bild 4.21).

4.4 Sonderfall:

Eindimensionale Bewegungen

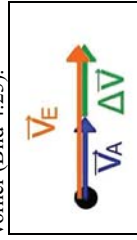
Eine Bewegung heißt eindimensional, wenn die Geschwindigkeitspfeile von $\vec{v}_A$, $\vec{v}_E$ und $\Delta\vec{v}$ entweder in die gleiche Richtung oder in die entgegengesetzte Richtung zeigen:



4.22 Situationen beim Fußballspiel

1) *Einwirkung in Richtung der Anfangsgeschwindigkeit*

Ein Stürmer kickt einen bereits rollenden Fußball in Richtung der ursprünglichen Bewegung. Die Richtung des Fußballs ändert sich dabei nicht. Allerdings ist das Tempo des Balls nach dem Stoß größer als vorher (Bild 4.23).

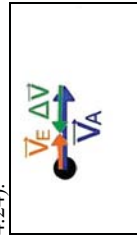


4.23 Erhöhen des Tempos

Ein weiteres Beispiel für diese Situation ist, wenn du mit deinem Fahrrad fährst und schon etwas schlapp bist. Dein Freund möchte dir helfen und schiebt dich einmal kräftig an. Du fährst kurz nach dem Schub in die gleiche Richtung weiter, allerdings mit größerem Tempo.

2) *Einwirkung entgegengesetzt zur Richtung der Anfangsgeschwindigkeit*a) *Bremsen*

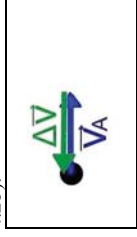
Ein Torwart versucht den Ball zu fangen, dieser gleitet dabei durch seine Hände. Der Ball bewegt sich nach der Berührung durch den Torwart in die gleiche Richtung wie zuvor, hat aber ein geringeres Tempo (Bild 4.24).



4.24 Bremsen

b) *Stoppen*

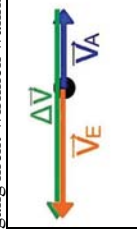
Ein Fußball rollt auf einen Spieler zu. Der stoppt ihn mit seinem Fuß. Das Tempo v_E ist dann null: Die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ hatte das gleiche Tempo wie $\vec{v}_A$, zeigte aber die entgegengesetzte Richtung. Dann wird die Bewegung gestoppt (Bild 4.25).



4.25 Stoppen

c) *Zurückgeben*

Ein Fußballer kickt den Ball in die Richtung zurück, aus der der Ball kam. Dann war die Zusatzgeschwindigkeit so groß, dass die Endgeschwindigkeit in die entgegengesetzte Richtung der Anfangsgeschwindigkeit gerichtet ist (Bild 4.26). Das kannst du dir so vorstellen: Durch die Einwirkung erhält der Ball in einem ersten Schritt gerade eine solche Zusatzgeschwindigkeit in Gegenrichtung zur ursprünglichen Bewegung, dass der Ball zur Ruhe kommt. In einem zweiten Schritt erhält er durch eine Einwirkung eine weitere Zusatzgeschwindigkeit. Das geht so schnell ineinander über, dass du den Übergang nicht wirklich wahrnimmst.



4.26 Zurückgeben

Ein weiteres Beispiel für diese Situation ist ein Tennisball, der mit einer Anfangsgeschwindigkeit auf den Spieler zufliegt. Dieser versetzt dem Ball mit dem Schläger einen so starken Stoß, dass die Endgeschwindigkeit in die entgegengesetzte Richtung zeigt und der Ball zum Mitspieler zurückfliegt.

Aufgaben

① Überlege dir $\vec{v}_A$, $\vec{v}_E$ und $\Delta\vec{v}$ beim Elfmeterschießen und beschreibe jeweils das Tempo.

② Beschreibe eine Bewegung für die gilt:

a) $v_A = 0$, Δv und $v_E \neq 0$

b) $v_E = 0$, Δv und $v_A \neq 0$

c) $\Delta v = 0$, $v_A \neq 0$ und $v_E \neq 0$

③ Kim schwimmt mit konstantem Tempo an einer Düse im Schwimmbad vorbei.

Durch die Düse erhält sie eine Zusatzgeschwindigkeit. Zeichne drei Bilder, aus denen die Bewegung deutlich wird und stelle die drei Geschwindigkeitspfeile $\vec{v}_A$, $\Delta\vec{v}$, und $\vec{v}_E$ dar.

(Tipp: Betrachte Bild 4.15)

④ Diskutiere mit deinen Mitschülern folgende Behauptungen:

Hannah sagt: „Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit und der Pfeil der Endgeschwindigkeit zeigen bei allen Bewegungen immer in die gleiche Richtung.“

Leonie sagt: „Der Pfeil der Endgeschwindigkeit kann nie länger sein als der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit.“

Aische sagt: „Beim Tennis muss der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit länger sein als der Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit, damit der Ball zum Gegner zurückfliegt.“

⑤ Dein Freund spielt dir einen ziemlich schwachen Ball zu. Du nimmst die Gelegenheit wahr und schmetterst den Ball ins andere Eck der Tischtennisplatte zurück. Zeichne für diese Situation eine mögliche Anordnung der Pfeile von $\Delta\vec{v}$, $\vec{v}_A$ und $\vec{v}_E$ kurz nach dem Stoß.

⑥ Kevin spielt gern Flipper. Er trifft die Kugel ziemlich gut, katapultiert sie damit zurück in den Flipperkasten und bekommt eine Menge Punkte. Zeichne eine Situation ins Heft, wenn Kevin die Kugel trifft und diese wieder zurück in den Kasten fliegt. Zeichne eine mögliche Anordnung der Pfeile von $\vec{v}_A$, $\Delta\vec{v}$, und $\vec{v}_E$ ein.

5. Die Newtonsche Bewegungsgleichung



5.1 Franziska wirkt mit ihrem Schläger auf den Tischtennisball ein.

Franziska übt Tischtennis (Bild 5.1), aber oft fliegt der Ball ganz anders als geplant. Franziska überlegt: Wenn sie mit dem Tischtennisschläger den Ball trifft, ändert sie durch diese Einwirkung seine Bewegung, denn die Einwirkung fügt zur Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ des Balls eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ hinzu. So ergibt sich die Endgeschwindigkeit $\vec{v}_E$ des Balls. Franziska weiß auch, dass die Richtung der Einwirkung und die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit gleich sind. Damit es ihr gelingt die Platte zu treffen, muss ein bestimmter Zusammenhang zwischen Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit bestehen.

5.1 Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit

V1: Lass dir einen Tischtennis-Ball zuwerfen. Schlage unterschiedlich stark gegen den Ball. Versuche, jeweils eine Aussage über die Zusatzgeschwindigkeit zu machen.

V2: Wiederhole den „Kugelstoßversuch“ (V2) von Seite 10. Stoße zwei Mal gegen die rollende Kugel. Versuche, beim zweiten Mal ungefähr doppelt so stark zu stoßen. Kannst du wieder eine Aussage über die Zusatzgeschwindigkeit machen?

Beobachtung: Bei einer stärkeren Einwirkung ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit größer.

Das gilt ganz allgemein:

Je größer die Einwirkungsstärke auf einen Gegenstand ist, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit, die der Gegenstand erhält.

Das bedeutet, bei größerer Einwirkungsstärke ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit länger.

Nun müssen wir den Begriff der Einwirkung noch präziser festlegen: Eine Einwirkung ist gekennzeichnet durch ihre Stärke und ihre Richtung. So wie man Tempo und Richtung mit dem Begriff Geschwindigkeit zusammenfasst, kann man auch die Stärke und die Richtung einer Einwirkung mit einem Begriff bezeichnen:

In der Physik werden die „Einwirkungsstärke“ und die „Einwirkungsrichtung“ zusammengefasst; dafür verwendet man den Begriff **Kraft** (Symbol $\vec{F}$, vom englischen Wort force)

Kraft $\vec{F}$ ——— Einwirkungsstärke

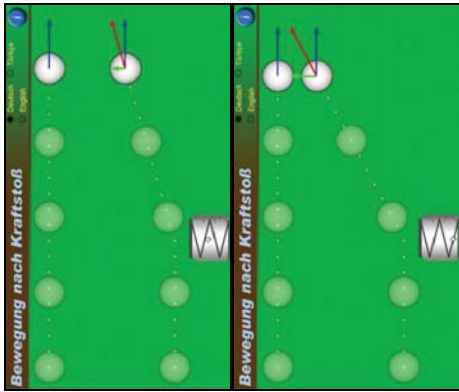
————— Einwirkungsrichtung

Damit können wir formulieren:

Je größer die Einwirkungsstärke einer **Kraft** ist, die auf einen Körper ausgeübt wird, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$, die der Körper erhält.

Das bedeutet, bei größerer Einwirkungsstärke einer Kraft ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit länger.

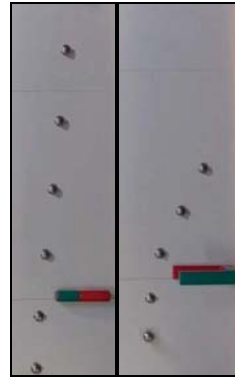
In der Computersimulation „Bewegung nach Kraftstoß“ wird dies veranschaulicht: Lassen wir eine gespannte Feder mit doppelter Kraft gegen eine Kugel schlagen, wird das Tempo von $\Delta\vec{v}$ doppelt so groß (Bild 5.2).



5.2 Unterschiedliche Kräfte bewirken unterschiedliche Zusatzgeschwindigkeiten (grüner Pfeil).

Beispiele

a) **Magnet**
Eine Kugel rollt an einem schwachen Magneten vorbei (Bild 5.3). Dabei ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit kleiner als wenn sie an einem starken Magneten vorbeirollt.



5.3 Eine Kugel rollt an einem schwachen Magneten (oben) und an einem starken Magneten (unten) vorbei.

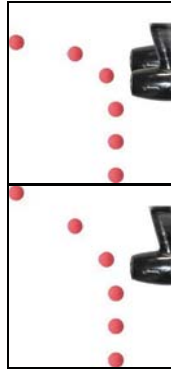
b) Formel 1

Je stärker ein Formel 1-Fahrer auf das Gaspedal tritt, desto größer ist die Kraft auf das Rennauto und desto größer ist auch das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit, die das Auto in jeder Sekunde erhält. Dadurch wird die Endgeschwindigkeit des Rennautos größer.

Es spielt aber auch eine Rolle, wie lange der Fahrer das Gaspedal tritt.

5.2 Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit

V3: Führe wieder einen Versuch mit Kugeln durch. Dieses Mal sollst du aber nicht gegen die Kugel stoßen, sondern sie mit einem Gebläse ablenken (Bild 5.4). Verwende dabei zunächst einen Föhn, und dann zwei gleiche Föhns nebeneinander um die Einwirkungsdauer des Gebläses auf die Kugel zu erhöhen.



5.4 Eine Kugel wird durch den Luftstrom eines Föhns (links) bzw. zwei nebeneinander liegender Föhns (rechts) abgelenkt.

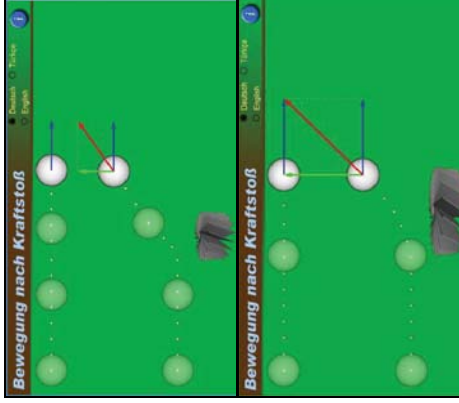
Beobachtung: Das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit wird umso größer, je länger der Luftstrom der Föhns auf die Kugel einwirkt.

Allgemein gilt:

Je länger die **Einwirkungsdauer** einer Kraft ist, die auf einen Gegenstand ausgeübt wird, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \bar{v}$, die der Körper erhält.

Auch dieser Zusammenhang kann durch die Simulation „Bewegung nach Kraftstoß“ veranschaulicht werden. Anstelle der Feder bewirkt hier ein Ventilator eine Kraft auf die Kugel. Der Ventilator kann durch seine unterschiedliche Breite unterschiedlich lange auf die Kugel einwirken. Damit wird das Tempo der Zusatzgeschwindigkeiten unterschiedlich groß (Bild 5.5).

Eine kleine Kraft, die über einen langen Zeitraum aufgeteilt wird, kann die gleiche Zusatzgeschwindigkeit zur Folge haben wie eine große Kraft, die nur einen kurzen Moment lang wirkt.



5.5 Unterschiedliche Einwirkungsduern bewirken unterschiedliche Zusatzgeschwindigkeiten (grüner Pfeil).

Beispiele

a) Seitenwind

Beim Skispringen beeinflusst der Seitenwind den Sprung der Sportler. Wenn nur ein kurzer Windstoss kommt, ist die Zusatzgeschwindigkeit in Windrichtung klein. Durch einen dauerhaften Seitenwind mit gleicher Stärke wie der kurze Windstoss erhält der Skispringer eine große Zusatzgeschwindigkeit in Windrichtung.

b) Formel 1

Wie du gerade erkannt hast, spielt die Dauer der Einwirkung eine wichtige Rolle: Wenn der Formel 1-Fahrer 5 s lang mit Vollgas anfährt, und sein Teamkollege mit dem gleichen Rennwagen 10 s mit Vollgas anfährt, dann ist das Tempo der Endgeschwindigkeit, welche der Wagen des Teamkollegen erreicht, deutlich größer. Daher muss auch das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit dieses Wagens deutlich größer sein.

5.3 Masse und Zusatzgeschwindigkeit

V4: Tritt etwa gleichstark (aber vorsichtig!) gegen einen Fußball und dann gegen einen Medizinball.

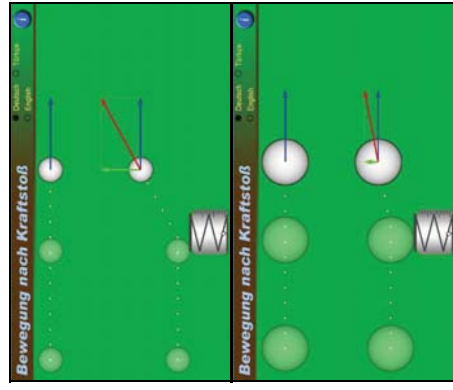
V5: Wiederhole den „Kugelstoßversuch“ (V2) von Seite 10 mit verschiedenen schweren Kugeln. Achte darauf, immer etwa gleich zu stoßen.

Beobachtung: Das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit wird umso größer, je leichter die Kugel ist. Bei einem „massigeren“, schwereren Gegenstand ist bei gleichstarker Einwirkung die Zusatzgeschwindigkeit kleiner. Diese Eigenschaft des Körpers nennt man **Masse** (Symbol m). Man gibt sie in der Einheit 1 kg an.

Allgemein gilt:

Je größer die **Masse** eines Gegenstands ist, auf den eine Kraft ausgeübt wird, desto kleiner ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \bar{v}$, die der Körper erhält.

Das kannst du auch wieder in der Simulation beobachten (Bild 5.6).



5.6 Unterschiedliche Massen bewirken unterschiedliche Zusatzgeschwindigkeiten (grüner Pfeil).

Beispiel

Leichtathletik

Beim Schlagball kannst du viel größere Weiten erzielen als beim Kugelstoßen. Das liegt daran, dass das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit beim leichten Schlagball viel größer ist als bei der schweren Kugel.

5.4 Die Newtonsche Bewegungsgleichung

Du hast jetzt alle Einflussfaktoren kennen gelernt, welche die Zusatzgeschwindigkeit bestimmen. Im Einzelnen weißt du, dass die Kraft (Richtung und Stärke der Einwirkung), die Zeitdauer und die Masse eine Rolle spielen. Weitere Einflussfaktoren gibt es nicht. Alle Einflussfaktoren werden in der **Newtonschen Bewegungsgleichung** (abgekürzt NBG) zusammengefasst:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$$

Sir Isaac Newton hat als erster diese Grundgleichung der Mechanik formuliert. Deswegen wurde sie nach ihm benannt.

Die Newtonsche Bewegungsgleichung

$\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ sagt aus:

1. Wenn auf einen Körper eine Kraft $\vec{F}$ ausgeübt wird, erhält dieser eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ (d.h. die Geschwindigkeit des Körpers ändert sich).
2. Die Richtung der Kraft und die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit sind gleich.
3. Je größer die Einwirkungsstärke der Kraft $\vec{F}$ ist, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ (bei jeweils gleicher Einwirkungsdauer und Masse).
4. Je länger die Einwirkungsdauer Δt ist, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ (bei jeweils gleicher Kraft und Masse).
5. Je größer die Masse m des Körpers ist, desto kleiner ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ (bei jeweils gleicher Kraft und Einwirkungsdauer).

Die Maßeinheit für die Kraft heißt Newton (N). Diese Einheit kann mit Hilfe der Einheiten der Einwirkungsdauer Δt (Sekunde s), der Masse m (Kilogramm kg) und der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$ (Meter pro Sekunde m/s) ausgedrückt werden:

$$1 \text{ N} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}.$$

Also gilt:

$$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

Aufgaben

- ① Gib Beispiele aus dem Alltag für die Aussagen der Newtonschen Bewegungsgleichung an.
- ② Diskutiere den Einfluss der Einwirkungsdauer auf die Zusatzgeschwindigkeit.
- ③ Diskutiere den Einfluss der Masse auf die Zusatzgeschwindigkeit.
- ④ Erkläre, was eine Kraft ist. Gib Beispiele aus dem Alltag an.

6. Anwendungen der Newtonschen Bewegungsgleichung

6.1 Alltagsanwendungen

Im letzten Kapitel hast du die Newtonsche Bewegungsgleichung (NBG) kennen gelernt. Sie lautet: $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$

Du hast auch schon gelernt, dass du mit dieser Gleichung viele Vorgänge in deinem Alltag erklären kannst.

a) Fausten oder Stoppen?

Beim Elfmeterschießen erreicht ein Fußball ein Tempo von 120 km/h. Soll der Torhüter den Ball halten, zurückfausten oder ablenken, um sein Verletzungsrisiko zu minimieren? (Bild 6.1)

Diese Frage kannst du mit der NBG beantworten. Wir nehmen dabei an, dass die Einwirkungsdauer immer gleich ist. Die Masse des Fußballs verändert sich auch nicht. Um herauszufinden welche Kraft der Torhüter auf den Ball ausüben muss, überlegen wir uns welche Zusatzgeschwindigkeit der Ball in den drei Situationen erhält:



6.1 Was soll der Torwart tun?

Die Anfangsgeschwindigkeit ist in allen drei Situationen gleich. Überlege dir mit den Pfeilbildern:

Beim Halten ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit dem Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit entgegengesetzt und genau so lang.

Beim Zurückfausten ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit wieder dem Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit entgegengesetzt, aber länger.

Beim Ablenken hingegen hat der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit eine andere Rich-

tung und ist wesentlich kürzer. Dementsprechend ist in diesem Fall auch die Kraft, die der Torhüter auf den Ball ausübt kleiner. Das Verletzungsrisiko ist im dritten Fall am geringsten.

b) Auffahrunfall eines Autos

Vergleichen wir die Auswirkungen zweier Unfälle: Ein Auto fährt mit 40 km/h gegen eine Betonwand, ein Auto gleichen Typs fährt mit gleicher Geschwindigkeit (gleiches Tempo und gleiche Richtung) in einen Drahtzaun. Beide Autos kommen dadurch zum Stillstand. Gefühlmäßig erwarten wir, dass die Kräfte auf die Autos und ihre Fahrer unterschiedlich sein werden, obwohl Anfangs- und Endgeschwindigkeit in beiden Fällen gleich sind.

Unsere Erwartung trifft tatsächlich zu, denn es gibt einen wichtigen Unterschied: die Einwirkungsdauer Δt der Wand bzw. des Zauns auf das Auto. Das Abbremsen durch den Drahtzaun dauert mehr als 10-mal so lange wie das Abbremsen durch die Betonmauer. Dann ist die durchschnittliche Kraft die der Zaun ausübt 10-mal kleiner als die durchschnittliche Kraft die die Mauer ausübt.

Diese Schlussfolgerung ergibt sich aus der Newtonschen Bewegungsgleichung. Der Wert des Produktes $m \cdot \Delta v$ ist ja für beide Autos gleich groß und gleich dem Wert von $F \cdot \Delta t$. Für den Fall, dass Δt 10-mal größer ist, muss also die Kraft F 10-mal kleiner sein, damit das Produkt den gleichen Wert behält.

c) Knautschzone

Nun kannst du auch verstehen, wie man Autos konstruieren muss, damit das Verletzungsrisiko bei Unfällen für die Insassen möglichst klein ist: Es muss dafür gesorgt werden, dass die Zeit vom Aufahren bis zum Stillstand möglichst lange dauert. Das erreicht man dadurch, dass „Knautschzonen“ eingebaut werden, die sich verformen. Dieser Vorgang des Verformens verlängert die Einwirkungsdauer und verringert dadurch die durchschnittliche Kraft.

Die Fahrgastzelle konstruiert man sehr steif, sie soll sich beim Unfall möglichst nicht verformen, damit die Insassen nicht eingeklemmt werden (Bild 6.2).



6.2 Crashtest mit einem Auto

d) Fahrradhelme

Genau diese Funktion haben auch Fahrradhelme. Sie sorgen dafür, dass die Einwirkungszeit bei einem Stoß gegen deinen Kopf verlängert wird. Dann wirkt eine kleinere Kraft. Gleichzeitig sorgt der Helm dafür, dass die Kraft nicht punktuell auf die Schädeldecke wirkt, sondern sich auf eine größere Fläche verteilt. Wie groß diese Unterschiede sind, kannst du in einem Versuch überprüfen:

Ein rohes Ei wird aus ca. 1 m Höhe fallengelassen. Es zerbricht. Danach wird ein anderes rohes Ei mit einem „Helm“ ausgestattet (Bild 6.3) und ebenfalls aus ca. 1 m Höhe fallengelassen. Das Ei bleibt unbeschädigt.



6.3 Crashtest mit einem Ei

e) Beladenes Auto

Ein leerer Kombi erreicht mit Vollgas in 12 s ein Tempo von 100 km/h. Vollbeladen erreicht er in gleicher Zeit – ebenfalls bei Vollgas – nur 75 km/h. Erkläre mit der Newtonschen Bewegungsgleichung, warum dies so ist.

f) Elastizität von Kletterseilen

Kletterseile sind bis zu einem gewissen Grad elastisch (Bild 6.4). Dies ist deshalb so wichtig, damit die Einwirkdauer groß genug und die Kraft möglichst klein wird, so dass man den Sturz ins Seil ohne schwere Verletzungen überlebt.



6.4 Sicherung mit dem Kletterseil

g) Abgang vom Hochreck

Für den Abgang vom Hochreck erhält der Sportler nach altem Reglement eine besonders hohe Punktzahl, wenn er mit durchgedrückten Knien auf den Boden aufkommt. Jemand behauptet, dass dies für die Gelenke sehr schädlich sei, und dass es schonender sei beim Auftreffen auf den Boden „in die Knie zu gehen“.

Das ist deshalb richtig, weil dadurch die Einwirkungsdauer vergrößert, und deshalb nach der NBG die Kraft verkleinert wird.

h) Kurvenfahrt

Ein Auto fährt um die Kurve. Dabei ändern sich die Richtung, und damit die Geschwindigkeit des Autos. Das Auto erhält also eine Zusatzgeschwindigkeit. Nach der NBG muss eine Kraft auf das Auto ausgeübt werden. Diese Kraft übt die Straße auf das Auto aus.

Bei Glatte kann die Straße keine Kraft auf das Auto ausüben. Man kann nicht um die Kurve fahren.

j) Huskies

Beim Schlittenhunderennen muss der Führer des Schlittens sorgfältig überlegen, wie viele Hunde er vor den Schlitten spannt. Das kannst du wieder mit der NBG verstehen: Je größer die Masse des Schlittens ist, desto größer ist die benötigte Zugkraft, um den Schlitten aus der Ruhe auf die Reisegeschwindigkeit zu bringen.



6.5 Huskies vor dem Schlittenrennen

Aufgaben

① Auch beim Volleyball-Aufschlag gilt die NBG. Beantworte: Wer übt eine Kraft aus? Auf wen wird diese Kraft ausgeübt?

Kannst du Δt , $\Delta \vec{v}$, $\vec{F}$ und m zuordnen?

② Erkläre, warum ein Airbag bei einem Unfall die Überlebenschancen von Fahrer und Beifahrer erhöht!

③ Erkläre, weshalb in der Formel 1 bei einem Rennen Reifenstapel als Bande verwendet werden.

④ Ein Regentropfen trifft gegen ein fahrendes Auto. Natürlich erhält das Auto dadurch eine Zusatzgeschwindigkeit. Warum merkst du davon im Auto nichts?

⑤ Mountainbiker fahren oft „Fullies“. Schau nach was das bedeutet, und erkläre, warum das bei einem Downhill hilfreich ist.

6.2 Das Beharrungsprinzip

Wird auf einen Körper eine Kraft ausgeübt, erhält dieser eine Zusatzgeschwindigkeit. Das sagt uns die Newtonschen Bewegungsgleichung $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$.

Was können wir über die Bewegung eines Körpers aussagen, wenn **keine** Kraft auf ihn ausgeübt wird, wenn also die Kraft null ist?

Dann ist die linke Seite der Gleichung null. Also muss auch die rechte Seite null sein. Und das geht wiederum nur, wenn die Zusatzgeschwindigkeit null ist. Wird keine Kraft auf einen Körper ausgeübt, so erhält dieser auch keine Zusatzgeschwindigkeit. Und das ist gleichbedeutend damit, dass sich die Geschwindigkeit des Körpers nicht ändert!

Jeder Körper behält seine Geschwindigkeit (Tempo und Richtung) bei, solange auf ihn keine Kräfte ausgeübt werden.

Dass das so ist, kannst du in den folgenden Versuchen nachvollziehen:

V1: Auf einer Luftkissenbahn wird ein Gleiter angestoßen. Danach wirkt in Bewegungsrichtung keine Kraft mehr auf den Gleiter d.h. er bewegt sich mit gleich bleibender Geschwindigkeit bis zum Ende der Bahn.

V2: Auf einem langen Wagen steht ein kleines Wägelchen (Bild 6.6). Beide fahren gemeinsam mit konstanter Geschwindigkeit, bis der untere Wagen von einem Bremsklotz angehalten wird.



6.6 Kleines Wägelchen auf langem Wagen

Auf den unteren Wagen wurde durch den Bremsklotz eine Kraft ausgeübt, dadurch hat er eine Zusatzgeschwindigkeit erhalten.

Wurde auf das kleine Wägelchen durch den Bremsklotz auch eine Kraft ausgeübt? Welche Bewegung führt es aus?

Beobachtung: Das Wägelchen fährt mit unveränderter Geschwindigkeit weiter. Da beim Zusammenstoß mit dem Bremsklotz auf das kleine Wägelchen keine Kraft ausgeübt wurde, hat es keine Zusatzgeschwindigkeit erhalten.

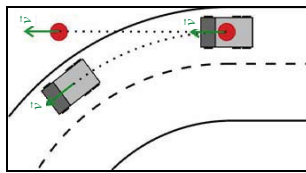
Beispiele

a) *Lastwagen*

Ein Lastwagen hat auf einer ebenen glatten Ladefläche ein ungesichertes Paket liegen.

Wie bewegt sich das Paket weiter, wenn der Lastwagen eine Linkskurve fährt?

Das Paket erhält keine Zusatzgeschwindigkeit d.h. es bewegt sich geradeaus weiter und fällt damit von der Ladefläche (Bild 6.7).



6.7 LKW in der Linkskurve

b) Voyager

Am 5. September 1977 wurde die Raumsonde Voyager 1 gestartet (Bild 6.8). Sie hat außer einigen Steuerdüsen keinen eigenen Antrieb.



6.8 Raumsonde Voyager 1

Dennoch gelang es – aufgrund des Beharrungsprinzips – die Sonde auf eine beeindruckende Reise zu schicken: In den Jahren 1979 und 1980 nahm sie Fotografien von Jupiter und Saturn auf. Inzwischen ist Voyager 1 mehr als 100-mal so weit von der Sonne entfernt wie die Erde. Die Raumsonde kann so lange im All fliegen, da (fast) keine Kräfte auf sie ausgeübt werden. Dadurch erhält sie keine Zusatzgeschwindigkeit und ihre Anfangsgeschwindigkeit ändert sich (fast) nicht. Sie wird noch viele tausend Jahre lang so weiter

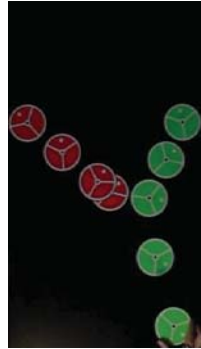
7. Das Wechselwirkungsprinzip



7.1 Eisstockschießen

Eva sieht beim Eisstockschießen zu (Bild 7.1). Sie beobachtet Folgendes:

Ein grüner Eisstock wird auf einen ruhenden roten Eisstock geschossen. Nach dem Zusammenstoß bewegen sich beide Eisstöcke. Eine Stroboskopaufnahme eines Modellversuchs ist in Bild 7.2 zu sehen.



7.2 Eisstockschießen im Modellversuch

„Das ist doch ganz klar“, denkt sich Eva: Die Geschwindigkeit des roten Eisstocks (speziell sein Tempo) hat sich geändert. Der rote Eisstock hat eine Zusatzgeschwindigkeit bekommen, da der grüne Eisstock auf ihn eingewirkt hat. Und: Auch die Geschwindigkeit des grünen Eisstocks (sein Tempo und seine Richtung) hat sich geändert. Also hat auch der grüne Eisstock eine Zusatzgeschwindigkeit bekommen. Aber wer hat auf ihn eingewirkt? Das kann nur der rote Eisstock gewesen sein! Wenn der grüne Eisstock auf den roten Eisstock eine Kraft ausübt, dann übt auch der rote Eisstock auf den grünen Eisstock eine Kraft aus.

Das gilt ganz allgemein:

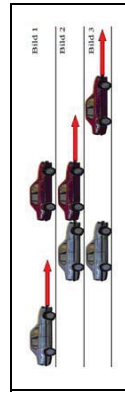
Wenn ein Körper eine Zusatzgeschwindigkeit erhält (und sich seine Geschwindigkeit ändert), hat auf diesen ersten Körper ein zweiter Körper eine Kraft ausgeübt. Dann erhält auch der zweite Körper eine Zusatzgeschwindigkeit (und ändert seine Geschwindigkeit), denn auf den zweiten Körper hat der erste Körper eine Kraft ausgeübt.

Wechselwirkungsprinzip:

Übt ein Körper 1 auf einen Körper 2 eine Kraft $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ aus, so übt Körper 2 auf Körper 1 eine gleichgroße, aber entgegengesetzte gerichtete Kraft $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ aus.

Wichtig: Die beiden Kräfte $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ und $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ greifen an verschiedenen Körpern an! $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ wirkt auf Körper 2 ein, dies führt zu einer Zusatzgeschwindigkeit für Körper 2, $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ wirkt auf Körper 1 ein, dies führt zu einer Zusatzgeschwindigkeit für Körper 1.

V1: Ein silbernes Spielzeugauto fährt auf ein gleich gebautes rotes Spielzeugauto. Du siehst, das silberne Auto bleibt stehen und das rote Auto fährt mit der Geschwindigkeit weg, die das silberne Auto vor dem Zusammenstoß hatte (Bild 7.3). Beide Autos haben eine Zusatzgeschwindigkeit erhalten.



7.3 Versuch mit Spielzeugautos

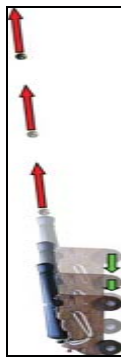
Das silberne Auto hat das rote Auto angestoßen. Dadurch hat das rote Auto eine Zusatzgeschwindigkeit erhalten. Aber auch das silberne Auto hat eine Zusatzgeschwindigkeit bekommen, denn das rote Auto hat auch auf das silberne Auto eingewirkt. Bei beiden Autos hat sich die Geschwindigkeit geändert. Also hat während des Zusammenstoßes jedes Auto eine Kraft auf das andere Auto ausgeübt. Diese Kräfte sind gleich groß und entgegengesetzt.

Beispiele

a) *Fluch der Karibik*

Auch im Kino kann man das Wechselwirkungsprinzip beobachten. Im Film „Fluch der Karibik“ wird die „Black Pearl“ von Soldaten verfolgt. Deshalb lässt Jack Sparrow die Kanone abfeuern (Bild 7.4).

Die Kanone übt eine Kraft auf die Kugel aus. Dadurch erhalten die Kugel eine Zusatzgeschwindigkeit und fliegen nach vorne aus dem Rohr. Aber auch die Kugel üben eine Kraft in entgegengesetzter Richtung auf die Kanone aus. Die Kanone erhält dadurch eine Zusatzgeschwindigkeit und rollt nach hinten.



7.4 Abfeuern einer Kanone

Das Abfeuern einer Kanonenkugel kannst du in einem Versuch nachvollziehen:

Setze dich mit einem Medizinball auf ein Skateboard. Wirf den Medizinball weg.

Du übst eine Kraft auf den Medizinball aus und gibst ihm eine Zusatzgeschwindigkeit, deshalb fliegt er weg. Aber gleichzeitig übt der Medizinball eine Kraft in der entgegengesetzten Richtung auf dich aus und du erhältst eine Zusatzgeschwindigkeit. Deshalb rollst du auf dem Skateboard in die entgegengesetzte Richtung.

b) *Karate*

Du hast dich sicher schon einmal gefragt, wie man mit der bloßen Hand oder Faust ein Holzbrett durchschlagen kann (Bild 7.5). Auch das kannst du mit der NBG und dem Wechselwirkungsprinzip verstehen:



7.5 Bruchtest beim Karate

Ein Karateka möchte eine möglichst große Kraft auf das Holzbrett ausüben. Das ist der Fall, wenn die Hand durch den Aufprall auf das Brett sehr schnell von einem hohen Tempo abgebremst wird: Dann übt das Brett eine große Kraft auf die Hand aus und nach dem Wechselwirkungsprinzip die Hand auf das Brett. Dazu muss das Tempo der Anfangsgeschwindigkeit der Hand möglichst groß sein. Karate-Meistern gelingt das so gut, dass sie nicht nur ein Holzbrett, sondern sogar mehrere Betonplatten durchschlagen können.

c) *Autocrash*

Stelle dir einen Frontalzusammenstoß zwischen einem Lastwagen (LKW) und einem Kleinwagen (PKW) vor. Auch in diesem Fall gilt: Der LKW übt eine Kraft auf den PKW aus, gleichzeitig übt der PKW eine Kraft auf den LKW aus. Diese beiden Kräfte sind gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet.

Aber das Tempo der Zusatzgeschwindigkeiten, die der LKW und der PKW erhalten ist sehr unterschiedlich. Warum?

Für Spezialisten

Die Kraft $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ die der Körper 1 auf den Körper 2 ausübt, ist zwar genauso groß wie die Kraft $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ die der Körper 2 auf den Körper 1 ausübt. Trotzdem ändern sich oft die Geschwindigkeiten der beiden Körper unterschiedlich stark. Woran liegt das?

Aus der NBG wissen wir: Das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit, die ein Körper durch eine Kraft erhält, hängt von der Masse des Körpers ab. Je größer die Masse des Körpers ist, desto kleiner ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit Δv .

Beim LKW ist wegen seiner größeren Masse das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit kleiner.

Aufgaben

① Wie lautet das Wechselwirkungsprinzip? Gib an, mit welchen Versuchen man seine Gültigkeit untermauern kann.

② Gib für die folgenden Situationen jeweils an, ob Kräfte wirken. Bestimme gegebenenfalls welche zwei Körper Kräfte aufeinander ausüben:

- Ein Hundertmeterläufer startet aus dem Startblock.
- Kemal fährt mit einem Ruderboot.
- Ein Hubschrauber startet.
- Ein Rennwagen startet.
- Ein Eisstock gleitet mit gleich bleibender Geschwindigkeit.
- Ein Eisstock prallt gegen einen anderen Eisstock.
- Ein Basketball wird geprellt.
- Eine Rakete hebt ab.
- Beim Boxen schlägt Joe Frazier seinem Gegner Muhammad Ali ins Gesicht.

③ Begründe mit der Bewegungsgleichung und mit dem Wechselwirkungsprinzip, warum die Kräfte beim Versuch mit den Spielzeugautos (V1) gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet waren.

④ Was passiert, wenn man aus einem kleinen Ruderboot heraus an Land springt? Begründe, warum bei einem Kreuzfahrtschiff der Effekt praktisch nicht beobachtet wird.

⑤ Stoßen ein Auto und ein Hase zusammen, sind die Kraft des Autos auf den Hasen und die Kraft des Hasen auf das Auto gleich groß. Warum ändert sich die Geschwindigkeit des Autos aber viel weniger als die Geschwindigkeit des Hasen?



⑥ Jonathan stellt sich mit einer vollen Gießkanne auf sein Skateboard und lässt das Wasser hinter sich auf die Straße laufen, um so vorwärts zu kommen. Überlege, ob das funktioniert.

8. Kraftarten

8.1 Gravitationskraft

Hochgehobene Gegenstände fallen senkrecht zum Erdboden hin, wenn man sie nicht festhält. Wird zum Beispiel ein Apfel nicht mehr vom Ast des Baums gehalten, fällt er ebenfalls senkrecht nach unten (Bild 8.1). Solange der Apfel hängt, ist er in Ruhe. Sobald er fällt erhält er eine Zusatzgeschwindigkeit, also muss ein anderer Körper eine Kraft auf ihn ausüben.

Dieser andere Körper ist die Erde, die alle Gegenstände in ihrer Nähe anzieht.



8.1 Gravitationskraft

Die Erde übt auf alle Gegenstände in ihrer Nähe eine anziehende Kraft aus, die Gravitationskraft genannt wird. Dadurch erhalten diese Gegenstände eine Zusatzgeschwindigkeit in Richtung des Erdbodens.

Beachte: In der Nähe der Erde ist die Gravitationskraft auf einen Gegenstand immer gleich groß.

Betrachte den Pfeil der Gravitationskraft, die auf den fallenden Apfel wirkt (Bild 8.1). Er ist zu jedem Zeitpunkt gleich lang, d.h. die Gravitationskraft auf den Apfel ist immer gleich groß.

Du spürst diese Kraft auch, wenn du einen Gegenstand hochhebst. Je größer die Masse eines Gegenstandes ist, umso größer ist die Gravitationskraft, welche die Erde auf ihn ausübt.

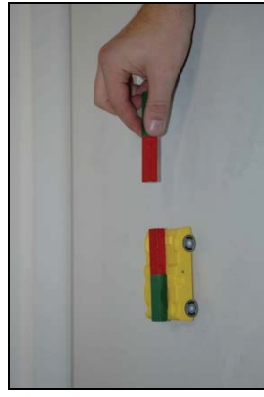
8.2 Magnetische Kraft

Dauermagnete üben auf bestimmte Materialien eine Kraft aus.

V1: Versuche mit einem Stabmagneten eine Eisenkugel, eine Holz- und Papierkugel zu beeinflussen.

Beobachtung: Der Magnet übt eine Kraft auf die Eisenkugel aus, sie erhält eine Zusatzgeschwindigkeit. Der Magnet übt keine Kraft auf die Holz- und die Papierkugel aus. Es kommt auf das Material an, ob ein Dauermagnet eine Kraft auf einen Gegenstand ausübt.

V2: Lege einen Stabmagnet auf ein Wägelchen. Einen weiteren Stabmagnet hast du in der Hand. Nähere dich mit dem einen Magnet in der Hand dem Magnet auf dem Wägelchen (Bild 8.3).



8.3 Der Magnet auf dem Wägelchen erhält eine Zusatzgeschwindigkeit.

Beobachtung: Bringst du zum Beispiel den Nordpol des Stabmagneten in die Nähe des Südpols so ziehen sich die Magneten an: der Magnet auf dem Wägelchen bekommt eine Zusatzgeschwindigkeit. Bringst du dagegen den Nordpol des Stabmagneten in die Nähe des Nordpols, stoßen sich die beiden Stabmagnete ab: der Magnet auf dem Wägelchen bekommt eine entgegen gerichtete Zusatzgeschwindigkeit.

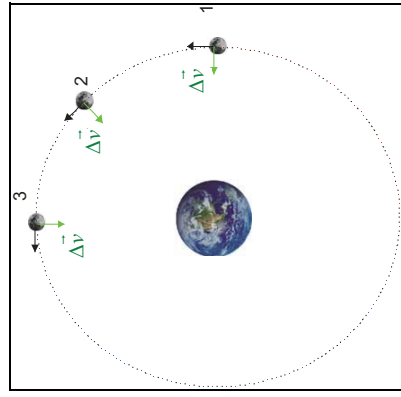
Nicht nur die Erde zieht Gegenstände an, auch der Mond, die Sonne und sogar du selbst: Immer wenn zwei Körper eine Masse haben, ziehen sie sich gegenseitig an. Spürbar wird diese anziehende Kraft aber erst dann, wenn die Masse des Körpers sehr groß ist, wie z.B. die Masse der Erde, der Sonne oder des Mondes.

Beispiel Mondumlaufbahn

Der Mond wird durch die Erde angezogen. Deshalb umläuft der Mond die Erde. Das kannst du dir so erklären (Bild 8.2): Durch die Kraft der Erde auf den Mond, erhält der Mond in allen Punkten seiner Umlaufbahn eine Zusatzgeschwindigkeit in Richtung Erde.

Im Punkt 1 hat der Mond eine Anfangsgeschwindigkeit. Hängst du den Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit (die immer in Richtung Erde zeigt) an den Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit erhältst du die Endgeschwindigkeit des Mondes im Punkt 2.

Im Punkt 2 bewirkt die Erde ebenfalls eine Zusatzgeschwindigkeit auf den Mond in Richtung Erde. So ergibt sich die Geschwindigkeit des Mondes im Punkt 3 usw. Ohne die Gravitationskraft der Erde würde sich der Mond geradlinig weiterbewegen.



8.2 Kreisbahn des Mondes um die Erde

Die Erde (und auch der Mond) werden von der Sonne angezogen und umlaufen deshalb die Sonne.

8.3 Elektrische Kraft

Auch elektrische Ladungen üben Kräfte aufeinander aus. Das kannst du in den folgenden Versuchen überprüfen:

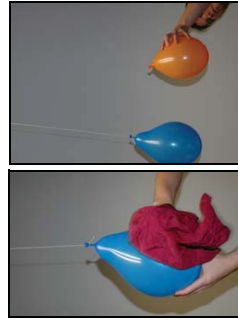
V3: Reibe dein Lineal an einem Wollpullover. Halte nun das Lineal über kleine Papierschnipsel (Bild 8.4)



8.4 Die Papierschnipsel erhalten eine Zusatzgeschwindigkeit.

Beobachtung: Die Papierschnipsel werden von dem Lineal angezogen. Sie erhalten eine Zusatzgeschwindigkeit, d.h. das Lineal hat auf sie eine Kraft ausgeübt.

V4: Hänge einen Luftballon auf und reibe ihn mit einem Wolllappen. Reibe einen zweiten Luftballon mit dem Wolllappen und halte den zweiten Luftballon in die Nähe des ersten Luftballons (Bild 8.5).



8.5 Der blaue Luftballon erhält eine Zusatzgeschwindigkeit.

Beobachtung: Die beiden Luftballone stoßen sich ab. Sie erhalten Zusatzgeschwindigkeiten d.h. sie haben eine Kraft aufeinander ausgeübt.

8.4 Reibungskraft

Wenn du eine Bocciakugel wirfst rollt sie eine Weile. Irgendwann bleibt dann die Kugel liegen (Bild 8.6).



8.6 Auf eine rollende Bocciakugel wirkt die Reibungskraft.

Das ist nichts Außergewöhnliches. Nach unseren alltäglichen Erfahrungen kommen in der Regel Gegenstände, die sich mit einer gewissen Geschwindigkeit bewegen, irgendwann zur Ruhe. Es ändert sich also die Geschwindigkeit der Bocciakugel. Es muss deshalb ein anderer Gegenstand eine Kraft ausgeübt haben, so dass die Bocciakugel eine Zusatzgeschwindigkeit erhält. Wer übt während des Rollens eine Kraft auf die Kugel aus? Es ist die Unterlage, in diesem Fall die Wiese.

Immer wenn sich ein Körper bewegt und er dabei andere Gegenstände berührt (wie zum Beispiel die Unterlage), wirken auf den Körper Kräfte an der Berührungsfäche. Man nennt diese Kräfte **Reibungskräfte**. Reibungskräfte bewirken Zusatzgeschwindigkeiten. Diese können wie bei der Bocciakugel der Anfangsgeschwindigkeit entgegengerichtet sein. Der Körper wird in diesem Fall stetig langsamer.

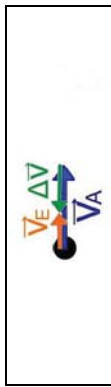
Reibungskräfte werden immer ausgeübt, wenn sich Körper während der Bewegung berühren.

Reibungskräfte sind sehr oft auch nützlich: Ohne Reibung würde der Fahrradreifen beim Treten am Boden durchdrehen. Auch Autos könnten weder starten noch stoppen, noch eine Kurve fahren. Und man könnte auch nicht laufen, wenn der Boden nicht eine Kraft auf die Schuhsohle ausüben würde.

Beispiele

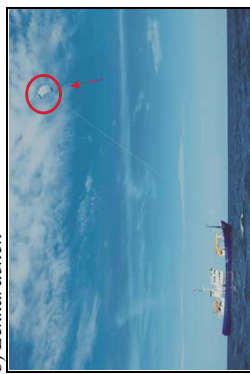
a) Fahrradfahren

Hört man beim Fahrradfahren auf in die Pedalen zu treten, wird das Fahrrad langsamer. Reibungskräfte wirken auf das Fahrrad, das dadurch eine Zusatzgeschwindigkeit erhält. Die Zusatzgeschwindigkeit zeigt dabei in die entgegengesetzte Richtung der Anfangsgeschwindigkeit (Bild 8.7).



8.7 Konstruktion der Endgeschwindigkeit bei Zusatzgeschwindigkeit entgegen der Fahrtrichtung

b) Lenkdrachen



8.8 MS Beaufort mit Lenkdrachen

Um Treibstoff zu sparen, werden im Schiffsverkehr Lenkdrachen eingesetzt. Die Zusatzgeschwindigkeit, die ein Schiff wie die „Beaufort“ (Bild 8.8) dadurch erhält, ist viel geringer als die Zusatzgeschwindigkeit, die ein Drachen-Surfer durch den Lenkdrachen erhält. Das liegt daran, dass die Masse der MS Beaufort viel größer ist als die des Surfers, selbst wenn die Kraft auf den Lenkdrachen jeweils gleich groß ist.

Dass das Schiff durch die ständig vom Lenkdrachen ausgeübte Kraft nicht immer schneller wird, liegt an der Reibungskraft. Wenn Antriebskraft und Reibungskraft gleich groß sind, bewegt sich das Schiff mit gleichbleibender Geschwindigkeit.

Aufgaben

- ① Diskutiere: Übt der Fußball, der auf den Boden fällt eine Kraft auf die Erde aus?

9. Januar 2008, Neue Zürcher Zeitung

Ein schwer berechenbarer Kleinplanet

Neue Erkenntnisse zu den Begegnungen von Apophis mit der Erde

Die künftige Bahn des Planetoiden Apophis ist nur schwer vorherzusagen. Zwar gilt als gesichert, dass der kosmische Gesteinsbrocken im Jahr 2029 in etwa fünf Erdradien Abstand an der Erde vorbeifliegen wird. Dass es bei der folgenden Erdbegegnung 2036 zu einer Kollision kommt, können die Forscher jedoch immer noch nicht ausschließen.

Thorsten Dambeck

Eine Teleskop-Aufnahme des Kleinplaneten Apophis (Bildmitte). (Bild: PD)

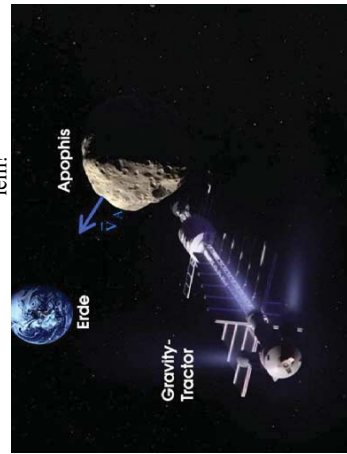
8.9 Zeitungsmeldung zum Asteroiden Apophis

- ④ Was haben sich die Wissenschaftler überlegt, um eine Kollision zwischen Apophis und Erde zu verhindern (Bild 8.9)?

Eine mögliche Lösung wäre der „Gravity Tractor“. Das ist ein sehr schweres Raumschiff, das den Asteroiden eine Zeitlang begleitet. Das Raumschiff übt auf Apophis eine Gravitationskraft aus. Dadurch erhält Apophis eine Zusatzgeschwindigkeit. Nach einer Einwirkungszeitdauer von einem Tag, beträgt diese Zusatzgeschwindigkeit 0,22 Mikrometer pro Sekunde. Dadurch ändert sich die Geschwindigkeit des Asteroiden, und zwar sein Tempo **und** seine Richtung. Durch diese Richtungsänderung verfehlt der Asteroid die Erde.

- a) Benenne die Kraftart, mit der die Wissenschaftler Apophis ablenken wollen!
- b) Warum ist es notwendig, dass der „Gravity Tractor“ Apophis eine Zeitlang begleitet? Begründe mit der Newtonschen Bewegungsgleichung!
- c) In der Skizze (Bild 8.10) bewegt sich Apophis mit der Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_A$ auf den Kollisionspunkt mit der Erde zu. Erkläre anhand der Darstellung, in welche Richtung die Gravitationskraft wirkt. Beschreibe die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit und der Endgeschwindigkeit von Apophis.

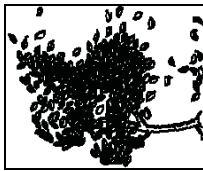
- d) Aktuell sehen die Wissenschaftler noch ein Problem, das sich durch die Wechselwirkung zwischen Apophis und dem „Gravity Tractor“ ergibt. Diskutiere das Problem!



8.10 Mit dem Gravity Tractor kann die Bahn von Apophis geändert werden.

9. Wenn mehrere Kräfte wirken

9.1 Kraftpfeile aneinander hängen



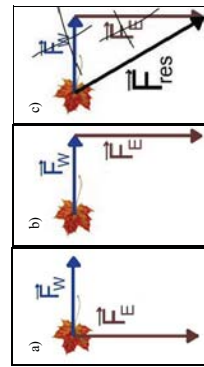
9.1 Blätter im Herbst

Die Blätter fallen im Herbstwind kreuz und quer von den Bäumen (Bild 9.1). Jedes Blatt kommt irgendwann am Boden an. Bei Windstille fällt jedes Blatt senkrecht nach unten. Den Grund dafür weißt du schon: Die Gravitationskraft wirkt auf das Blatt. Weht der Wind von der Seite (wie zum Beispiel in Bild 9.1) übt nicht nur die Erde, sondern auch der Wind eine Kraft auf das Blatt aus.

Wie können wir die Zusatzgeschwindigkeit eines Körpers mit der Newtonschen Bewegungsgleichung bestimmen, wenn zwei Kräfte auf ihn ausgeübt werden?

Dazu müssen wir die beiden Kräfte ersetzen durch eine einzelne Kraft, die **resultierende** Kraft genannt wird. Sie hat die gleiche Wirkung, wie die beiden einzelnen Kräfte zusammen.

Die resultierende Kraft wird grafisch nach dem gleichen Verfahren bestimmt, das du von der Bestimmung der Endgeschwindigkeit schon kennst (Bild 9.2).



9.2 Vorgehen bei zwei Kräften

Vorgehen:

a) Zuerst zeichnest du die **an dem Körper angreifenden** Kräfte ein.

Ähnlich wie die Geschwindigkeit wird auch die Kraft durch einen Pfeil dargestellt: Die Länge des Pfeils gibt die Stärke

der Einwirkung, die Richtung des Pfeils gibt die Richtung der Einwirkung an. (Im Beispiel ist das die Gravitationskraft der Erde $\vec{F}_E$ und die Kraft des Windes $\vec{F}_W$.)

b) Die Kraftpfeile setzt du in gleicher Weise zusammen wie die Geschwindigkeitspfeile, d.h. du hängst den einen Kraftpfeil an die Spitze des anderen Kraftpfeils. Es spielt keine Rolle, mit welchem Pfeil du beginnst. (Im Beispiel wurde der Pfeil von $\vec{F}_E$ an die Spitze des Pfeils von $\vec{F}_W$ gehängt.)

c) Jetzt verbindest du den ersten Pfeilfuß (im Beispiel den Pfeilfuß von $\vec{F}_W$) mit der letzten Pfeilspitze (im Beispiel die Pfeilspitze von $\vec{F}_E$). Diese Verbindung ist der Pfeil der resultierenden Kraft. Du weißt nun sowohl ihre Stärke, als auch ihre Richtung.

Da die resultierende Kraft die gleiche Wirkung hat, wie die beiden einzelnen Kräfte zusammen, musst du nun nur noch die resultierende Kraft betrachten. Du kannst so tun, als ob nur eine einzige Kraft (die resultierende Kraft) auf den Körper ausgeübt wird. Damit du nicht durcheinander kommst, musst du aber die anderen Kräfte im Bild ausstreichen.

Im Beispiel erkennst du durch die resultierende Kraft, dass das Blatt eine Zusatzgeschwindigkeit nach schräg rechts unten erhält.

Die resultierende Kraft:

Finde alle Kräfte, die **auf den Körper ausgeübt werden**. Hänge die Kraftpfeile aneinander. Der Pfeil der resultierenden Kraft ist die Verbindung des Pfeilfußes des ersten Kraftpfeils mit der Pfeilspitze des letzten Kraftpfeils. Du kannst nun so tun, als ob alle Kraftpfeile durch den Pfeil der resultierenden Kraft ersetzt werden. Die resultierende Kraft liefert dir die Zusatzgeschwindigkeit, die der Körper bekommt.

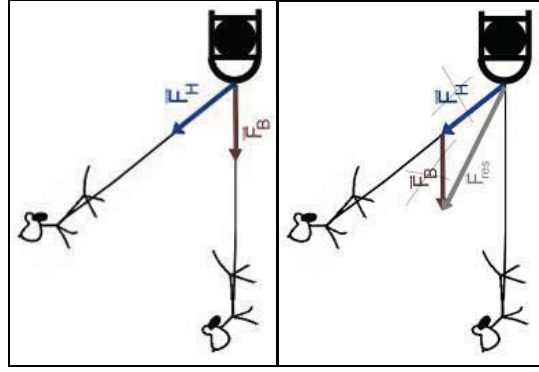
Beispiel

Hundeschlitten



9.3 Hundeschlitten

Sven aus Schweden bindet seine beiden Hunde Bello und Hasko vor einen Schlitten. Die Hunde ziehen den Schlitten mit Sven (Bild 9.3). Plötzlich sieht Hasko einen Hasen. Er zieht für einen kurzen Moment mit großer Kraft nach rechts. In welche Richtung erhält der Schlitten nun durch die beiden Hunde eine Zusatzgeschwindigkeit?



9.4 Resultierende Kraft beim Hundeschlitten

Die beiden Kraftpfeile $\vec{F}_H$ und $\vec{F}_B$ von den Hunden werden aneinander gehängt (Bild 9.4). Man kann sich vorstellen, dass diese Kräfte durch die resultierende Kraft $\vec{F}_{\text{res}}$

ersetzt werden. In Richtung der resultierenden Kraft erhalten Sven und sein Schlitten eine Zusatzgeschwindigkeit.

9.2 Kräftegleichgewicht

Warum erhält die Schale auf dem Tisch keine Zusatzgeschwindigkeit (Bild 9.5), obwohl doch die Gravitationskraft auch auf sie ausgeübt wird?



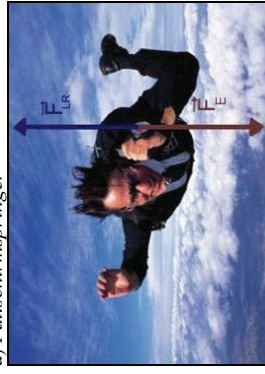
9.5 Obertschale

Du musst zunächst alle Körper finden, die eine Kraft auf die Schale ausüben: Die Erde übt die Gravitationskraft auf die Schale aus und der Tisch übt auch eine Kraft auf die Schale aus. Wenn du diese beiden Kraftpfeile aneinander hängst siehst du, dass die resultierende Kraft gleich null ist.

In diesem Fall, wenn die resultierende Kraft gleich null ist, spricht man von einem **Kräftegleichgewicht**.

Beispiele

a) Fallschirmspringer



9.6 Fallschirmspringer

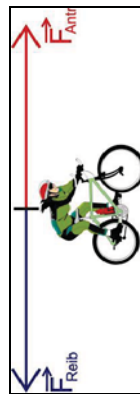
Welche Kräfte wirken auf einen Fallschirmspringer, der seinen Schirm noch nicht geöffnet hat (Bild 9.6)?

Es wirken zwei Kräfte auf ihn: Die Gravitationskraft der Erde und die Reibungskraft der Luft. Sind die beiden Kräfte gleich groß, wird die resultierende Kraft null. Das bedeutet, dass der Fallschirmspringer keine Zusatzgeschwindigkeit erhält. In diesem Fall bleibt seine Geschwindigkeit unverändert.

b) *Fahrradfahrer*

Beim Fahrradfahren kann man erleben, dass das Tempo unverändert bleibt, obwohl man kräftig in die Pedale tritt.

Welche Kräfte wirken auf den Fahrradfahrer: erstens eine Antriebskraft, zweitens eine Reibungskraft (Bild 9.7). Wenn Antriebskraft und Reibungskraft gleich groß sind, ist die resultierende Kraft null. Dann erhält der Fahrradfahrer keine Zusatzgeschwindigkeit, und seine Geschwindigkeit bleibt unverändert.



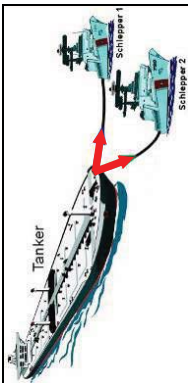
9.7 Kräfte beim Fahrradfahren

Aufgaben

① Diskutiere mit deinem Banknachbarn, welche Kräfte auf einen Skispringer wirken. Diskutiert auch, welchen Einfluss Wind aus unterschiedlichen Richtungen auf die resultierende Kraft auf den Skispringer hat!

② Welche Kräfte wirken auf einen Tennisball im Moment des Abschlags? Welche Kraft ist im Moment des Abschlags am größten? Beschreibe die resultierende Kraft auf den Tennisball.

③ Zwei Schlepper müssen einen Tanker aus dem Hafen ziehen (Bild 9.8). Beide ziehen mit gleich großer Kraft. Zeichne die Situation von oben gesehen in dein Heft. Der Winkel zwischen den Kraftpfeilen ist 50° . Konstruiere den resultierenden Kraftpfeil!



9.8 Abschleppen eines Tankers

④ Erkläre deinem Banknachbar, warum dein Federmäppchen auf dem Schreibtisch keine Zusatzgeschwindigkeit erhält, obwohl doch die Gravitationskraft auf das Federmäppchen wirkt.

⑤ Erkläre, warum der Tisch im Bild 9.5 ebenso wie die Schale im Gleichgewicht ist.

Zur Unterscheidung von Wechselwirkungsgesetz und Kräftegleichgewicht:

Beim Wechselwirkungsprinzip werden Aussagen über Kräfte gemacht, die an unterschiedlichen Körpern angreifen.

Beim Kräftegleichgewicht werden Aussagen über Kräfte gemacht, die am gleichen Körper angreifen.

Beispiel:

Wechselwirkung: Die Erde übt eine Gravitationskraft auf die Schale aus. Diese Kraft greift an der Schale an. Auch die Schale übt eine Kraft auf die Erde aus. Diese Kraft greift aber an der Erde an. Diese beiden Kräfte sind nach dem Wechselwirkungsgesetz gleich groß und entgegengesetzt gerichtet.

Kräftegleichgewicht: Die Erde übt eine Gravitationskraft auf die Schale aus. Auch der Tisch übt eine Kraft auf die Schale aus. Diese beiden Kräfte greifen an der Schale an. Wenn diese beiden Kräfte eine resultierende Kraft gleich null ergeben, ist die Schale im Kräftegleichgewicht.

6. Zusammenfassung

In einer Befragung an allen staatlichen Gymnasien von Rheinland-Pfalz im Herbst 2004 wurden Daten zur digitalen medialen Arbeitsplatzausstattung und zur Physikmediennutzung der Physiklehrkräfte an Gymnasien erhoben (Kapitel 1.1). Es wurde ermittelt, wie die Lehrkräfte den Computer im Physikunterricht einsetzen, welche Art von Software und welche konkreten Softwareprodukte sie bereits eingesetzt haben. Betrachtet man den Unterrichtseinsatz der verschiedenen Arten von Computernutzung, so wurden das Informationsmedium Internet (75 % der Lehrkräfte), Simulationen (69 %) und die PC-Messung (68 %) am häufigsten im Unterricht eingesetzt. Es folgen Interaktive Bildschirmexperimente (51 %), Modellbildung (41 %), Kommunikationsmedium Internet (32 %) und Videoanalyse (22 %). Der geringe Unterrichtseinsatz der Videoanalyse ist auf die mit Abstand geringsten Mediumskenntnisse (55 % haben keine Kenntnisse) und auf den sehr themenspezifischen Einsatz in der Mechanik zurückzuführen. Damit war die Videoanalyse das unbekannteste und am wenigsten eingesetzte Medium trotz der Verfügbarkeit kostenloser Videoanalyseprogramme und Videos. Das Interesse am Einsatz der genannten Medien war aber hoch. Erschwert wurde der Einsatz dadurch, dass es damals in 60 % der Schulen keinen Physikraum mit eigenem Beamer gab.

Ein Teil dieser Fragebogenerhebung zum Computereinsatz im Physikunterricht wurde im Jahr 2009 an den Gymnasien von Unterfranken (in Bayern) wiederholt (Kapitel 1.2). Deshalb wurde ein Vergleich mit Daten aus Rheinland-Pfalz aus dem Jahr 2004 durchgeführt. Es zeigen sich ähnliche Ergebnisse, aber eine intensivere Nutzung: der Computer ist heute ein Standardmedium im Physikunterricht, obwohl es große Unterschiede bei den verschiedenen Einsatzarten gibt. Meist ist der Computer ein Werkzeug in der Hand des Lehrers für Demonstrationzwecke. Es zeigt sich, dass es viele regionale Unterschiede gibt – insbesondere bei den konkret verwendeten Softwareprodukten.

Überraschenderweise gibt es bei drei Informationsquellen der Lehrkräfte zur Videoanalyse (Studium, Lesen und Informationen von Kollegen) keinen signifikanten Unterschied zwischen Nutzern bzw. Nicht-Nutzern. Diesen gibt es nur beim Referendariat und vor allem bei Fortbildungen, was die Bedeutung von Fortbildungen unterstreicht. Fortbildungen sind entscheidend dafür, ob der Computer im Physikunterricht eingesetzt wird und vor allem dafür, welche Software eingesetzt wird. So ist es auch verständlich, dass 15 % der Lehrkräfte angeben, dass sie an einer angebotenen Fortbildung zu Videoanalyse auf jeden Fall teilnehmen würden und weitere 51 % angeben, dass sie daran vielleicht teilnehmen würden.

Mit „measure dynamics“ ist ein neues Programm verfügbar, das eine deutliche Verbesserung darstellt und eine Vielzahl neuer Möglichkeiten bietet (Kapitel 1.3). Dazu gehören vielfältige Exportiermöglichkeiten und die automatische Analyse des bewegten Objektes, die neben der Farbe die geometrische Form und die Größe des zu analysierenden Objektes erkennt. Von

6. Zusammenfassung

Vorteil ist, dass Diagramme in Echtzeit synchron mit dem ablaufenden Video erstellt werden und mehrere Objekte analysiert werden können. Mit wenig Aufwand können dynamisch ikonischer Repräsentation von physikalischen Größen in Form von Säulen oder Vektorpfeilen in das Video eingeblendet werden, Serienbilder erstellt werden und Stroboskopbilder erzeugt werden.

Anfang 2008 wurde von Casio mit der EX F1 die erste auch für Schulen bezahlbare Hochgeschwindigkeitskamera vorgestellt. Weitere Modelle folgten kurz darauf, sodass inzwischen digitale Kameras mit Hochgeschwindigkeitsfunktion bereits für ca. 100 € erhältlich sind. Daraus ergeben sich neuen Möglichkeiten für den Physikunterricht an der Schule (Kapitel 2.1). Ein Nachteil der Videoanalyse lag bisher darin, dass die Framerate (quasi die „Abtastrate“) von Videoaufnahmen bei 25 bzw. 30 Bildern (Messwerten) pro Sekunde fest war und bei einigen Experimenten nicht ausreichte. An dieser Stelle setzt die Hochgeschwindigkeitskamera an, da sie dank der einstellbaren Bildrate eine höhere Abtastrate hat. Damit werden Experimente wie Stöße, waagrechte oder schräge Würfe, fallende Kugeln, Loopingfahrten von Spielzeugautos, das Maxwell-Rad und Schwingungsanalysen exakter und realistischer auswertbar.

Eine Möglichkeit, um im Unterricht interessante, alltagsnahe Themenbezüge herzustellen, bietet der fächerverbindenden Unterricht beim Thema Sport. Reale Sportbewegungen können aufgenommen und mithilfe der Software gemeinsam im Unterricht aufgearbeitet werden (Kapitel 2.2). Unterrichtsbeispiele erstrecken sich von leichtathletischen Disziplinen bis hin zum Fußball und können in vielfältiger Weise sowohl im Physik- als auch im Sportunterricht eingesetzt werden: So kann zum Beispiel der Stabhochsprung herangezogen werden, um Energieumwandlungsprozesse in einem sportlichen Kontext darzustellen, wohingegen der Weitsprung eine alternative Anwendung des schiefen Wurfes bietet. Andere Sportarten wie etwa der Schleuderball- und der Hammerwurf bieten weitere Ansatzpunkte. Die auf Kontrast und Bewegung basierende automatische Analyse der Software trägt dabei zu einer leichteren Umsetzung im Unterricht bei. Durch neuartige Darstellungsmöglichkeiten wie Stroboskopbilder, Einblenden von Vektoren oder Serienbilder werden manche Betrachtungen erst möglich. Mithilfe berechneter Fitfunktionen kann die real gemessene Bewegung außerdem mit dem zugrunde gelegten physikalischen Modell verglichen werden.

Eine weitere Möglichkeit, um den Unterricht stärker auf den Alltag von Schülern zu beziehen und einen Bezug zum menschlichen Körper herzustellen, ist das Behandeln von alltäglichen Bewegungen, wie z.B. Gehen, Laufen, Treppensteigen oder einfachen Sprüngen. Die Erfassung der physikalisch relevanten Größen entsprechender Bewegungen der Schüler kann heute durch verschiedene computerbasierte Messwerterfassungsmöglichkeiten erfolgen, wie Kraftmessplatte, Funk-3D-Beschleunigungssensoren oder Videoanalyse, die unterschiedliche Vor- und Nachteile bei diesem Thema haben. Eine besondere Möglichkeit ist die Darstellung von Sensordaten in Videos mit Hilfe des Videoanalyseprogramms „measure dynamics“. Durch

6. Zusammenfassung

den einfachen Import von Datentabellen können die Daten von Beschleunigungssensoren oder der Bodenreaktionskraftmessung in einem Video mit dynamisch ikonischen Repräsentationen angezeigt werden. Dazu muss man eine Bewegung filmen und gleichzeitig mit einem entsprechenden Sensor messen und danach die Messdaten in das Videoanalyseprogramm importieren, wo sie im Video auf vielfältige Weise dargestellt werden können. Das heißt, hier wird das Videoanalyseprogramm nur als Darstellungsprogramm von Sensor-Messwerten verwendet.

Da sich Vergnügungsparks immer größerer Beliebtheit erfreuen, sind Fahrgeschäfte in Freizeitparks geeignete Lernanlässe im Mechanikunterricht. Hierzu wurden bei einigen Fahrattraktionen des Europa-Parks in Rust Messungen mit Beschleunigungs- und GPS-Sensoren sowie Videoanalysen durchgeführt und verglichen, beispielsweise eine Kreisbewegung, eine Schiffschaukel und Achterbahnfahrten mit Looping und Hügelfahrt (Kapitel 2.3). Ein Vorteil der Videoanalyse ist, dass es sich dabei immer um eine objektive Betrachtung der Bewegung aus Sicht eines außenstehenden, ruhenden Beobachters handelt. Eine Schwierigkeit ist jedoch häufig, einen geeigneten Aufnahmeort für die Kamera zu finden, so dass eine zweidimensionale Bewegung ohne Verzerrung gefilmt werden kann. Ein weiterer Vorteil der Videoanalyse ist, dass bei ausgedehnten Objekten mehrere verschiedene Punkte des Objektes betrachtet werden können. Die GPS-Messung im Freizeitpark erwies sich dagegen nur bedingt als möglich. Bei Attraktionen mit kleinen Ortsänderungen bzw. mit (Teil-)Überdachung sind die Messungen nicht sinnvoll bzw. nicht möglich. Beschleunigungssensoren haben den Vor- bzw. Nachteil, dass sie dreidimensional messen. Das wesentliche Problem ist, dass sich die Lage des Sensors ändern kann und man damit die Problematik des Bezugssystem hat.

Schülerlabore als außerschulischer Lernort werden immer verbreiteter. Vor diesem Hintergrund haben Schülerinnen und Schüler der siebten Jahrgangsstufe (Realschule und Gymnasium) in einem Lehr-Lern-Labor die wichtigsten Grundbegriffe der Mechanik anhand zweidimensionaler Bewegungen selbst erkundet (Kapitel 2.4). In spielerischen Experimenten in verschiedenen Stationen, z.B. mit Carrera-, Darda- und Spielzeugeisenbahn, wurden Bewegungsabläufe betrachtet und gefilmt. Mit Hilfe des Videoanalyseprogramms „measure dynamics“ können die Schüler selbst die aufgezeichneten Filmsequenzen analysieren und die Geschwindigkeit sowie die Beschleunigung visuell durch Vektorpfeile sichtbar machen.

Die anfänglichen Bedenken, die Schüler mit der Technik der Videokameras und des Videoanalyseprogramms zu überfordern, wurden schnell widerlegt. Der Umgang mit der Kamera fiel den Schülern erstaunlich leicht und sie haben sich schnell in das intuitiv bedienbare Programm „measure dynamics“ eingearbeitet. Das Lehr-Lern-Labor hat den Schülern gut gefallen und die Mehrheit der Schüler möchte gerne ein weiteres Schülerlabor besuchen. Auch begleitende Lehrkräfte wurden dadurch motiviert, selbst einmal die Videoanalyse im Unterricht einzusetzen und dazu selbst Videos mit Schülern aufzunehmen.

6. Zusammenfassung

Auch außerhalb der Mechanik gibt es Anwendungen für die Videoanalyse. Der Bierschaumzerfall wird häufig als Analogon zum radioaktiven Zerfall verwendet. Ein Literaturüberblick zeigt, dass der Bierschaumzerfall fachlich komplex ist und dass verschiedene Veröffentlichungen zu unterschiedlichen mathematischen Beschreibungen finden (Kapitel 3.1). An dem Messbeispiel von Leike wird gezeigt, wie man eine mathematische Gleichung findet, was man dabei beachten muss und wie man verschiedene Modelle bewerten kann. Schließlich wird ein Bierschaumzerfall mittels Videoanalyse studiert und die Messung kritisch beleuchtet. Insgesamt zeigt sich, dass der biexponentielle Zerfall ein brauchbares Modell für den Bierschaumzerfall ist.

1905 beendete Einstein seinen Artikel über die Brownsche Molekularbewegung mit dem Wunsch „Möge es bald einem Forscher gelingen, die hier aufgeworfenen, für die Theorie der Wärme wichtigen Fragen zu entscheiden!“. Mit Hilfe der Videoanalyse kann die Richtigkeit der Annahmen Einsteins im Experiment gezeigt werden. Dazu werden drei Möglichkeiten für ein Modellgas bzw. für ein Modell der Brownschen Bewegung vorgestellt (Kapitel 3.2). Dabei wird aufgezeigt, wie diese jeweils mittels Videoanalyse qualitativ und sogar quantitativ ausgewertet werden können, um so die Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung zu gewinnen und Einsteins Theorie zu bestätigen: Die Abhängigkeit des mittleren Verschiebungsquadrats oder des mittleren Geschwindigkeitsquadrats von der Temperatur lassen sich einfach und überzeugend erkennen. Da es sich um statistische Verteilungen handelt, ist ein langes Video mit einer großen Bildanzahl nötig und dafür ist die automatische Analyse unabdingbar.

Der Unterricht zur Radioaktivität steht vor dem Problem, dass wenig motivierende Schulexperimente möglich sind. Die Wilsonsche Nebelkammer ist auf Grund ihrer kurzen Sensitivität für den Schulunterricht ungeeignet im Gegensatz zu einer kontinuierlichen Diffusions-Nebelkammer, die jedoch sehr teuer ist. Damit Lehrkräfte oder Schüler selbst eine kostengünstig bauen können, wurde eine Nebelkammer mit Peltier-Elementen konstruiert und ausführliche Bauanleitungen erstellt (Kapitel 3.3). Schon der Nulleffekt genügt hier, um Bahnspuren zu beobachten.

Bei dieser kontinuierlichen Diffusions-Nebelkammer sind zwei Einsatzmöglichkeiten der Videoanalysesoftware „measure dynamics“ möglich (Kapitel 3.3): Bringt man Radongas in die Kammer ein, zeichnet man die Nebelspuren des Radonzerfalls mit einer Videokamera auf und stellt im Videoanalyseprogramm ein, dass man nur jedes 50-te oder 100-te Bild sehen will, sieht man beim Abspielen des Videos durch den so erzielten Zeitraffer qualitativ die Abnahme der Aktivität. Für eine quantitative Auswertung zählt man die Spuren in jedem 100-ten Frame oder man zählt mithilfe der Zählfunktion in den einzelnen Bildern, wobei man jedes 100-te hat exportieren lassen. Mit dem Videoanalyseprogramm ist auch das Ausmessen der Länge der Spuren einfach möglich und aus der gemessenen Spurlänge kann man dann die Geschwindigkeit und die kinetische Energie von α -Teilchen bestimmen.

6. Zusammenfassung

Um einen Laserstahl in Luft im Physikunterricht sichtbar zu machen, ist der Einsatz einer Verdampfer-Nebelmaschine einfach und führt zu beeindruckenden Ergebnissen (Kapitel 3.4). Solche Nebelmaschinen sind von Bühnen, aus Discos und von privaten Partys bekannt und kosten ab 30 €. Anwendungen im Unterricht sind beispielsweise Anordnungen von Planspiegeln, das Sichtbarmachen von Schwingungen mit einem Drehspegel, das Michelson-Interferometer und die Beugung an Spalten und am Gitter. Bei der Beugung am Gitter kann eine quantitative Auswertung mit einem Videoanalyseprogramm geschehen: Macht man ein Foto, kann man in einem Videoanalyseprogramm wie z.B. „Coach 6“ oder „measure dynamics“ direkt die Winkel im Bild mit der Software sehr genau ausmessen.

Vektorielle Größen spielen in der Physik und speziell in der Mechanik eine wichtige Rolle. Wie bereits seit Jahrzehnten von vielen Didaktikern gefordert, ist es zum Verständnis der Mechanik nötig, im Mechanikunterricht mit zweidimensionalen Bewegungen zu beginnen, um so Fehlvorstellungen bei den Schülern zu reduzieren oder zu verhindern. Dazu braucht man aber ein Messwerterfassungssystem für zweidimensionale Bewegungen, das nicht die beiden Komponenten von Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung getrennt angibt, sondern diese Größen als Pfeile anzeigt. Dies ist in der Videoanalysesoftware „measure dynamics“ möglich, in der die Größen durch Pfeile im Video eingeblendet werden können.

An der Universität Würzburg wurde in einem Mathematikvorkurs vor Beginn der Vorlesungszeit untersucht, inwieweit Physikstudierende des ersten Semesters grundlegende Fähigkeiten im Umgang mit Vektoren aus der Schule mitbringen (Kapitel 4.1). Dazu mussten sie vor Studienbeginn einerseits mathematische Aufgaben und Aufgaben mit physikalischem Kontext aus der Statik bearbeiten. Andererseits wurden Aufgaben zum vektoriellen Verständnis der Beschleunigung und Kraft gestellt. Die Ergebnisse bei der graphischen Addition und Subtraktion von Vektoren sind besser als dies vorher aufgrund von Erfahrungen in Übungen erwartet wurde. Aber es zeigte sich, dass die Studienanfänger große Probleme bei der Richtung der Beschleunigung und der Kraft haben. Somit zeigt auch diese Untersuchung erneut das Scheitern des Konzeptes des herkömmlichen Physikunterrichts, die Kinematik und Dynamik an eindimensionalen Bewegungen einzuführen und später auf mehrere Dimensionen zu erweitern.

In vielen Lehrerfortbildungen hat sich herausgestellt, dass Lehrkräfte kaum Vorstellungen von den Schülervorstellungen haben, aber dieses Thema sehr wichtig finden, sobald sie etwas davon erfahren. Dadurch verbessern sich ihre Überzeugungen bezüglich Schülervorstellungen und die Handlungen der Lehrkräfte. Dennoch gab es lange kaum Erhebungen, welche Vorstellungen Lehrkräfte über die Vorstellungen der Schüler haben. Im Vorfeld einer Lehrerfortbildung ergab sich die Möglichkeit, die Physikgymnasiallehrer von Unterfranken (245 teilnehmende Lehrkräfte) mit einem Fragebogen zu befragen (Kapitel 4.2). In dieser Untersuchung sollte zum einen ermittelt werden, ob Physiklehrkräfte typische Schülerfehlvorstellungen kennen und zum anderen, welche Vorstellungen sie bezüglich der Häufigkeit ihres Auf-

6. Zusammenfassung

treten bei typischen Fragestellungen haben (vor und nach dem entsprechenden Unterricht). Interessant ist insbesondere, dass Lehrkräfte die Schwierigkeiten der Schüler im Umgang mit Beschleunigungsgraphen bei eindimensionalen Bewegungen kennen, aber keine Vorstellung haben von den Problemen bei zweidimensionalen Bewegungen, wie sie nach einem traditionellen Unterricht vorhanden sind. Man kann vermuten, dass Lehrkräfte denken, Schüler könnten ihr Wissen über eindimensionale Bewegungen auf zwei Dimensionen erweitern, was aber nicht der Fall ist.

Ein Unterrichtsgang, der in der Sekundarstufe II über zweidimensionale Bewegungen in die Kinematik einsteigt und dabei die Videoanalyse konsequent als Messmöglichkeit verwendet, wurde erstmals mit der Videoanalysesoftware „Coach 5“ durchgeführt (Kapitel 4.3). An drei zweidimensionalen Bewegungen, einer allgemeinen Fahrradfahrbewegung, einem Basketballkorbwurf und der Rotorbewegung einer Windkraftanlage lernen Schüler Bewegungen zu erfassen und mit Vektoren zu beschreiben. Das funktioniert, obwohl es damals noch kein Videoanalyseprogramm gab, das direkt Vektorpfeile in das Video einzeichnen kann. Die traditionell im Vordergrund stehenden eindimensionalen einfachen Bewegungsformen ergeben sich aus den Projektionen von Wurf- und Kreisbewegung auf die Koordinatenachse.

Im neuen bayerischen Gymnasiallehrplan werden die kinematischen Größen sowie die Newtonschen Gesetze bereits in der siebten Jahrgangsstufe kennen gelernt, während Diagramme und Bewegungsfunktionen erst in späteren Jahren behandelt werden. Dafür wurde ein entsprechender Unterricht konzipiert und durchgeführt, bei dem über zweidimensionale Bewegungen in die Mechanik eingeführt wurde und die Darstellung der Größen durch Pfeile betont wurde (Kapitel 4.4). Hierbei wurde besonders darauf geachtet, dass die Schüler selbst aktiv beteiligt sind. Außerdem wurden verschiedenste Medien vom Spielzeug bis zu Videos und Simulationen eingesetzt. Eine zentrale Veranschaulichung in diesem Unterrichtskonzept waren Videoprojekte, in denen die kinematischen Größen durch Pfeile dynamisch auf einem gefilmten Eisenbahnzug im Video dargestellt wurden. Da es damals noch keine Software gab, mit der das einfach möglich war, wurde vor dem Unterricht die Bewegung gefilmt und in dem Videoanalyseprogramm AVA analysiert. Dann wurde vor dem Unterricht in der Software PAKMA das Video eingebunden und die Pfeile gemäß den Daten der Videoanalyse darüber gezeichnet, was im Unterricht gezeigt und besprochen wurde.

Das Einblenden von Ortsmarken und verschiedener bewegter Pfeile im Video ist in „measure dynamics“ einfach mit wenigen Mausklicks möglich (Kapitel 4.5). So können im Video Größen sichtbar gemacht werden, die sonst für das Auge nicht fassbar sind, z.B. die Größen „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“. Das erleichtert die Betonung des vektoriellen Charakters dieser Größen und damit die Einführung kinematischer Grundgrößen an Hand zweidimensionaler Bewegungen.

6. Zusammenfassung

Für den Mechanikunterricht gibt es verschiedene Sachstrukturen. Traditionell wird im Mechanikunterricht bei der Einführung der Kraft der statische Aspekt betont. Die dynamischen Aspekte sowie die kinematischen Größen werden dann meist nur anhand eindimensionaler Bewegungen behandelt. Seit knapp 40 Jahren werden jedoch bereits andere Sachstrukturen formuliert und weiterentwickelt – die aber bisher z.T. kaum Eingang in die Praxis gefunden haben. Da Schulbücher als „heimliche Lehrpläne“ gelten, wurden Physikschulbücher analysiert.

Bei einer Analyse von Physikschulbüchern der 7. und 8. Jahrgangsstufe der bayerischen Realschule (Kapitel 4.6.1) zeigten sich erheblich Unterschiede in den Schulbüchern, nicht nur bezüglich der Gestaltung, sondern insbesondere in der Sachstruktur und dem Berücksichtigen von bekannten Fehlvorstellungen. In den Schulbüchern eines Verlages wird auf die Schülervorstellungen eingegangen und es werden neuere Sachstrukturen zumindest ansatzweise integriert. Das zeigt sich vor allem durch die behandelten zweidimensionalen Bewegungen und der damit verbundenen Hervorhebung der Richtung einer Bewegung, durch die konsequente Unterscheidung von Schnelligkeit und Geschwindigkeit, die Betonung der Geschwindigkeit als vektorielle Größe, die Verwendung von Ortsänderungs- und Geschwindigkeitsänderungsvektoren und den geforderten Einsatz von Computermesswerterfassung und Videoanalyse.

Bei einer Analyse von sechs Physik-Schulbüchern für die 7. Jahrgangsstufe in Bayern wurden fünf Bücher von Schulbuchverlagen und das Buch aus dem Forschungsprojekt von Wiesner/Wilhelm/Tobias/Waltner/Hopf verglichen (Kapitel 4.6.2). Einige Werke sind stark quantitativ ausgerichtet und setzen auf Graphen und auf Messtabellen. Die Messung der Textlesbarkeit weist zudem auf eine schwer verständliche Sprache hin. Die Sachstruktur der fünf zugelassenen Werke ist sehr ähnlich, aber der Anteil statischer Aspekte ist unterschiedlich. Das Schulbuch aus dem Forschungsprojekt benutzt eine völlig abgeänderte Sachstruktur, ist aber trotzdem lehrplankonform. Das Buch stellt zudem ein qualitatives Verständnis in den Vordergrund und verzichtet konsequent auf Graphen, mathematische Gleichungen, Messtabellen und Rechenaufgaben. Stattdessen wird hauptsächlich auf qualitative Denkaufgaben und logische Bilder mit Pfeilen für die physikalischen Größen zurückgegriffen und in diesem Zusammenhang die Videoanalyse verwendet.

Bisherige Studien zeigten, dass sich verschiedene Unterrichtsmethoden nur wenig auf die Lernleistung der Schüler auswirken, die Auswirkungen unterschiedlicher Sachstrukturen sind allerdings – wie verschiedene Indizien nahe legen – schwerwiegender. In einer vergleichenden Untersuchung wurde der Einfluss der Sachstruktur auf das Lernen der Newtonschen Mechanik untersucht (Kapitel 4.7.1). Der traditionelle Zugang zur Mechanik anhand linearer Bewegungen wird mit einer Sachstruktur verglichen, die von zweidimensionalen Bewegungen direkt zur Dynamik überleitet (Kapitel 4.7.2).

6. Zusammenfassung

Seit den Anfängen des Physikunterrichts bis mindestens in die 1980er Jahre wurde in der Sekundarstufe I über die Statik in die Mechanik eingeführt und in der Sekundarstufe II wurde erst Kinematik, dann Dynamik behandelt – aber fast nur eindimensional. In den letzten beiden Jahrzehnten wurde die Statik zurückgedrängt, so dass nun in der Sekundarstufe I die eindimensionale Kinematik dominiert und in der Weiterführung die Beschleunigung und die Gleichung $F = m \cdot a$ eine wichtige Rolle spielen. Neben der statischen und eindimensional-kinematischen Einführung gibt es seit den 1970er Jahren zwei Zugänge, die stark dynamisch orientiert sind: Der Karlsruher Physikkurs mit Impulsströmen, der bisher im Bereich Mechanik keine empirischen Erfolge vorweisen kann, und das Wiesnersche Kraftstoßkonzept, das empirische Erfolge vorweisen kann. Dieses wurde weiterentwickelt und mit neuen Medien wie der Videoanalyse aufbereitet (Kapitel 4.7.2). Grundideen sind, die Geschwindigkeit vektoriell anhand zweidimensionaler Bewegungen und die Mechanik dynamisch über die Kraftstoßgleichung $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$ einzuführen, wobei die Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}$ als eigenständige Größe anstelle der Beschleunigung eingeführt wird. Geeignete Möglichkeiten, eine Bewegung im Rahmen des Schulunterrichts aufzuzeichnen und adäquat darzustellen, bietet die Erstellung von Videos, in die mit Hilfe einer Videoanalysesoftware Geschwindigkeits- und Geschwindigkeitsänderungspfeile eingezeichnet werden, sowie die Erstellung von Stroboskopbildern, die ebenso mit Hilfe einer Videoanalysesoftware aus Videos möglich ist. Das Mechanikkonzept ist damit eine Kombination des Wiesnerschen Kraftstoßkonzeptes mit den Möglichkeiten der Videoanalyse und mit dynamisch dargestellten Vektorpfeilen.

Für die Vergleichsstudie wurden ein Lehrtext (siehe 5. Anhang), Videoaufnahmen von Experimenten, passende Videoanalysen sowie ein Simulationsprogramm produziert. Zur Überprüfung der Wirksamkeit der verschiedenen Sachstrukturen wurde in einer Kooperation der Universitäten Würzburg, München und Wien in den Schuljahren 2007/08 und 2008/09 eine vergleichende Untersuchung durchgeführt (Kapitel 4.7.1). Verfolgt wurden dabei neben der Wissensentwicklung der Schülerinnen und Schüler deren Interesse und selbstbezogene Kognitionen. Um den Einfluss verschiedener Lehrpersonen möglichst auszuschalten, unterrichtete jede an der Hauptstudie beteiligte Lehrkraft sowohl in der Kontroll- als auch in der Experimentalgruppe. In allen Klassen wurden die Verläufe von Wissen und nicht kognitiven Merkmalen im Prä-Post-Follow-Up-Design verfolgt. Weder für den Unterricht in der Kontrollklasse noch für den in der Treatmentklasse wurden den Lehrkräften Vorschriften zur Durchführung gemacht. Die Ausgestaltung der einzelnen Stunden oblag der einzelnen Lehrperson. Zur weiteren Kontrolle des Unterrichtsgeschehens wurden die Lehrpersonen aber jeweils aufgefordert, ein Unterrichtstagebuch zu führen. Es wurde erwartet, dass durch dieses die methodische Gestaltung des Unterrichts über den Untersuchungszeitraum nur wenig variiert und z. B. das Ausmaß an schüleraktivierenden Unterrichtsmethoden oder die Verwendung des Experiments relativ konstant bleibt.

6. Zusammenfassung

In einer Kontrollgruppe im Raum München wurde 2008 die Mechanik in herkömmlicher Weise unterrichtet; die gleichen Lehrkräfte unterrichten 2009 nach dem veränderten Konzept (Treatmentgruppe). Um die Lehrermaterialien und das Schülerbuch vorher auf Unterrichtstauglichkeit zu testen, hat eine Erprobungsgruppe von 14 Lehrkräften in 19 Klassen in Unterfranken nach dem veränderten Konzept unterrichtet. Die Rückmeldung ihrer Erfahrungen führte zu einer Überarbeitung des Schülertextes. Die Schüler der Erprobungsgruppe zeigen im Posttest signifikant mehr fachliches Verständnis, signifikant mehr Interesse am Fach Physik und eine signifikant höhere Selbstwirksamkeitserwartung (Kapitel 4.7.3). Aber es werden zwei Gruppen verglichen, in denen verschiedene Lehrkräfte an verschiedenen Orten zu unterschiedlichen Jahreszeiten die Mechanik unterrichtet haben.

Interviews von Schülerinnen und Schülern in der Erprobungsgruppe zeigten, dass diese den zweidimensionalen Geschwindigkeitsbegriff gut erfasst haben, d.h. dass die Geschwindigkeit sowohl Tempo als auch Richtung beinhaltet (Kapitel 4.7.4). Dies führt zu erstaunlichen Ergebnissen im Hinblick auf die Kurvenfahrt mit konstantem Tempo, bei der den Befragten klar war, dass sich die Geschwindigkeit immer ändert, da sich die Richtung der Geschwindigkeit ändert.

Bei genauerer Betrachtung der tabellarischen Tagebücher der Lehrkräfte in der Erprobungsgruppe ist auffällig, dass die konzeptspezifischen Inhalte unterschiedlich viel Zeit einnahmen (Kapitel 4.7.4). Die Frage wurde in der Hauptstudie daher detaillierter untersucht und als Erhebungsinstrument zusätzlich das Videographieren einer Unterrichtsstunde eingeplant, um Informationen über die Konzepttreue in der unterrichtlichen Umsetzung zu erhalten. Nach Abschluss des Mechaniklehrgangs wurden die beteiligten Lehrkräfte der Erprobungsstudie in Leitfadeninterviews zu ihrer Bewertung des Konzeptes befragt. Alle zwölf befragten Lehrkräfte hielten den zweidimensionalen Geschwindigkeitsbegriff mit Tempo und Richtung für sinnvoll und für verständlich, was sie in ihren Unterricht adaptieren wollen. Im Hinblick auf die Newtonsche Bewegungsgleichung ergab sich ein etwas differenzierteres Bild, denn sechs Lehrkräfte wollen wieder so unterrichten, vier Lehrkräfte wollen es nur mit Modifikation und zwei nicht weiterführen. Dabei zeigte sich: Je größer die Kenntnisse konzeptueller Lernschwierigkeiten waren, desto weitgehender wurde das Konzept akzeptiert.

Im Rahmen der Studie wurde das zweidimensional-dynamische Unterrichtskonzept für die 7. Jahrgangsstufe des Gymnasiums evaluiert (Kapitel 4.7.5). Zehn Lehrpersonen unterrichteten im Sommer 2008 als Kontrollgruppe nach dem herkömmlichen Konzept und im Sommer 2009 als Treatmentgruppe nach dem neuen Konzept. Bei den vergleichbaren Aufgaben zum Grundverständnis ergibt sich zwischen Kontroll- und Treatmentgruppe ein höchst signifikanter Unterschied mit mittlerer Effektstärke. D.h. durch den Unterricht nach zweidimensional-dynamischem Lehrgang wurde ein signifikant besserer Lernerfolg erreicht. In Kontroll- und Treatmentgruppe sind die Jungen erwartungsgemäß den Mädchen im Vorwissen hoch bzw. höchst signifikant überlegen. Diese Unterschiede bleiben in der Kontrollgruppe bestehen oder

6. Zusammenfassung

wachsen sogar an, während es in der Treatmentgruppe nach dem Unterricht keine signifikanten Unterschiede mehr gibt, die Mädchen also aufholen. Im Hinblick auf die nicht-kognitiven Variablen „Interesse“ und „Selbstkonzept“ konnten keine Effekte durch die Zugehörigkeit der Lernenden zur Kontroll- bzw. zur Treatmentgruppe festgestellt werden. Allerdings fühlen sich Schüler der Treatmentgruppe höchst signifikant kompetenter beim Einzeichnen einer Kraft, beim Vorhersagen einer Bewegung und beim Erklären einer Bewegung, während sich Schüler der Kontrollgruppe selbst signifikant kompetenter beim Rechnen und beim Diagramme-Lesen fühlen, was kein Inhalt des Lehrplans ist.

In der Kontrollgruppe korreliert die Zahl der Mechanik-Lernschwierigkeiten, die eine Lehrkraft im Interview nennen kann, wie erwartet positiv mit dem Lernerfolg, d.h. Schüler von Lehrkräften mit hohen Kenntnissen zeigen mehr Verständnis. Überraschenderweise lag hier aber in der Treatmentgruppe kein Zusammenhang vor, d.h. diese Kenntnisse der Lehrkräfte spielen für das Verständnis der Lernenden bei diesem Konzept keine Rolle mehr. Das erwartete Ergebnis, dass die Anzahl gehaltener Unterrichtsstunden ein Prädiktor für den Lernerfolg ist, konnte lediglich in der Treatmentgruppe festgestellt werden. In der Kontrollgruppe lag dieser Zusammenhang erstaunlicherweise nicht vor; mehr Unterrichtszeit führte nicht zu besseren Schülerergebnissen.

Insgesamt zeigt sich, dass die Videoanalyse ein Werkzeug ist, das neue Möglichkeiten eröffnet bzw. mit der sich bekannte Ideen gut umsetzen lassen. Es geht in dieser Arbeit also nicht um die Motivationswirkung eines modernen Mediums; für den Unterricht werden in dieser Arbeit geeignete motivierende Kontexte und erfolgreiche didaktische Konzepte als wichtiger angesehen, d.h. auch geschickte didaktische Rekonstruktionen und insbesondere an die Schüler angepasste Sachstrukturen. Dazu ist die Videoanalyse aber ein geeignetes Hilfsmittel.

7. Abstract

In a survey conducted at all state grammar schools of Rhineland-Palatinate in autumn 2004, data regarding the digital media workplace equipment and the use of media by grammar school Physics teachers in class were collected (chapter 1.1). It was established how teachers use computers in Physics lessons, what type of software and what specific software products they have already worked with. In class, computers were mainly used to access the information medium internet (75 % of teachers), for simulations (69 %), and for PC-based measurements (68 %). It was further used for Interactive Screen Experiments (51 %), modelling (41 %), the internet as communication medium (32 %), and for video analysis (22 %). Video analysis is used so little in class because the teachers have got by far the least knowledge regarding this medium (55 % claim to have no knowledge), as well as due to the fact that it is used for very specific areas in mechanics. Therefore video analysis was the least known and least used medium, despite the availability of free-of-charge video analysis programmes and videos. However, the interest in the use of the aforementioned media was very high. Using them was even more difficult, because back then, 60 % of the schools did not have Physics classrooms with their own beamers.

Part of this questionnaire regarding the use of computers in Physics was repeated at the grammar schools of Lower Franconia (Bavaria) in 2009 (chapter 1.2). Therefore the data were compared with those collected in Rhineland-Palatinate in 2004. The results were similar, but the use was more intensive: today, the computer is a standard medium in Physics classes, even though there are great differences when it comes to the various types of use. Usually the teacher uses the computer as a tool for demonstrations. A great number of regional differences were detected – in particular regarding the software products used.

Surprisingly, with three information sources for video analysis available to teachers (studying, reading, and information from colleagues), there is no significant difference between users and non-users. This difference is only prevalent during the practical phase of teacher training, and mainly in further training courses – a fact that emphasises the importance of further training courses. Further training courses are a decisive factor for the use of computers in Physics classes, and especially regarding which software is used. It is therefore quite understandable, that 15 % of teachers stated that they would definitely, and 51 % answered that they might take part in a further training course on video analysis, .

“measure dynamics” is a new program providing a significant improvement and a variety of new possibilities (chapter 1.3). These include numerous exporting options and the automatic analysis of a moving object, recognising geometric shape, size, and colour of the object that is being analysed. It is also advantageous that real-time diagrams are generated synchronously with the video, and that several objects can be analysed. With only little effort, dynamic-

7. Abstract

iconic representations of physical values in the shape of columns or vector arrows can overlay the video, and serial images and stroboscope images can be created.

At the beginning of 2008, Casio launched the EX F1, the first high-speed camera that was affordable for schools as well. Further models followed shortly afterwards, so that today, digital cameras with high-speed function are available for as little as approx. EUR 100. This opens up new possibilities for teaching Physics in schools (chapter 2.1). Up to now, one disadvantage of video analysis has been that the frame rate (sampling rate) of video recordings was fixed at 25 or 30 images (measuring values) per second, and was not sufficient for some experiments. This is where the high-speed camera came in, because it has got a higher sampling rate, thanks to the adjustable frame rate. It allows for much more exact and realistic evaluations of experiments such as impacts, horizontal or oblique throws, falling spheres, matchbox cars doing roller coaster loops, the Maxwell's wheel, and vibration analyses.

Aspects of PE lessons can be integrated in Physics lessons to create a connection of the relevant topic with interesting, real-life situations. Real movements in sports can be recorded and processed during the lesson, using the software (chapter 2.2). Examples for lessons range from athletics to football, and can be used in different ways in Physics as well as in PE lessons. For example pole vault can be used to demonstrate energy conversion processes within a sports context, whereas long jump provides an alternative use of the oblique throw. Other types of sport such as sling ball and hammer throw offer further starting points. The automatic analysis of the software based on contrast and motion supports an easier realisation in class. Some observations only become possible thanks to new display options such as stroboscope images, fading in of vectors or serial shots. Thanks to calculated fit functions, the measured real motion can also be compared to the underlying physical model.

Another option to increasingly tie in the students' everyday lives with the lessons and to create a link with the human body is by analysing everyday movements such as walking, running, climbing stairs or jumping. Today, the physically relevant values of the students' movements can be collected using different, computer-based measurement value logging options such as a force plate, remote 3-D acceleration sensors or video analysis; all of which have got advantages and disadvantages for this use. One particular option is the representation of sensor data in videos using the video analysis program "measure dynamics". The easy import of data tables allows for the data from the acceleration sensors or the ground reaction force measurement to be displayed in a video with dynamic-iconic representations. For that, a movement must be filmed and at the same time measured with the respective sensor, then the measurement data are imported into the video analysis program, where they can be represented in the video in multiple ways. That means that here, the video analysis program is only used as a program to show sensor measurement values.

7. Abstract

Leisure parks are becoming increasingly popular, and therefore fun rides provide ideal learning incentives in mechanics lessons. In that context, some fun rides at the Europa Park leisure park in Rust have taken and compared measurements with acceleration and GPS sensors, as well as video analyses, of for example a circular motion, a swing boat, and roller coaster rides with looping and hill climb (chapter 2.3). Video analysis has got the advantage that it is always an objective observation of the motion from the viewpoint of an outside, inert observer. One common difficulty, however, is finding a suitable location for the camera, so that a two-dimensional motion can be filmed without any distortions. Another advantage of video analysis is that with larger objects, several points of an object can be monitored. The GPS measurements, however, were only partly possible in the leisure park. In case of attractions with small changes of location or with (partial) roofing, measurements are either not expedient or not possible. Acceleration sensors produce three-dimensional measurements, which is both advantage and disadvantage. The fundamental problem is that the position of the sensor can change, which creates the problem of the reference system.

Student labs as out-of-school places of learning are becoming more and more common. Against this background, students of year 7 (secondary modern school and grammar school) have explored the most important basic concepts of mechanics based on two-dimensional motions in a teaching-learning lab (chapter 2.4). Motion-sequences were observed and filmed in hand-on experiments at different stations, using for example Carrera or Darda tracks, and train sets. The students analysed the recorded sequences and depicted velocity as well as acceleration through vector arrows using the video analysis program “measure dynamics”.

Initial worries that using the technology of the video cameras and the video analysis program might be asking too much of the students were quickly dispersed. The students found it surprisingly easy to handle the camera, and they quickly familiarised themselves with the intuitively operable program “measure dynamics”. They liked the teaching-learning lab, and the majority of students would like to go to another student lab. Accompanying teachers were also motivated to use video analysis in their classroom, and to record videos with students themselves.

Video analysis has got further uses outside of mechanics as well. The decay of beer foam is often used as an analogon to radioactive decay. A literature overview shows that the decay of beer foam is a complex matter, and that various publications find different mathematical descriptions (chapter 3.1). The measuring example by Leike shows how you can find an equation, what needs to be observed, and how various models can be evaluated. Finally the decay of beer foam is studied using video analysis, and the measurements are critically examined. The overall result is that the bi-exponential decay is a usable model for the decay of beer foam.

7. Abstract

In 1905, Einstein concluded his paper on the Brownian Motion with the request “May soon a researcher be successful, to solve the question posed here, which is so important for the theory of heat.” Video analysis can help prove the correctness of Einstein’s assumptions in an experiment. For that purpose, three possibilities for a model gas and for a model of the Brownian Motion, respectively, are introduced (chapter 3.2). It is shown how they can be evaluated regarding quality and even quantity using video analysis, in order to achieve the Maxwell-Boltzmann distribution and to prove Einstein’s theory: The dependence of the mean square displacement or the mean square velocity of temperature are easily and convincingly shown. Since it is statistic distributions, a long video with a high number of images is required, which renders automatic analysis indispensable.

When teaching about radioactivity, the problem arises that only few motivating school experiments are possible. Due to its short sensitivity, the Wilson cloud chamber is not suitable for school lessons, unlike a continuous diffusion cloud chamber, which is, however, very expensive. A cloud chamber using Peltier elements was constructed, and an extensive construction manual was prepared, so that teachers and students could build their own, inexpensive cloud chamber (chapter 3.3). Here, even the background level suffices for an observation of particle tracks.

There are two possible applications of the video analysis software “measure dynamics” with this continuous diffusion cloud chamber (chapter 3.3). If radon gas is added to the chamber, the cloud tracks of the decay of radon are recorded using a video camera, and the video analysis program is set to show only every 50th or 100th image, the thusly created time-lapse effect shows the quality reduction of activity when the video is being played. For an evaluation regarding quantity, the tracks are counted in every 100th frame, or using the count function in the individual images (with every 100th image being exported). The video analysis program also facilitates the easy reading the length of the tracks, so that velocity and kinetic energy of the α -particles can be determined from the measured track length.

In order to make a laser beam visible in Physics lessons, a vaporiser fog machine is easy to use and yields impressive results (chapter 3.4). Those fog machines are known from stages, clubs, and private parties, and cost around EUR 30. In class they can be used for example in alignments of plane mirrors, making vibrations visible using rotating mirrors, the Michelson interferometer, and the diffraction on slits and gratings. The video analysis program can be used for a quantitative evaluation for diffractions on the grating: If you take a picture, the video analysis program software such as “Coach 6” or “measure dynamics” allows you to take a direct and exact measurement of the angles in the picture.

In Physics and especially in mechanics, vector values play an important role. As educationalists have been requesting for decades, it is essential to start teaching mechanics using two-dimensional motions, in order to reduce or to avoid the students having misconceptions, and

7. Abstract

for them to understand mechanics. This, however, requires a measurement collection system for two-dimensional motions that does not show the two components of velocity and/or acceleration separately, but shows these values as arrows. This is possible with the video analysis software “measure dynamics”, where values can be displayed as arrows in the video.

At the University of Würzburg in a prep course in Mathematics before the start of the lecture period it was examined, to what extent students of Physics in their first semester have got basic vector-handling skills that they learned at school (chapter 4.1). Within the framework of this prep course and before embarking on their studies, they had to solve mathematical problems and Physics-based problems from statics on the one hand. On the other hand, they had to solve problems regarding the vectorial understanding of acceleration and force. The results in the graphic addition and subtraction of vectors are much better than previously expected due to experiences in tutorials. However, it also turned out that first-year students have got major problems regarding direction of acceleration and force. This study therefore proved once more that the traditional approach in Physics lessons of introducing kinematics and dynamics using one-dimensional motions, which are then extended to several dimensions at a later stage, has failed.

During numerous further training courses for teachers it has turned out that teachers hardly know about the students’ conceptions, but that they consider this subject to be very important, as soon as they learn something about it. This improves their ideas of students’ conceptions, as well as the teachers’ actions. For quite some time, however, there have been hardly any surveys regarding the teachers’ perceptions of the students’ conceptions. In the run-up to a further training course for teachers, the Physics teachers at grammar schools in Lower Franconia (245 participating teachers) were asked to fill in a questionnaire (chapter 4.2). This survey should identify on the one hand if Physics teachers know typical misconceptions of students, and on the other hand which perceptions they have regarding the frequency with which they appear in the context of typical questions (before and after the relevant lesson). It is particularly interesting that teachers know the difficulties students have when dealing with acceleration graphs in one-dimensional motions, but have no idea of the problems with two-dimensional motions, as they exist after a traditional lesson. One can assume that teachers think students could transfer their knowledge on one-dimensional motions to two dimensions, but that is not the case.

A sequence of lessons, which introduces kinematics in secondary education level II by starting with two-dimensional motions and consistently using video analysis as a measurement tool has been realised for the first time with the video analysis software “Coach 5” (chapter 4.3). Students learn to record motions and to describe them with vectors using three two-dimensional motions: a general cycling movement, throwing a basketball, and the rotor movements of a wind turbine. Even though back then there was no video analysis program that could mark vector arrows directly into the video, it worked. The one-dimensional, simple

7. Abstract

forms of motion, which are traditionally in the foreground, result from projecting throwing and circular motions onto the coordinate axis.

According to the new curriculum at Bavarian grammar schools, kinematic values as well as Newton's laws are introduced as early as year seven, while charts and motion functions are covered in later years. For that purpose, relevant lessons introducing mechanics via two-dimensional motions, and emphasising the representation of values through arrows were conceived and implemented (chapter 4.4). Care was taken that the students are actively involved. A variety of media ranging from toys to videos and simulations was furthermore used. A central visualisation in this lesson concept were video projects, where kinematic values were dynamically represented via arrows in a filmed train in the video. Since there was no software yet, with which this would have been easily possible, the motion was filmed before class, and analysed using the video analysis program AVA. Then the video was embedded in the software PAKMA before class, and the arrows were drawn on top of it in compliance with the data from the video analysis, which was then shown and discussed in class.

Integrating placemarks and various animated arrows in the video is simply a matter of a few mouse clicks in "measure dynamics" (chapter 4.5). That way it is possible to display values in the video, which otherwise would not be visible to the eye, e.g. the values "velocity" and "acceleration". This makes it easier to emphasise the vectorial character of these values, and thus to introduce basic kinematic values based on two-dimensional motions.

There are different content structures for teaching mechanics. Traditionally, the static aspect is emphasised when force is introduced in mechanics lessons. The dynamic aspects as well as the kinematic values are then usually only addressed using one-dimensional motions. For almost 40 years, however, other content structures have been formulated and developed further – partly, however, they have hardly been implemented in practice up to now. Since schoolbooks are considered to be "secret curriculum", physics schoolbooks have been analysed.

An analysis of physics schoolbooks of years 7 and 8 at Bavarian secondary modern schools (chapter 4.6.1) revealed great differences in schoolbooks, not only regarding design, but mainly regarding content structure and the way known misconceptions are taken into consideration. Schoolbooks of one publishing house address students' conceptions, and newer content structures are integrated at least rudimentally. This is mainly shown on the following examples: two-dimensional motions and the associated accentuation of the direction of a motion, the consistent differentiation of speed and velocity, the emphasis of velocity as a vectorial value, the use of change of location and change of velocity vectors, and the required use of computer measurement value recording and video analysis.

In an analysis of six physics schoolbooks for year 7 in Bavaria, five books by educational publishing companies and the book from the research project of Wiesner/Wilhelm/Tobias/Waltner/Hopf were compared (chapter 4.6.2). Some books show a clear focus on quantity and

7. Abstract

rely on graphs and measurement tables. The assessment of the readability of the text revealed language that is difficult to understand. The content structure of the five approved books is very similar, but the share of static aspects is different. The schoolbook from the research project uses a completely different content structure while at the same time being absolutely compliant with the curriculum. The book furthermore sets great store by a qualitative understanding, and consistently dispenses with graphs, equations, measurement tables, and arithmetic problems. Instead of that, it mainly resorts to qualitative brainteasers and logical pictures with arrows representing the physical values, and uses video analysis in this context.

Previous studies showed that different teaching methods only have little influence on the students' learning efficiency; various evidence points towards the fact that different content structures have got more serious impacts. In a comparative study, the influence of the content structure on learning Newton's mechanics was analysed (chapter 4.7.1). The traditional access to mechanics with the help of linear motions is compared with a content structure that leads over from two-dimensional motions directly to dynamics (chapter 4.7.2).

Since the early days of teaching Physics until at least the 1980s, students were introduced to mechanics via statics in secondary education level I, and in secondary education level II first kinematics and then dynamics were taught – but almost exclusively one-dimensional. In the last two decades, statics was pushed back, so that now one-dimensional kinematics dominates in secondary education level I, and in continuation, acceleration and the equation $F = m \cdot a$ play an important role. Besides the static and the one-dimensional kinematic introduction there have been two approaches with a strong dynamics orientation since the 1970s. The Karlsruhe physics course with momentum currents, which up to now can not show any empirical successes in mechanics, and Wiesner's Impulse Concept, which has achieved empirical successes. This has been developed further, and refined using new media such as video analysis (chapter 4.7.2). The basic ideas are to introduce velocity vectorially with the help of two-dimensional motions, and to introduce mechanics dynamically via the impulse equation $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$, with the change of velocity $\Delta \vec{v}$ being introduced as a separate value instead of acceleration. Suitable options to record and to adequately show a motion within the framework of a lesson are making videos with the possibility to include velocity and change of velocity arrows using video analysis software, as well as the generation of stroboscope images, which can also be made from videos using video analysis software. The mechanics concept is therefore a combination of Wiesner's Impulse Concept, the possibilities of video analysis, and dynamically displayed vector arrows.

For the comparative study, a teaching text (see appendix 5), video recordings of experiments, suitable video analyses, as well as a simulation program were produced. In order to verify the effectiveness of the various content structures, a comparative study was carried out by the universities of Würzburg, Munich, and Vienna in school years 2007/08 and 2008/09. Besides the development of the students' knowledge, their interest and self-referential cognitions were

7. Abstract

being monitored. In order to prevent the influence of different teachers as far as possible, every teacher involved in the main study taught the control as well as the treatment group. In all classes, the development of knowledge and non-cognitive characteristics were being monitored in the pre-post-follow-up design. The teachers received no instructions regarding implementation for teaching both the control class and the treatment class. Every individual teacher was responsible for preparing the individual lessons. In order to further monitor the lessons, however, the teachers were asked to keep a classroom diary. It was expected that that way the methodic structuring of the lessons would vary only little throughout the period of the study, and that for example the degree of student-activating teaching methods or the use of the experiment remained relatively consistent.

In 2008, mechanics was taught the conventional way in a control group in the Munich area. The same teachers taught according to the changed concept in 2009 (treatment group). In order to test the teaching material and the students' book for suitability for teaching, a test group of 14 teachers taught 19 classes in Lower Franconia according to the changed concept. Following the feedback of their experiences, the students' text was revised. In the post-test, the students of the test group showed significantly more understanding of the subject, significantly more interest in the subject Physics, and significantly higher self-efficacy expectations (chapter 4.7.3). However, the comparison was between two groups, where different teachers taught mechanics at different places and different seasons.

Interviews of students in the test group showed that they have grasped the two-dimensional concept of velocity, i.e. that velocity contains speed as well as direction (chapter 4.7.4). This leads to surprising results regarding cornering at a constant speed, where the interviewed students realised that the velocity always changes, because the direction of the velocity changes.

Upon closer inspection of the tabular diaries of the teachers in the test group it is apparent that the concept-specific contents used up different amounts of time (chapter 4.7.4). The question was therefore analysed in detail in the main study, and it was planned to additionally videotape one lesson as a data collection tool, to gain more information on how closely the concept was being followed in the lessons. After the end of the mechanics course, the teachers involved in the test study were asked for their assessment of the concept in guided interviews. All twelve teachers asked considered the two-dimensional notion of velocity with speed and direction to be expedient and understandable, and they wanted to include this in their lessons. Regarding Newton's equation of motion there was a more differentiated picture: six teachers wanted to teach like that again, four teachers wanted to follow this concept but only with modifications, and two did not want to continue teaching according to this concept. It became evident that the broader the knowledge of conceptual learning difficulties was, the more widely accepted the concept was.

7. Abstract

Within the framework of the study, the two-dimensional-dynamic teaching concept was evaluated for year 7 at grammar schools (chapter 4.7.5). In summer 2008, ten teachers taught according to the traditional concept as control group, and as treatment group according to the new concept in summer 2009. There was a very significant difference with medium effect size in comparable problems regarding the basic understanding between the control group and the treatment group. I.e. teaching according to the two-dimensional-dynamic sequence of lessons yielded a significantly better learning success. As expected, boys have got a more or most significantly higher previous knowledge than girls in the control group and in the treatment group. In the control group, these differences remain or even increase, while in the treatment group there are no significant difference after the teaching, the girls therefore catch up. With regard to the non-cognitive variable “interest” and “self-image”, no effect resulting from the learner being part of the control group or the treatment group could be established. However, when it comes to drawing in a force, predicting a motion, and explaining a motion, the students of the treatment group feel most significantly more competent, whereas students of the control group itself feel significantly more competent in calculating and reading charts, which is not part of the curriculum.

As expected, in the control group the number of learning difficulties with mechanics that a teacher can name in an interview correlates positively with the learning success, i.e. students of teachers with great knowledge show more understanding. It was surprising, however, that here there was no connection in the treatment group, i.e. with this concept, the knowledge of the teachers was irrelevant for the understanding of the learners. The expected result, that the number of lessons predicts the learning success, could only be established in the treatment group. Surprisingly, this correlation did not exist in the control group; more lessons did not lead to better student results.

All in all, video analysis turned out to be a tool that opens up new possibilities, and that allows for known ideas to be implemented well. This thesis is not about the motivational effect of a modern medium; it rates suitable motivating contexts and successful didactic concepts as more important, i.e. also clever didactic reconstructions and especially content structures that were adjusted to suit the students. For that purpose, however, video analysis is a suitable tool.

8. Danksagung

Bei einer solchen Arbeit ist eine Danksagung schwierig, da so viele Menschen irgendwie dazu beigetragen haben, dass eine Aufzählung immer unvollständig ist.

Bedanken möchte ich mich bei allen Lehrern, die bereit waren, einen Fragebogen auszufüllen oder einen Test ihren Schülern zu stellen und dafür Unterrichtszeit zur Verfügung stellten. Gedankt sei aber auch den Schülern und Studierenden, die Tests beantworteten. Herzlicher Dank vor allem gilt den Lehrern, die bereit waren, sich auf neue Unterrichtskonzepte einzulassen, danach zu unterrichten und zur Evaluation beizutragen.

Bedanken möchte ich bei all den vielen Koautoren, mit denen ich zusammen einiges untersuchte, Neues ausprobierte und schließlich etwas veröffentlichte. Danke für die konstruktive Zusammenarbeit!

Besonderer Dank gilt auch Herrn Dipl.-Phys. StR Michael Suleder, der die Software „measure dynamics“ programmierte, ohne die vieles nicht möglich gewesen wäre. Danke für die Geduld bei all den vielen Fragen, Wünschen und Kritiken, die ich immer wieder hatte, und danke für das Umsetzen vieler dieser Punkte.

Herzlich bedanken möchte ich mich an dieser Stelle bei meinem Mentorat, Herrn Prof. Dr. Thomas Trefzger, Herrn Prof. Dr. Hans-Georg Weigand und Herrn Prof. Dr. Jean Geurts, die stets an den Erfolg der Arbeit glaubten. Herrn Prof. Dr. Thomas Trefzger sei für die Möglichkeiten gedankt, die ich am Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik nutzen konnte.

Schließlich sei besonders meiner Frau Angelika gedankt, die diese Arbeit unterstützte und Verständnis dafür hatte, wenn ich abends erst spät heimkam und auch am Wochenende arbeitete. Besonders möchte ich auch Jesus Christus danken, der mir zu dieser Arbeit Mut und Ideen gab sowie die nötige „Kraft“, d.h. die innere Stärke und das Durchhaltevermögen.