Videoanalyse zweidimensionaler Bewegungen mit dynamisch ikonischen Repräsentationen im Physikunterricht

Schriftliche Hausarbeit
für die erste Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium

vorgelegt von
Christine Michel
November 2007

Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Fakultät für Physik und Astronomie
Lehrstuhl für Physik und ihrer Didaktik
Betreuer: Dr. Thomas Wilhelm

Freude am Schauen und Begreifen ist die schönste Gabe der Natur.
(**Albert Einstein**)

Inhaltsverzeichnis

Seite:

I: EINLEITUNG 1

II: THEORETISCHE BETRACHTUNG DES THEMAS 5

1. Kognitionspsychologischer Hintergrund 5
   1.1. Das Gedächtnis 5
      1.1.1. Das Ultrakurzzeitgedächtnis 6
      1.1.2. Aufmerksamkeitsprozesse 6
      1.1.3. Das Kurzzeitgedächtnis 8
      1.1.4. Wiederholungs- und Kodierungsprozesse 9
      1.1.5. Das Langzeitgedächtnis 9
   1.2. Interne Repräsentation von Wissen 12
      1.2.1. Propositionale Repräsentationen 12
      1.2.2. Schemata 12
      1.2.3. Modelle 13
         1.2.3.1. Modell, Modellsubjekt und Modellobjekt 13
         1.2.3.2. Eigenschaften und Funktionen von Modellen 14
         1.2.3.3. Mentale Modelle 15

2. Lerntheoretische Aspekte 17
   2.1. Theorie zum Lernen mit Multimedia 18
   2.2. Integriertes Modell des Text- und Bildverstehens 19
      2.2.1. Grundlagen des Modells 19
      2.2.2. Annahmen des Modells 19
   2.3. Cognitive load theory 21
      2.3.1. Intrinsic cognitive load 22
      2.3.2. Extraneous cognitive load 23
      2.3.3. Germane cognitive load 24
   2.4. Zusammenfassende Darstellung 25

3. Verschiedene Darstellungsformen und ihre Funktionen 27
   3.1. Einteilung der Darstellungsformen 27
   3.2. Bilder 28
   3.3. Texte 32
   3.4. Dynamisch ikonische Repräsentationen 33
   3.5. Multicodierung 34

Seite:

4. Bewegungsanalyse im Physikunterricht 38
4.1. Schülervorstellungen in der Kinematik 38
4.1.1. Zu den Begriffen „Ort“ und „Weglänge“ 38
4.1.2. Zum Begriff „Geschwindigkeit“ 39
4.1.3. Zum Begriff „Beschleunigung“ 40
4.1.4. Empirische Befunde 42
4.2. Der Einsatz von Videoanalyse im Physikunterricht 43
4.2.1. Vorteile 44
4.2.2. Lehrplanverankerung im bayerischen achtstufigen Gymnasium 46

III. VERSCHIEDENE VIDEOS UND EINSATZMÖGLICHKEITEN

1. Die Spielzeugeisenbahn 49
1.1. Versuchsaufbau 49
1.2. Kreisbahn 51
1.3. Gerade Strecke 54
1.4. Ovale Bahn 57
1.5. Schlangenlinie 59

2. Das Fadenpendel 60
2.1. Versuchsaufbau 60
2.2. 10° Auslenkung 60
2.3. 30° Auslenkung 62
2.4. 60° Auslenkung 65

3. Der Luftkissentisch 68
3.1. Kreisbewegung 68
3.1.1. Versuchsaufbau 68
3.1.2. Kreisbewegung mit konstantem Radius 68
3.1.3. Kreisbewegung mit abnehmendem Radius 69
3.2. Reflexionsgesetz 70
3.3. Stoß zweier Pucks 71
3.3.1. Stoß zweier gleicher Massen 71
3.3.2. Stoß zweier ungleicher Massen 73

Seite:

4. Die Berg- und Talfahrt 74
   4.1. Versuchsaufbau 74
   4.2. Streckenführung 1 75
   4.3. Streckenführung 2 77

5. Probleme bei der Erstellung und Analyse der Videos 80

IV: ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSGEDANKE 81

V: LITERATURVERZEICHNIS 83

VI: ANHANG 89

VII: DANKSAGUNG 91

VIII: SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG 93

I: EINLEITUNG

„*Freude am Schauen und Begreifen ist die schönste Gabe der Natur*“ (Albert Einstein, zitiert nach Liss, 2000). Schauen wir also hin! Wollen wir begreifen, wie die Natur funktioniert. Das Schauen ist dabei die einfachere Disziplin im Wissenserwerb. Des Begreifens bedarf es dabei viel mehr. Wie ein Mensch begreift und was dafür nötig ist, ihm diesen Prozess zu erleichtern, ist schon lange Gegenstand der verschiedensten wissenschaftlichen Disziplinen. Während die Psychologie sich mit dem Aufbau des Gedächtnisses und seinen Funktionen beschäftigt, behandelt die Pädagogik die inneren und äußeren Umstände des Lernenden. Die Didaktik versucht ihrerseits, eine Brücke zwischen ihrer eigenen Fachwissenschaft und den verschiedenen Disziplinen der Erziehungswissenschaften zu schlagen. Die Physikdidaktik bemüht sich darum, das physikalische Wissen unter fachwissenschaftlichen, pädagogischen und psychologischen Gesichtspunkten so aufzuarbeiten, dass es für den Lernenden leichter zu begreifen ist und fachlich nicht verfälscht wird.

Befasst man sich mit der Idee, den Schülern die Mechanik von Anfang an zweidimensional nahe zu bringen und dies mit dem Medium Computer beziehungsweise Video zu verknüpfen, so sollte man auf die Erkenntnisse der Erziehungswissenschaften bezüglich des Lernens zurückgreifen.

Der erste Teil dieser Arbeit befasst sich daher mit dem theoretischen Hintergrund des Lernens und zeigt verschiedene Aspekte der Psychologie, Pädagogik und Didaktik zu diesem Thema auf. In Kapitel 1 wird zunächst ein Überblick über das Gedächtnis und seine Funktionsweise gegeben und beschrieben, wie das Wissen im Gedächtnis des Menschen repräsentiert ist. Dafür werden die Begriffe Propositionen, Schemata und Modelle eingeführt und erläutert, um schließlich in Kapitel 2 anhand der drei wichtigsten Lerntheorien zum Thema Multimedia und kognitiver Belastung den Vorgang des Wissenserwerbs darzulegen. Dabei soll aufgezeigt, welche Einflussmöglichkeiten der Lehrende auf diesen Prozess besitzt.

Nachdem die kognitions- und lerntheoretischen Hintergründe erläutert wurden, werden in Kapitel 3 die verschiedenen Darstellungsformen und ihre Funktionen vorgestellt. Dabei wird grob zwischen Bildern und Texten unterschieden. Während die Texte nur der Vollständigkeit halber aufgeführt werden, werden die Bilder weiter in Abbildungen und logische Bilder unterteilt. Als besonderer Teil der logischen Bilder werden die dynamisch ikonischen Repräsentationen besprochen. Sie sind zum einen neben dem Video selbst die wichtigste Darstellungsform der Videoanalyse und zum anderen erleichtern sie es den Schülern, sich vor allem Vektoren besser vorstellen zu können und so die Mechanik besser zu verstehen. Der letzte Punkt der Darstellungsformen ist die Multicodierung, die schließlich die Kombination verschiedener Darstellungsformen ist. Das vierte und letzte Kapitel des ersten Teils dieser Arbeit behandelt die Bewegungsanalyse im Physikunterricht. Hier wird zunächst auf die Vorstellungen der Schüler zur Kinematik eingegangen. Da diese stark von den physikalischen Tatsachen abweichen, sind die Erkenntnisse zu diesem Thema für die Lehre der Mechanik von großer Bedeu-

tung. Um falsche Präkonzepte der Schüler zu vermeiden und diese gegebenenfalls korrigieren zu können, sollte der Mechanikunterricht von Beginn an zweidimensional durchgeführt werden. Welche Vorteile dabei die Videoanalyse hat und wie diese im bayerischen Lehrplan des achtstufigen Gymnasiums verankert ist, wird in Abschnitt 4.2. besprochen.

Im zweiten Teil dieser Arbeit werden verschiedene Projekte besprochen, mit deren Hilfe man zweidimensionale Bewegungen im Mechanikunterricht erarbeiten kann. Dafür wurden Videos aufgenommen, mit „VirtualDub“ beschnitten, komprimiert und schließlich mit dem Videoanalyseprogramm „measure Dynamics“ der Firma PHYWE analysiert sowie exportiert. Alle Projekte dieser Arbeit sind auf der angehängten CD sowohl als Projekt-Datei als auch als avi-Datei dokumentiert. Das Hauptaugenmerk der analysierten Videos liegt auf der qualitativen Darstellung der kinematischen Grundgrößen „Ort“, „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“. Sie werden durch Pfeile dargestellt, die an dem jeweiligen Versuchsobjekts „angeheftet“ sind, sich mit diesem bewegen und ihre Form entsprechend der physikalischen Größen verändern. Die Videos sind gemäß ihrem Versuchsaufbau zusammengefasst und lassen sich in vier Obergruppen unterteilen: Die Spielzeugeisenbahn, das Fadenpendel, der Luftkissentisch und die Berg- und Talfahrt.

Die Spielzeugeisenbahn (Kapitel 1) fährt in den verschiedenen Projekten auf unterschiedlichen Schienenführungen. Dabei können bei konstantem beziehungsweise variablem Tempo die Größen „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ erarbeitet werden. Die bearbeiteten Videos orientieren sich am Unterrichtskonzept von SCHÜLLER (2007) für die siebte Jahrgangsstufe des bayerischen Gymnasiums und können zur Einführung der kinematischen Grundgrößen verwendet werden. Kapitel 2 des zweiten Teils zeigt drei Projekte mit dem Fadenpendel. Dabei wird seine Bewegung bei den Auslenkungen von 10°, 30° und 60° analysiert. Kapitel 3 behandelt Versuche mit dem Luftkissentisch. Hier werden Kreisbewegungen, das Reflexionsgesetz und Stöße zweier Pucks betrachtet. Die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der verschiedenen Pucks sind durch Pfeile dargestellt und man erkennt deutlich, wie sie sich während der verschiedenen Versuchsabläufe verändern. Das letzte Kapitel dieses Teils zeigt schließlich die Berg- und Talfahrt eines Wagens. Dafür wurden zwei verschiedene Streckenführungen aufgebaut und die Bewegung des Wagens analysiert. Das besondere an diesen beiden Projekten ist neben der Pfeildarstellung von „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ der Vergleich der Energien. Dafür werden die zeitlichen Verläufe der kinetischen, potentiellen und der gesamten Energie des Wagens in Diagrammen dargestellt. Diese Art der Darstellung verdeutlicht, dass sich die kinetische und potentielle Energie ineinander umwandeln und dass die Gesamtenergie des Wagens im Laufe des Versuchs abnimmt, bis dieser zum Schluss des Versuches ruht.

Allen Projekten ist gemein, dass neben den gezeigten Größen im Video noch weitere Größen (zum Beispiel die Geschwindigkeitsänderung oder der Ort) bereits moduliert sind und ihre Filter bei Bedarf eingeschaltet werden können. Sie können jedoch nur im Programm selbst eingeschaltet werden. Die exportierten Videos ermöglichen es hingegen dem Benutzer, die

Filme der bearbeiteten Projekte zu jeder Zeit und an jedem Rechner abzuspielen, ohne dass das Analyseprogramm „measure Dynamics“ installiert sein oder auf es zurück gegriffen werden muss.

II: THEORETISCHE BETRAHTUNG DES THEMAS

1. Kognitionspsychologischer Hintergrund

1.1. Das Gedächtnis

„Unter Gedächtnis verstehen wir die lernabhängige Speicherung ontogenetisch erworbener Informationen, die sich phylogenetischen neuronalen Strukturen selektiv artgemäß einfügt und zu beliebigen Zeitpunkten abgerufen, d.h. für ein situationsangepasstes Verhalten verfügbar gemacht werden kann“ (Sinz, 1979, S. 16). Die Vorraussetzung eines jeden Lernprozesses ist das Gedächtnis, denn ohne es wäre eine dauerhafte Speicherung des Gelernten und ein späteres Wiedererkennen gleicher oder ähnlicher Strukturen nicht möglich. Bevor Informationen im Gedächtnis langfristig gespeichert werden können, müssen sie zunächst aufgenommen und verarbeitet werden. Dabei unterscheidet man unterschiedliche Stadien der Informationsverarbeitung, die von der Reizaufnahme über Aufmerksamkeitsprozesse bis hin zu Kodierungsprozessen reichen (Lukesch, 2001, S. 47). Anhand des klassischen Mehrspeicher-Modells (vgl. Abbildung 1), das vor allem von BROADBENT (Broadbent, 1958), ATKINSON und SHIFFRIN (Atkinson; Shiffrin, 1968) entwickelt wurde, werden nun im Folgenden die Grundzüge der Informationsaufnahme in das Gedächtnissystem erklärt.

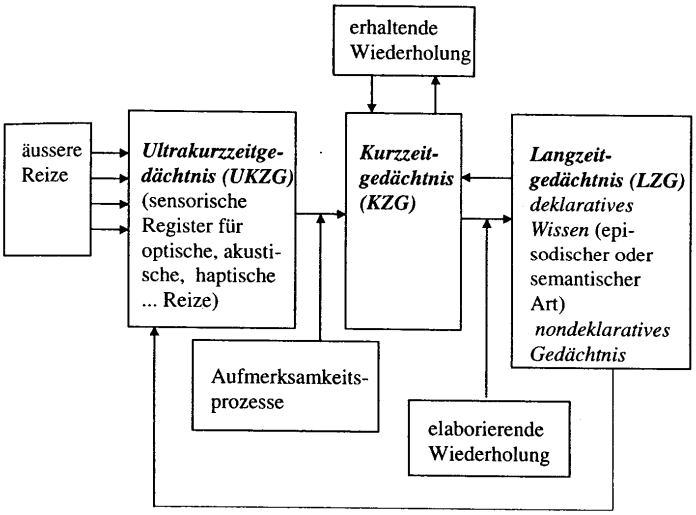


Abbildung 1: Mehrspeichermodell für die Informationsaufnahme in das Gedächtnis (Lukesch, 2001, S. 47)

Die Annahme einer starren und linearen Abfolge der Informationsverarbeitung wird heute stark kritisiert. Aus didaktischen Gründen ist es jedoch sinnvoll, auch weiterhin drei funktionelle Typen von Gedächtnis zu unterscheiden. Hierbei geht der Informationsfluss meist in eine Richtung (von Ultrakurzzeitgedächtnis zu Langzeitgedächtnis) und ist stark von den Inhalten des Langzeitgedächtnisses abhängig (Lukesch, 2001, S. 48). Unterschieden werden: Ultrakurzzeitgedächtnis (UKZG); Kurzzeitgedächtnis (KZG) und Langzeitgedächtnis (LZG).

1.1.1. Das Ultrakurzzeitgedächtnis

Die Sinnesorgane des Menschen dienen als Schnittstelle zwischen dem Organismus und der Außenwelt. Externe physikalische Reize unterschiedlicher Qualität (Teilchen, Schwingungen etc.) gelangen an spezialisierte Zellen, die diese Reize in für das Nervensystem verständliche Formen "übersetzen", die Rezeptoren. Die aufgenommenen Reize werden im Laufe eines komplexen Informa-tionsverarbeitungsprozess zu Wahrnehmungen und Erinnerungen. Zunächst werden sie am Rezeptor als Potentialdifferenz in die entsprechenden Areale in der Hirnrinde weitergeleitet. Dort induzieren sie elektrochemische Kreisprozesse, die etwa 100-500 Millisekunden bestehen bleiben. Das ist deutlich länger als die Refraktärzeit (Zeit zwischen zwei von den Sinneszellen ausgesandten Impulsen) am Rezeptor. Somit kann das Ultrakurzzeitgedächtnis eine kontinuierliche Außenweltwahrnehmung trotz einer diskontinuierlichen Reizleitung ermöglichen (Lukesch, 2001, S. 50).

Wichtig bei der Betrachtung des Ultrakurzzeitgedächtnisses ist, dass der Zugang zu ihm im Gegensatz zum Kurzzeitgedächtnis aufmerksamkeitsunabhängig ist. Die Informationen werden hier kurzfristig und unverändert gespeichert und durch spätere Informationen desselben Registers überschrieben. Man geht heute davon aus, dass für die Informationsverarbeitung vor allem drei Register von entscheidender Bedeutung sind: Jene, welche die optischen (ikonisches Gedächtnis), die auditiven (echoisches Gedächtnis) beziehungsweise die haptischen (taktiles Gedächtnis) Erfahrungen verarbeiten (Lukesch, 2001, S. 50).

Das ikonische Gedächtnis verarbeitet visuelle Reize. Seine Kapazität bei der Reproduktion liegt zwischen vier und sieben Einheiten. Diese sehr geringe Kapazität kann von zwei Ursachen herrühren: entweder ist die sensorische Aufnahmekapazität einfach beschränkt, oder sie zerfällt in aller kürzester Zeit und schrumpft auf vier bis sieben Einheiten zusammen. SPERLING führte zu diesem Thema zahlreiche Versuchsreihen durch und kam schließlich zu dem Ergebnis, dass wohl die zweite Ursache für die geringe Kapazität des Ultrakurzzeitgedächtnisses verantwortlich ist. Nach ihm werden die Informationen kurze Zeit als visuelle Bilder so genannten Ikons gespeichert (Lukesch, 2001, S. 51-53).

Das echoische Gedächtnis ist für die Aufnahme und Verarbeitung der auditiven Reize verantwortlich. Bei ihm ergaben sich ähnliche Befunde wie beim ikonischen Gedächtnis. Die Informationen bleiben hier höchstens zwei Sekunden präsent (Lukesch, 2001, S. 54).

Beim taktilen Gedächtnis handelt es sich um das Register, der tastbare Reize verarbeitet. Auch hier ergaben sich wieder ähnliche Befunde wie bei den beiden anderen Registern (Lukesch, 2001, S. 54).

1.1.2. Aufmerksamkeitsprozesse

Der Übergang vom Ultrakurzzeitgedächtnis zum Kurzzeitgedächtnis erfolgt wie durch einen Filter, der das Kurzzeitgedächtnis vor Überlastung schützt. Seit langem ist bekannt, dass nur einer sehr begrenzten Anzahl von Tätigkeiten gleichzeitig Aufmerksamkeit geschenkt werden kann. Dabei handelt es sich meist um sehr routinierte Handlungen, die fast automatisch ausge-

führt werden können. Um dieses Phänomen zu verstehen, wurden verschiedene Modelle entwickelt. Sie erklären alle den Übergang vom jeweiligen Register in das Kurzzeitgedächtnis (Lukesch, 2001, S. 56).

Beispielhaft werden hier kurz zwei dieser Modelle näher erklärt:

Das erste ist das Filtermodell von BROADBENT (1958). Er versuchte den Übergang vom Ultrakurzzeitgedächtnis zum Kurzzeitgedächtnis mittels einer Multispeichertheorie zu erklären (vergleiche Anfang Kapitel 1.1). Der zur Folge arbeitet das kognitive Verarbeitungssystem mit einem einzigen Kommunikationskanal. Dieser wertet die Informationen sequentiell aus und besitzt von vornherein ein begrenztes Fassungsvermögen. Ein Selektionsfilter wählt dabei eine Information aus, die dann weiter verarbeitet wird. Nur diese Information gelangt schließlich in den Kurzzeitspeicher und wird semantisch analysiert. Versucht man jedoch zwei oder mehr Informationen gleichzeitig zu folgen (zum Beispiel auf einer Party mehreren Gesprächen parallel zuhören), so wechselt man zwischen beiden Eingangskanälen hin und her. Bei BROADBENTs Filtermodell ist also wichtig, dass die ankommenden Reize stark selektiert werden und somit die nicht gewählten Informationen unwiederbringlich verloren gehen (Lukesch, 2001, S. 58).

Verschiedene Experimente haben jedoch gezeigt, dass eine Verarbeitung gleichzeitig dargebotener Stimuli möglich ist. Das lässt vermuten, dass die Aufmerksamkeit auf verschieden Informationsquellen verteilt werden kann. KAHNEMAN entwickelte daraufhin das Modell der flexiblen Ressourcen-Allokation, in dem er davon ausgeht, dass der Mensch einen begrenzten Pool kognitiver Ressourcen besitzt, den er bei der Informationsverarbeitung einsetzen kann. Je schwieriger eine Aufgabe ist, desto größer ist der Teil der Verarbeitungskapazität, die sie benötigt. Zum Beispiel kann man sich während des Autofahrens mit jemandem unterhalten, sobald die Verkehrssituation jedoch volle Konzentration beansprucht (z.B. plötzliches Bremsen durch Hindernisse auf der Straße) ist nur noch eine Handlung (das Autofahren) durchführbar. Wie die Ressourcen einer Person gesteuert werden, hängt entweder von willkürlichen Absichten oder bestehenden Dispositionen ab (Kahneman, 1973, zitiert nach Lukesch, 2001, S. 61-63).

Für den Lehr-/Lernprozess bedeuten die verschiedenen Modelle, dass Informationen bei fehlender Aufmerksamkeitszuwendung von Seiten der Schüler vermutlich nicht weiterverarbeitet werden und verloren gehen. Für den Lehrer ist es somit wichtig, dass er die volle Aufmerksamkeit der Schüler besitzt. Mit Hilfe einer guten Unterrichtsvorbereitung, die beispielsweise die zehn Merkmale guten Unterrichts von MEYER (2007, S. 23-133) beinhalten, legt der Lehrer dafür eine gute Grundlage. Vor allem die Medienvielfalt im Unterricht hilft, keine Langeweile und Monotonität im Unterricht aufkommen zu lassen. In diesem Zusammenhang hat sich in den letzten Jahren mit den neuen Medien (Computer, Videoanalyse, Modellbildungsprogramme) eine große Bandbreite an Möglichkeiten aufgetan, die die Aufmerksamkeit und Faszination der Schüler wecken kann. Der Lehrer sollte jedoch immer darauf achten, dass

die verwendeten Methoden und Medien passend eingesetzt werden, die Schüler lernen mit ihnen umzugehen und keine „Methoden-/Medienüberflutung“ stattfindet.

1.1.3. Das Kurzzeitgedächtnis

Im Kurzzeitgedächtnis sind die kurzfristig verfügbaren Informationen präsent. Es wird auch als der aktive Teil des Gedächtnissystems bezeichnet. Damit Informationen im Kurzzeitgedächtnis verfügbar sein können, müssen sie kodiert werden. Dabei wird eine akustische, optische und semantische Kodierung unterschieden (Lukesch, 2001, S. 66).

Um Informationen vom Kurzzeitgedächtnis ins Langzeitgedächtnis zu überführen, sind Wiederholungen nötig. Ebenso ist es möglich vom Kurzzeitgedächtnis Suchprozesse im Langzeitgedächtnis auszulösen, damit die ins Kurzzeitgedächtnis gelangten Informationen leichter verarbeitet werden können. Bezüglich des genauen Aufbaus und der Struktur des Kurzzeitgedächtnisses variieren die theoretischen Vorstellungen beträchtlich (Lukesch, 2001, S. 74f):

ATKINSON und SHIFFRIN gehen davon aus, dass das Kurzzeitgedächtnis einen Puffer besitzt, der aus einer bestimmten Anzahl von „Halteplätzen“ besteht. Ankommende Informationen belegen diese allmählich. Sobald der Puffer voll ist, gelangen die am meisten memorierten Informationen ins Langzeitgedächtnis. Die Informationsverarbeitung wird durch Kontrollprozesse gesteuert. Das Kurzzeitgedächtnis bildet dabei ein Kontrollzentrum, das für die Verarbeitung der neuen Informationen bereits gespeicherte Informationen aus dem Langzeitgedächtnis abruft und diese verknüpft. Mittels verschiedener Kontrollprozesse (Kodierungsprozeduren, Wiederholungsoperationen und Suchstrategien) steuert das Individuum somit den Informationsfluss im Gedächtnis (Baeriswyl, 1989, S. 16ff).

Eine weitere Theorie bezüglich des Aufbaus und der Struktur bietet die Vorstellung von BADDELY und HITCH (zusammengefasst in Lukesch (2001) S. 74-77 und Baeriswyl (1989) S. 18-20). Bei ihnen *„ist das Kurzzeitgedächtnis kein einfacher Zwischenspeicher, sondern ein modular aufgebautes System, das getrennte, aber interaktive Subsysteme umfasst“* (Lukesch, 2001, S. 75). Ihr Arbeitsgedächtnissystem besteht aus einer modalitätsunabhängigen zentralen Exekutive, einem modalitätsspezifischen Speicher für die visuell-räumlichen Vorstellungen und eine modalitätsspezifische artikulatorische Schleife.

Die zentrale Exekutive bildet den Kern des Systems und übernimmt Steuerungs- und Kontrollprozesse. Sie ist vor allem für die Kontrolle von Störreizen zuständig. Zudem besitzt sie die Möglichkeit bei einer kapazitären Überbelastung der beiden Subsysteme auch Speicherprozesse zu übernehmen. Ihre Verarbeitungskapazität, das heißt die ablaufenden Problemlöse- und Entscheidungsprozesse, ist in diesem Fall allerdings reduziert (Lukesch, 2001, S. 75f).

Die artikulatorische Schleife ist als ein eigenständiges sprachspezifisches Speichersystem zu betrachten, das nur eine begrenzte Kapazität von circa drei Einheiten besitzt und auf einer akustischen Repräsentation aufbaut. Ihre Existenz wurde durch verschiedene Versuchen bewiesen, in denen drei Effekte immer wieder auftraten: der phonologische Ähnlichkeitseffekt (ähnlich lautende Buchstaben werden leichter verwechselt als unähnlich lautende), der Wort-

längeneffekt (je kürzer ein Wort ist, desto leichter kann man es sich merken) und der Effekt der artikulatorischen Unterdrückung (visuell dargebotene Reize werden genauso artikulatorisch verarbeitet wie auditive Reize) (Baeriswyl, 1989, S. 21f).
Der visuell-räumliche Speicher als drittes System ist für die Verarbeitung bildhafter oder räumlicher Vorstellung verantwortlich und arbeitet unabhängig vom verbalen Speicher, was dazuführt, dass es bei der gleichzeitigen Verarbeitung von räumlichen und verbalen Aufgaben zu fast keinen Interferenzen kommt (Lukesch, 2001, S. 77).

1.1.4. Wiederholungs- und Kodierungsprozesse

Wenn Reize vom Ultrakurzzeitgedächtnis durch Aufmerksamkeitszuwendung in das Kurzzeitgedächtnis gelangt sind, müssen sie dort ständig wiederholt werden, um nicht zu zerfallen. Dabei kann die Wiederholung aufgrund automatisch ablaufender Elaborationsprozesse auch einen Übergang ins Langzeitgedächtnis ermöglichen. In diesem Kontext wird zwischen erhaltender (primärer) und elaborierender (sekundärer) Wiederholung unterschieden. Die erhaltende Wiederholung bezeichnet das spontane stille Wiederholen von Inhalten. Es stellte sich bei Versuchen heraus, dass Personen, die still wiederholten, weniger vergaßen als jene, die nicht wiederholten. Je stärker sie während des Behaltensintervalls durch weitere Aufgaben beansprucht wurden, desto weniger konnten sie wiederholen und der Lernstoff ging schneller verloren (Lukesch, 2001, S. 78).
Wichtig für eine elaborierende Wiederholung sind die ablaufenden Kodierungsprozesse. Sie stehen mit bereits bestehenden Strukturen oder Wissensbeständen des Langzeitgedächtnisses in Beziehung. Dabei werden die externen Informationen der Außenwelt kodiert und in interne Repräsentationen (vgl. Kapitel 1.2) verwandelt (Lukesch, 2001, S. 86f).
Zu den wichtigsten Kodierungsprozessen gehören: Chunking (Rekodierung von Informationseinheiten zu neuen Einheiten), Clustering (Zuordnung von Informationen zu bestehenden Kategorien) oder die Erstellung mentaler Modelle (vgl. Kapitel 1.2.3).

1.1.5. Das Langzeitgedächtnis

Das Langzeitgedächtnis ist für die langfristige Speicherung von Erfahrungen und Informationen zuständig. In ihm sind alle verhaltensrelevanten Informationen des Menschen gespeichert, die weitere Lern-, Denk- und Problemlöseprozesse ermöglich. Es kann grob in zwei Teile untergliedert werden: das deklarative und das nondeklarative Gedächtnis (vgl. Abbildung 2).

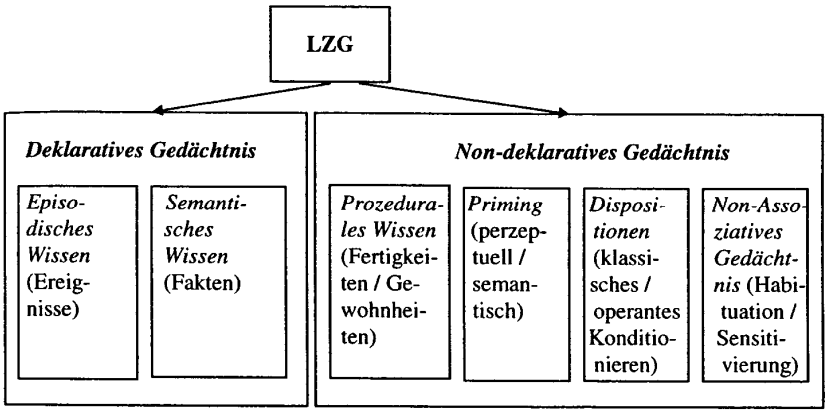


Abbildung 2: Vermutete Grobstruktur des Langzeitgedächtnisses (Lukesch, 2001, S. 111)

Das deklarative Gedächtnis beinhaltet Allgemein- beziehungsweise Weltwissen. Es handelt sich dabei um bewusstseinsfähiges Wissen, wodurch der Mensch seine Welt interpretieren kann. Man geht davon aus, dass seine Inhalte in geordneter Form gespeichert sind. Das bedeutet, dass aufeinander bezogene Wissenseinheiten miteinander verbunden sind. Das deklarative Gedächtnis kann weiter in episodisches und semantisches Gedächtnis unterteilt werden. Dabei beinhaltet das episodische Gedächtnis alle zeitlich datierten, räumlich lokalisierbaren und persönlichen Erfahrungen. Im Gegensatz zum semantischen Gedächtnis ist es wegen mangelnder Vernetzung sehr störanfällig. EBBINGHAUS ermittelte in diesem Zusammenhang den Verlauf der Vergessenskurve des Menschen. Die Ersparnis an Lernzeit gibt dabei an, wie viel sich der Mensch bis zum Zeitpunkt eines erneuten Lernvorgangs gemerkt hat (vgl. Abbildung 3).

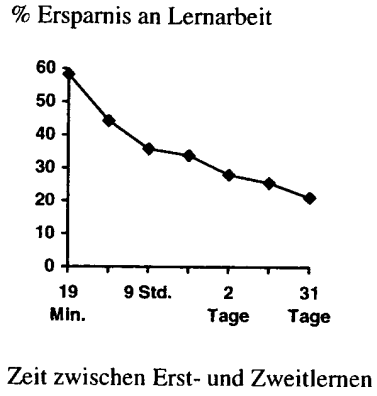


Abbildung 3: Verlauf der Vergessenskurve nach Daten von Ebbinghaus (Lukesch, 2001, S. 114)

Beeindruckend ist vor allem, dass am Anfang das Ausmaß des Vergessens sehr groß ist und im Laufe der Zeit stark abnimmt. So vergisst der Lernende in den ersten 20 Minuten nach einer Lernphase circa 42 Prozent des Gelernten und nach sechs Tagen ist nur noch 25 Prozent des ursprünglich erlernten Stoffs präsent. Anhand von Eigenversuchen formulierte EBBINGHAUS später das nach ihm benannte Gesetz bezüglich des Vergessens: *„Die Quotienten aus Behaltenem und Vergessenem verhielten sich umgekehrt wie die Logarithmen der Zeiten“* (Ebbinghaus, 1885, S. 17; zitiert nach Lukesch, 2001, S. 115).

Für den Unterricht ist wichtig, dass die Vergessenskurve stark vom gelernten Material abhängt. Sinnlose Silbenreihen werden deutlich schneller vergessen als sinnvolle Texte (Lukesch, 2001, S. 115). Auf den Physikunterricht übertragen bedeutet das, dass von den Schülern wesentlich besser behalten werden, wenn sie mit erlebten Episoden der Schüler verknüpft werden. Für den konkreten Unterricht bedeutet das zum Beispiel: Erarbeitet der Lehrer mit den Schülern im Rahmen des Mechanikunterrichts den waagrechten Wurf anhand von Erzählungen und reinen Rechenaufgaben, so ist dies für die Schüler sehr komplex und oft auch sinnfrei. Lässt der Lehrer jedoch einen Schüler einen Ball werfen, nimmt diese Bewegung mit einer Kamera auf und analysiert diese anschließend in der Klasse mittels eines geeigneten Programms, so bekommt der Lerninhalt „waagrechter Wurf“ eine sinnvolle Verknüpfung und einen episodischen Charakter. Der Schüler wird somit diesen Lernstoff besser und länger behalten.

Der zweite Teil des deklarativen Gedächtnisses, das semantische Gedächtnis, beinhaltete reines Faktenwissen. Es besitzt Bedeutungen, die nicht unmittelbar erlebt werden müssen, wie zum Beispiel „die Erde besitzt einen Äquatorumfang von 40.075 km“. Der Mensch muss nicht die Erde entlang des Äquators erneut umrunden und diese Strecke messen, um es sich zu merken, sondern er kann es als Faktenwissen im Gedächtnis abspeichern. Das semantische Wissen umfasst somit das organisierte Wissen des Menschen. Diese Art von Wissen ist generativ. Das bedeutet, dass aus ihm anderes Wissen abgeleitet werden kann und somit Informationen abgerufen werden können, die in dieser Form vorher nie abgespeichert wurden. Zur Verdeutlichung soll folgendes Beispiel dienen: Wenn Herr XY existiert, besitzt er auch Vater und Mutter (Lukesch, 2001, S. 113 ff). Wie dieses Wissen im Gedächtnis repräsentiert ist, wird in Kapitel 1.2. genauer erläutert.

Die Unterteilung des Gedächtnisses in einen deklarativen und einen nondeklarativen Teil führte RYLE (1949) ein, um das Wissen in Fakten-/Begriffswissen und Handlungswissen zu unterscheiden. Letztgenanntes wird auch als prozedurales Wissen bezeichnet und beinhaltet Fertigkeiten, also Handlungsketten, die in einer gegebenen Situation in einer bestimmten Reihenfolge ablaufen. Damit ist zum Beispiel Radfahren, Klavierspielen, Schwimmen oder ähnliches gemeint. Neben diesen psychomotorischen Fertigkeiten umfasst das nondeklarative Gedächtnis auch kognitive Fähigkeiten wie das Lösen von Rechenaufgaben. All diese Fertigkeiten steuern die Handlungen eines Individuums meist automatisch und unbewusst. Je routinierter eine Aufgabe ausgeführt werden kann (aufgrund von Übung), desto unbewusster wird sie durchgeführt (Lukesch, 2001, S. 143 ff). Da der Schüler beim Erwerb von physikalischem Wissen primär keine Prozeduren erlernen soll, sondern die Physik hinter den Aufgaben und Rechnungen verstehen soll, wird in dieser Arbeit nicht weiter auf das nondeklarative Gedächtnis und den Erwerb von Prozeduren eingegangen.

1.2.Interne Repräsentation von Wissen

Nachdem die Grundzüge des Aufbaus und die Struktur des Gedächtnisses erläutert wurden, wird nun die interne Repräsentation, das heißt die Darstellung des Wissens im Gehirn, besprochen. In der Literatur wird dabei zwischen propositionalen Repräsentationen (als kleinste Wissenseinheit), Schemata (die die Struktur zwischen den Propositionen angeben) und Modellen (als vereinfachte Darstellung komplexer Sachverhalte) unterschieden. Besonders die Modelle und ihre kognitive Bildung werden in diesem Kapitel besprochen, da sie grundlegend für den Lernprozess sind und falsche mentale Modelle zu falschen Vorstellungen und Vorhersagen führen.

1.2.1. Propositionale Repräsentationen

„*Die wichtigste Stütze des Langzeitgedächtnisses sind Repräsentationen, die nicht die genaue Struktur des Erinnerten bewahren, sondern dessen Bedeutung*“ (Anderson, 1989, S. 112). Diese Bedeutung wird in so genannten propositionalen Repräsentationen gespeichert.

ANDERSON spricht den Propositionen eine zentrale Rolle im Erleben, Deuten und Erkennen von Bedeutungen zu. Für ihn sind sie die kleinstmögliche “*Bedeutungseinheit, die als selbstständige Behauptung stehen kann, also die kleinste Einheit, die sinnvoll als wahr oder falsch beurteilt werden kann*“ (Anderson, 1989, S. 112). Der Mensch speichert dabei jedoch nicht den genauen Wortlaut einer Aussage ab, sondern nur seine Bedeutung. Dies belegen frühere Forschungsarbeiten von ANDERSON, der nachwies, dass Versuchspersonen nur schwer angeben konnten, ob sie den Originalsatz oder einen bedeutungsgleichen Satz gehört hatten (Anderson, 1989, S. 113).

Propositionen bleiben jedoch nicht einzeln im Gedächtnis stehen, sondern sind meist in hierarchischen Netzwerken organisiert und können sogar zu Schemata zusammengefasst werden (Rubitzko, 2006, S. 59). JOHNSON-LAIRD (1980, S. 108) sieht propositionale Repräsentationen über dies als eine erste mentale Darstellung von Informationen. Diese Darstellung besteht aus diskreten Sinneinheiten, den Propositionen, die aus sprachlichen Symbolen zusammengesetzt sind. Wie sie zusammengesetzt sind, beschreibt die Syntax, was dazu führt, dass eine starke Ähnlichkeit zwischen der Struktur der propositionalen Repräsentation und der lingualen Struktur des von ihr beschriebenen Textes besteht.

1.2.2. Schemata

Die eben besprochenen Propositionen eignen sich jedoch nicht für die Erklärung der Repräsentation ganzer Gruppen von zusammengefassten Informationseinheiten. Die Informationen stehen dabei miteinander in Beziehungen und weisen eine ganz bestimmte Struktur, die so genannten Schemata, auf (Anderson, 1989, S. 120 f). Viele Kognitionspsychologen sehen in den Schemata jene Bausteine des Gedächtnisses, der Sprache und des Denkens, die sich sehr gut zur Beschreibung und Erklärung komplexer menschlicher Informationsverarbeitungsprozesse eignen. Das Wissen, das in Schemata gespeichert ist, erleichtert das Denken und

Schlussfolgern eines Individuums. Problematisch wird es jedoch dann, wenn die Erinnerung eines Menschen verfälscht wird, was dadurch zustande kommt, wenn die neuen Informationen so gefiltert werden, dass sie einem bereits bestehenden Schema angeglichen werden und wichtige Aspekte dieser Informationen gelöscht werden, da sie für dieses Schema irrelevant sind (Lukesch, 2001, S. 132 und Mandl & Spada, 1988, S. 124).
Schemata sind dadurch gekennzeichnet, dass es sich um kognitive Strukturen handelt, die allgemeines Wissen im Gedächtnis repräsentieren. Sie weisen so genannte Leerstellen auf, die durch unterschiedliche Inhalte gefüllt werden können (z.B. Im AUTO-Schema sind das Merkmale wie Farbe, Motor etc.). Ein Schema kann derart in ein anders eingebettet sein, dass es diesem hierarchisch untergeordnet ist (z.B. die Schemata LENKRAD oder MITTELKONSOLE sind dem Schema AUTO untergeordnet). Der Inhalt eines Schemas besteht aus episodischem und generischem Wissen. Sie sind dynamische Systeme, die einer ständigen Veränderung unterliegen. Schemata übernehmen zudem Wahrnehmungs- und Kodierungsprozesse und besitzen die Funktion, die Aufmerksamkeit zu verteilen und neues Wissen in bestehende Strukturen zu integrieren (Dutke, 1994, S. 24 ff und Mandl & Spada, 1988, S. 125 ff).

1.2.3. Modelle

1.2.3.1. Modell, Modellsubjekt und Modellobjekt

Spricht man in der Physikdidaktik von „Physik lernen“, so wird damit meist die physikalische Modellbildung der Schüler verstanden. Unter dem Modellbegriff werden alle theoretischen Konstrukte zusammengefasst wie vorläufige Schülervorstellungen, Konstrukte der Wissenschaft oder auch altbewährte Theorien. Ein solches Modell ist beispielsweise das Teilchenmodell des Lichts oder das Modell des Massepunkts (Kircher, 1995, S. 91 ff).
Für die Didaktik ist neben der Beziehung zwischen Objekt (reales Objekt) und Modell vor allem die Beziehung zwischen Subjekt (z.B. Schüler) und Modell von großer Bedeutung, da diese bei den Lehr-Lernprozessen eine zentrale Rolle einnimmt. Der Modellbegriff lässt sich dann folgendermaßen darstellen:

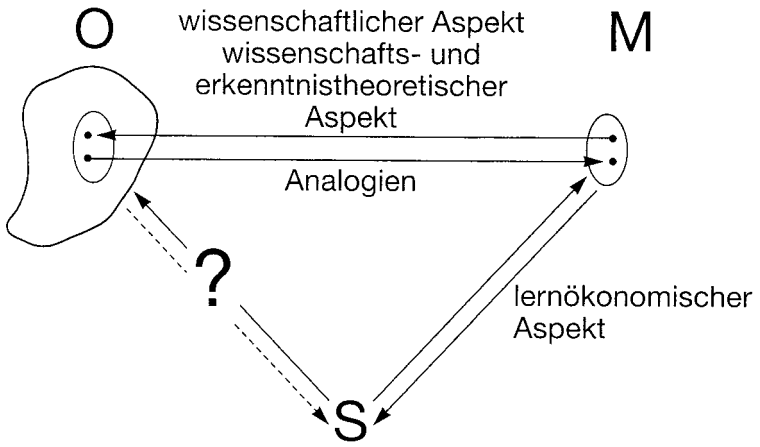


Abbildung 4: Formale Darstellung der Relationen des Modells M zum Modellobjekt O und zum Modellsubjekt S (Kircher, 1995, S. 96)

Die Beziehung zwischen Modell und Objekt betrifft den wissenschaftlichen beziehungsweise den wissenschafts- und erkenntnistheoretischen Aspekt der Modellbildung. Die Analogien (Ähnlichkeiten) zwischen den beiden Aspekten stellen dabei nicht endgültige Zusammenhänge dar, sondern sie können sich im Laufe der Zeit ändern (Kircher, 1995, S. 96).
Der Zusammenhang zwischen dem Modell und dem Modellsubjekt (Schüler) besteht vor allem im Lernaspekt. Welcher Prozess dabei im Gedächtnis des Schülers vonstatten geht und wie die Beziehung zwischen Subjekt und Modell beschaffen sein sollten beschreiben verschiedene Theorien, die sich auf drei Punkte reduzieren und zusammenfassen lassen (Kircher, 1995, S. 106):

(1) Lernen wird als innere Aktivität betrachtet.
(2) Vorraussetzungen für eine Lernaktivität ist die subjektive Bedeutung des Lerninhalts für das Individuum.
(3) Lernen hängt stark von der Beziehung zwischen der kognitiven Struktur des Individuums und der Struktur des Lerninhalts ab.

1.2.3.2.Eigenschaften und Funktionen von Modellen

Allgemein gesagt sollen Modelle erklären, Vorhersagen ermöglichen und das Lernen erleichtern. Diese drei Funktionen sind wesentlich und werden durch die Eigenschaften eines Modells bedingt. Vor allem das Erklären und Lernerleichtern sind für den Physikunterricht von zentraler Bedeutung. Dabei sollte der Lehrer jedoch versuchen, Extrema zu vermeiden: Wird die Relation zwischen Modell und Objekt zu stark in den Vordergrund gerückt, so entstehen schnell physikalische Modelle, die von den Schülern als zu schwer empfunden werden. Legt der Lehrer jedoch sein Hauptaugenmerk auf das Erklären und vereinfacht dadurch die Sachverhalte zu stark, kann es schnell zu willkürlichen Interpretationen physikalischer Phänomene Seitens der Schüler führen, die in der Physik nicht mehr haltbar sind (Kircher, 1995, S. 146).
Sollen Modelle als Lernhilfen fungieren, so müssen sie vor allem anschaulich, bedeutsam, einfach, transparent und dem Schüler vertraut sein. Wie produktiv ein Modell ist, muss in der Fachdidaktik unter dem Gesichtspunkt der Zieldimension betrachtet werden. Ein Modell wird meist dann als anschaulich bezeichnet, wenn es sich bei ihm um wahrnehmbare, gestalthafte Objekte handelt. Bedeutsam ist dies dann, wenn das Modell eine subjektive Bedeutung für den Lernenden einnimmt. Im lernpsychologischen Sinne kann ein Modell dann als einfach bezeichnet werden, wenn es leicht zu veranschaulichen ist beziehungsweise sich durch Handlungen leicht erlernen lässt. Die nächste Eigenschaft von Modellen ist die Transparenz. Sie betrifft vor allem die Beziehung zwischen Modell und Subjekt (Schüler) beziehungsweise Modell und Objekt (Realität). Bei einem transparenten Modell müssen somit zwei Dinge beachtet werden: Zum einen muss die kognitive Struktur des Subjekts klar und eindeutig sein. Ist dies nicht der Fall, ist auch das transparenteste Modell wirkungslos. Zum anderen muss eine klare Struktur zwischen den Begriffen des Objekts und denen des Modells vorhanden sein. Relevante Elemente werden dabei hervorgehoben und unwichtige Elemente werden weg

gelassen. Die Beziehung und Bedeutung der Elemente kann zum Beispiel durch Pfeile verdeutlicht werden. Die letzte Eigenschaft eines Modells ist die Vertrautheit. Damit ein Modell vertraut ist, muss die kognitive Struktur stabil sein. Ist dies der Fall, so wird sie bei einer erneuten Verwendung des Modells wieder erkannt und gegebenenfalls als vertraut empfunden (Kircher, 1995, S. 118-145). Das bezeichnet den so genannten „AHA-Effekt“, wenn die Schüler zum Beispiel in der zehnten Klasse erneut die Mechanik besprechen und sich an die Bedeutung und Beziehung der kinematischen Grundgrößen, die sie in der siebten Klasse schon einmal gelernt haben, erinnern (und das Modell von Geschwindigkeit und Beschleunigung als Vektorpfeile erneut anwenden).

Damit ein bearbeitetes Video als Mittel zur Verdeutlichung von Modellen verwendet werdenden kann, muss es daher den Sachverhalt veranschaulichen (es zeigt das reale Objekt mit seinem physikalischen Zustand, wie Ort, Geschwindigkeit oder Beschleunigung). Es ist dann für den Schüler von Bedeutung, wenn er sich mit dem gezeigten Sachverhalt identifizieren kann (z.B. ein Auto, das um die Kurve fährt). Die Eigenschaft der Transparenz erfüllt das Video dann, wenn die in ihm gezeigten Strukturen (z.B. die Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Beschleunigung) deutlich und eindeutig herausgehoben werden. Aus diesen Bedingungen kann abgelesen werden, dass ein Modell nicht zwingend statisch den Schülern dargeboten werden muss, sondern in Form von dynamischen Repräsentationen verdeutlicht werden kann.

Die physikalische Modellbildung beinhaltet, wie bereits erwähnt, nicht nur die Entwicklung und Darstellung eines Modells durch die Lehrkraft, sondern natürlich auch die Verankerung, Verwendung und Bedeutung des Modells durch das Modellsubjekt (den Schüler). Hat der Schüler die physikalischen Strukturen erkannt und sieht diese als bedeutsam und vertraut an, so entwickelt er ein mentales Modell von ihnen.

1.2.3.3.Mentale Modelle

Der Begriff „Mentale Modelle“ ist in der Literatur nicht einheitlich definiert.

JOHNSON-LAIRD unterscheidet mentale Modelle deutlich von Propositionen. Er sieht sie als eine analoge Abbildung von Ausschnitten der realen Welt, die sich aus propositionalen Repräsentationen zusammensetzen oder aus der direkten Wahrnehmung gebildet werden. Ein mentales Modell ist seiner Ansicht nach ein innerer Gegenstand, mit dessen Hilfe durch Analogiebeziehungen zum Objekt (Verhaltens-, Struktur- und Funktionsanalysen) Aufgaben oder Probleme mental gelöst werden können (Johnson-Laird, 1980, S. 108).

Auch DUTKE sieht mentale Modelle als einen *„Ausdruck des Verstehens eines Ausschnittes der realen Welt“* (Dutke, 1994, S. 2). Sie können wie bei JOHNSON-LAIRD Planungs- und Steuerungsfunktionen übernehmen. Ihr Schwerpunkt kann dabei sowohl handlungs- als auch verstehensorientiert sein. DUTKE macht sich im Gegensatz zu anderen Autoren darüber Gedanken, wer der Urheber mentaler Modelle ist. Er unterscheidet dabei zwischen mentalen Modellen, die von außen initiiert werden (z.B. durch den Lehrer) oder vom Individuum aus

eigenem Antrieb erzeugt werden, um sich das Verstehen beziehungsweise Behalten verschiedener Dinge zu erleichtern (Dutke, 1994, S. 2).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mentale Modelle hypothetische Konstrukte sind, mit denen die menschliche Informationsverarbeitung beschrieben und erklärt werden kann. Sie erfüllen weitestgehend die Funktionen allgemeiner Modelle und können erklären, steuern (z.B. Routinehandlungen) oder vorhersagen. Hat sich der Lernende ein mentales Modell erstellt, so lässt es sich nur noch sehr schwer ändern. Das ist sogar dann noch der Fall, wenn es objektiv betrachtet die Wirklichkeit falsch abbildet (Dutke, 1994, S. 76).

Dieser Aspekt wird sehr stark im Zusammenhang mit Schülervorstellungen diskutiert. Der Lehrer muss sich dieser Problematik immer bewusst sein und sollte daher besonders bei der Einführung neuer Themenbereiche darauf achten, keine falschen mentalen Modelle zu provozieren beziehungsweise bestehenden falschen mentalen Modellen sogar entgegen zu wirken. Für den Mechanikunterricht bedeutet dies, dass der Lehrer besonders auf das richtige und vollständige Verständnis der kinematischen Grundgrößen achten sollte. Dabei kann ein völlig neuer Einstieg in die Kinematik, wie er von WILHELM (2005) vorgeschlagen wird, helfen. WILHELM steigt dabei direkt zweidimensional in den Kinematikunterricht ein und verdeutlicht die Grundgrößen durch dynamisch ikonische Repräsentationen. Eine anschauliche Darstellungs- und Analysemöglichkeit der zweidimensionalen Betrachtung bietet die Videoanalyse, die bei gezieltem und geschicktem Einsatz die Entstehung falscher mentaler Modelle verhindern kann, da sie anhand eines realen Beispiels abstrahiert.

Denn Mentale Modelle, die zum Verstehen neuer Sachverhalte entwickelt werden, basieren meist auf Analogien. Analogien sind die Beziehungen zwischen einem Modell und dem realen Objekt. Ihre Erkenntnisgewinnung beruht dabei allein auf der Übertragung der Beziehungen und nicht auf der Ähnlichkeit der Elemente. Um Analogien zu erkennen oder zu ziehen, benötigt man in Schemata organisiertes Wissen. Sind die Elemente im Basisbereich (bereits gespeichertes Wissen) und im Zielbereich (neuer Sachverhalt) sehr ähnlich, so besteht eine große Wahrscheinlichkeit, dass ein geeignetes Schema aktiviert wird. Bei der Konstruktion eines mentalen Modells werden die Leerstellen eines Schemas ausgefüllt, wodurch die abstrakten Relationen dieses Schemas auf das spezielle Modell übertragen werden. „*Die Folge ist eine Anreicherung des Modells durch Kontextwissen, das Bestandteil des Schemas ist. Das Ableiten neuer Folgerungen wird dadurch erleichtert oder ermöglicht, dass die abstrakten Relationen durch Beispiele vertrauter, vorstellbarer Sachverhalte repräsentiert sind. Das mentale Modell ist also konkreter als die zugrunde liegende Wissensbasis*“ (Dutke, 1994, S. 77). Das Besondere an mentalen Modellen ist die Tatsache, dass in ihnen Sachverhalte der Umwelt dynamisch simuliert werden können. Dabei werden Ergebnisfolgen gedanklich durchgespielt. Die Probehandlung kann dabei zu neuen Modellvorstellungen und vorher nicht gekannten Zusammenhängen und Folgerungen führen (Dutke, 1994, S. 76 f).

2. Lerntheoretische Aspekte

Im diesem Kapitel werden drei Ansätze zu Informationsverarbeitung vorgestellt. Dabei handelt es sich um die „Theorie zum Lernen mit Multimedia“ von MAYER, das „Integrierte Modell des Text- und Bildverstehens“ von SCHNOTZ und BANNERT und die „Cognitive-load-Theorie“ von SWELLER. In der zusammenfassenden Darstellung wird dann darauf eingegangen, wie nach diesen Theorien Lernmaterial gestaltet werden und auf was der Lehrer bei der Unterrichtsplanung und Durchführung achten sollte.

Allen drei Theorien liegen folgende Annahmen zu Grunde:

(1) Das Arbeitsgedächtnis besitzt eine begrenzte Kapazität.

(2) Die Informationsverarbeitung erfolgt auf zwei verschiedenen Verarbeitungskanälen gemäß der Dual-Code-Theorie.

(3) Die Informationsverarbeitung ist ein aktiver Prozess.

Die erste Annahme, dass das Arbeitsgedächtnis eine begrenzte Kapazität aufweist, geht auf das Modell von BADDELEY und HITCH (zusammengefasst in Lukesch, 2001, S. 74-77 und Baeriswyl, 1989, S. 18-20) zurück und wurde bereits in Kapitel 1.1.3. besprochen.

Die zweite Annahme, die verschiedene Verarbeitungskanäle postuliert, ist die Dual-Code-Theorie von PAIVIO (zusammengefasst in Lukesch, 2001, S. 94 ff). Er entwickelte 1971 ein Erklärungsmodell für den Effekt, dass der Mensch für Bilder eine deutlich höhere Gedächtniswirkung besitzt als für Wörter. Sein Modell basiert auf zwei Kodierungssystemen, einem bildhaften und einem verbalen (vgl. Abbildung 5). Das bildhafte System verarbeitet und speichert nonverbale Informationen als Vorstellungsbilder, das verbale System die sprachlichen Teile der Information. Im verbalen Teil des Systems können die einzelnen Einheiten gleichzeitig und unabhängig, das heißt parallel, im nonverbalen Teil nur sequentiell verarbeitet werden.

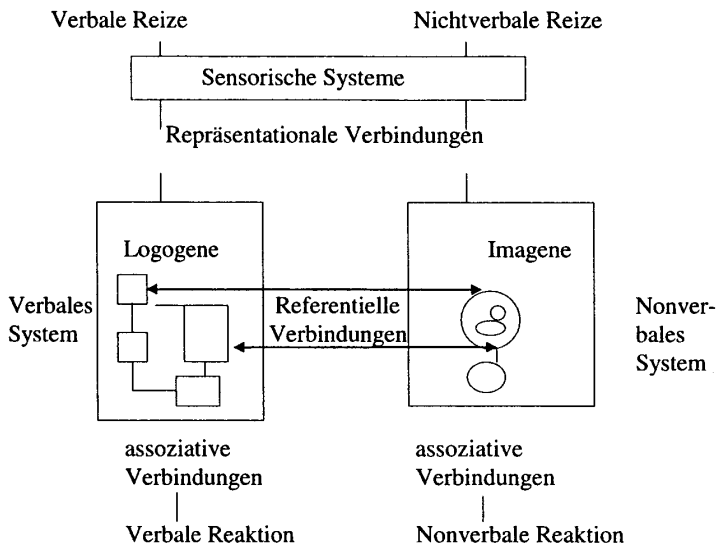


Abbildung 5: Struktur des verbalen und nonverbalen Verarbeitungssystem gemäß der Dual-Code-Theorie (Paivio, 1986, S. 67, zitiert aus Lukesch, 2001, S. 95)

Für die referentielle Verbindung der beiden Systeme nimmt PAIVIO drei verschiedene Stadien der Informationsverarbeitung an: Die unterste Stufe bildet die repräsentationale Ebene. Hier werden nonverbale Informationen durch Vorstellungsbilder und verbale Informationen durch verbale Beziehungen repräsentiert. Die nächste Stufe ist die referentielle Ebene, in der das eine System jeweils durch das andere aktiviert wird. Somit löst ein Wort ein Vorstellungsbild und ein Bild eine verbale Repräsentation aus. Auf der dritten Stufe, der assoziativen Ebene, entstehen innerhalb jedes Systems Verbindungen zu anderen Einheiten (z.B. Bild- oder Wortassoziationen) (Lukesch, 2001, S. 96).
Die dritte Grundlage der nachfolgenden Lerntheorien besagt, dass das Lernen ein aktiver Prozess ist. Das bedeutet, dass der Lernvorgang immer bewusst und gewollt geschehen muss. Lernen ist damit das aktive Erschaffen von Erkenntnissen und Bedeutungen, die mit früher Gelerntem in Einklang gebracht werden. Dabei werden Verbindungen zwischen Reizen und dem Vorwissen geschaffen, die im Langzeitgedächtnis verankert werden. Diese Verbindungen erleichtern später das Erinnern und Verstehen von Gelerntem (Rubitzko, 2006, S. 69-70).

2.1.Theorie zum Lernen mit Multimedia

Aus diesen Grundannahmen entwickelte MAYER sein Modell der Informationsverarbeitung, das sich wie folgt darstellen lässt:

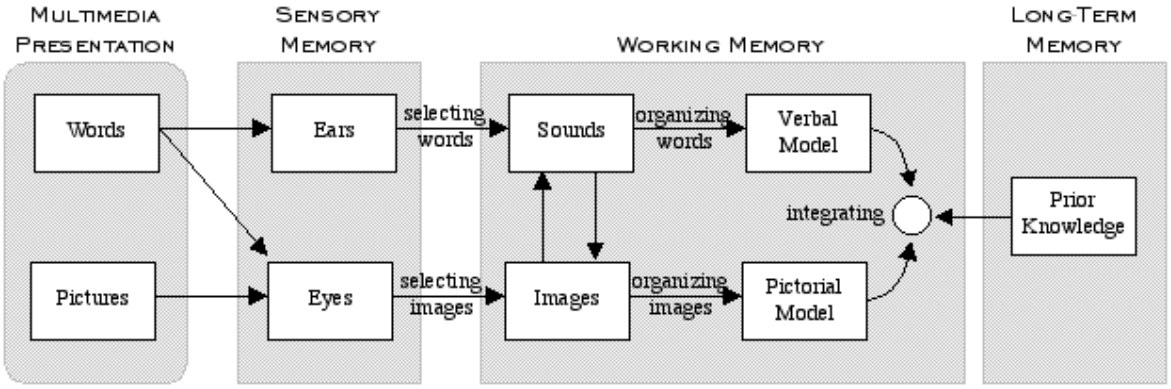


Abbildung 6: Theorie zum Lernen mit Multimedia (Mayer, 2001, S. 44)

Abbildung 6 beschreibt das von MAYER (2001) entwickelte Modell zum Lernen mit Multimedia, anhand dessen er den menschlichen Informationsverarbeitungsprozess erklärt. Die verschiedenen Kästchen repräsentieren die einzelnen Gedächtnisformen: sensorisches Gedächtnis, Arbeitsgedächtnis und Langzeitgedächtnis. Äußere Reize werden über die Sinnesorgane aufgenommen und gemäß der Überlegungen zum sensorischen Gedächtnis (vgl. Kapitel 1.1.) sinneskanalspezifisch präsent gehalten. Durch die Zuwendung von Aufmerksamkeit werden die sprachbasierten beziehungsweise bildhaften Informationen in sprachbasierte oder bildhafte Repräsentationen im Arbeitsgedächtnis umgewandelt. Dabei werden die Informationen (Wörter oder Bilder) selektiert. Diese Selektion ist aufgrund der begrenzten Kapazität des Arbeitsgedächtnisses sehr wichtig (Mayer, 2001, S. 41-44).

Der größte Teil der Informationsverarbeitung findet im Arbeitsgedächtnis statt. Die linke Seite des in Abbildung 6 gezeigten Arbeitsgedächtnisses zeigt das selektierte Informationsmaterial, das direkt aus dem sensorischen Gedächtnis übertragen wird. Die rechte Seite dagegen zeigt die mentale Repräsentation der Informationstypen. Beim Übergang von der linken auf die rechte Seite werden die Informationen im Arbeitsgedächtnis in verbalen beziehungsweise nonverbalen Kanälen neu organisiert. Dabei werden die sprachbasierten beziehungsweise bildhaften Repräsentationen zu jeweils eigenständigen Modellen zusammengesetzt. Ob der Lernende die Informationen sinnstiftend organisieren kann, hängt dabei von der Begrenztheit der Ressourcen im Arbeitsgedächtnis und von der Anstrengung des Lernenden ab. Hier spielt die Aufmerksamkeit eine zentrale Rolle (Mayer, 2001, S. 55 f).
Der wichtigste Schritt in dieser Theorie ist MAYERs Ansicht nach die Integration zwischen dem verbalen und dem nonverbalen Modell. Dabei werden die codespezifischen Modelle mit einander verknüpft und mit dem Vorwissen aus dem Langzeitgedächtnis verbunden. Dieser Prozess ist sehr aufwendig und bedarf daher einer effektiven Nutzung aller kognitiven Ressourcen, da der Lernende hier die Strukturen der beiden Codesysteme erkennen und das Vorwissen dafür nutzen muss, um die Integration richtig zu steuern. Schließlich gelangen die Informationen durch Integration ins Langzeitgedächtnis, wo das Wissen eines Menschen dauerhaft gespeichert ist (Mayer, 2001, S. 45-57).

2.2.Integriertes Modell des Text- und Bildverstehens

2.2.1. Grundlagen des Modells

SCHNOTZ und BANNERT (1999) entwickelten in Anlehnung an die Theorie von MAYER (2001) ein integriertes Modell des Text- und Bildverstehens. Sie bedienten sich dabei ebenfalls der drei Grundannahmen, die zu Anfang von Kapitel 2 erklärt sind. Sie sehen jedoch die bei MAYER angenommene Parallelität von Text- und Bildverarbeitung als problematisch, da Texte auf verschiedenen Zeichensystemen basieren und somit unterschiedliche Repräsentationsprinzipien verwenden. Texte besitzen deskriptionale Repräsentationen, da sie aus Symbolen bestehen, die einen Sachverhalt beschreiben. Bilder hingegen haben eine depiktionale Repräsentation, bestehend aus ikonischen Zeichen. Sie sind mit dem Bezeichneten durch gemeinsame Strukturmerkmale verbunden. Depiktionale Repräsentationen sind zum Beispiel Diagramme, realistische oder logische Bilder (Schnotz; Bannert, 1999, S. 219-220).

2.2.2. Annahmen des Modells

Als Lösung bildeten SCHNOTZ und BANNERT ein alternatives Modell zu MAYER (2001), in dem stärker auf die verschiedenen Repräsentationsprinzipien eingegangen wird. Sie postulierten: der Prozess des „*Text- und Bildverstehens wird dabei als anforderungsorienierte Konstruktion von deskriptionalen und depiktionalen mentalen Repräsentationen durch Selektions-, Organisations-, Symbolverarbeitungs- und Strukturabbildungsprozesse sowie Prozesse*

der mentalen Modellkonstruktion und Modellselektion angesehen“ (Schnotz: Bannert, 1999, S.217).

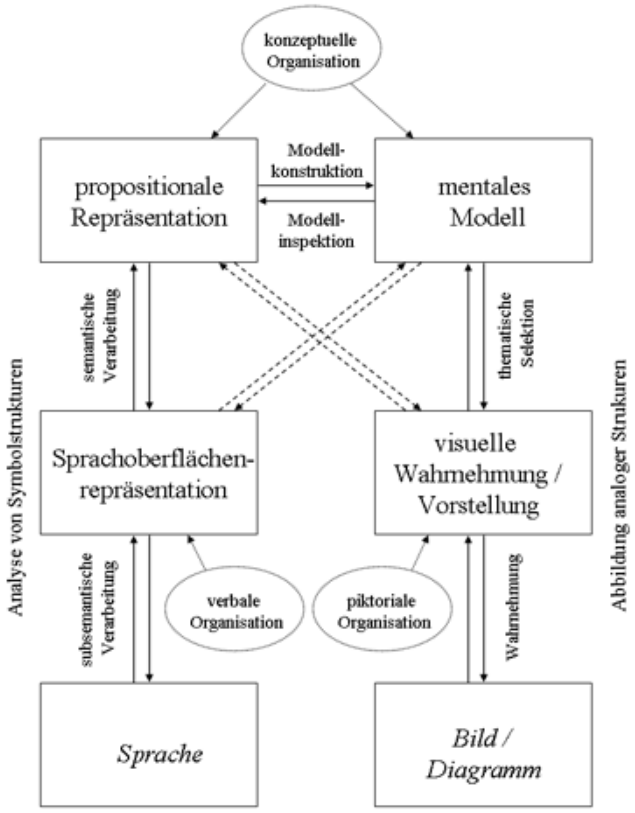


Abbildung 7: Schematische Darstellung eines integrierten Modells des Text- und Bildverstehens (Schnotz, 2004)

Abbildung 7 zeigt die graphische Darstellung des Modells von SCHNOTZ und BANNERT. Es setzt sich aus einem beschreibenden (deskriptionalem) Pfad links und einem darstellenden (depiktionalem) Repräsentationszweig rechts zusammen. „*Der deskriptionale Zweig besteht aus dem (externen) Text, der (internen) mentalen Repräsentation der Textoberflächenstruktur sowie der (ebenfalls internen) propositionalen Repräsentation des semantischen Gehalts. Die Interaktionen zwischen diesen Repräsentationen basieren auf Prozessen der Symbolverarbeitung. Der depiktionale Zweig besteht aus dem (externen) Bild, der (internen) visuellen Wahrnehmung bzw. Vorstellung des Bildes sowie dem internen mentalen Modell des dargestellten Sachverhalts*“ (Schnotz; Bannert, 1999, S. 221). Die Repräsentationen interagieren dabei in Form analoger Strukturabbildungsprozesse miteinander.

Dem zur Folge entwickelt ein Individuum beim Lernen und Verstehen eines Textes eine mentale Textoberflächenrepräsentation, die durch eine semantische Verarbeitung im Gedächtnis propositional repräsentiert wird. Anhand der propositionalen Repräsentation, auch Textbasis genannt, konstruiert das Individuum ein mentales Modell des Sachverhalts. Die Konstruktion

basiert dabei nach SCHNOTZ und BANNERT (1999, S. 221) auf auf- und absteigenden Schemaaktivationen, die Selektions- und Organisationsfunktionen übernehmen. Absteigende Aktivation bewirkt eine Selektion von anforderungs- und zielrelevanten Informationen. Das Wechselspiel auf- und absteigender Aktivation führt dann zu einer bestimmten Schemakonfiguration, die optimal zur vorliegenden Textinformation passt. Die Organisationsprozesse verarbeiten verbale Informationen nach Syntax (Satzbau) und Morphologie (nach äußerer Form und Gestalt) und führen so zu einer strukturierten mentalen Repräsentation der Textoberfläche. Die konzeptionellen Organisationsprozesse verarbeiten die Präsentation der Textoberfläche und bilden so propositionale Repräsentationen und mentale Modelle aus.
Analog dazu entwickelt ein Lernender beim Bildverständnis durch Wahrnehmungsprozesse eine visuelle Vorstellung des Bildes und durch eine thematische Selektion der Vorstellung entsteht schließlich eine propositionale Repräsentation beziehungsweise ein mentales Modell des abgebildeten Gegenstands. Auch bei der Bildwahrnehmung gibt es auf- und absteigende Schemaaktivationen. Aufsteigende Aktivation führt zu einer visuellen Enkodierung anforderungsrelevanter Informationen, wohingegen die absteigende Aktivation eine Selektion der Informationen bewirkt (Schnotz; Bannert, 1999, S. 221). Um ein Bild nicht nur wahrzunehmen, sondern auch verstehen zu können, muss ein Individuum aus der thematischen Struktur des Bildes über semantische Prozesse ein mentales Modell des Inhalts konstruieren. Die thematische Selektion geschieht meist passend zur Aufgabe und beinhaltet oft Allgemeinwissen, das dann in das mentale Modell mit einfließt (Rubitzko, 2006, S. 72 f). Das Individuum konstruiert dieses Modell, indem es wahrgenommene graphische Gegebenheiten auf mentale Relationen abbildet. Das Bildverstehen kann somit als ein Prozess der Abbildung analoger Strukturen verstanden werden. Anhand der entstandenen Modelle können neue Informationen abgelesen werden. Diese so genannte Modellinspektion wird laut SCHNOTZ und BANNERT in Form von Propositionen gemacht. Somit findet ihrer Meinung nach eine fortlaufende Interaktion zwischen der Modellkonstruktion und –inspektion statt (Schnotz; Bannert, 1999, S. 221 f).

2.3.Cognitive load theory

Eine ganz andere Art der Theorie über die Verarbeitungsprozesse ist die Cognitive-load-Theorie von SWELLER (Sweller et al., 1998, S. 251-292). Sein Augenmerk liegt auf der begrenzten Kapazität des Arbeitsgedächtnisses und der optimal Nutzung seiner Ressourcen beziehungsweise einer Verhinderung seiner Überlastung. Das Langzeitgedächtnis besitzt im Gegenteil dazu eine nahezu unbegrenzte Kapazität. Sein Wissen ist in Schemata organisiert, die die einkommenden Informationen nach der Art ihrer Verwendung kategorisieren. Bereits bestehende Schemata können zudem dabei helfen, ein neues Schema zu konstruieren oder Informationen im Arbeitsgedächtnis zu kodieren. Die Art und Weise, wie Informationen im Arbeitsgedächtnis verarbeitet werden ist die Hauptangelegenheit der Cognitive-load-Theorie. Beim Lernprozess wird das Arbeitsgedächtnis von drei unterschiedlichen kognitiven Belas-

tungen (cognitive loads) beansprucht: Intrinsic cognitive load (ICL), extraneous cognitive load (ECL), germane cognitive load (GCL).

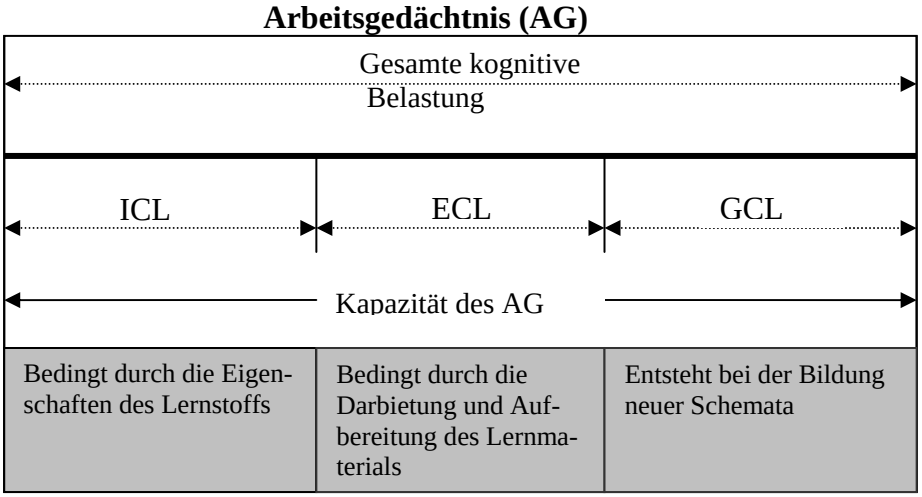


Abbildung 8: strukturelle Darstellung der Cognitive-load-Theorie von SWELLER

2.3.1. Intrinsic cognitive load

Der Intrinsic cognitive load bezeichnet die Beanspruchung des Arbeitsgedächtnisses, die durch die Inhalte des Lernmaterials zustande kommt. Lerninhalte können dem zu Folge danach unterschieden werden, in welcher Art sie das Arbeitsgedächtnis belasten. Die Belastung hängt davon ab, wie viele Informationen gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis präsent sind und verarbeitet werden. Hierbei ist es wichtig, ob sie nacheinander abgearbeitet werden können oder gleichzeitig aktiv sein müssen, da sie miteinander interagieren. Betrachtet man beispielsweise einen Lernenden, der in einer fremden Sprache neue Vokabeln lernt, so belastet er sein Arbeitsgedächtnis nicht sehr stark, da er die Wörter nacheinander lernen kann. Der Lerninhalt der verschiedenen Vokabel muss also nicht miteinander interagieren. Die Belastung des Arbeitsgedächtnisses ist somit gering (Sweller et al., 1998, S. 259).

Lernt der Schüler jedoch keine Vokabeln, sondern möchte beispielsweise das zweite Newtonsche Gesetz mit F = m*a verstehen, so muss er während des Lernprozesses mehrere Sinneinheiten („a ist eine vektorielle Größe, die von der Änderung der Geschwindigkeit in einem bestimmten Zeitintervall abhängt“, „F bezeichnet die Kraft, die ebenfalls vektoriell ist“…) gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis aktiv haben. Die Elemente interagieren sehr stark miteinander und bewirken so eine hohe Belastung dieses Teils des Gedächtnisses. Kann ein Lernender mit stark interagierenden Lerninhalten umgehen, so spricht SWELLER davon, dass er einen Sachverhalt verstanden hat. Je stärker die Sinneinheiten miteinander interagieren, desto höher ist der kognitive Aufwand und desto schwerer ist der Lerninhalt zu verstehen (Sweller et al., 1998, S. 260 f).

Wie sehr ein Lerninhalt das Arbeitsgedächtnis belastet, ist jedoch nicht bei jedem Menschen gleich. Die Belastung wird stark vom Zusammenspiel des Vorwissens und dem eigentlichen Inhalt beeinflusst. *„Was für den in einem Wissensgebiet unerfahrenen Lernenden viele intera-*

gierende Sinneseinheiten darstellt, ist für den erfahrenen Lerner vielleicht nur eine einzige Einheit“ (Rubitzko, 2006, S. 74). Dieser Unterschied ergibt sich daraus, ob beim Lerner für den aktuellen Lerninhalt bereits ein Schema vorliegt, mit dem die Inhalte zu Sinneinheiten zusammengefasst werden können oder nicht.

Für das Lernen in der Schule und die Unterrichtsvorbereitung des Lehrers wird der Intrinsic cognitive load meist als eine Konstante angesehen. Sie nimmt eine bestimmte feste Menge an Kapazität in Anspruch und der Lehrer kann ihn nicht beeinflussen. Unter dem Gesichtspunkt der einzelnen Stunde ist das richtig, doch hat der Lehrer auf das ganze Schuljahr gesehen die Möglichkeit den Intrinsic cognitive load eines Schülers zu beeinflussen. Durch gezielten Aufbau von Vorwissen und Schemata sollte die Minimierung des Intrinsic cognitive load ein Lehrziel des Lehrers sein. Der Schüler kann dadurch an seinen Anforderungen „wachsen“, da er durch sein Vorwissen und die von ihm erstellten Schemata und mentalen Modelle, die er sich in den vorangegangenen Wochen, Monaten oder Schuljahren angeeignet hat, besser in der Lage ist, mit gegenwärtigen oder zukünftigen Lerninhalten umzugehen. Angewandt auf den Mechanikunterricht in der Schule bedeutet das, dass der Schüler einfacher die Dynamik versteht, wenn er vorher das Prinzip der kinematischen Grundgrößen (Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung …) verinnerlicht hat. Der Lehrer sollte folgende Dinge beachten: Erstens den Stoffverteilungsplan sinnrichtig aufbauen, zweitens sicherstellen, dass die Schüler nach jeder Einheit den Inhalt verstanden haben und anwenden können und drittens gezielt den Aufbau von Schemata (z.B. durch die geeignete Darstellungsform) fördern. Zudem sollte der Lehrer, um eine kognitive Überlastung zu vermeiden, die Lernziele nicht zu hoch stecken und nicht zu viele Lernziele in eine Unterrichtsstunde stecken.

2.3.2. Extraneous cognitive load

Der Extraneous cognitive load beschreibt die Belastung des Arbeitsgedächtnisses durch die Art der Aufbereitung des Lernmaterials. Das Design, die Organisation und Präsentation des Lernmaterials beeinflusst deutlich die Beanspruchung des Kurzzeitgedächtnisses. Da die limitierte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses die kognitiven Leistungen des Menschen am stärksten beschränken, sollte das Lernmaterial so erstellt werden, dass es einen geringen Extraneous cognitive load erzeugt. Das ist vor allem dann von Bedeutung, wenn der Intrinsic cognitive load bereits sehr hoch ist (Sweller et al., 1998, S. 262).

Für die Schule bedeutet das, dass der Lehrer bei der Erstellung des Lernmaterials immer darauf achten soll, dass kein hoher Extraneous cognitive load bei einem neuen Lernstoff entsteht. Das kann durch geschickte Kodierung des Lerninhalts erreicht werden. So kann beispielsweise die Bewegung eines geworfenen Balls durch ein Stroboskopbild, einen Graphen, eine dynamisch ikonische Repräsentation oder ähnliches dargestellt werden. Welche dieser Darstellungsformen der Lehrer jedoch verwenden sollte, hängt allein vom gewünschten Lernziel ab. Sollen die Schüler begreifen, dass beim schrägen Wurf eine Parabelflugbahn entsteht, so verwendet der Lehrer praktischer Weise das Stroboskopbild. Soll jedoch klar werden, dass der

Ball die ganze Zeit beschleunigt wird, so verwendet der Lehrer eine Pfeildarstellung der relevanten Größen. Die verschiedenen Arten der Darstellung und ihre Verwendung nennt man in der Didaktik Kodierung (vgl. Kapitel 3.1.). Das bedeutet, dass der Extraneous cognitive load durch eine geschickte Kodierung möglicht klein gehalten werden sollte.
SWELLER weist in diesem Zusammengang darauf hin, die Verbindung verschiedener Darstellungsformen so zu wählen, dass ein möglichst geringer Extraneous cognitive load entsteht. Wird beispielsweise ein Diagramm und ein Text so miteinander kombiniert, dass man eines von beiden benötigt, um das andere zu verstehen, interagieren beide Darstellungsformen sehr stark und es entsteht ein großer Extraneous cognitive load (Sweller et al., 1998, S. 263). Verdeutlichen jedoch beide unabhängig von einander den gleichen Inhalt, wird also dieser auf zwei verschiedene Arten kodiert, interagieren sie weniger miteinander und der Extraneous cognitive load ist geringer.

2.3.3. Germane cognitive load

Als dritte Form der kognitiven Belastung beschreibt SWELLER den Germane cognitive load. Er gibt die Belastung im Arbeitsgedächtnis an, die durch die Entwicklungs- und Aktivierungsprozesse von Schemata entsteht. Wenn Intrinsic cognitive load und Extraneous cognitive load wenig Kapazität beanspruchen, ist noch Raum für den Germane cognitive load und neue Schemata können erzeugt werden (Sweller et al., 1998, S. 264).
Der Erwerb und die Anwendung von Schemata ist eine Möglichkeit das Arbeitsgedächtnis zu entlasten und für den Wissenserwerb das Langzeitgedächtnis mit zu nutzen. Wie beim Intrinsic cognitive load erklärt, können existierende Schemata dafür sorgen, dass miteinander interagierende Sinneinheiten zu komplexen Einheiten zusammengefasst werden und als ein Ganzes aktiv sind (Sweller et al., 1998, S. 260 f).
Der Lehrer sollte daher darauf achten, dass der Intrinsic cognitive load und der Extraneous cognitive load klein sind, damit der Germane cognitive load groß sein kann. Das ist in den meisten Fällen jedoch recht anspruchsvoll, da der Lehrer bei durchschnittlich 30 Schülern in einer Klasse nicht bei jedem Lernenden weiß, wie viel Kapazität ein Lerninhalt bei jedem einzelnen benötigt. Somit kann es vor allem bei schwachen Schülern, die meist bei gleichem Lerninhalt aufgrund mangelnden Vorwissens beziehungsweise mangelnder Schemata einen höheren Intrinsic cognitive load besitzen, durch vom Lehrer geforderten Germane cognitive load zu einer Überlastung des Arbeitsgedächtnisses kommen. Diese Schüler sind dann überfordert und können den dargebotenen Lernstoff nicht aufnehmen.

2.4.Zusammenfassende Darstellung

Die theoretische Grundlage der eben besprochenen Informationsverarbeitungstheorien bilden drei Annahmen:

(1) Das Arbeitsgedächtnis besitzt eine begrenzte Kapazität.
(2) Die Informationsverarbeitung erfolgt auf zwei verschiedenen Verarbeitungskanälen gemäß der Dual-Code-Theorie.
(3) Die Informationsverarbeitung ist ein aktiver Prozess.

MAYER (2001, S. 41 ff) entwickelte ausgehend von der Dual-Code-Theorie eine Theorie zum Lernen mit Multimedia. Er postuliert, dass die Hauptarbeit der Informationsverarbeitung im kapazitätsbegrenzten Arbeitsgedächtnis geleistet wird. Dabei unterscheidet er zwischen einem verbalen Verarbeitungskanal, der für Texte zuständig ist und einem nonverbalen Zweig, der visuelle Informationen verarbeitet. Durch Organisationsprozesse werden die Informationen abhängig vom Codesystem in Repräsentationen umgewandelt. Als den wichtigsten Schritt seiner Theorie sieht er die Integration der mentalen Repräsentationen mit dem Vorwissen an. Durch diesen Vorgang kann das neu gewonnene Wissen im Langzeitgedächtnis verankert werden.

Ausgehend von dieser Theorie entwarfen SCHNOTZ und BANNERT (1999, S. 317-236) ein integriertes Modell zum Text- und Bildverständnis. Ihm zu Folge bieten Texte und Bilder komplementäre Wege zum Aufbau mentaler Repräsentationen. *„Im Gegensatz zum Modell von Mayer, der die Parallelität der Text- und Bildverarbeitung voraussetzt, betonen Schnotz & Bannert (1999) die Unterschiede in der mentalen Repräsentation von text- und bildbasierten Informationen und der jeweiligen Verarbeitung*“ (Rubitzko, 2006, S. 71). Es besteht aus zwei Zweigen: einem deskriptiven Zweig, in dem durch die Analyse von Symbolstrukturen aus einem Text eine propositionale Repräsentation wird, aus der ein mentales Modell konstruiert wird, und einem depiktionalen Zweig, in dem durch die Abbildung analoger Strukturen aus einem Bild oder Diagramm ein mentales Modell wird.

SWELLER (Sweller, et al., 1998, S. 251- 292) legt in seiner Cognitive-load-Theorie das Augenmerk besonders auf die Überlastung des Arbeitsgedächtnisses. Er unterscheidet drei verschiedene Belastungen, die entweder durch den Lerninhalt (Intrinsic cognitive load), die Aufarbeitung und Darstellung (Extraneous cognitive load) oder den Erweb und die Aktivation von kognitiven Schemata (Germane cognitive load) entstehen. Die Lehrkraft kann bei seinem Unterricht den meisten Einfluss auf den Extraneous cognitive load nehmen. Der Intrinsic cognitive load ist eine mehr oder weniger feste Größe. Vor allem bei neuen komplexen Sachverhalten, bei denen die Schüler nur ein geringes Vorwissen oder sogar falsche Vorstellungen (vgl. Kapitel 3.2.1.) besitzen, ist der Intrinsic cognitive load sehr groß. Um eine Überlastung des Arbeitsgedächtnisses zu vermeiden, muss der Lehrer darauf achten, dass der Extraneous cognitive load gering gehalten wird.

Diesen drei Theorien zur Folge sollte es für einen Lehrer von besonderer Bedeutung sein, das Lernmaterial der Schüler so aufzuarbeiten, dass das Arbeitsgedächtnis nicht überlastet wird

und möglichst beide Verarbeitungskanäle angesprochen werden. Da der Lernprozess zudem ein aktiver Prozess ist, sollte nach SCHNOTZ und BANNERT (1999, S.222) die Frage berücksichtigt werden, wie die Schüler die verschiedenen Wege der mentalen Modellkonstruktion nutzen und von welchen Bedingungen dies abhängt. Wesentlich für die Nutzung von Texten ist ihrer Meinung nach die kognitive Ökonomie, nach der der Schüler den Aufwand zur Konstruktion und Nutzung der mentalen Modelle möglichst gering hält. Der kognitive Aufwand beim Textverstehen ist nach SCHNOTZ und BANNERT generell höher als beim Bildverstehen, da die Modellkonstruktion des Textes über die Bildung einer propositionalen Repräsentation stattfindet. Sie muss somit von einer symbolischen zu einer analogen Repräsentationsform überführt werden.

Schüler entscheiden sich jedoch meist nicht nach dem objektiven Konstruktionsaufwand, sondern laut SCHNOTZ und BANNERT (1999, S. 222 f) nach subjektiven Einschätzungen des Konstruktions- und Nutzungsaufwands. Schüler schätzen diesen vor allem beim Bildverstehen falsch ein. SCHNOTZ und BANNERT begründen das folgender maßen: „*Während beim Textverstehen durch die lineare Struktur des Textes eine bestimmte Verarbeitungsreihenfolge vorgegeben ist, so dass auftretende Verstehensprobleme relativ leicht bemerkt werden, ist diese Reihenfolge beim Bildverstehen wenig festgelegt*“ (Schnotz; Bannert, 1999, S. 223). Beim Wissenserwerb mit Bildern steht also die Gefahr einer „Verstehensillusion“, wohingegen der Schüler bei Texten eher merkt, wenn er etwas nicht verstanden hat. Um diese Gefahr zu minimieren, ist es besonders wichtig, den Umgang mit jeder Art von Bildern in der Schule zu üben. Beherrscht der Schüler diese Arbeitsweise gut und sicher, so erleichtert dies den Prozess des Wissenserwerbs.

3. Verschiedene Darstellungsformen und ihre Funktionen

Im folgenden Kapitel werden zunächst die verschiedenen Darstellungsformen skizziert und anschließend die für diese Arbeit wichtigen Formen diskutiert. Dabei handelt es sich um Bilder, dynamisch ikonische Repräsentationen und multiple Repräsentationen. Die Darstellungsform Text wird vollständigkeitshalber kurz angesprochen.

Zu jeder der genannten Darstellungsformen werden ihre Eigenschaften und Funktionen vorgestellt. Beispiele aus den Bereichen der Dynamik und Kinematik sollen verdeutlichen, wie die Funktionen im Physikunterricht konkretisiert werden können.

3.1. Einteilung der Darstellungsformen

Über die Kategorisierung und Einteilung der verschiedenen Darstellungsformen gibt es in der Literatur keine Einigkeit.

RUBITZKO (2006, S. 79 f) ordnet die verschiedenen Darstellungsformen drei Haupttypen zu: den Bildern, Texten oder Kombinationen aus beidem. Er betont dadurch die Unterscheidung zwischen verbalen und ikonischen Repräsentationen. Alternativ dazu bietet er eine Kategorisierung nach den besonderen Eigenschaften von Multimedia an, gibt dabei jedoch zu bedenken, dass dies besondere Schwierigkeiten aufweist und eine solche Gliederung in sehr viele Unterbereiche zerfallen würde. Zudem lassen sich seiner Ansicht nach bei dieser Strukturierung Formen wie die Animation nicht exakt zuordnen.

BALLSTAEDT (1997, S. 5 f) hingegen betrachtet sechs verschiedene unabhängige Grundformen der Darstellung: Texte, Charts, Tabellen, Diagramme, Abbildungen und Piktogramme. Unter Texten versteht er *„eine Veräußerlichung von konzeptuellem Wissen aus dem Kopf eines Autors oder einer Autorin“* (Ballstaedt, 1997, S. 5). Ihr Vorteil liegt eindeutig in der Darstellung komplexer Konzepte und Zusammenhänge. Sie vermitteln die Informationen in einer der Wort- und Satzfolge eigenen Struktur, wobei die Syntax die Relationen zwischen den Konzepten klar festlegt.

Charts sind laut BALLSTAEDT visualisierte *„Zusammenhänge zwischen Begriffen, Kategorien und Aussagen in zweidimensionalen Anordnungen aus Einheiten (Kästchen, Ellipsen, Kreisen), die durch inhaltliche Verbindungen (Linien, Pfeile) verknüpft sind“* (Ballstaedt, 1997, S. 6). Sie veranschaulichen nicht-realsichtbare Zusammenhänge wie hierarchische Strukturen.

Tabellen hingegen beinhalten überwiegend numerische Informationen in zweidimensionaler Anordnung. Sie sind übersichtlicher als Texte und bilden die Grundlage von Diagrammen. Diagramme verdeutlichen *„nicht sichtbare quantitative Zusammenhänge durch topologische und räumliche Beziehungen“* (Ballstaedt, 1997, S. 6). Zu den bekanntesten zählen Kreis-, Säulen-, Balken- und Kurvendiagramme.

Unter Piktogrammen versteht BALLSTAEDT (1997, S. 7) eine Übergangsform zwischen Bild und Schrift. Beispiele dafür sind Icons auf Bildschirmen oder sprachfreie Anleitungen oder Schilder.

3.2.Bilder

Unter Bildern versteht man zunächst einmal *„alle Arten von Darstellungen auf einer Fläche, unabhängig vom Grad der Abstraktion“* (Issing, 1983, S. 9). Ebenso wie bei der Einteilung der verschiedenen Darstellungsformen herrscht auch bei der Einteilung der Bilder in ihre Unterformen keine Einigkeit. Während ISSING (1983, S. 12 f) zwischen Abbildungen, analogen und logischen Bildern unterscheidet, teilt WEIDEMANN (1994, S. 9) die Bilder in künstlerische, unterhaltende und informierende Bilder ein. Da für diese Arbeit nur die informierenden Bilder von Bedeutung sind, werden diese im Folgenden nach der Unterteilung von WILHELM (2005, S. 31 ff) gegliedert (vgl. Abbildung 9):

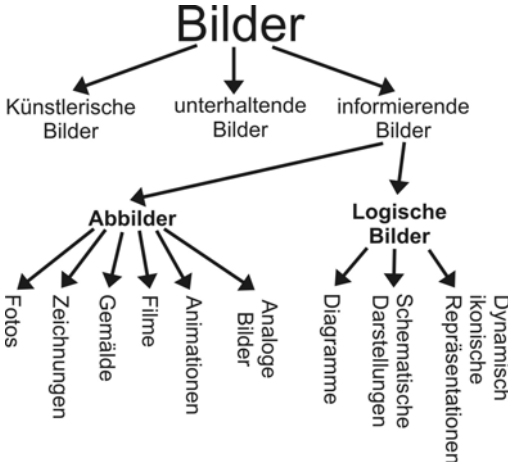


Abbildung 9: Mögliche Klassifizierung von Bildern (nach Wilhelm, 2005, S. 31, bearbeitet von Thomas Wilhelm)

Die informierenden Bilder lassen sich unterteilen in Abbildungen (oder Abbilder) und logische Bilder. Zu den Abbildungen zählen Fotographien, Zeichnungen, Gemälde, Filme, Animationen und analoge Bilder. Unter den logischen Bildern hingegen werden Diagramme, schematische Darstellungen und dynamisch ikonische Repräsentationen verstanden (Wilhelm, 2005, S. 31).

Abbildungen zeigen Gegenstände der physikalischen Welt, die real existieren und somit visuell wahrnehmbar sind. Sie werden besonders dort verwendet, wo eine direkte Wahrnehmung des Objekts nicht möglich ist (wenn das Objekt zu weit weg, zu groß, zu klein… ist). Bei Abbildungen können wichtige Teile des Objekts hervorgehoben oder unwichtige, ablenkende Details weggelassen werden, um die Aufmerksamkeit des Betrachters auf bestimmte Teile eines Gegenstands zu fokussieren (Issing, 1994, S. 12 und Wilhelm, 2005, S. 31). Die Abbildung eines Gegenstands muss nicht statisch sein, sondern kann ebenfalls aus Filmen oder Videos bestehen. Sie machen sogar die Darstellung von Bewegungen (z.B. die Fahrt einer Modelleisenbahn) möglich. Der Einsatz von Filmen im Unterricht bietet sich zudem an, da er anschaulich ist und nicht so abstrakt wie eine rein theoretische Betrachtung des Themas. Auf die Bedeutung von Videos für den Physikunterricht wird in Kapitel 4.2. genauer eingegangen.

Einen Sonderfall der Abbildungen sind die analogen Bilder, da sie durch die Analogiebildung zu bereits bestehendem Wissen auf nicht oder nur schwer darstellbare Strukturen hinweisen. Ihre äußere Gestalt ähnelt stark der der Abbildung, zielt jedoch nicht auf die reine Darstellung eines Sachverhalts ab, sondern versucht in seiner Aussage auf einen analogen Sachverhalt hinzuweisen. Es handelt sich dabei also um die Darstellung von Relationen, Funktionen und Prozessen, die der Betrachter sich durch In-Beziehung-Setzen erschließen kann (Wilhelm, 2005, S. 31). Bei analogen Bildern werden strukturelle Analogien (z.B. die Analogie zwischen dem Aufbau eines Atommodells und dem Planetensystem) von funktionalen Analogien (z.B. die Darstellung des Stromkreislaufs als Wasserkreislauf) unterschieden (Issing, 1994, S. 149 und Issing, 1983, S. 13). Da Analogien bei der Verwendung der Videoanalyse im Physikunterricht nicht relevant sind, wird hier nicht näher darauf eingegangen.

Logische Bilder können sowohl wahrnehmbare als auch nicht wahrnehmbare Merkmale darstellen. Sie visualisieren quantitative und qualitative Zusammenhänge eines Sachverhalts und sind durch einen hohen Grad der Schematisierung und Weglassung gekennzeichnet. Ihre Funktion liegt in der vereinfachenden Darstellung von Relationen, Strukturen, Konzepten oder Theorien. Qualitative Zusammenhänge werden mittels Venn-Diagrammen (Bestehend aus Kreisen, Ellipsen oder Rechtecke zur Darstellung von Objektmengen) oder Graphen, die sich aus Knoten (Ellipsen, Rechtecken oder ähnlichen), gerichteten (Pfeile) und ungerichteten (Linien) Kanten zusammensetzen. Quantitative Zusammenhänge hingegen werden in der Physik durch Liniendiagramme visualisiert. Weitere Diagrammarten sind: Kreis-, Balken, Säulen und Streudiagramme (Issing, 19983, S.13 und Schnotz, 1994, S.97 ff). Zu den logischen Bildern könne über dies noch die im übernächsten Kapitel besprochenen dynamisch ikonischen Repräsentationen gezählt werden, da bei ihnen die physikalischen Größen (wie die Geschwindigkeit) durch Pfeile, Flächen oder Positionen verdeutlicht werden (Wilhelm, 2005, S. 32).

Die Funktionen von Bildern sind vielfältig und werden von den verschiedenen Autoren unterschiedlich benannt. Während ISSING (1883, S. 14-15) von einer Motivations-, Mitteilungs-, Informations-, Vermittlungs-, Prozesssteuerungs- sowie erklärenden, gedächtnisstützenden und diagnostisch therapeutischen Funktion spricht, unterscheidet WEIDEMANN (1991, S. 34 ff) zwischen Aktivierungs-, Konstruktions-, Fokus- und Ersatzfunktion. KIRCHER, GIRWIDZ und HÄUßLER (Kircher et al., 2000, S. 226 f) nennen bezüglich der Wissensvermittlung vor allem vier Funktionen: Zeige-, Fokus- und Konstruktionsfunktion sowie die physikalische Visualisierung. Unter der Zeigefunktion verstehen sie die deutliche und angemessene Vermittlung von bildhaften Informationen und physikalischen Abläufen. Die Fokusfunktion meint eine gezielte Hervorhebung von Details und Teilbereichen. Sie kann nur sinnvoll verwendet werden, wenn beim Lernenden bereits Vorwissen vorhanden ist. Von der Konstruktionsfunktion sprechen sie dann, wenn bereits bekannt Sachverhalte, Prozesse oder Vorgehensweisen zusammengesetzt werden oder durch ein Bild beim Lernenden neues Wissen konstruiert wird. Physikalische Visualisierungen geben dem Lernenden optische Vorstel-

lungshilfen schwer erkennbarer oder vorstellbarer Größen (z.B. vektorieller Größen). Sie können direkt an Messwerten angeknüpft sein oder bildhafte Analogien darstellen. Je nachdem wie das Vorwissen oder die Wissensstruktur des Schülers beschaffen ist, kann ein und dasselbe Bild verschiedene Funktionen erfüllen. Wie ein Bild gestaltet wird, sollte sich daher danach richten, welche Funktion es beim Betrachter haben soll und wie ausgeprägt dessen Vorwissen ist (Wilhelm, 2005, S. 32).

Bilder können nicht nur alleine als Medium im Unterricht eingesetzt werden, sondern auch in Kombination mit Texten präsentiert werden. Genau genommen tritt diese Kombination fast immer auf, da nur in den seltensten Fällen der Lehrer den Schülern ein Bild oder eine Reihe von Bildern kommentarlos vorlegt. Verbindet man jedoch gezielt und bewusst Bilder mit Texten, so kann dies eine multiple Kodierung unterstützen. Dabei kann entweder das Bild eine Hilfe oder Erklärung zum Text darstellen oder aber das Bild im Vordergrund stehen und der Text (z.B. als Unterschrift) nur begleitend wirken. Übernimmt das Bild nur eine erklärende und helfende Rolle, so besitzt es zusätzlich zu den oben genannten noch eine weitere Funktion. Das Bild kann dann als Ersatz für komplexe Beschreibungen fungieren. Das ist vor allem bei Situationsbeschreibungen oder komplexen Sachverhalten nützlich, da eine verbale Darstellung zu abstrakt oder unvollständig werden könnte. Spiegelt es jedoch den Inhalt einer Textaussage visuell wieder, so übernimmt das Bild eine Repräsentationsfunktion. Von einer Interpretationsfunktion hingegen spricht man, wenn es die Textaussage durch eine optische Akzentuierung in eine bestimmte Richtung drängt. Neben diesen Funktionen kann das Bild noch eine anleitende Funktion übernehmen. In diesem Fall ist der Text nur von untergeordneter Bedeutung und das oder die Bilder werden als primäre Informationsquelle verwendet (z.B. Bauanleitungen bei Möbeln) (Kircher et al., 2000, S. 227 f). Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Funktionen von Bildern, ob alleine oder in Kombination mit Texten, vielfältig sind und stark vom Vorwissen der Schüler abhängen. Ihre Konstruktion und ihr Einsatz sollten immer auf die Bedingungen und Bedürfnisse der Schüler abgestimmt sein.

Da Bilder eine deutlich höhere Informationsdichte als Texte besitzen und somit leichter zu einer kognitiven Überlastung führen können, werden im Folgenden im Rückgriff auf die Lerntheorien die wichtigsten Aspekte der Bildwahrnehmung, -interpretation und -verarbeitung genannt. WEIDEMANN (1994, S. 26 ff) sieht den Bildverarbeitungsprozess als eine „higher-level-activity“ an und postuliert daher, dass ihr Rezeptionsverlauf (der Verlauf ihrer Informationsaufnahme) unvorhersehbar ist. Er entwickelte für den Rezeptionsprozess ein Schema, das zwischen prä-attentiven und attentiven Prozessen beziehungsweise zwischen ökologischem und indikatorischem Bildverstehen unterscheidet (vgl. Abbildung 10).

	ökologisches Bildverstehen	*indikatorisches Bildverstehen*
prä-attentive Prozesse	Erfassen des Dargestellten "auf den ersten Blick"	Erfassen des Arguments "auf den ersten Blick"
attentive Prozesse	vollständiges Identifizieren der Bilddetails	umfassendes Extrahieren des visualiserten Arguments

Abbildung 10: Modi der Rezeption von Bildern (Weidemann, 1994, S. 26)

Für WEIDEMANN (1994, S. 29-32) ist die Wahrnehmung prä-attentiv, wenn die globale Bedeutung eines Bildes rasch und automatisch erfasst wird. Prä-attentive Prozesse sind dann maßgeblich für das Bildverstehen verantwortlich, wenn nur wenig Zeit für die Betrachtung zur Verfügung steht. Erfolgt das Bildverstehen hingegen absichtsvoll, bewusst und zielgerichtet, so spricht er von einem attentiven Prozess. Den Bildelementen wird dann mehr Aufmerksamkeit gewidmet und diese können so einzeln und selektiv analysiert und interpretiert werden. Um die Aufmerksamkeit auf bestimmte Bildelemente zu fokussieren, ist es gut dem Bildbetrachter gezielte Instruktionen zu geben. Mehrere Studien haben sogar ergeben, dass es vor allem bei bewegten Bildern unablässig ist, genaue Instruktionen zu geben, damit der Betrachter informierende Bilder gänzlich verstehen kann (vergleiche hierzu Weidemann, 1994, S. 33-34).

Als ökologisches Bildverstehen bezeichnet WEIDEMANN (1994, S. 27) das Erkennen von Objekten und Szenen auf den ersten Blick. Bei der Identifikation des Dargestellten spielen sensuelle Erfahrungen und Vorwissen eine wichtige Rolle. Normalerweise erfolgt diese Art des Erkennens prä-attentiv automatisch. Es kann jedoch auch attentiv verlaufen, zum Beispiel wenn sehr detaillierte Abbildungen erfasst werden sollen. Geht die Wahrnehmung über das bloße Erkennen der Abbildung hinaus, so spricht WEIDEMANN (Weidemann, 1994, S.28) von indikatorischem Bildverstehen. Dabei wird das Argument (also die Bildaussage) der Abbildung erfasst und rekonstruiert. Um informierende Bilder effektiv verarbeiten zu können, benötigt es immer einer indikatorischen Bildverarbeitung. Sie ist meinst attentiv und verlangt einen höheren Zeitaufwand und mehr kognitive Ressourcen als das ökologische Bildverstehen. Vor allem bei stehenden Bildern bricht der Betrachter aus diesem Grund den Verarbeitungsprozess nach dem automatisch prä-attentiv ökologischen Prozess ab. Bei bewegten Bildern hingegen werden stets neue Informationen gegeben und präsentieren sich als Verarbeitungsaufgaben. Der Prozess des Bildverstehens wird dadurch nicht so schnell abgebrochen und die Wahrscheinlichkeit eines tieferen Verständnisses ist höher.

Die kognitive Belastung des Arbeitsgedächtnisses ist vor allem beim attentiven Bildverstehen sehr groß. Nach der von SWELLER et al. (1998) entwickelten Cognitive-load-Theorie (vgl. Kapitel 2.3) bedeutet das, dass ungewohnte Bilddarstellungen dem Wissenserwerb im Weg stehen können. Trotzdem ist die Verwendung von Bildmedien beim Wissenserwerb sinnvoll und wünschenswert, da die Kombination von Bild und Text (in der Physik meist gesprochene Texte) zwei Sinneskanäle anspricht und die kognitive Belastung in der Summe gesehen verringert wird. Nach WEIDEMANN (1994, S. 43) können Bilder zudem die Entwicklung von Modellen und Schemata begünstigen. In einer neuen Lernsituation kann der Schüler dann auf diese Zurückgreifen und sein Intrinsic cognitive load ist dadurch geringer. Nach der Cognitive-load-Theorie begünstigt der Wissenserwerb mit Bildern somit kurzfristig (mehrere Sinneskanäle werden beansprucht) und langfristig (durch Aufbau von Schemata) den Lernprozess der Schüler.
Auch nach der Theorie von SCHNOTZ und BANNERT (1999) zum Lernen mit Text- und Bildmedien ist es günstiger Bilder statt Texte zur Informationsvermittlung zu verwenden. Um aus einem Text ein mentales Modell zu konstruieren, muss zunächst eine Repräsentation der Textoberfläche entwickelt werden, die dann in eine propositionale Repräsentation umgewandelt wird, um anschließend zum mentalen Modell zu werden. Bei der Bildwahrnehmung hingegen entsteht durch thematische Selektion eine visuelle Darstellung, die direkt in ein mentales Modell umgewandelt werden kann. Der Prozess des Textverständnisses verlangt somit eine höhere kognitive Leistung als der des Bildverständnisses.

3.3. Texte

Auf die Darstellungsform „Text“ wird in dieser Arbeit nur vollständigkeitshalber kurz eingegangen. Sie stellt im Hinblick auf die Dual-Code-Theorie (vgl. Kapitel 2.) die komplementäre Repräsentation zum Bild dar.
BALLSTAEDT (1997, S. 21-23) unterteilt diese Darstellungsform in expositorische (erläuternde), narrative (erzählende), anleitende und didaktische Texte. Unter letzterem fasst er alle Texte zusammen, die eine Basisinformationsquelle dahingegen ergänzen, dass sie Lernprozesse unterstützen und anregen. Dabei kann es sich um Lernzielangaben, Zusammenfassungen, kognitive Vorstrukturierungen, Exkurse, Nachschlagewerke oder Kontrollaufgaben handeln.
Texte sind somit das wohl am häufigsten eingesetzte Medium, wenn es um Wissensvermittlung geht. Das hängt natürlich auch damit zusammen, dass erstens alle anderen Darstellungsformen in Texte übersetzt werden können und zweitens die Sprache als Mittel des Textes normalerweise immer und überall verfügbar ist. Unterricht in der Schule wäre ohne den Einsatz von Texten nicht möglich. Sie sind vor allem dann unverzichtbar und den meisten anderen Darstellungsformen überlegen, wenn das Verständnis eines Sachverhalts maßgeblich von der Reihenfolge der dargebotenen Information abhängt.

3.4.Dynamisch ikonische Repräsentationen

Die dynamisch ikonischen Repräsentationen gehören, wie unter 3.1. erwähnt, zu den logischen Bildern. HEUER (1996a, S. 12) versteht unter ihnen eine bildhafte Darstellung von physikalischen Größen, die sich im Verlauf des Experiments oder einer Simulation in ihrer Lage, Form oder Größe verändern. Er zählt dazu Zeiger, Vektoren, Säulen und Flächen, die durch ihren Flächeninhalt oder ihre Länge den Betrag der physikalischen Größe symbolisieren und deren Richtung die Richtung der Größe angibt. Im Gegensatz zu statischen Bildern können dynamisch ikonische Repräsentationen zeitliche Abläufe und funktionale Abhängigkeiten verdeutlichen. Die physikalischen Vorgänge können dadurch anschaulicher werden und Gesamtzusammenhänge beziehungsweise Veränderungen der visualisierten Größen können so dargestellt werden, dass die strukturellen Aussagen direkt erkannt und verarbeitet werden können (Heuer, 1996a, S. 12).

Die kognitive Psychologie unterscheidet verschiedene Arten interner Repräsentationen (vgl. Kapitel 1.2.). Gemäß den verschiedenen Teilen des Langzeitgedächtnisses können kognitive Informationen in deklaratives Wissen (Wissen über Ereignisse und Fakten) und prozedurales Wissen (Wissen über Fertigkeiten) unterteilt werden (Lukesch, 2001, S. 111). Je nach externer Repräsentation dieses Wissens werden die einkommenden Reize intern in verbale oder ikonische propositionale Repräsentationen umgewandelt und im Gedächtnis verankert (vgl. Kapitel 2). Diese Propositionen (kleinste Sinneinheiten) können sich zu Schemata entwickeln, aus denen wiederum mentale Modelle entstehen.

Vor allem bildhafte Informationen können für den Aufbau mentaler Modelle von Vorteil sein, „*da visuelle Elemente in die Modelle mit einbezogen werden können*“ (Heuer, 1996a, S. 12). Sind diese bildhaften Informationen dann auch noch dynamisch, können sie gerade schwachen Schülern mit geringem Vorwissen helfen eine mentale Vorstellung des Ablaufs physikalischer Vorgänge aufzubauen (Girwidz et al., 2004, S. 2). Besonders hilfreich könnte es sein, wenn die dynamisch ikonische Repräsentation eine Externalisierung der gewünschten internen Repräsentation ist, da sie dann den Aufbau interner Repräsentationen unterstützt.

Solche dynamisch ikonischen Repräsentationen findet man in den verschiedensten Softwareprogrammen oder physikalischen CDs. So zum Beispiel auf „cliXX Physik in bewegten Bildern“ von TREITZ (2000), bei „Crocodile Physics“ (z.B. Potentialsäulen) (Schwarze, 2003), dem Windows Programm PAKMA (Heuer, 1996b, S.6) und schließlich im Videoanalyseprogramm „measure Dynamics“ der Firma PHYWE, dass als Grundlage der Videoanalyse dieser Arbeit verwendet wurde (weitere Programme sind bei Wilhelm, 2005, S. 37-38 zusammengefasst).

Die Vorteile dynamisch ikonischer Darstellungen sind vielfältig und reichen weit über die Motivation der Schüler, Dekoration der Darstellung und Lenkung der Aufmerksamkeit hinaus. So bieten sie zum Beispiel die Möglichkeit bei Versuchen Daten so aufzuarbeiten, dass im Arbeitsgedächtnis der Schüler genügend Ressourcen zur Verfügung stehen, um Sachverhalte zu erkennen und strukturelle Zusammenhänge zu erschließen. Funktionale Zusammen-

hänge physikalischer Größen werden im Physikunterricht häufig durch Graphen dargestellt. Dies ist jedoch nur für Schüler von Vorteil, die bereits ein fundiertes physikalisches Vorwissen besitzen und gelernt haben Graphen zu lesen und zu interpretieren. Besonders für schwache Schüler sieht WILHELM (2005, S. 37) eine Chance darin, dass die Verbindung von Graphen mit dynamisch ikonischen Repräsentationen ihnen hilft, die Zusammenhänge zwischen beiden Darstellungsformen zu erkennen.

Ein weiterer Vorteil dieser Darstellungsform ist, dass durch sie physikalische Größen veranschaulicht werden können, die sonst nicht direkt erkenn- oder wahrnehmbar sind (z.B. Kräfte, Ladungen, Beschleunigung oder Spannung). Sie sind somit eine Hilfe für die Schüler zum Aufbau von qualitativen Vorstellungen. Zudem können durch den Einsatz von Computern, die die Darstellung dynamisch ikonischer Repräsentationen erst ermöglichen, mehrere Größen gleichzeitig dargstellt und deren Beziehung gezeigt werden (Wilhelm, 2005, S. 37). Wählt der Lehrer dann noch systematisch die Farben der einzelnen Größen (z.B. immer Blau für die Geschwindigkeit und rot für die Beschleunigung), ermöglicht das den Schülern zusätzlich die gesehenen Zusammenhänge leichter mit anderen Sachverhalten oder Versuchsaufbauten in Beziehung zu setzen.

Weitere Vorteile dynamisch ikonischer Repräsentationen werden im Rahmen der Vorteile des Einsatzes von Videos besprochen (vgl. Kapitel 3.2.1.). Beim Einsatz dynamisch ikonischer Repräsentationen muss jedoch darauf geachtet werden, dass nicht zu viele verwendet werden und es so zu einer Überfüllung kommt. Zudem können sie zu informationsreich sein, was zu einem kognitiven overload im Sinne der Cognitive-load-Theorie führen kann.

3.5. Multicodierung

Komplexe Informationen, somit auch physikalisches Wissen, sind laut BALLSTAEDT (1997, S. 220) multipel. Das bedeutet, dass sie an unterschiedlichen Orten im Gehirn und durch unterschiedliche Wissensformen (deklaraiv, prozedural,…) repräsentiert sind. Wo und wie das Wissen dann im Gedächtnis verankert ist, hängt stark von der Darstellungsform der dargebotenen Information ab.

Wird ein und derselbe Inhalt durch eine Kombination aus zwei eigenständigen Darstellungen präsentiert, so spricht RUBITZKO (2006, S. 108 f) von einer multiplen Repräsentation. Werden zudem zwei unterschiedliche Kodesysteme verwendet, so nennt man diese Art der Darstellung Multicodierung (Weidemann, 2002, S. 47). Durch den Fortschritt der Technik und den Einzug des Computers in viele Klassenzimmer ist es für den Lehrer einfacher geworden Informationen multipel zu kodieren. Besonders mit Hilfe des Computers ist es heute möglich bewegte Bilder in den Unterricht zu bringen und diese genau so aufzuarbeiten, dass sie den Schülern das Lernen erleichtern.

Neben der Multicodierung sind auch die Multimodalität, also die Integration der verschiedenen Sinnesbereiche, und die Interaktivität ein großer Vorteil des Multimediaeinsatzes (Girwidz, 2004, S. 9-10). Beim Einsatz eines Videoanalyseprogramms können diese Aspekte be-

sonders dann greifen, wenn der Schüler im Computerraum verschiedene Videos selbst analysiert und mit dem Programm arbeitet.

Unter kognitionspsychologischen Gesichtspunkten eignet sich die Multicodierung, als Kombination verschiedener Darstellungsformen sehr gut zur Wissensvermittlung, da sie mehrer Verarbeitungskanäle anspricht. Wie in Kapitel 2 erklärt, unterscheidet die Dual-Code-Theorie von PAIVIO (Lukesch, 2001, S. 94 ff) zwei getrennte Informationsverarbeitungskanäle: einen verbalen, in dem sprachliche Reize aufgenommen werden, und einen nonverbalen Zweig, der vor allem Bilder aber auch Geräusche und Handlungen verarbeitet. Auf der Grundlage dieser Theorie entwickelte MAYER (2001) seine Theorie zum Lernen mit Multimedia (vgl. Kapitel 2.1). Auf Basis dieser Theorie fertige er zahlreiche Laborversuche an, um die Wirksamkeit von Multimedia im Lernprozess zu beweisen. Aus seinen Ergebnissen formulierte er verschiedene Prinzipien speziell für den Einsatz von Animationen, die man vorsichtig auf den Einsatz von Multimediaanwendungen im Allgemeinen und die Verwendung von Videoanalyse im Speziellen übertragen kann. So stellten MAYER und MORENO fest (2002, S. 93), dass Schüler deutlich intensiver lernen, wenn Text und Bildpräsentationen parallel dargeboten werden (Multimediaprinzip). Das liegt daran, dass Schüler besser mentale Modelle und Beziehungen zwischen Bildern und Wörtern entwickeln können, wenn beide Formen gleichzeitig präsent sind. Das Kontiguitätsprinzip betont zusätzlich die zeitliche und räumliche Gemeinsamkeit der Darstellung. Über dies ist es geschickter die verbalen Informationen in Form eines gesprochenen Textes zu präsentieren, als ihn auf den Bildschirm zu schreiben. MAYER und MORENO (2002, S. 96) sehen das Problem, dass der visuelle Kanal sonst durch die Kombination von Bild und gedrucktem Text überlastet werden kann und somit nicht genügend Ressourcen zum Wissenserwerb zur Verfügung steht (Modalitätsprinzip). Laut dem Redundanzprinzip wird das Lernen erschwert, wenn bewegte Bilder mit gesprochenen und zusätzlich geschriebenen Texten kombiniert werden. Die Erklärung ist ähnlich der des Modalitätsprinzips. Weiterhin sollte laut MAYER und MORENO (2002, S. 96) bei der Anwendung von Multimedia darauf geachtet werden, dass für den Wissenserwerb irrelevante Informationen möglichst ausgeblendet werden, da sonst der Lernende den nicht-sachbezogenen Informationen Aufmerksamkeit zuwenden könnte und so (laut der Cognitive-load-Theorie von SWELLER (Sweller et al.,1998, S. 251- 292)) nicht mehr genügend kognitive Ressourcen für den Lernprozess zur Verfügung stehen (Kohärenzprinzip). Als letztes Prinzip postulieren MAYER und MORENO (2002, S. 96-97) das Personalisierungsprinzip, das besagt, dass die Schüler leichter lernen, wenn bewegte Bilder mit gesprochenen Texten, die im Erzählstil und nicht im formalen Stil verfasst sind, kombiniert werden. Das liegt seiner Ansicht nach daran, dass die Schüler, wenn sie Informationen in Form einer Diskussion (Lehrer-Schüler-Diskussion) präsentiert bekommen, stärker mitdenken und es sich dadurch besser merken können.

Für den Einsatz von Videos im Physikunterricht bedeuten diese Prinzipien, dass der Lehrer darauf achten muss, gezielte zusätzlich gesprochene Informationen zu den Bildern zu geben.

Bei der Erstellung der Videos ist zudem wichtig, dass er das Bild zeitlich und räumlich so beschneidet, dass irrelevante Informationen weg fallen.
Die in dieser Arbeit aufbereiteten Videos von zweidimensionalen Bewegungen im Mechanikunterricht bestehen hauptsächlich aus bildhaften Darstellungen. Verbale Darstellungen sind wenn überhaupt nur sehr selten enthalten und dienen als Legende. Der Lehrer muss daher im Unterricht an gegebener Stelle gezielte Informationen und Instruktionen geben. Neben der Zweiteilung der Darstellungen (verbal und bildhaft) ist auch eine Multicodierung innerhalb rein visueller Darstellungen möglich. Gemäß des Ansatzes der kognitiven Flexibilität (Spiro et al., 1988, S. 378 ff) sollte Wissen, damit es unter verschieden Rahmenbedingungen genutzt werden kann, also spontan umorganisiert werden kann, in verschiedenen Arten gelehrt, organisiert und repräsentiert werden. Besonders komplexe und schwer strukturierbare Wissensbereiche sollten daher *„zu verschiedenen Zeiten, in neu konstruierte Zusammenhänge, unter verschiedenen Zielsetzungen und unter verschiedenen Perspektiven“* (Girwidz, 2004, S. 10) betrachtet werden. Um physikalische Abläufe dem Schüler flexibel zu vermitteln, schlägt HEUER (Heuer, 2003, S. 2) verschiedene Darstellungen, die in Abbildung 11 gezeigt sind, vor.

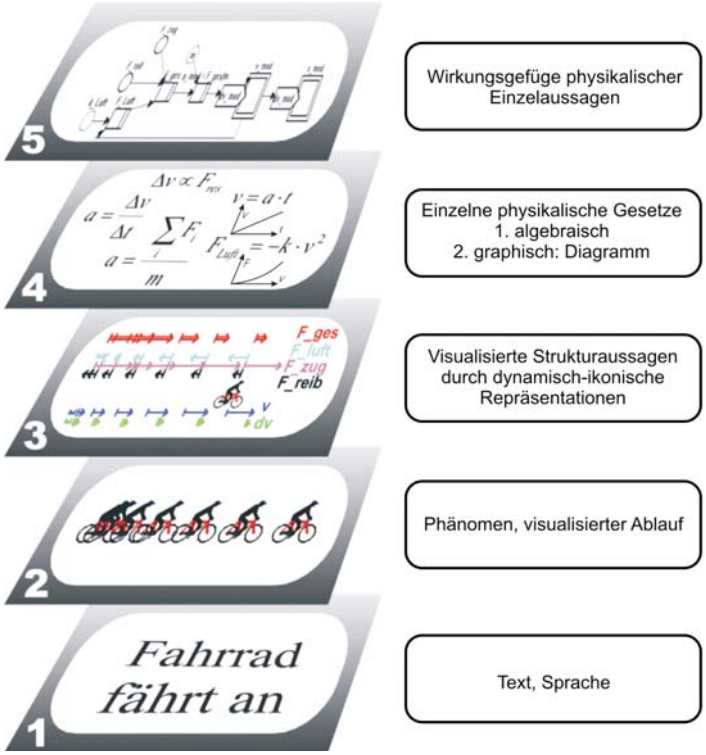


Abbildung 11: Übersicht über Kodierungen (nach Wilhelm, 2005, S. 36, bearbeitet von Thomas Wilhelm)

Als erste Ebene der Kodierung nennt er Texte und Sprache. Sie werden am häufigsten zur Informationsvermittlung genutzt, da durch sie Situationen oder Vorgänge schnell und präzise charakterisiert werden können. Das größte Problem dieser Kodierungsebene sind die Fehlinterpretationen und Missverständnisse der Adressaten, wenn sie verwendete Wörter und Begriffe nicht oder anders kennen. Als zweite Ebene nennt HEUER (2003, S. 3) die Phänomene und visualisierten Abläufe. Diese können in Form einer Animation, eines Videos oder einer

Stroboskopabbildung dargeboten werden und ermöglichen gegebenenfalls qualitative oder halbquantitative Aussagen über die zeitliche Entwicklung des Vorgangs. Auf der dritten Ebene der Kodierung befinden sich visualisierte Strukturaussagen durch dynamisch ikonische Repräsentationen. Dabei werden physikalische Größen durch Vektoren oder Flächen sowie ihre Abhängigkeiten voneinander dargestellt. Die dynamisch ikonischen Repräsentationen sind kontextabhängig und erlauben in Kombination mit der zweiten Kodierungsebene qualitative und halbquantitative Aussagen. Als Grundlage der dynamisch ikonischen Repräsentation können computerunterstützte Experimente, Simulationen oder wie in dieser Hausarbeit Videos dienen. Erst in der vierten Ebene werden einzelne physikalische Gesetze in Form von Graphen oder algebraischen Gleichungen dargestellt. Steigt der Lehrer zu schnell in diese Stufe der Kodierung ein, so besteht die Gefahr, dass diese quantitativen Aussagen den meisten Schülern später nur als deklaratives Wissen zur Verfügung stehen und keine ausreichende Vernetzung zwischen den Sachverhalten entstanden ist. Die letzte Ebene der Kodierung beinhaltet schließlich ein Wirkungsgefüge physikalischer Einzelaussagen, das in Form eines Netzwerks alle physikalischen Abhängigkeiten, die einen Ablauf bestimmen, zeigt. Der physikalische Vorgang wird dadurch strukturell überschaubar und qualitativ verständlich (Heuer, 2003, S. 2-3).

Abschließend ist zur Multicodierung zu sagen, dass das Lesen, Verstehen und Interpretieren jeder einzelnen Darstellungsform von Schülern geübt werden muss. Bevor der Schüler nicht den Umgang mit den verschiedenen Kodierungen gelernt hat, ist eine multiple Darstellung nicht sinnvoll, da es sonst gemäß der Cognitive-load-Theorie (Sweller et al., 1998, S. 251-292) zu einer kognitiven Überlastung kommen kann.

4. Bewegungsanalyse im Physikunterricht

Der Einsatz von Videoanalyse im Unterricht ermöglicht es, Realexperimente und Alltagsbewegungen zu filmen und diese so aufzuarbeiten, dass sie für den Physikunterricht als Beispiele dienen. Besonders im Kinematikunterricht der 7. Klasse, in der die Größen Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung qualitativ betrachtet werden sollen, eignet sich der Einsatz sehr gut. Ein Programm, mit dem man Videos didaktisch aufarbeiten und analysieren kann, ist „measure Dynamics“ von der Firma PHYWE, das von MICHALEL SULEDER programmiert wurde. Sein großer Vorteil gegenüber anderer Videoanalyseprogramme auf dem Mark ist die automatische Objekterkennung und Analyse, der einfache Einsatz dynamisch ikonischer Repräsentationen und die Möglichkeit gleichzeitig mit dem Ablauf des Versuchs einen sich entwickelnden Graphen zu betrachten. Zudem hat man die Option analysierte Videos mit den dynamisch ikonischen Repräsentationen zu exportieren und auf einem Datenträger zu speichern. Sie können dadurch unabhängig vom Programm auf jedem beliebigen Rechner abgespielt werden.

Bevor in diesem Kapitel auf die Anwendung eines Videoanalyseprogramms (in dieser Arbeit: „measure Dynamics“) und der zweidimensionalen Betrachtung der Kinematik eingegangen wird, werden zunächst typische Schülervorstellungen zu diesem Thema skizziert, um die Vorteile eines Einsatzes von Videoanalyse besser verstehen zu können.

4.1. Schülervorstellungen in der Kinematik

Das Thema „Schülervorstellungen“ entwickelte sich erst in den 70er Jahren des letzen Jahrhunderts zu einem eigenständigen Forschungsgebiet, in dem seither in der Didaktik aller Naturwissenschaften gearbeitet wird. In der Physikdidaktik sind die Vorstellungen der Schüler im Bereich der Mechanik am ausführlichsten untersucht. Der Begriff „Schülervorstellungen“ beschreibt neben den Vorstellungen, die die Schüler aus Alltagssituationen entwickelt haben, (Alltagsvorstellungen) auch diejenigen, die durch den Physikunterricht geprägt und gebildet werden (Wilhelm, 2005, S. 5).

In den folgenden Kapiteln werden nun kurz die Schülervorstellungen zu den drei kinematischen Grundgrößen „Ort“, „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ besprochen. Weitere Informationen zum Thema „Schülervorstellungen“ in der Kinematik finden sich bei WILHELM (2005).

4.1.1. Zu den Begriffen „Ort“ und „Weglänge“

In der Newtonschen Mechanik bezeichnet der Begriff „Ort“ einen bestimmten Punkt in einem Bezugssystem, der durch den Ortsvektor, also die Relation zum Nullpunkt des Bezugssystems, beschrieben werden kann. Die Weglänge beschreibt die Länge der Bahnkurve, also den zurückgelegten Weg bei einer Bewegung. Im traditionellen Physikunterricht wird zwischen den beiden Begriffen oft nicht klar unterschieden, da die Bewegungen meist eindimensional vom Nullpunkt ausgehend in positive Koordinatenrichtung betrachtet werden. Ort und Weg-

länge haben in diesem Spezialfall identische Werte und lassen sich daher schwer von den Schülern unterscheiden. Erst bei einer zweidimensionalen Bewegung kristallisiert sich für die Schüler ein deutlicher Unterschied heraus (Wilhelm, 2005, S. 13). Als Einstig in den Mechanikunterrichts bietet sich daher die zweidimensionalen Bewegungen an. Auch und gerade bei der traditionellen Vorgehensweise sollte der Lehrer besonders darauf achten, dass er stets deutlich zwischen beiden Begriffen unterscheidet und auch bei der Sprech- und Schreibweise sorgfältig differenziert. Nur so kann eine falsche Vorstellung der Schüler verhindert werden.

4.1.2. Zum Begriff „Geschwindigkeit“

Im Alltagsgebrauch des Begriffs „Geschwindigkeit“ wird die eigentlich vektorielle Größe auf eine Betragsgröße reduziert und bezeichnet meist nur das Tempo oder die Schnelligkeit eines Objekts. In der Physik reduziert sich bei einer eindimensionalen Bewegung der vektorielle Charakter, also die Richtung, nur noch auf das Vorzeichen. Da die Schüler, wenn sie im Unterricht die Geschwindigkeit besprechen, bereits ausgeprägte Alltagsvorstellungen besitzen und der traditionelle Physikunterricht mit der eindimensionalen Bewegung beginnt, fügen die Schüler an ihre Alltagsvorstellung nur noch das Vorzeichen als Richtungsangabe an, ohne aus den beiden Größen Schnelligkeit und Richtung die neue Größe, die Geschwindigkeit, zu machen. Es ist somit nicht verwunderlich, dass für einen Schüler bei einem Auto, dass mit gleich bleibendem Tempo auf einer Kreisbahn fährt, die Geschwindigkeit konstant bleibt und somit keine Beschleunigung vorliegt (Wilhelm, 2005, S. 13 und Wilhelm; Heuer, 2002, S. 29). Aus eigener Erfahrung muss ich sagen, dass diese Vorstellung auch bei vielen Physikstudenten im Grundstudium verbreitet ist und sich im Laufe des Studiums nur langsam ändert. Was bedeutet, dass sich die Schüler auch nach dem Physikunterricht nicht die allgemeine Form der Geschwindigkeit $v = \Delta\vec{x} / \Delta t$, sondern die vereinfachte Formel aus der eindimensionalen Bewegung $v = s / t$ merken (Wilhelm, 2005, S. 14).

WODZINSKI (1996, S. 42) benennt als ein weiteres Problem bezüglich der Richtung, dass in der Alltagsvorstellung zwei Körper die gleiche Richtung besitzen, wenn sie sich unabhängig von ihrem Ausgangspunkt auf denselben Punkt zu bewegen. Bei einer Kreisbewegung ist die Richtung in der Alltagsvorstellung sogar immer gleich (nämlich entlang des Kreises), was dazu führt, dass die meisten Schüler bei der Bewegung um die Kurve die Geschwindigkeit als einen gebogenen Pfeil einzeichnen (Wilhelm, 2005, S. 14 und Wilhelm; Heuer, 2002, S. 29).

Um die falschen Vorstellungen der Schüler zu korrigieren beziehungsweise ihre Verfestigung zu verhindern, sollte der Lehrer daher von der traditionellen Vorgehensweise im Physikunterricht abrücken. Als Alternative zur herkömmlichen Herangehensweise an die Kinematik wurden schon einige Unterrichtskonzepte und Untersuchungen entwickelt und durchgeführt (z.B. von JUNG (1980), WIESNER (1994), WODZINSKI (1996), WILHELM (2005) und SCHÜLLER (2007)), in denen die Schüler über die Kinematik und Dynamik in die Mechanik

eingeführt werden und von Beginn an die zweidimensionale Bewegung, also die Bedeutung der Richtung einer Größe im Vordergrund steht. Für den Begriff „Geschwindigkeit“ ist der Meinung von SCHÜLLER (2007, S. 7) zu folgen, der darauf hinweist, dass von Anfang an verschiedene Punkte im Unterricht beachtet werden sollten. Zum einen ist es auf Grund der bestehenden Alltagsvorstellungen der Schüler wichtig, im Unterricht immer zwischen den Begriffen „Tempo“ beziehungsweise „Schnelligkeit“ (als Betrag der Geschwindigkeit) und „Geschwindigkeit“ (als „neue“ Größe, die den Betrag und die Richtung vereint) zu unterscheiden und die Schüler gegebenenfalls diesbezüglich in ihren Äußerungen zu korrigieren. Um diesen Unterscheid noch deutlicher herauszuarbeiten bietet es sich zusätzlich an, zunächst auf das Formelzeichen $\vec{v}$ der Geschwindigkeit zu verzichten und mit einer rein qualitativen Betrachtung zu beginnen.

Der Einsatz dynamisch ikonischer Repräsentationen bietet sich dafür an. Die Geschwindigkeit wird dabei als Pfeil dargestellt, der seine Länge und Richtung entsprechend ihrer Änderung variiert. Der Lehrer kann so erreichen, dass sich die Schüler die Geschwindigkeit als einen Pfeil vorstellen, der am Objekt haftet, immer in Bewegungsrichtung zeigt und seine Länge je nach Tempo des Objektes verändert (Schüller, 2007, S. 7). Die Gefahr, dass die Schüler sich die Geschwindigkeit als skalare Größe verinnerlichen, ist dann deutlich geringer. Zudem wird von Anfang an klar gemacht, dass die Alltagsvorstellung des Begriffs in der Physik keine Gültigkeit hat.

Die Verwendung von Videos als Grundlage der dynamisch ikonischen Repräsentationen bietet sich insofern an, da die Geschwindigkeitspfeile direkt an dem Objekt platziert werden können, also der Versuchsablauf und dessen Analyse übereinander gelegt werden können und nicht zeitlich beziehungsweise räumlich getrennt dargestellt werden müssen (Kontiguitätsprinzip). Das Video bietet außerdem die Möglichkeit, dass die Bewegungen eines beliebigen, realen, den Schülern aus dem Alltag vertrauten Gegenstand betrachtet und mit Hilfe eines geeigneten Programms analysiert werden kann. Den Schülern fällt dadurch zum einen der Bezug zur Realität leichter und zum anderen merken sie wieder, dass die Begriffe in der Physik andere Bedeutungen besitzen als im Alltag.

4.1.3. Zum Begriff „Beschleunigung“

Im Alltag versteht man unter der Beschleunigung das „Schneller werden“, also die Zunahme des Tempos. In der Physik hingegen beschreibt die Beschleunigung einen Quotienten aus der Änderung der Geschwindigkeit pro Zeitintervall: $\vec{a} = \Delta\vec{v} / \Delta t$. Für die Schüler ist die Beschleunigung meist kein Quotient, sondern eine Bilanzgröße, die sich aus der Anfangs- und Endgeschwindigkeit ergibt. Somit ist es nicht verwunderlich, dass für sie eine große Beschleunigung eine große Endgeschwindigkeit impliziert und die zeitliche Komponente meist unberücksichtigt bleibt. Das ist besonders dann der Fall, wenn ein Zeitpunkt (z.B. höchster Punkt beim senkrechten Wurf) und kein Zeitintervall für die Beschleunigung von Bedeutung ist. In die-

sem Fall entstehen gravierende Verständnisprobleme (Schecker, 1985, S. 264; Wilhelm, 2005, S. 14 f und Wilhelm & Heuer, 2002, S. 31).

Zu dem Problem, dass die Schüler die Beschleunigung als Bilanzgröße sehen, kommt noch hinzu, dass sie meist den vektoriellen Charakter (also Betrag und Richtung) dieser Größe vernachlässigen und sie auf eine skalare Größe reduzieren. Aufgrund dieser beiden Schwierigkeiten fällt es den Schülern schwer sich eine negative Beschleunigung (vor allem in negative Richtung schneller werden) oder vor allem eine Beschleunigung bei konstantem Tempo (Kreisbewegung) vorzustellen. Vor allem bei einer Kurvenfahrt mit veränderlicher Geschwindigkeit vergessen die Schüler die radiale Komponente der Beschleunigung und zeichnen bei gegebenen Fragen nur die tangentiale Komponente ein (Wilhelm, 2005, S. 15 ff).

Zu diesem Thema führte Wilhelm eine Studie mit Studenten an der Universität Würzburg durch. Er fand heraus, dass die meisten Studenten zu Beginn ihres Studiums das physikalische Konzept der Beschleunigung nicht verinnerlicht hatten. Ein Drittel der befragten Studenten sahen die Beschleunigung als eine Eigenschaft der Geschwindigkeit an, so dass die Geschwindigkeitsrichtung angegeben wird. Der überwiegende Teil der Studenten verwendete in der Beantwortung der Fragen die Vorstellung, dass die Beschleunigung die Änderung der Schnelligkeit eines Objektes ist und vernachlässigten dabei ihren vektoriellen Charakter. Diese Vorstellungen kommen nach WILHELM (2007, S. 5-6) dadurch zustande, dass der eindimensionale Bewegung im Unterricht zu viel Gewicht gegeben wird.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass die Beschleunigung ein komplexer und schwer zu verstehender Begriff ist, dessen Alltagsvorstellung bei den Schülern schon vor der ersten Physikstunde in den Köpfen (falsch) verankert ist und sich vom Lehrer nur noch schwer korrigieren lässt. Aus diesem Grund ist es besonders wichtig, dass der Physikunterricht in der Schule so aufgebaut ist, dass die fehlerhaften Vorstellungen nicht noch verstärkt, sondern abgebaut werden. JUNG (1980, S. 30-59) schlägt dafür ein Konzept vor, in dem zunächst eine zusätzliche Geschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ eingeführt wird. Sie liegt zwar in der Ebene von $\vec{v}$, kann jedoch in eine andere Richtung zeigen. Mit Hilfe dieser Zusatzgeschwindigkeit erklärt WILHELM (2005, S. 92 ff) die Beschleunigung durch Operations- und Konstruktionsschritte anhand ihrer Definition: Der zusätzliche Geschwindigkeitsvektor $\Delta\vec{v}$ ergibt sich aus der Änderung des Geschwindigkeitsvektors im Zeitintervall Δt. Er gibt an, welche Geschwindigkeit dazu kommt oder abgezogen wird. Somit gilt:

$\overrightarrow{v_{alt}} + \Delta\vec{v} = \overrightarrow{v_{neu}}$ oder $\Delta\vec{v} = \overrightarrow{v_{neu}} - \overrightarrow{v_{alt}}$

Die Länge des Vektors symbolisiert die Stärke der Änderung und hängt vom gewählten Zeitintervall ab. WILHELM (2005, S. 93) dividiert nun diesen Geschwindigkeitsvektor durch das gewählte Zeitintervall und erhält so die Durchschnittsbeschleunigung gemäß ihrer Definition: $\vec{a} = \Delta\vec{v} / \Delta t$.

Durch dieses Vorgehen lernen die Schüler, sich auch die Beschleunigung als Pfeil vorzustellen. Durch die Größe $\Delta\vec{v}$ wird neben der Stärke der Änderung (Länge des Pfeils) zusätzlich die Richtung der Änderung betont. Die Geschwindigkeit ändert sich somit nicht nur, wenn das Objekt schneller oder langsamer wird, sondern auch, wenn es gedreht wird oder sich auf einer Kreisbahn befindet (Schüller, 2007, S. 9).

4.1.4. Empirische Befunde

Welche Auswirkungen und Erfolge der Einstieg in die Mechanik über die Kinematik hat wird im Folgenden anhand der Untersuchungen von LABBUDE, REIF und QUINN (1988) und den beiden Unterrichtskonzepte von WILHELM (2005) und SCHÜLLER (2007) gezeigt. Bei beiden Konzepten liegt das Hauptaugenmerk auf der zweidimensionalen Veranschaulichung der kinematischen Grundbegriffe „Ort“, „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ und der Verwendung dynamisch ikonischer Repräsentationen. Diese beiden Punkte (Zweidimensionalität und dynamisch ikonische Repräsentationen) sind die größten Vorteile der Videoanalyse. Aus diesem Grund können die folgenden Ergebnisse ohne weiteres auf die Anwendung von Videoanalyse im Physikunterricht zur Darstellung zweidimensionaler Bewegungen übertragen werden.

LABBUDE, REIF und QUINN (1988) erarbeiteten neben der normalen Physikvorlesung in kurzen Individualunterrichtsstunden (20-25 Minuten) mit sechs Studenten das Beschleunigungskonzept. Noch nach ein paar Tagen konnten diese Studenten qualitative Aufgaben aus der Kinematik fast immer (95%) richtig lösen. Im Vergleich zum Vortest (40% richtig) ist das eine deutliche Verbesserung. Leider wurde jedoch kein Langzeitverhalten der Studenten getestet.

WILHELM entwickelte ein Konzept, in dem er gezielt Schülervorstellungen zur Kinematik/ Dynamik mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung verändern will. Er testete dafür Schüler konventionell unterrichteter Klassen und Schüler, die nach seinem Konzept unterrichtet wurden. Es kam heraus, dass ein großer Teil der traditionell unterrichteten Schüler auch nach Ende ihres Mechanikunterrichts bei qualitativen Aufgaben ihre Alltagsvorstellungen zu den Begriffen „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ beibehielten und nicht die physikalischen Vorstellungen übernahmen. Die zweite Gruppe hingegen, bei der Wert auf die kinematischen Grundgrößen gelegt und ausführlich zweidimensionale Bewegungen behandelt wurden, hatte ein deutlich tieferes physikalisches Verständnis erworben und die Schüler konnten größtenteils ihre Fehlvorstellungen überwinden (Genauere Informationen und Einzelergebnisse bei Wilhelm, 2005, S. 139-226).

Auch das von SCHÜLLER (2007) entwickelte und an WISNER (1994) und WODZINSKI (1996) angelehnte Unterrichtskonzept zum Mechanikunterricht in der 7. Jahrgangsstufe zeigte Wirkung. Er stieg auch mit zweidimensionalen Bewegungen die Kinematik ein und erarbeitete mit den Schülern die kinematischen Grundgrößen anhand der Bewegung einer Spielzeugeisenbahn. Er verglich nach den von ihm durchgeführten zehn Unterrichtsstunden das Wissen

der Schüler mit dem einer 11. Klasse, die traditionell nach dem alten Lehrplan unterrichtet worden war und ihren Mechanikunterricht eine Woche vorher beendet hatte. Bei seinen Untersuchungen kam heraus, dass diejenigen Schüler, bei denen viel Wert auf das Verständnis der kinematischen Grundgrößen gelegt wurde, besser abschnitten als die traditionell unterrichteten Schüler. In wieweit das Wissen nachhaltig in den Köpfen der Schüler verankert ist und welche Auswirkung das für den zukünftigen Lernstoff (vor allem in der 10 Klasse) hat, ist noch unklar (genauere Informationen und Einzelergebnisse bei Schüller, 2007, S. 111-121).

Für die Verwendung der Videoanalyse im Physikunterricht bedeuten diese Ergebnisse, dass sie vor allem dann die Vorstellungen der Schüler verbessern kann, wenn sie als Grundlage dynamisch ikonischer Repräsentationen dient und zweidimensionale Bewegungen analysiert. Natürlich kann mit ihr auch eindimensionale Bewegungen aufgearbeitet und dargestellt werden, doch liegt ihre größte Stärke in der Verdeutlichung der Richtung einer Größe.

4.2. Der 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 (zusammenfassende Erklärungen zu den Einzelnen Instrumenten bietet Wilhelm, 2005, S. 98-104).

Die Videoanalyse hat im Vergleich zu allen anderen Mitteln verschiedene Vorteile. Sie ist eine Alternative zum Messen zweidimensionaler Bewegungen und hat die Option, Zeitmarken festzuhalten und Ortsänderungen zu betrachten. Videos haben den Vorteil, dass sie immer zweidimensionale Bilder sind, die meistens in festen Zeitabständen (0,04 Sekunden) aufgenommen sind. Dabei sollte jedoch betrachtet werden, dass es sich hier nicht um 25 ganze Frames pro Sekunde handelt, sondern um Halbbilder, die im Zeilensprungverfahren abwechselnd aufgenommen werden. Bei einer schnellen Bewegung kann sich dadurch ein Kammeffekt ergeben. In diesem Fall ist es günstiger eine Kamera mit „Progressiv Mode“ zu verwenden. Das Gerät nimmt dann 12,5 Vollbilder mit einem Zeitabstand von 0,08s auf. So können Bewegungen aus dem Alltag aufgenommen und in den Unterricht gebracht werden (Wilhelm, 2005, S. 99).

Um die aufgenommenen Videos im Unterricht sinnvoll einsetzen zu können, benötigt man ein Videoanalyseprogramm wie zum Beispiel „measure Dynamics“. Das Besondere an diesem Programm ist, dass das bewegte Objekt bei guten Videos nach einer einmaligen Markierung vom Programm automatisch verfolgt wird und kein manuelles Anklicken an jedem Punkt der Bewegung mehr nötig ist. Zudem werden die dynamisch ikonischen Repräsentationen vom PC automatisch gezeichnet und zusammen mit dem Video abgespielt. Neben diesen Funktionen bietet es zusätzlich die Möglichkeit der Serienbild- und Stroboskopaufnahme, die die Ers-

tellung versuchsbezogener Arbeitsblätter erleichtert. 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 (Kontiguitätsprinzip). Das folgende Kapitel zeigt weitere Vorteile des Einsatzes von Videos im Unterricht auf.

4.2.1. Vorteile

Zu Beginn dieses Kapitels soll deutlich und mit Nachdruck darauf hinweisen 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 zudem dem Lehrer dabei helfen, Versuchsvorgänge so aufzubereiten, dass Fehlkonzepte der Schüler durch die Konfrontation in Frage gestellt werden und in physikalische Konzepte umgewandelt werden (Heuer, 1993, S. 132). Videos ermöglichen es, Realität und Experiment miteinander zu verbinden und die Analyse zu erleichtern. Neben der Kopplung 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 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. Neben der zeitlichen Kontiguität liegt beim Einsatz analysierter Videos auch eine räumliche Kontiguität dadurch vor, dass bewegte Bilder, dynamisch ikonische Repräsentationen und Graphen auf dem Bildschirm gezeigt werden können. HEUER (Heuer, 1992, S. 130) sagt in diesem Zusammenhang, dass eine Überlappung der Darstellung, bei der alte und neue Repräsentationen gleichzeitig nebeneinander gezeigt werden, dem Schüler die nötige Übersetzung von einer zur anderen Darstellung erleichtert. Dadurch dass der gleiche Sachverhalt auf verschiedene Arten kodiert ist (Multicodierung), können die Schüler gemäß des Ansatzes der kognitiven Flexibilität (Spiro et al., 1988, S. 378 ff) ihr Wissen flexibler nutzen.

Da in der heutigen Zeit bereits viele Schulen Computerräume mit Schülerarbeitsplätzen besitzen, müssen die im Unterricht verwendetet Videos nicht zwingend vom Lehrer vorher analysiert werden, sondern es ist sogar 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 und nicht im traditionellen Frontalunterricht den Stoff „vorgekaut“ zu bekommen. Das Wissen wird für sie dadurch lebendiger und „persönlicher“. Das bedeutet, dass sie sich mit dem Lernstoff identifizieren können und er nicht mehr nur ein komplexer fremder Stoff ist, den der Lehrer ihnen versucht nahe zu bringen.

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 Aufgabenkultur ist es, den Schülern anwendungsbezogenes Wissen zu vermitteln, dass ihnen erlaubt außerschulische Probleme zu lösen (Beinbrech, 2003, S. 7). 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 Videoanalyseprogramm, 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.

Im Vergleich zu anderen Videoanalyseprogrammen ermöglicht „measure Dynamics“ dem Lehrer bearbeitete Videos zu exportieren und in der Schule abzuspielen ohne das Programm zu verwenden. Das bietet verschiedene Vorteile. Zum einen kann der Lehrer seine bearbeiteten Videos auf jedem beliebigen Rechner abspielen, ohne darauf achten zu müssen, dass dort das Programm „measure Dynamics“ installiert ist. Er kann die bearbeiteten Videos seinen Schülern mit nach Hause zu geben, damit diese den Lernstoff besser nacharbeiten können. Zum anderen fallen bei den exportierten Videos alle zusätzlichen Informationen (wie Optionsleiste, Messwerttabelle etc.) weg und die Konzentration der Schüler wird auf das Video fokussiert.

Der Einsatz realer Abbildungen mit dem Computer bietet unter kognitionspsychologischen Gesichtspunkten weitere Vorteile. Auf mentaler Ebene können die Schüler häufig keinen direkten Zusammenhang zwischen dem betrachteten Problem und den am Computer visualisierten Modellvorstellungen herstellen (Suleder; Heuer, 2004, S. 1). Das ist vor allem dann ein Problem, wenn Modell und Experiment getrennt von einander dargestellt werden müssen. Besser ist es, wenn die Größen in Form dynamisch ikonischer Repräsentationen und die Visualisierung ihrer funktionalen Zusammenhänge unmittelbar mit dem Objekt (Realexperiment) verknüpft sind und nach dem Kontiguitätsprinzip auf einem Bildschirm gezeigt werden. Zudem können durch diese Darstellung physikalische Grundphänomene gezeigt und Gesetzmäßigkeiten erarbeitet werden, wodurch die Schüler die physikalischen Aussagen direkt erschließen können (Suleder; Wilhelm; Heuer, 2004, S. 1). Die Modellbildungsprozesse bei den Lernenden gehen schneller und präziser vonstatten, da bereits die strukturellen und funktionalen Zusammenhänge herausgestellt sind. Zudem können im Video die Größen wie „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ als Vektoren verdeutlicht werden, was einen ganz anderen Einstieg in die Kinematik ermöglicht (vgl. dazu das Konzept von Wilhelm, 2005). Falsche Vorstellungen lassen sich dadurch korrigieren und sogar vermeiden.

Im nächsten Kapitel wird nun geschildert, inwieweit die Verwendung von Videoanalyse zweidimensionaler Bewegungen im neuen G8-Lehrplan in Bayern verankert ist und wie sich ihr Einsatz realisieren lässt.

4.2.2. Lehrplanverankerung im bayerischen achtstufigen Gymnasium

Der folgende Text stützt sich auf die Lehrpläne des bayerischen achtstufigen Gymnasiums auf der Homepage des Staatsinstituts für Schulqualität und Bildungsforschung (ISB) in München. Nach dem neuen Lehrplan für das achtstufige Gymnasium kommen die Schüler bereits in der siebten Klassenstufe erstmals mit der Kinematik in Berührung. Die Schüler sollen in dieser Jahrgangsstufe lernen ihr Denken zu abstrahieren und üben in Zusammenhängen zu denken. Als fächerverknüpfendes und fächerübergreifendes Unterrichtsvorhaben wird unter anderem das Thema „Auf einen Blick, Diagramme, Graphen und Bilder“ vorgeschlagen, dass sich mittels Videoanalyse im 3. Kapitel des Fachlehrplans Natur und Technik mit Schwerpunkt Physik einbauen ließe. Im Fach Natur und Technik erwerben die Schüler von der fünften Klasse an naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen und erlernen in verschiedenen Schwerpunkten Grundzüge aus den Fächern Physik, Chemie, Biologie und Informatik. Der Schwerpunkt Physik in der siebten Klassenstufe soll den Schülern helfen, bereits bekannte Arbeitsmethoden in diesem Fach zu vertiefen und physikalische Grundbegriffe und Denkweisen genauer kennen zu lernen. Physikalische Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten sollen zunächst überwiegend verbal beschrieben und qualitativ erarbeitet werden. Nach den beiden Themenblöcken „Optik“ und „elektrischer Strom“ beschäftigen sich die Schüler mit „Kräften in Natur und Technik“. Dabei sollen sie grundlegende kinematische Größen kennen lernen und es soll so der Grundstock für die gesamte Kinematik gelegt werden. Zur Erarbeitung der Größen „Ort“, „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ bietet sich die Videoanalyse gerade zu an. Mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen wird in den Köpfen der Schülern eine vektorielle Vorstellung der Grundgrößen gefördert und fehlerhafte Schülervorstellungen verhindert oder korrigiert (vgl. Kapitel 4.1.). Ein ausführliches Unterrichtskonzept zur Einführung in die Kinematik findet sich bei SCHÜLLER (2007), der unter Zuhilfenahme einer Spielzeugeisenbahn die Grundgrößen mit den Schülern erarbeitete. Im zweiten Teil dieser Arbeit werden Videos dieser Eisenbahn mit „measure Dynamics“ analysiert und didaktisch aufgearbeitet.

In der achten Jahrgangsstufe sollen die Schüler ihr logisches und strukturelles Denken weiter fördern und dazu ermutigt werden sich mit komplexeren Zusammenhängen auseinander zu setzen. Das Fach Physik bietet dazu die Möglichkeit unter dem Themenblock „Physik und Technik in der Gesellschaft“, Bewegungsabläufe im Sport zu untersuchen und physikalisch zu analysieren. Die Videoanalyse ist dabei ein sinnvolles Mittel, da sie auch die Analyse komplexer Bewegungsabläufe (Trampolinspringen oder Basketballspielen) erleichtert. Zudem wird in dieser Klassenstufe die Energie als Erhaltungsgröße behandelt. Ein Versuch dazu bietet das

Video „Berg- und Talfahrt“, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde und als bearbeitetes Video angehängt ist.

Die neunte Klassenstufe des achtstufigen Gymnasiums sieht die Erarbeitung der Kinematik und Dynamik geradliniger Bewegungen vor. Die Schüler lernen dabei Bewegungsdiagramme zu deuten und dadurch den zeitlichen Verlauf von Bewegungen zu analysieren. Gerade der Einsatz eines Videoanalyseprogramms erleichtert den Schülern, die Zusammenhänge zwischen dem Versuchsablauf und dem Graphen zu erkennen und diese kognitiv zu verarbeiten. Besonders die zeitliche und räumliche Verbindung (Kontiguitätsprinzip) der beiden Darstellungsformen hilft ihnen dabei. Die Videoanalyse ist hier im Lehrplan explizit aufgeführt, um beispielsweise Bewegungen aus Verkehr und Sport zu analysieren.

Auch der Lehrplan der zehnten Jahrgangsstufe des achtstufigen Gymnasiums sieht den Einsatz von Videoanalyse im Fach Physik vor. Unter der Themenüberschrift „Die Mechanik Newtons“ soll in circa 26 Unterrichtsstunden ihr Wissen zur Bewegungslehre aus den unteren Klassen zusammengesetzt und in die Newtonschen Gesetze vertieft werden. Neben eindimensionalen Bewegungen sollen auch zweidimensionale Abläufe analysiert und verstanden werden. Dabei kann die Videoanalyse helfen, Versuchsaufbauten wie den waagrechten Wurf, den realen Wurf, die Kreisbewegung und die Bewegung unter Einwirkung der Gravitationskraft darzustellen, zu analysieren und zu interpretieren. Da die Schüler zu diesem Zeitpunkt bereits ein fundiertes Wissen über die Mechanik besitzen sollten und der Lehrplan mit 26 Unterrichtsstunden relativ viel Zeit für die Vertiefung dieses Themenblocks zur Verfügung stellt, besteht die Möglichkeit, dass die Schüler im Computerraum mit bereits formatierten und beschnittenen Videos einzelne Bewegungsabläufe selbst erarbeiten. Dabei sollte der Lehrer eine kleine Einführung in das Programm geben und unter Umständen für eine zweite Aufsichtsperson sorgen, die sich ebenfalls mit dem Programm auskennt und individuelle Hilfestellungen geben kann. Der Einsatz der Videoanalyse als Selbstlerneinheit ist in der zehnten Klasse sinnvoll, da die Schüler bereits ein genügend großes Vorwissen besitzen und die für sie eventuell neue Darstellungs- beziehungsweise Arbeitsform nicht zu einer kognitiven Überlastung im Sinne der Cognitive-load-Theorie von SWELLER et al. (1998) kommt. Auch zum Lehrstoff der zehnten Jahrgangsstufe finden sich im zweiten Teil dieser Arbeit Beispielvideos.

III: VERSCHIEDENE VIDEOS UND EINSATZMÖGLICHKEITEN

Der zweite Teil dieser Hausarbeit beinhaltet Videos, die alle mit dem Analyseprogramm „measure Dynamics“ der Lehrmittelfirma PHYWE bearbeitet wurden. Das Hauptaugenmerk der bearbeiteten Filme liegt dabei auf der qualitativen Darstellung der kinematischen Grundgrößen „Ort“, „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“. Sie werden durch Pfeile dargestellt, die an dem jeweiligen Versuchsobjekts „angeheftet“ sind, sich mit diesem bewegen und ihre Form entsprechend der physikalischen Größen verändern. Die Videos sind gemäß ihrem Versuchsaufbau zusammengefasst und lassen sich in vier Obergruppen unterteilen:

- Die Spielzeugeisenbahn
- Das Fadenpendel
- Der Luftkissentisch
- Die Berg- und Talfahrt.

Im Folgenden werden nun die einzelnen Versuchsaufbauten erklärt, die verwendeten Analysefilter beschrieben, die verschiedenen Videos präsentiert und anschließend ihre Einsatzmöglichkeiten genannt. Alle hier besprochenen Videos sind in ihrer vollen Länge sowohl als measure-Dynamics-Projekt als auch als avi-Film auf der dieser Hausarbeit beigefügten DVD zu finden.

1. Die Spielzeugeisenbahn

1.1. Versuchsaufbau

Auf einer großen Platte wurde eine Spielzeugeisenbahn mit regelbarer Stromzufuhr aufgebaut (vergleiche Abbildung 12). Das Dach der Eisenbahn wurde durch das Überkleben mit einem farbigen Papier mattiert, um Spiegelungen zu vermeiden.

Abbildung 12: Verwendete Spielzeugeisenbahn mit regelbarem 12 V Transformator

Für die verschiedenen Videos wurden die Schienen in Form eines Kreises (offen und geschlossene Kreisbahn), als Oval, Schlangenlinie und Gerade aufgebaut (vergleiche Abbildung 13-17).

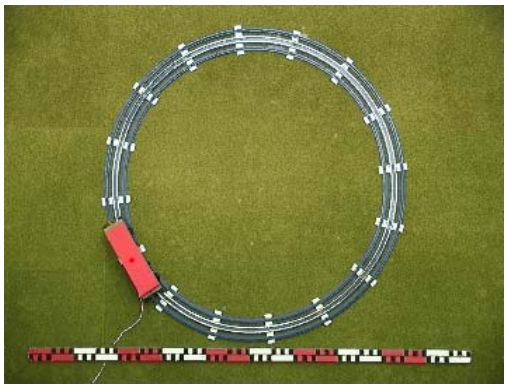


Abbildung 13: geschlossener Kreis

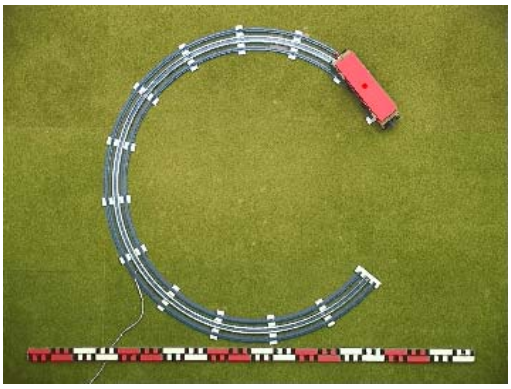


Abbildung 14: offener Kreis

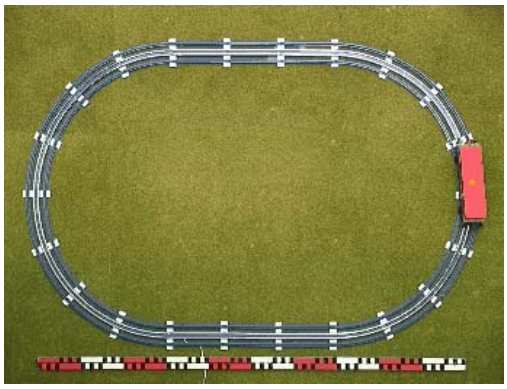


Abbildung 15: Ovale Schienenführung

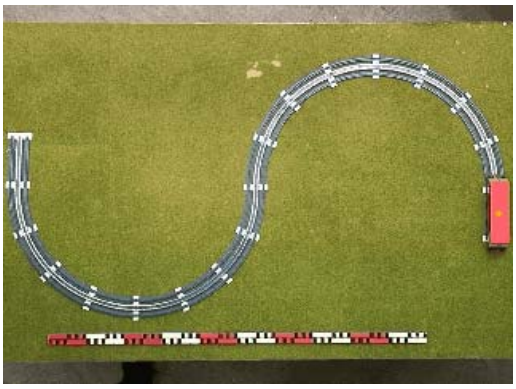


Abbildung16: Schlangenlinienförmige Schienenführung

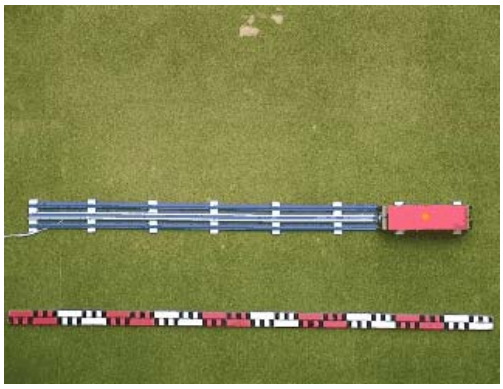


Abbildung 17: Gerade Strecke

Das Tempo der Eisenbahn wurde über einen 12-Volt-Stelltransformator den Versuchsanordnungen angepasst und variierte zwischen einem konstanten Tempo über Schneller- beziehungsweise Langsamerwerden bis hin zum Stillstand der Eisenbahn. Wie das Tempo im Einzelnen eingestellt wurde, wird bei den verschiedenen Versuchen genauer erklärt. Alle Eisenbahn-Videos sind im Progressivmodus aufgenommen worden. Das bedeutet, dass der Abstand zwischen zwei neuen Bildern 0,08 Sekunden beträgt. Die Kamera zeigt bei diesem Vollbildmodus allerdings immer zwei gleiche Bilder hintereinander an, was dazuführt, dass der Abstand zwischen zwei Frames wieder wie üblich 0,04 Sekunden beträgt. Um diese Diskrepanz zwischen neuem Bild und angezeigtem Frame zu umgehen, wurde bereits bei der Bearbeitung in „VirtualDub“ jeder zweite Frame herausgeschnitten. Dadurch werden nun trotz Vollbild-

modus keine Bilder doppelt gezeigt und die Analyse in „measure Dynamics“ funktioniert besser. Der Abstand zwischen zwei Bildern im Video beträgt somit 0,08 Sekunden.

1.2. Kreisbahn

Insgesamt wurden vier Projekte mit der im Kreis fahrenden Eisenbahn erstellt. Die ersten beiden Projekte (Eisenbahn- Kreis Herleitung der Geschwindigkeit.prj und Eisenbahn- Kreis konstantes Tempo.prj) zeigen die analysierte Bewegung der Bahn bei konstantem Tempo. Dafür wurde der Transformator auf circa die Hälfte eingestellt und die Bahn einige Male im Kreis fahren lassen. Die Bewegungen wurden in „measure Dynamics“ jeweils zwei Mal analysiert. Beim ersten Mal wurde der Vorgang ganz normal mit einer Schrittweite von 1 (entspricht einem Zeitabstand zwischen zwei Bildern von 0,08 Sekunden) untersucht. Die so ermittelten Messdaten bieten die Grundlage für die Darstellung der Filter „Ort“, „Geschwindigkeit“, „Geschwindigkeitsänderung“ und „Geschwindigkeit (alt)“. Die zweite Bewegungsanalyse wurde mit einer Schrittweite von 2 (entspricht einem Zeitabstand zwischen zwei Bildern von 0,16 Sekunden) durchgeführt, weil dadurch die Werte über einen größeren Zeitraum gemittelt sind. Die dabei entstandene Messwerttabelle wird als Grundlage für den Filter „Beschleunigung“ verwendet. Bei der Darstellung des fertig analysierten Videos mit den dazugehörigen dynamisch ikonischen Repräsentationen (sichtbaren Filtern einschließlich der Beschleunigung) muss darauf geachtet werden, dass ebenfalls eine Schrittweite von 2 verwendet wird. Ist dies nicht der Fall, so ist der Beschleunigungspfeil nur bei jedem vierten Frame sichtbar und der Betrachter hat das Gefühl als würde der Pfeil blinken.

Mit dem Projekt „Eisenbahn- Kreis Herleitung der Geschwindigkeit.prj“ kann der Lehrer im Unterricht den Begriff der Geschwindigkeit erarbeiten. In Jahrgangsstufe 7 geht man zunächst nicht auf Bezugssysteme und Ortsmessungen ein, sondern beginnt direkt mit der Geschwindigkeit. Daher ist dieses Projekt eher für die Jahrgansstufen 10 beziehungsweise 11 gedacht. Zunächst sollte der Wagen nur mit $\vec{x}$ gezeigt werden. Dafür kann zum Beispiel die Ortsvektoren (vergleiche Abbildung 18a) hinter dem Wagen gestempelt werden beziehungsweise seine Bahnkurve (vergleiche Abbildung 18b) eingezeichnet werden. Die verschiedenen Möglichkeiten können bei den Filtern ausgewählt und eingeblendet werden. Zur Erarbeitung der Ortsänderung können die Ortsvektoren der aktuellen Position der Eisenbahn (weißer Pfeil) und zukünftigen (ein Frame weiter) Position (grüne Pfeile) 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 separat einblendbare Geschwindigkeitspfeil (gelber Pfeil). Nachdem der Schüler verstanden hat, wie $\Delta\vec{x}$ zustande kommt, ist es sinnvoll $\vec{v} = \frac{\Delta\vec{x}}{\Delta t}$ zu definieren und dann $\vec{v}$ einzublenden (vergleiche Abbildung 18c). 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 die in Kapitel 4.1.2. beschriebenen Fehlvorstellungen können vermie-

den beziehungsweise korrigiert werden. Die Betrachtung von $\vec{x}$ und der Bahnkurve besitzt zudem den Vorteil, dass klar zwischen den Größen Ort und Weglänge unterschieden wird. Außerdem wir eine einfache Differenzierung geübt und die Einführung der Beschleunigung vorbereitet. Genauso wie hier aus $\Delta\vec{x}$ nun $\vec{v}$ wird, wird später aus $\Delta\vec{v}$ das $\vec{a}$.

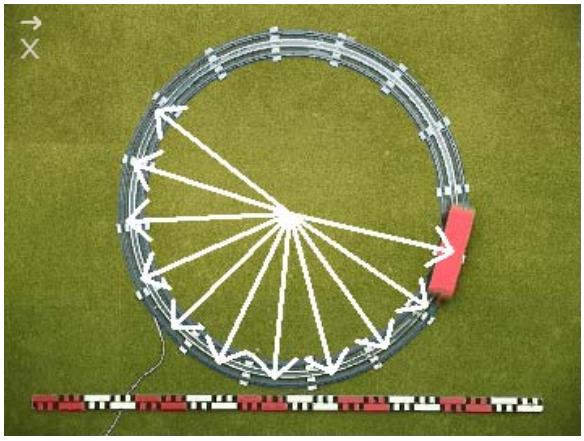


Abbildung 18a: gestempelter Ortsvektor des Wagens

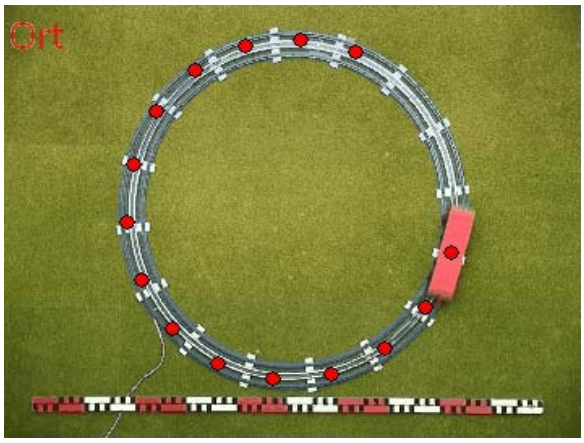


Abbildung 18b: Bahnkurve des Wagens

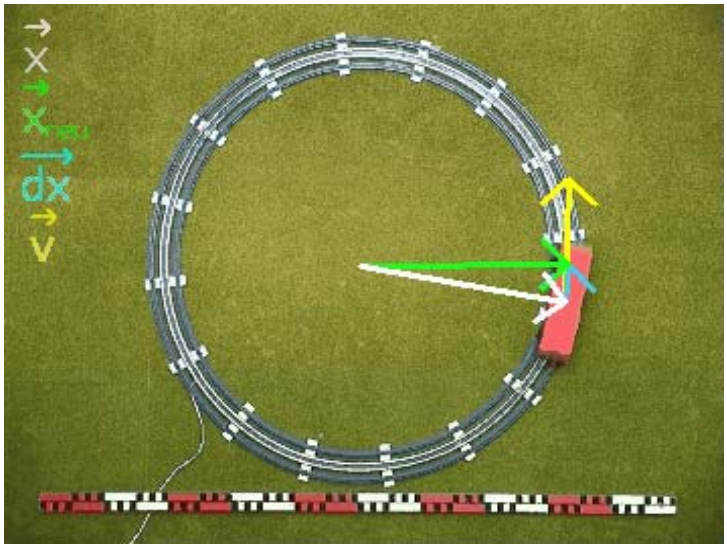


Abbildung 18c: Kreisbahn zur Herleitung der Geschwindigkeit

Das Projekt „Eisenbahn- Kreis konstantes Tempo.prj“ kann im Unterricht verwendet werden, um die Beschleunigung als Geschwindigkeitsänderung in einem bestimmten Zeitintervall einzuführen und zu erklären (vergleiche Abbildung 19). Dafür eignet sich die Kurvenfahrt am besten, da sich bei konstantem Tempo nur die Richtung der Geschwindigkeit ändert und die Schüler direkt lernen, dass Geschwindigkeit und Beschleunigung vektorielle Größen sind.

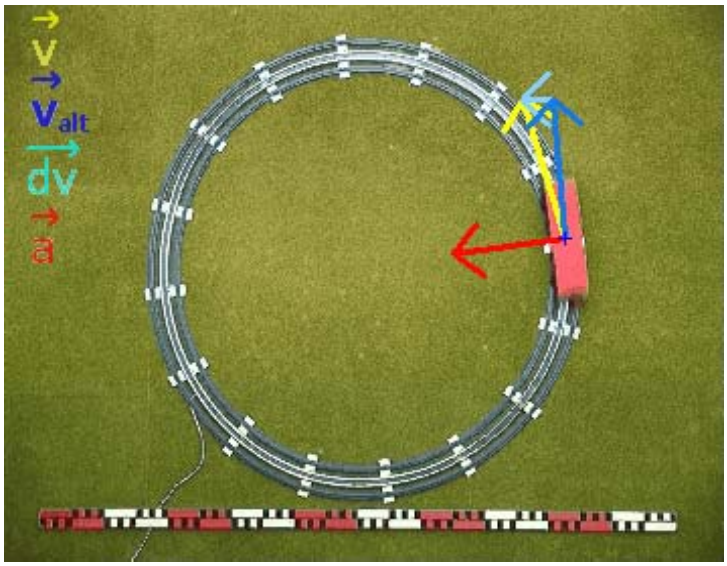


Abbildung 19: Kreisbahn zur Herleitung der Beschleunigung

Abbildung 19 zeigt eine Momentaufnahme aus dem Projekt „Eisenbahn- Kreis konstantes Tempo.prj“. Der rote Pfeil beschreibt 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. Zudem kann man bei diesem Projekt sehen, dass die Beschleunigung bei konstantem Tempo immer nach innen in den Kreis zeigt und im Idealfall sogar Richtung Kreismittelpunkt.
Als drittes Projekt („Eisenbahn- Kreis schneller werden.prj“) wurde das Tempo der Eisenbahn im Laufe des Versuchs erhöht und dadurch der Betrag der Beschleunigung größer (vergleiche Abbildung 20). Die Beschleunigung ist so nicht genau zum Kreismittelpunkt gerichtet, sondern besitzt eine Komponente in Vorwärtsrichtung der Bewegung.

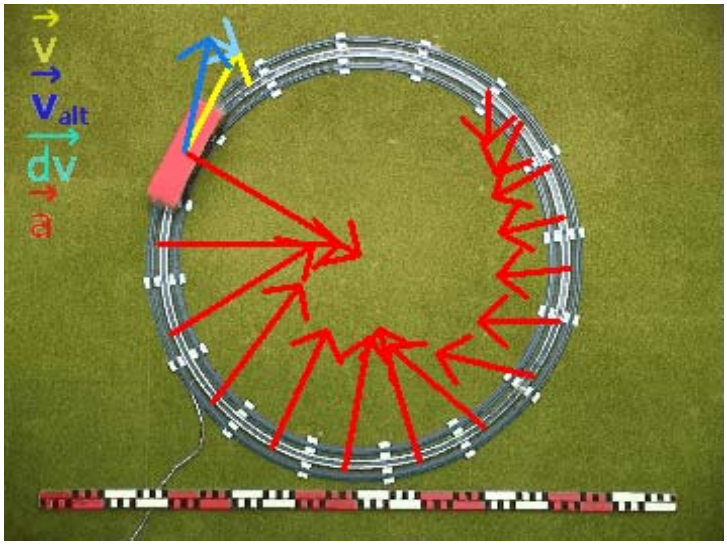


Abbildung 20: Eisenbahn auf Kreisbahn mit steigendem Tempo

Es wurden bei der Analyse wieder zwei Messtabellen erstellt. Die erste bei einer Schrittweite von 1 für die Geschwindigkeiten $\vec{v}$ und $\vec{v}_{alt}$ und die Geschwindigkeitsänderung $\Delta\vec{v}$ (entspricht einem Zeitabstand zwischen zwei Bildern von 0,08 Sekunden) und die zweite bei einer

Schrittweite von 2 für die Beschleunigung $\vec{a}$ (entspricht einem Zeitabstand zwischen zwei Bildern von 0,16 Sekunden). Zudem wurde beim Beschleunigungsfilter eine Spurlänge von 30 eingestellt, wodurch die letzten 15 Beschleunigungspfeile dargestellt werden. Der Schüler erkennt dadurch, dass der Betrag der Beschleunigung diesmal nicht konstant beleibt, sondern im Laufe der Bewegung zunimmt. Zudem sieht er, dass die Beschleunigung neben der radialen Komponente auch einen tangentialen Anteil besitzt und der Beschleunigungspfeil, solange die Eisenbahn schneller wird, nicht mehr Richtung Kreismittelpunkt zeigt. Diese Darstellung erleichtert dem Schüler daher, die beiden Eigenschaften – Betrag und Richtung – der kinematischen Grundgrößen besser zu verstehen und seine Alltagsvorstellungen diesbezüglich zu erweitern.

Das vierte und letzte Projekt, das sich mit der Eisenbahn auf einer Kreisbahn beschäftigt, ist „Eisenbahn-offener Kreis.prj“. Diesmal ist der Kreis unterbrochen und die Eisenbahn fährt über das Ende der Schienen hinaus. Bei diesem Video soll den Schülern verdeutlicht werden, dass sich die Eisenbahn gemäß des Beharrungsprinzips (1. Newtonsches Gesetzt) ohne die Schienen geradeaus weiter bewegen würde. Zudem kann der Schüler sehen, welche Auswirkungen die Reibungskraft hat, da die Eisenbahn kurz nach dem Ende der Schienen zum stehen kommt (vergleiche Abbildung 21a und 21b).

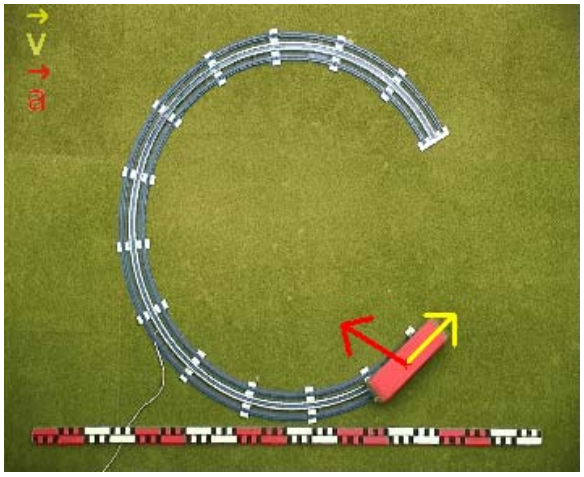


Abbildung 21a: offener Kreis - kurz vor Ende der Schienen

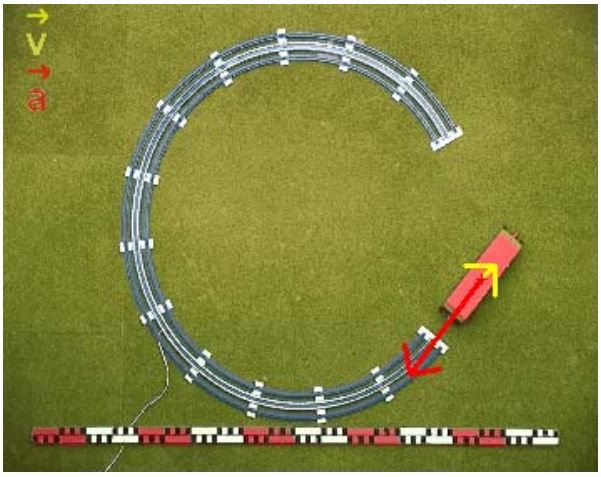


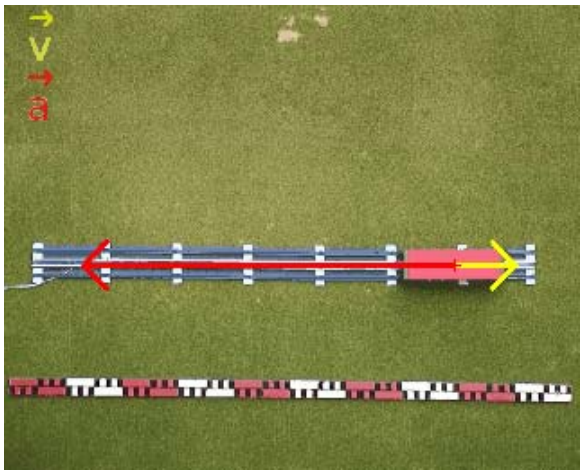
Abbildung 21b: offener Kreis – kurz hinter dem Schienenende

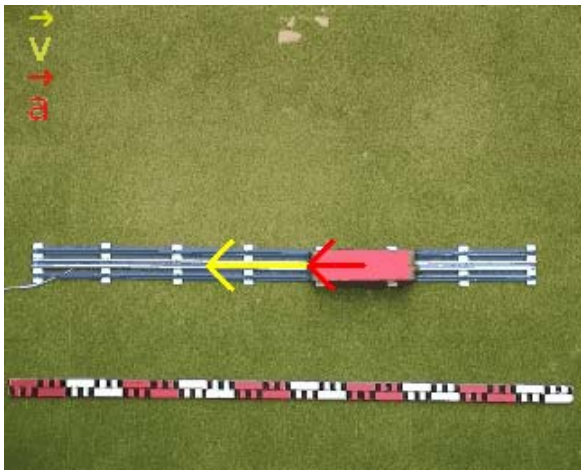
Bei diesem Projekt ist auf die Darstellung der Geschwindigkeitsänderung und der alten Geschwindigkeit verzichtet worden, weil das Video sonst überladen ist und die Aufmerksamkeit des Betrachters vom Wesentlichen abgelenkt wird. In der Projektdatei sind die entsprechenden Filter jedoch vorhanden und können bei Bedarf eingeschaltet werden.

1.3. Gerade Strecke

Mit Hilfe der Videoanalyse können nicht nur zweidimensionale Bewegungen analysiert und für den Unterricht aufgearbeitet werden. Auch eine eindimensionale Betrachtung kann und sollte mit den Schülern besprochen werden.

Bei diesem Versuch wurden die Schienen als eine Strecke aufgebaut, auf der die Eisenbahn entlang fährt. Zu dieser Versuchsanordnung wurden zwei unterschiedliche Projekte erstellt, bei denen eine Schrittweite von 4 (entspricht einem Zeitabstand zwischen zwei Bildern von 0,32 Sekunden) für die Analyse der Beschleunigung verwendet wurde. Das erste Projekt (Eisenbahn- Strecke Hin und Her.prj) zeigt die Spielzeugeisenbahn, wie sie hin und her fährt. Der Betrachter kann dabei deutlich den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Beschleunigung erkennen (vergleiche Abbildung 22a und 22b). Man sieht: Die Eisenbahn wird schneller, wenn $\vec{v}$ und $\vec{a}$ in gleiche Richtung zeigen und langsamer, wenn $\vec{v}$ und $\vec{a}$ in entgegen gesetzte Richtung weisen. Da es sich um eine rein eindimensionale Betrachtung handelt, wurden die Geschwindigkeitsänderung und alte Geschwindigkeit nicht mit in die Analyse einbezogen.





(a) **(b)**

Abbildung 22: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Beschleunigung beim Hin- und Herfahren der Eisenbahn

Betrachtet man die x-Komponente der Geschwindigkeit und die x-Komponente der Beschleunigung in Abhängigkeit von der Zeit, so sieht man deutlich, dass die Geschwindigkeit konstant bleibt, wenn die Beschleunigung Null ist und bei maximaler/minimaler Beschleunigung sich die Geschwindigkeit am stärksten ändert (vergleiche Abbildungen 23 und 24). Zudem wird die x-Komponente der Geschwindigkeit immer größer, wenn die x-Komponente der Beschleunigung positiv ist, und v_x wird kleiner, wenn a_x negativ ist. Die nicht ganz gleichförmigen Graphen entstehen dadurch, dass der 12-V-Transformator per Hand verstellt wurde und so das Tempo der Bahn immer variiert.

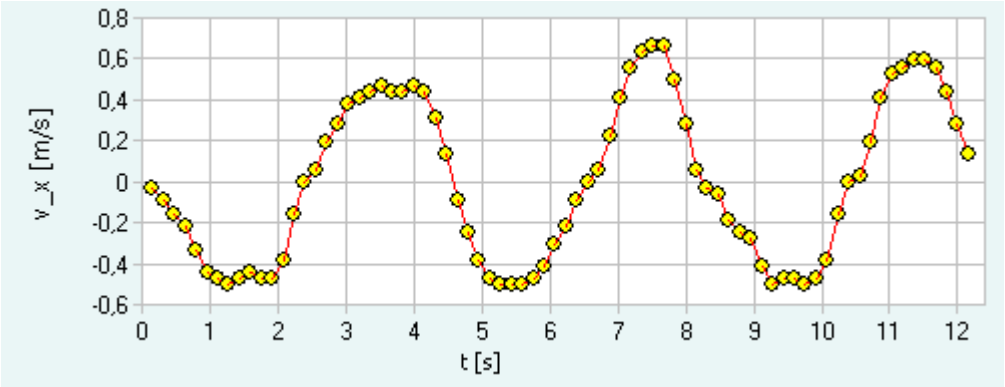


Abbildung 23: v_x-t-Diagramm bei der Hin- und Herfahrt auf einer geraden Strecke

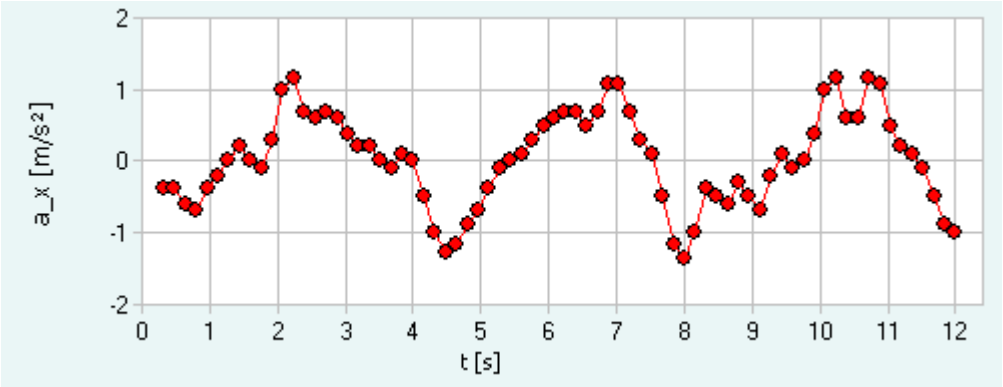


Abbildung 24: a_x-t-Diagramm bei der Hin- und Herfahrt auf einer geraden Strecke

Beim zweiten Projekt (Eisenbahn- Strecke Über Schienen Hinaus.prj) auf der Geraden endet die Bahn am Ende der Schienen ihre Fahrt nicht und kehrt zurück, sondern fährt über das Schienenende hinaus und wird von der Reibung des Untergrundes gebremst (vergleiche Abbildung 25).

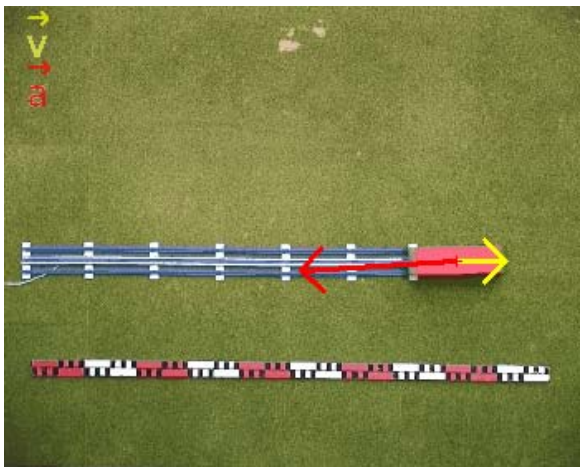


Abbildung 25: Eisenbahn fährt über das Schienenende hinaus

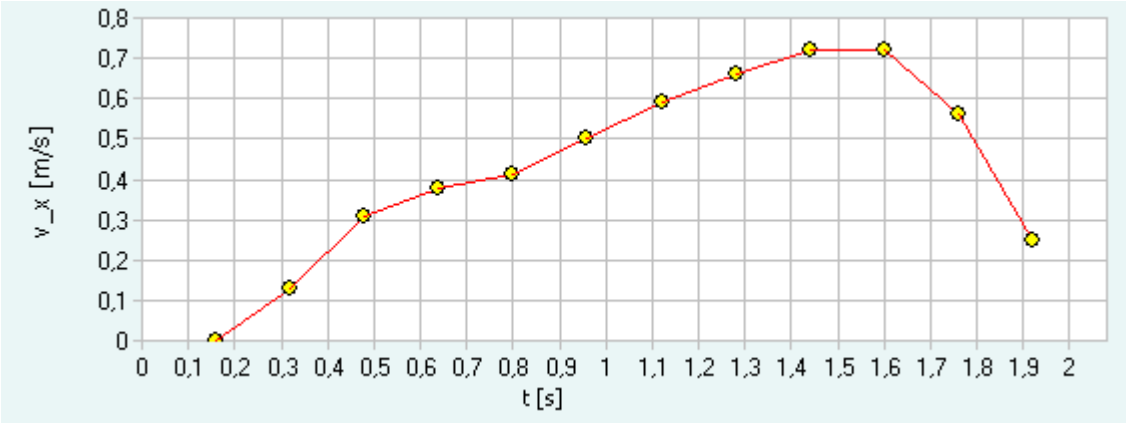


Abbildung 26: v_x-t-Diagramm bei der Fahrt auf einer geraden Strecke über das Schienenende hinaus

Die Verteilung der Geschwindigkeit pro Zeiteinheit (Abbildung 26) lässt erkennen, dass die Spielzeugeisenbahn bis zu der Zeit von t = 1,6s beschleunigt und dann auf der Rasenplatte abgebremst wurde.

1.4. Ovale Schienenführung

Die dritte Schienenanordnung beschreibt ein Oval. Bei den Darstellungen dieser Versuchsanordnung wurde wieder auf die Visualisierung der Geschwindigkeitsänderung und der alten Geschwindigkeit verzichtet, da sie keine neuen Erkenntnisse liefern, das Video sonst zu voll wäre und es dadurch zu einer kognitiven Überlastung im Sinne der Cognitive-Load-Theorie beim Betrachter kommen könnte. Sollten diese beiden Darstellungen jedoch benötigt werden, so können ihre Filter eingeschaltet werden und die Größen werden sichtbar. Mit dem Versuchsaufbau einer ovalen Schienenführung wurden insgesamt drei verschiedene Projekte durchgeführt.

Zunächst fährt die Spielzeugeisenbahn mit konstantem Tempo entlang der Schienen (Eisenbahn- Oval konstantes Tempo.prj). Bei der Analyse wurde der Filter der Beschleunigung auf eine Spurlänge von 60 eingestellt und die Analyse erfolgte dabei bei einer Schrittweite von 2 (entspricht einem Zeitabstand zwischen zwei Bildern von 0,16 Sekunden). Dadurch kann die Veränderung der Beschleunigung gut nachvollzogen werden. In Abbildung 27 ist deutlicht sichtbar, dass sie auf den geraden Streckenteilen fast Null ist und in den Kurven maximal wird. Abgesehen von den Übergängen zwischen Gerade und Kurve ist der Betrag der Beschleunigung in jedem Abschnitt konstant.

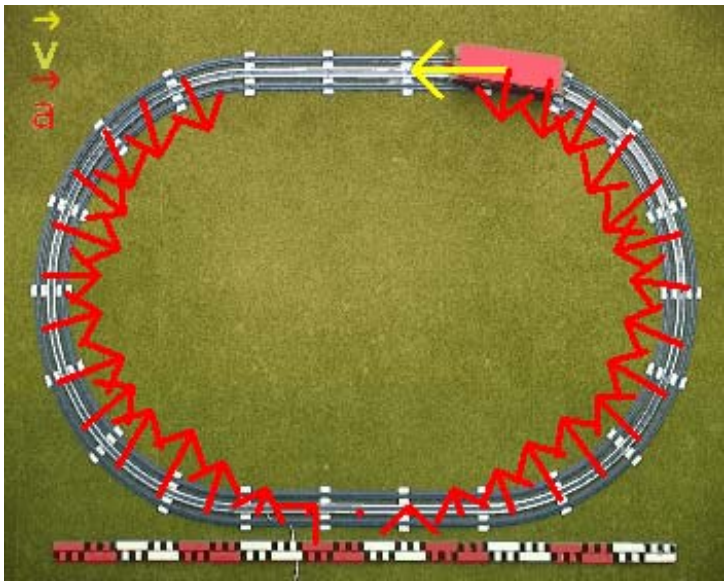


Abbildung 27: Ovale Schienenführung mit konstantem Tempo

Das zweite und dritte Projekt dieses Versuchsaufbaus zeigt einmal die Eisenbahn, wie sie anfährt, schneller wird, konstant fährt, wieder langsamer wird und schließlich steht. Die beiden Projekte unterscheiden sich dabei allein in dem Punkt, dass die Eisenbahn in der einen Bearbeitung („Eisenbahn- Oval Anfahren bis stehenbleiben.prj„ vergleiche Abbildung 29) nach dem Stehen bleiben in die gleiche Richtung wieder weiter fährt und bei der anderen Bearbeitung („Eisenbahn- Oval Hin und Her.prj“) ihre Fahrtrichtung ändert. Bei beiden Projekten kann die Beschleunigung und die Geschwindigkeit in ihrem zeitlichen Verlauf gut beobachtet werden. Besonders schön erkennt man, dass die tangentiale Komponente der Beschleunigung einmal in und einmal entgegen der Richtung der Bewegung zeigt. Die Beschleunigung wirkt daher einmal schneller werdend und einmal bremsend. Diese Projekte können im Unterricht verwendet werden, um die Bewegungen auf der Geraden und der Kurve mit einander zu verbinden und schließlich noch die Variation des Tempos zu zeigen.

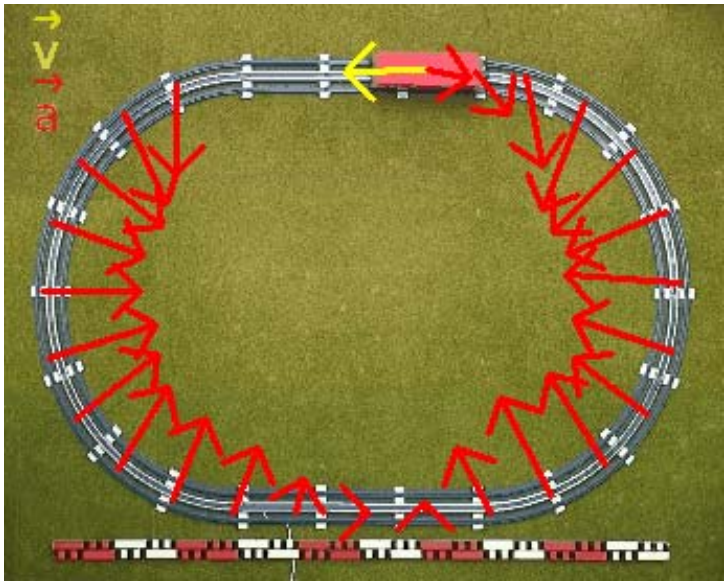


Abbildung 29: ovale Schienenführung mit variablem Tempo

1.5. Schlangenlinie

Bei der letzten Anordnung beschreiben die Schienen eine S-Kurve. Die Beschleunigung der Eisenbahn wechselt daher beim Wendepunkt der Kurven die Richtung, was die Analyse deutlich zeigt. Um die Beschleunigung genauer bestimmen zu können, wurde für ihre Analyse ebenfalls eine Schrittweite von 2 (entspricht 0,16 Sekunden) verwendet. Die Darstellung der alten Geschwindigkeit und der Geschwindigkeitsänderung ist optional, falls benötigt, bei den Filtern einblendbar (vergleiche Abbildung 30a und 30b).

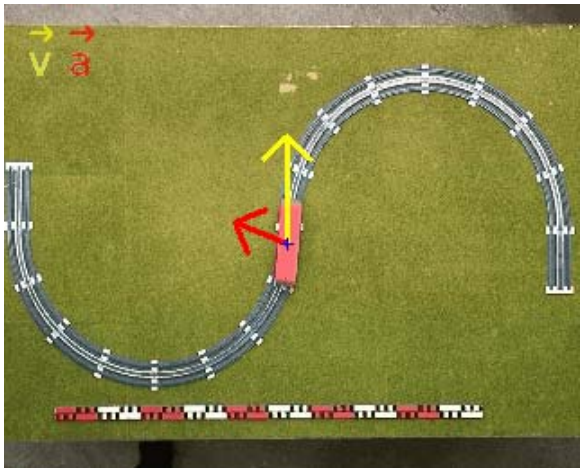


Abbildung 30a: Geschwindigkeit und Beschleunigung kurz vor dem Wendepunkt

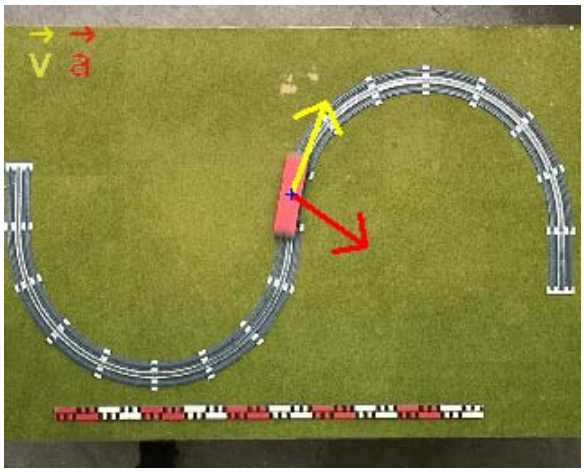


Abbildung 30b: Geschwindigkeit und Beschleunigung kurz nach dem Wendepunkt

Bei diesem Projekt müssen die Schüler darüber nachdenken, was es bedeutet, dass die Beschleunigung immer „nach Innen“ in einem Kreis zeigt.

2. Das Fadenpendel

2.1. Versuchsaufbau

An der Tafel wurde mittels einer Klemme ein Fadenpendel mit der Fadenlänge l = 0,96 m aufgehängt. Zudem wurden im Hintergrund Auslenkwinkel von 10° bis 60° aufgezeichnet, um die Auslenkung des Pendels genauer einstellen zu können (vergleiche Abbildung 31a).

Abbildung 31a: Versuchsaufbau des Fadenpendels

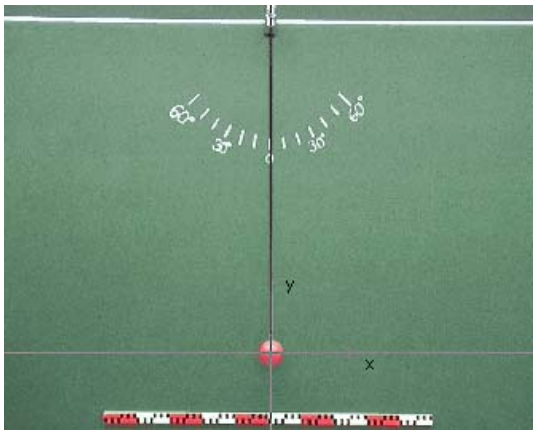


Abbildung 31b: Nullpunktswahl

In den nachfolgenden drei Projekten wurde das Pendel einmal um 10°, einmal um 30° und einmal um 60° ausgelenkt und jeweils sechs Schwingungsperioden aufgenommen und analysiert. Der Nullpunkt des Koordinatensystems wurde für alle Projekte im Ruhepunkt des Pendels gewählt (vergleiche Abbildung 31b). Alle Aufnahmen wurden im Vollbildmodus der Kamera aufgenommen, da die Bewegung vor allem bei größerer Auslenkung so schnell war, dass sich bei normaler Kameraeinstellung ein Kammeffekt eingestellt hätte. Da die Kamera im Vollbildmodus jedes Bild doppelt zeigt, wurde bereits bei der Bearbeitung durch „VirtualDub“ jedes zweite Bild gelöscht. Der Abstand zwischen zwei Bildern beträgt somit 0,08 Sekunden. Um die Beschleunigung besser darstellen zu können, wurde die Analyse wieder mit einer Schrittweite von 2 (entspricht einem Zeitabstand von 0,16 Sekunden) durchgeführt.

2.2. 10° Auslenkung

Bei einer Auslenkung von 10° wurden die Geschwindigkeit und die Beschleunigung als dynamische Vektoren dargestellt (vergleiche Projekt „Fadenpedel10°.prj“). Beim Abspielen des analysierten Videos sieht man deutlich, dass in den Umkehrpunkten des Pendels die Beträge der Beschleunigungen maximal und die der Geschwindigkeiten minimal sind. Im Nullpunkt des Pendels verhält es sich genau umgekehrt (vergleiche Abbildung 32a und 32b). Da die Auslenkung und damit die Geschwindigkeit sehr gering sind, kann die Radialbeschleunigung, die durch die Fadenkraft zustanden kommt, bei recht grober Näherung vernachlässigt werden. Die Bewegung kann somit als eine lineare Bewegung betrachtet werden, die sich gleichmäßig von Links nach Rechts und umgekehrt vollzieht. Aus diesem Grund werden im Folgenden nur die x-Komponente der Beschleunigung und die Auslenkung des Pendels in x-Richtung betrachtet.

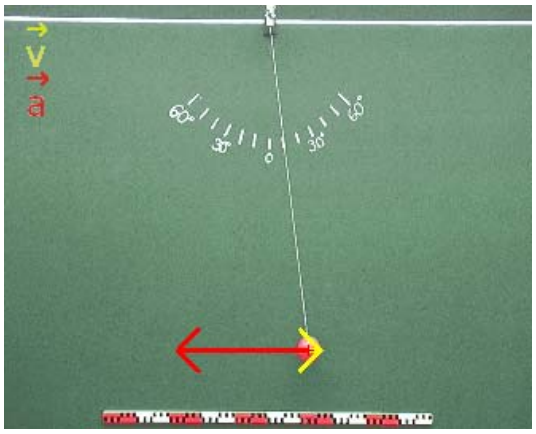


Abbildung 32a: Geschwindigkeit und Beschleunigung am Umkehrpunkt

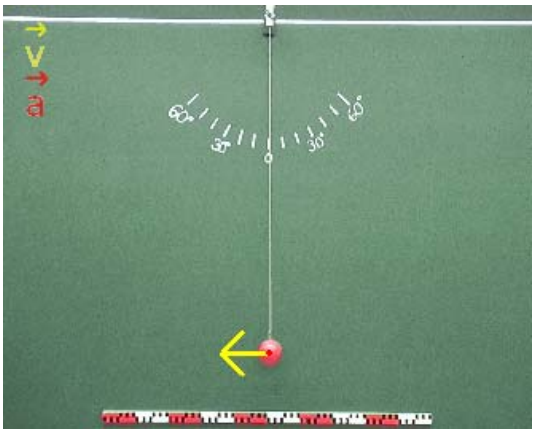


Abbildung 32b: Geschwindigkeit und Beschleunigung am Umkehrpunkt

Betrachtet man nun den zeitlichen Verlauf der x-Komponente des Ortes (aufgrund der kleinen Auslenkung kann die y-Komponente vernachlässigt werden), so sieht man, dass sie gerade bei den ersten fünf Schwingungen sehr gut einer Sinuskurve angenähert werden kann (vergleiche Abbildung 33).

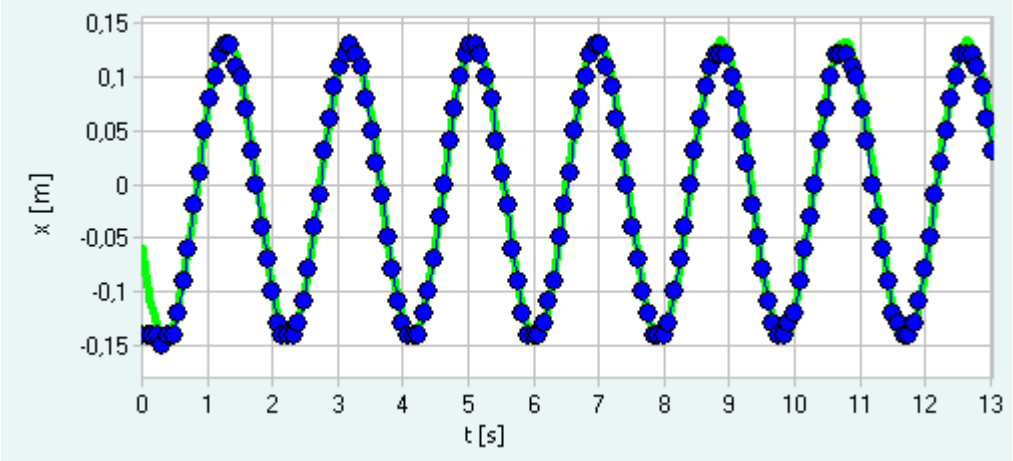


Abbildung 33: Auslenkung des Pendels (blau) in x-Richtung mit angeglichener Sinuskurve (grün)

Ähnliche Periodizitäten erkennt man auch bei der Geschwindigkeit und Beschleunigung des Pendels, was bei größeren Auslenkungen nicht mehr der Fall ist (vergleiche Abbildung 34).

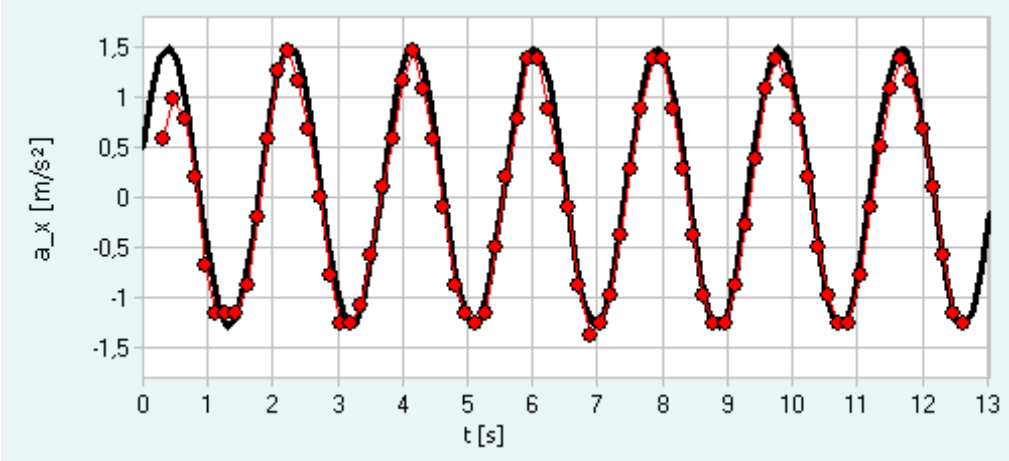


Abbildung 34: zeitlicher Verlauf der x-Komponente der Beschleunigung (rote Kurve) mit eingeblendeter Sinuskurve (schwarze Kurve)

2.3. 30° Auslenkung

Bei der Auslenkung von 30° wurden erneut Geschwindigkeit und Beschleunigung als dynamische Vektoren dargestellt (vergleiche Projekt „Fadenpedel30c°.prj“). Bei dieser Auslenkung fällt die y-Komponente der beiden Größen stärker ins Gewicht (vergleiche Abbildung 35a und 35b). Es gilt daher nicht mehr die Kleine-Winkel-Näherung $x \approx s$. Aus diesem Grund wurde der Betrag der Beschleunigung in „measure Dynamics“ mit $|\vec{a}| = \sqrt{(a_x)^2 + (a_y)^2}$ in einer neuen Tabellenspalte berechnet und als Graph ausgegeben (vergleiche Abbildung 37). Auch die Bogenlänge wurde in einer neuen Tabellenspalte mit der Formel $s = l * \varphi$ mit $\varphi = \arctan\frac{y}{x}$ berechnet und als Diagramm aufgetragen (vergleiche Abbildung 36). Auf Grund eines Programmfehlers konnten die Dimensionen der Bogenlänge und der Beschleunigung leider nicht im Graphen angegeben werden.

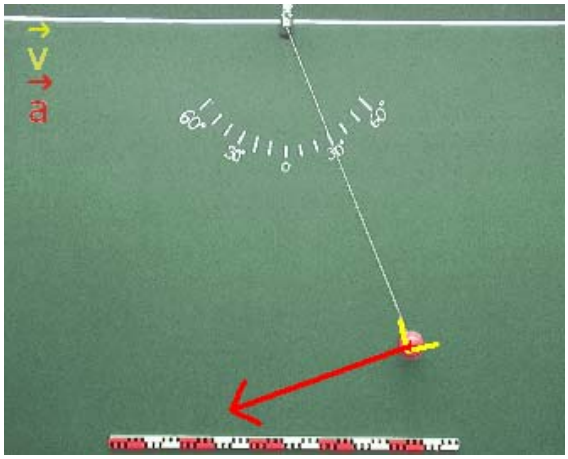


Abbildung 35a: Geschwindigkeit und Beschleunigung des Pendels bei 30° Auslenkung

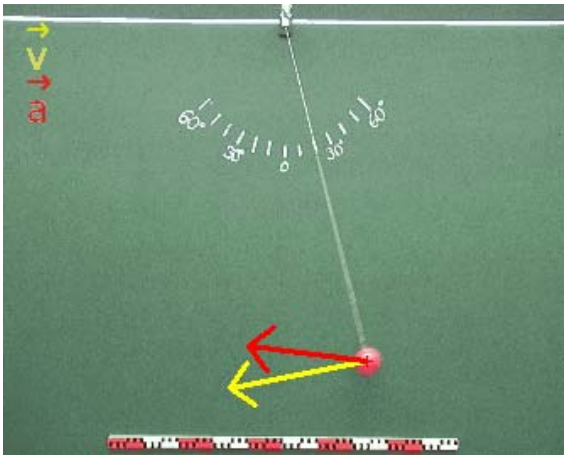


Abbildung 35b: Geschwindigkeit und Beschleunigung kurz vor dem Ruhepunkt

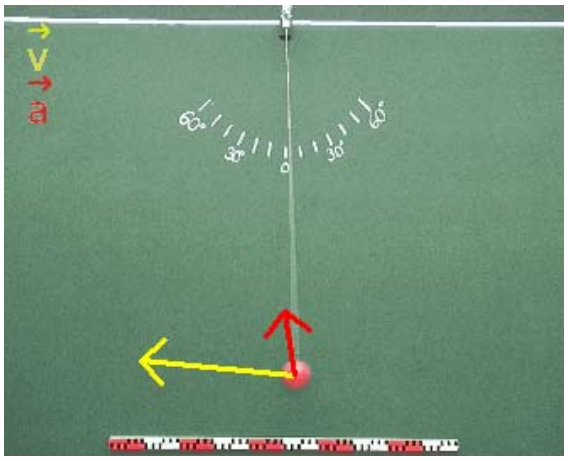


Abbildung 35c: Geschwindigkeit und Beschleunigung in der Nähe des Ruhepunkts

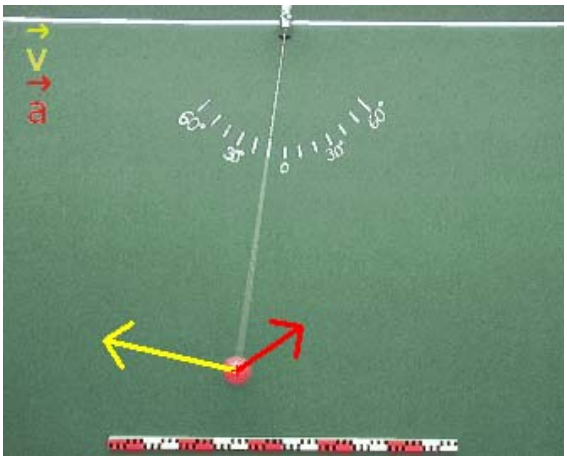


Abbildung 35d: Geschwindigkeit und Beschleunigung nach dem Ruhepunkt

Sowohl sie Bogenlänge s als auch der Betrag a der Beschleunigung $\vec{a}$ besitzen aufgetragen gegen die Zeit eine sehr regelmäßige Funktion. Der Betrag a der Beschleunigung hat dabei die doppelte Frequenz der Bogenlänge s. Aus den beiden Graphen (Abbildung 36 und Abbil-

dung 37) lässt sich zudem ablesen, dass die Beschleunigung am Umkehrpunkt des Pendels maximal und im Ruhepunkt minimal ist. In den Umkehrpunkten gibt es nur eine tangentiale Beschleunigung, da die Geschwindigkeit Null ist und im Ruhepunkt gibt es nur eine Radialbeschleunigung. Zwischen beiden Punkten kommen beide Beschleunigungen vor. Bei den bei einer Pendelauslenkung von 30° auftretenden Geschwindigkeiten ist die Tangentialbeschleunigung im Umkehrpunkt größer als die Radialbeschleunigung im Ruhepunkt. Weiter sieht man, dass der Betrag von a im Laufe des Versuchs leicht abnimmt, da die Bewegung des Pendels nicht reibungsfrei verläuft. Am Anfang und am Ende des Versuchs ist die Beschleunigung Null, da das Programm „measure Dynamics“ die Beschleunigung nicht direkt misst, sondern über die zweite Ableitung des Ortes berechnet. Die ersten und letzten beiden Punkte der Analyse fallen somit aus der Rechnung heraus und das Programm legt sie automatisch auf Null.

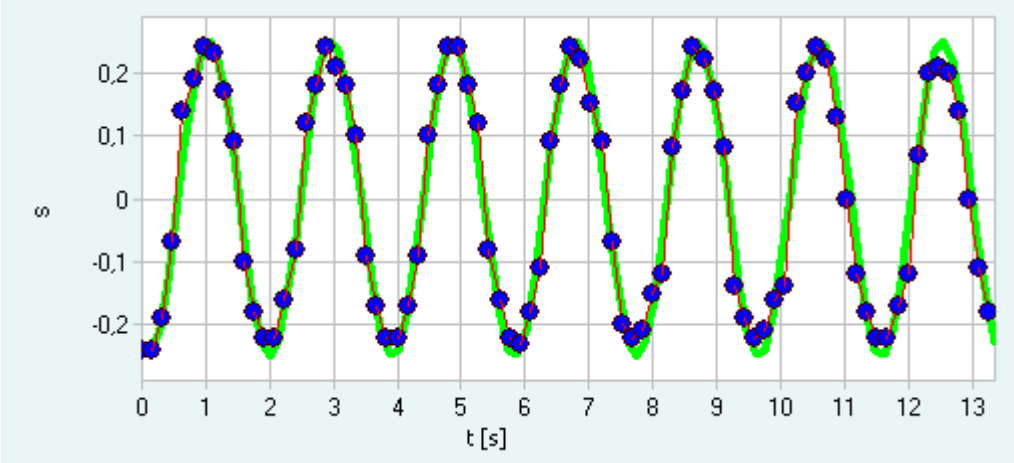


Abbildung 36: Bogenlänge (blaue Kurve) des Pendels bei einer Auslenkung von 30° (s in m) mit eingeblendeter Cosinusfunktion (grüne Kurve)

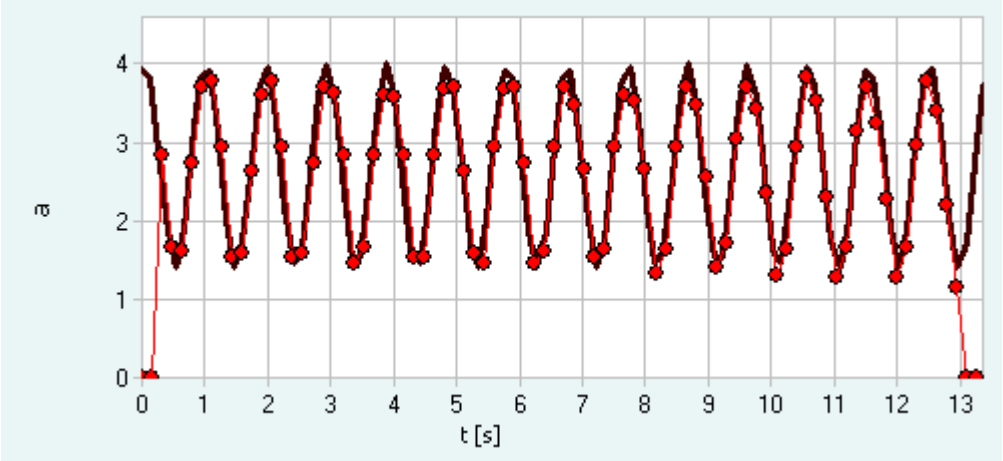


Abbildung 37: Zeitlicher Verlauf des Betrags der Beschleunigung eines Pendels bei 30° Auslenkung in m/s² (rote Funktion) mit eingeblendeter Cosinusfunktion (schwarze Kurve)

Aus didaktischen Gesichtspunkten bietet sich die Besprechung des Fadenpendels mittels Videoanalyse an, da sich vor allem die Beschleunigung deutlich anders verhält als man zunächst vermuten würde. Das liegt vor allem an der Radialbeschleunigung, die mit größerer werden-

der Auslenkung deutlich zunimmt. Während sie bei einer Auslenkung von 10° bei grober Näherung vernachlässigbar ist, spielt sie bei 30° bereits eine entscheidende Rolle und führt dazu, dass der Betrag der Beschleunigung auf den Pendelkörper nicht mehr sinusförmig ist. Um die Kurve besser verstehen zu können sollte man sich zunächst überlegen, wie sich die Tangential- und Radialbeschleunigung in den Umkehrpunkten beziehungsweise dem Ruhepunkt verhalten. Im Ruhepunkt des Pendels ist die tangentiale Komponente der Beschleunigung Null und am Umkehrpunkt ist sie maximal. Ihr Verlauf ergibt also einen Sinus um den Nullpunkt. Die radiale Komponente der Beschleunigung dagegen ist im Ruhepunkt maximal und am Wendepunkt Null, da sich die Fadenkraft und die radiale Komponente der Gravitationskraft in diesem Punkt aufheben. Durch eine vektorielle Addition der Tangential- und Radialbeschleunigung ergibt sich schließlich die resultierende Beschleunigung, und ihr Betrag aufgetragen gegeben die Zeit ergibt einen Graph, der deutlich anders ist, als viele ihn zunächst erwartet hätten.

2.4. 60° Auslenkung

Das dritte Projekt („Fadenpedel60b.prj“) zeigt die Bewegung des Fadenpendels bei einer einmaligen Auslenkung von 60° aus der Ruhelage. Geschwindigkeit und Beschleunigung der Kugel wurden wieder durch dynamische Pfeile verdeutlicht (vergleiche Abbildung 38a bis 38d).

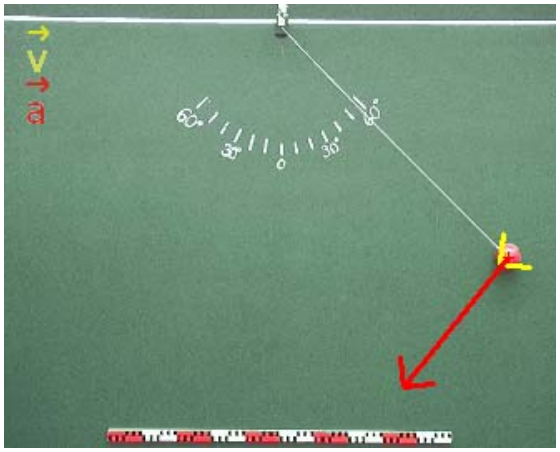


Abbildung 38a: Geschwindigkeit und Beschleunigung bei 60° Auslenkung

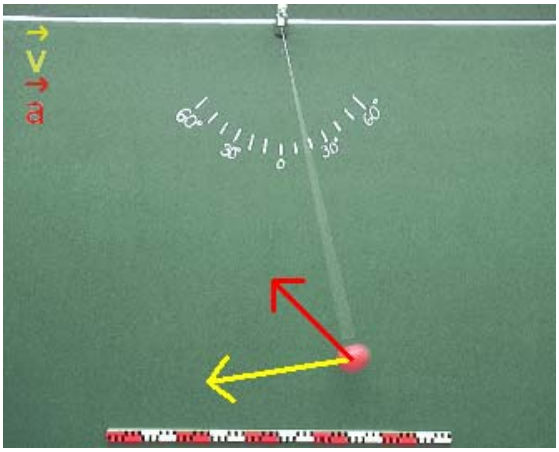


Abbildung 38b: Geschwindigkeit und Beschleunigung kurz vor dem Ruhepunkt

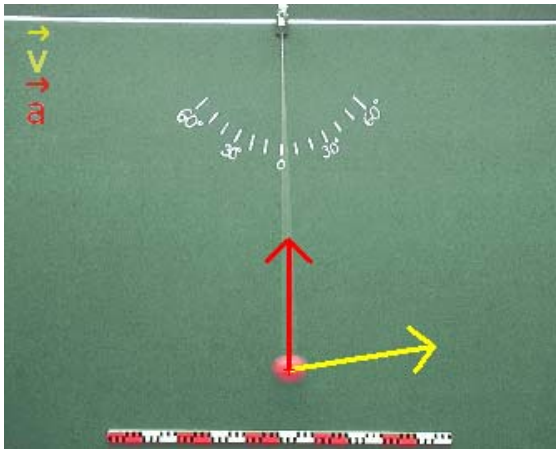


Abbildung 38c: Geschwindigkeit und Beschleunigung am Ruhepunkt

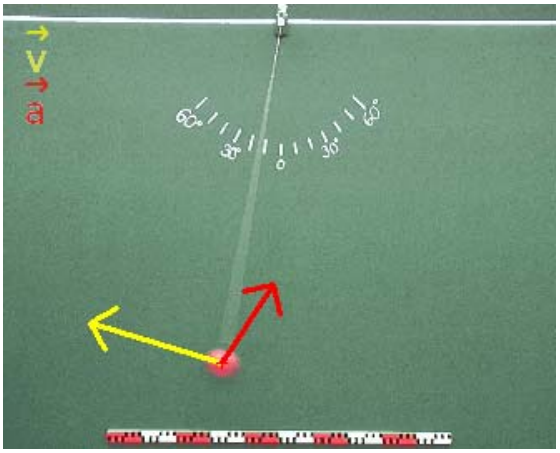


Abbildung 38d: Geschwindigkeit und Beschleu- kurz nach dem Ruhepunkt

Bogenlänge und Beschleunigung des Pendelkörpers wurden wie in Kapitel 2.3. beschrieben in zusätzlichen Tabellenspalten berechnet und als Graphen aufgezeichnet. Während die Bogenlänge s nur leicht von der Cosinuskurve abweicht (vergleiche Abbildung 39), folgt der Betrag a der Beschleunigung $\vec{a}$ keiner gleichförmigen Kurve mehr (vergleiche Abbildung 40). Beide Größen nehmen während des Versuchsablaufs zudem deutlich ab, was am Energieverlust durch Luftwiderstand und kleinste Bewegungen am Aufhängepunkt zustande kommen. Bei diesem Versuch ist die Videoanalyse sehr wichtig, da sich der Verlauf der Beschleunigung nicht leicht erklären lässt. Der Graph des Betrags der Beschleunigung alleine gibt keine Aussage über ihren Verlauf und die Zusammensetzung aus Tangential- und Radialbeschleunigung. Erst in Kombination mit dem ablaufenden Video sieht man, dass der Betrag der Be-

schleunigung immer in der Nähe des Ruhepunktes minimal ist und maximal, wenn sich das Fadenpendel am rechten beziehungsweise linken Wendepunkt befindet.

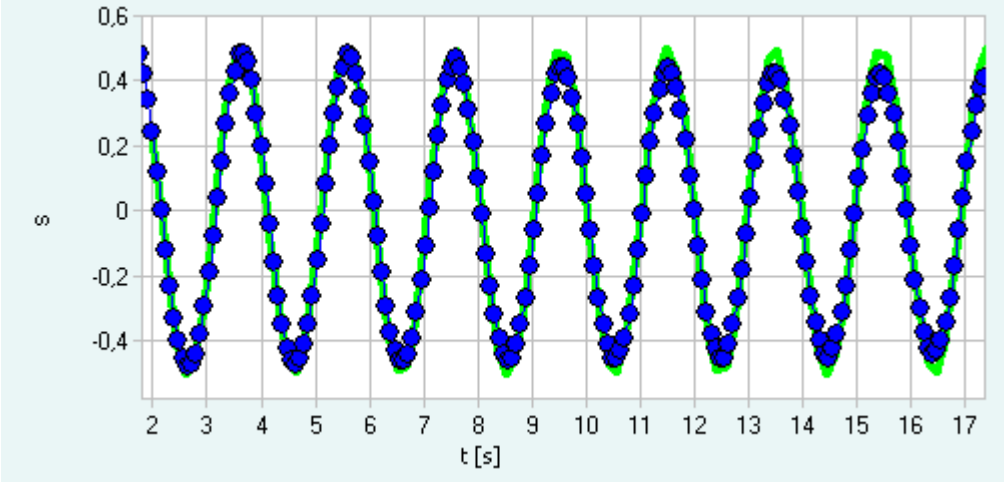


Abbildung 39: Bogenlänge (blaue Kurve) des Pendels bei einer Auslenkung von 60° (s in m) mit eingeblendeter Cosinusfunktion (grüne Kurve)

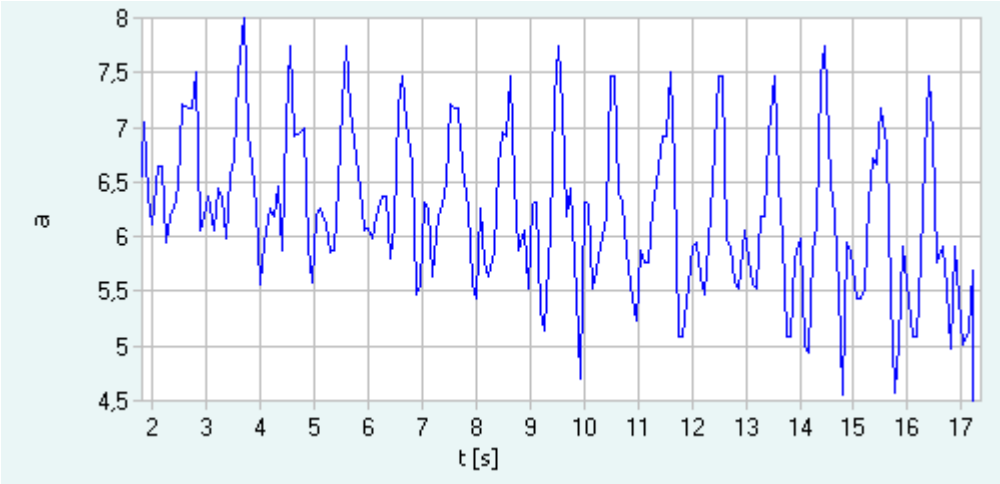


Abbildung 40: Zeitlicher Verlauf der Betrag der Beschleunigung eines Pendels bei 60° Auslenkung in m/s

Abbildung 40 sagt jedoch nichts über die Tangential- und Radialbeschleunigung des Pendels aus. Erst bei der Betrachtung des analysierten Videos kann man erahnen, wie sich die Beschleunigung an den einzelnen Punkten zusammensetzt. An den Wendepunkten und dem Ruhepunkt kann sogar eine exakte Aussage darüber gemacht werden. Wie bereits in Kapitel 2.3. erwähnt ist die Radialbeschleunigung am Ruhepunkt maximal und am Wendepunkt Null. Bei der Tangentialbeschleunigung verhält es sich genau umgekehrt. Sie ist am Wendepunkt des Pendels maximal und im Ruhepunkt besitzt sie ihr Minimum. Wie bei der Bewegung des Pendels bei 30° Auslenkung, besitzt das Fadenpendel hier an den Wendepunkten seine maximale wirkende Beschleunigung, aber am Ruhepunkt ergibt sich ein lokales Maximum. Dieses lokale Maximum ist kein Messfehler, sondern ergibt sich aus der gemeinsamen Wirkung der radialen und tangentialen Beschleunigung. Um dies noch besser verdeutlichen zu können wurde eine Simulation der Bewegung in PAKMA (Heuer, 1996b, S.6) erstellt und die dazugehörigen Graphen ausgegeben. Man erkennt deutlich den Zusammenhang zwischen dem

Betrag der Beschleunigung und dem Verlauf der Tangential- und Radialbeschleunigung (vergleiche Abbildung 41). Zudem erkennt man, dass die Radialbeschleunigung immer positiv ist und die doppelte Frequenz der Tangentialbeschleunigung besitzt.

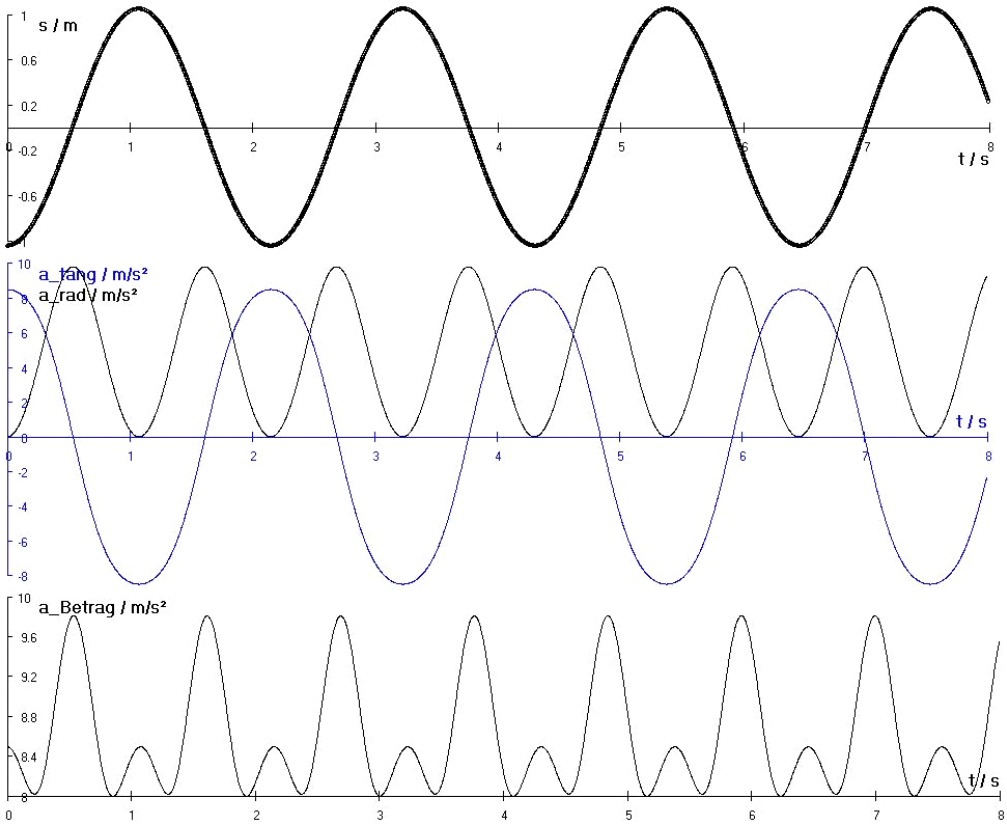


Abbildung 41: Zeitlicher Verlauf der Beschleunigungen und der Bogenlänge eines Pendels bei 60° Auslenkung in einer PAKMA-Simulation, erstelle von Thomas Wilhelm.

Da das Fadenpendel für die Schüler sehr schwer zu verstehen und zudem manchen Lehrbüchern falsch erklärt ist, bietet es sich an dieses Thema mittels analysierter Videos zu erklären und zu veranschaulichen. Dabei ist es besonders wichtig, dass die Bewegung sehr langsam ist und sich die besprochenen Graphen zeitgleich mit der Bewegung aufbauen, damit die Schüler jeden Teilschritt der Bewegung genau betrachten und verstehen können.

3. Der Luftkissentisch

In diesem Kapitel werden zweidimensionale Bewegungen auf dem Luftkissentisch durchgeführt und analysiert. Bei der Betrachtung und eventuell späterer quantitativer Analyse der Videos muss beachtet werden, dass die verwendeten Luftkissentische nicht exakt plan waren. Die Oberfläche war zur Mitte hin leicht abfallend, was besonders bei langsamen Bewegungen zu Verfälschungen der Bahnen führt.

3.1. Kreisbewegung

3.1.1. Versuchsaufbau

Auf einem Holzkasten, durch dessen Löcher an der Oberseite Luft strömen kann, wurde ein Puck mittels einer Schnur der Länge l = 26,5 cm auf einer Kreisbahn bewegt (vergleiche Abbildung 41). Zunächst wurde der Radius dieses Kreises konstant (r = 26,5 cm) gehalten und die Bewegung des Pucks analysiert (vergleiche Projekt „Luftkissentisch- Kreis mit konstantem Radius.prj“). Später wurde durch die kontinuierliche Verkürzung des Radius („Luftkissentisch- Kreis mit kleiner werdendem Radius.prj“) der Puck auf einer spiralförmigen Bahn gebracht. Dafür wurde ein Gewicht von m = 800 g Gramm an das Ende der Schnur, die durch ein Loch in der Mitte des Tisches geführt ist, gehängt (vergleiche Abbildung 42).

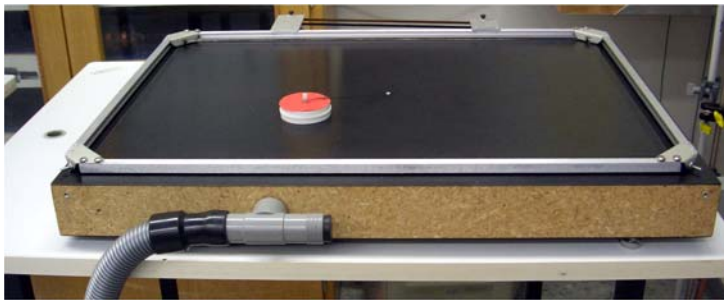


Abbildung 41: Versuchsaufbau des Luftkissentisches

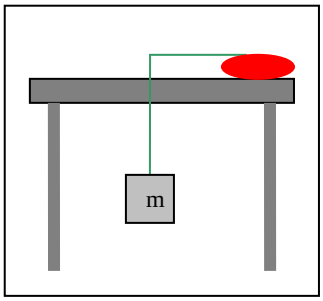


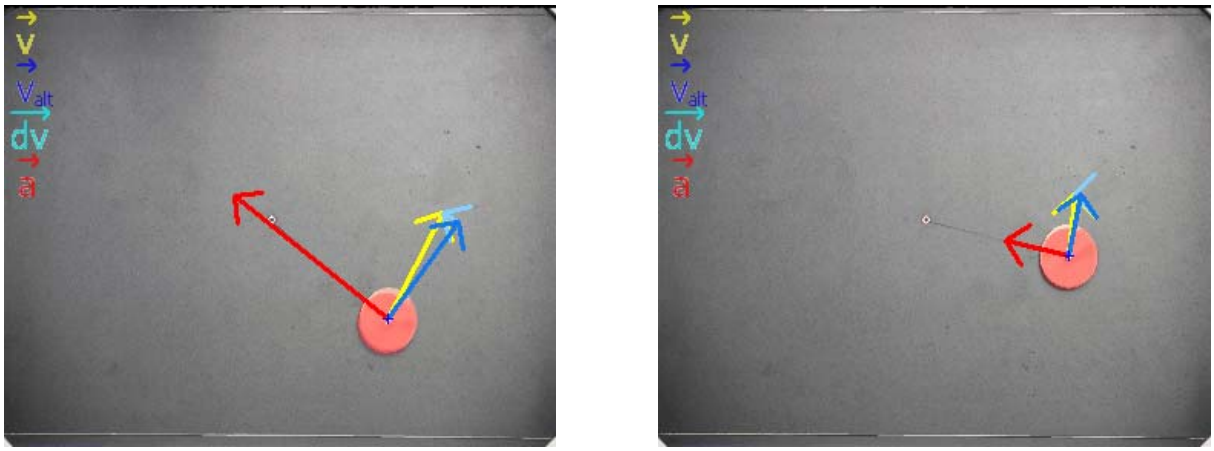
Abbildung 42: Schematische Seitenansicht des Tisches

Alle Aufnahmen wurden im Vollbildmodus aufgenommen und jeder zweite Frame bei der Beschneidung in „VirtualDub“ entfernt. Da die Bewegung sehr schnell ist, wurde bei der Analyse in „measure Dynamics“ der Suchradius, in dem das bewegte Objekt für die Analyse liegen muss, verdoppelt. Die Bewegung auf dem Luftkissentisch ist deutlich gleichförmiger als alle anderen in dieser Arbeit analysierten Bewegungen. Aus diesem Grund konnte für die Analyse der Beschleunigung auch eine Schrittweite von 1 (entspricht t = 0,08 Sekunden) verwendet werden.

3.1.2. Kreisbewegung mit konstantem Radius

Ebenso wie bei der Bewegung der Spielzeugeisenbahn (Eisenbahn- Kreis konstantes Tempo.prj) kann auch der Verlauf eines Pucks auf einer konstanten Kreisbahn für die Einführung und Herleitung der Beschleunigung verwendet werden. Für das nachfolgende Projekt wurde diese Bewegung analysiert und für den Unterricht aufbereitet. Die Bewegung ist gleichmäßi-

ger und „sauberer“ als die der Eisenbahn, da sich der Puck nahezu reibungsfrei und ohne äußere Einflüsse (wie unebene Schienen oder herausspringende Räder) bewegen kann. Dass trotzdem eine geringe Reibung wirkt, sieht man daran, dass er im Laufe der Zeit deutlich an Tempo verliert. Dieser Effekt ist in sofern für die Darstellung in der Schule wünschenswert, da Schüler sehen können, dass auch die Beschleunigung geringer wird, was wiederum bedeutet, dass die Zentripetalkraft mit kleiner werdendem Tempo abnimmt (vergleiche Abbildung 42a und 42b).



(a) **(b)**

Abbildung 42: Bewegung des Pucks bei konstantem Radius

3.1.3. Kreisbewegung mit abnehmendem Radius

Variiert man den Radius der Kreisbahn, indem man eine kontinuierliche Kraft von circa 7,8 Newton an dem Faden erzeugt, so läuft der Puck auf einer Spirale Richtung Zentrum (vergleiche Projekt „Luftkissentisch- Kreis mit kleiner werdendem Radius.prj“). Durch die vektorielle Darstellung der Geschwindigkeit und Beschleunigung sieht man deutlich, dass die Beschleunigung in Richtung des Mittelpunkts zeigt und ihr Betrag nach Einsetzten der Zugkraft langsam abnimmt. Auch der Betrag der Geschwindigkeit nimmt im Laufe des Experiments ab, da Reibungskräfte auf den Puck wirken. Zum einen greift die Gleitreibungskraft am Puck entgegen der Richtung der Geschwindigkeit an und ist in ihrem Betrag konstant. Die zweite Reibungskraft wirkt am Loch und teilt sich in eine Komponente in Fadenrichtung und eine Komponente senkrecht dazu auf.

Der spiralförmige Verlauf des Pucks kann entweder durch ein Stroboskopbild (vergleiche Abbildung 43) oder durch die Darstellung des Ortes (Abbildung 44) sichtbar gemacht werden.

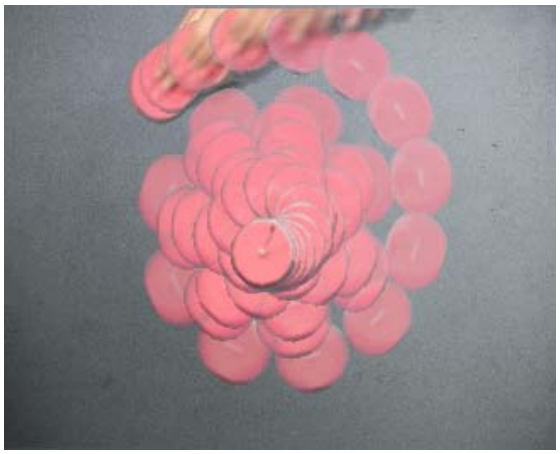


Abbildung 43: Stroboskopbild der spiralförmigen Bewegung eines Pucks

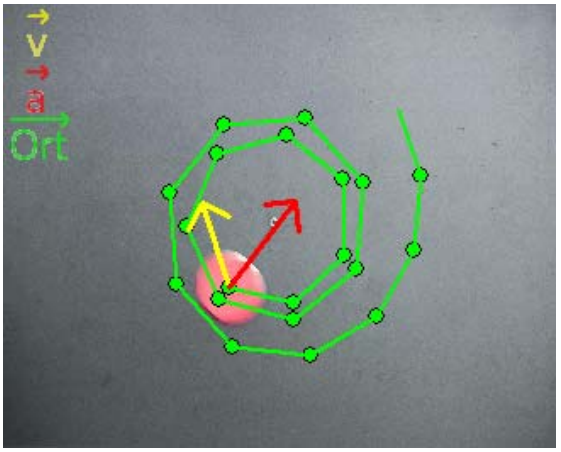


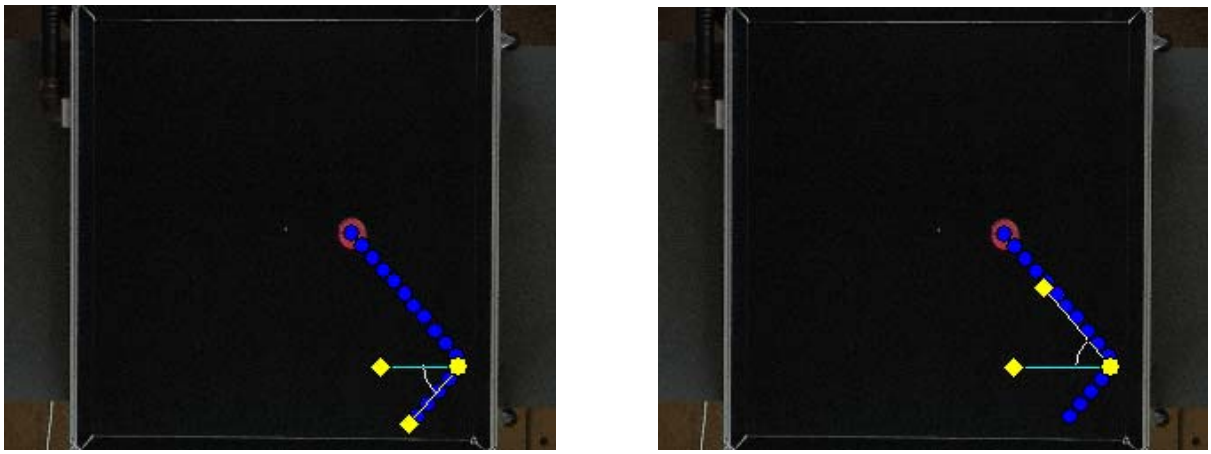
Abbildung 44: Darstellung der spiralförmigen Bewegung durch Stempelung des Orts (grüne Punkte)

3.2. Reflexionsgesetz

Auf einem Holzkasten, durch dessen Löcher an der Oberseite Luft strömen kann, wurde ein Puck in Bewegung gesetzt. Am Rand des Holzkastens ist ein Metallrahmen befestigt, an dessen Innenseite dünne Metalldrähte gespannt sind, die eine möglichst verlustfreie Reflexion gewährleisten sollen (vergleiche Abbildung 41). Der Puck wurde so angestoßen, dass möglichst oft an den Drähten reflektiert wird.

Alle Aufnahmen wurden im Vollbildmodus aufgenommen und jeder zweite Frame bei der Beschneidung in „VirtualDub“ entfernt. Die Bewegung auf dem Luftkissentisch ist deutlich gleichförmiger als alle anderen in dieser Arbeit analysierten Bewegungen. Aus diesem Grund konnte für die Analyse der Beschleunigung auch eine Schrittweite von 1 (entspricht t = 0,08 Sekunden) verwendet werden.

Das Projekt „Reflexionsgesetz.prj“ zeigt einen Puck auf dem Luftkissentisch, den Metalldrähten des Rahmens reflektiert wird. Durch die Funktion des Winkelmessens bei „measure Dynamics“ kann der Lehrer den Schülern das Reflexionsgesetzt „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“ verdeutlichen. Die in Abbildung 45a und 45b gemessenen Winkel betragen in etwa 49°. Um den Bewegung des Pucks besser nachzuvollziehen wurde die Darstellung des Orts mit einer Spurlänge von 16 gewählt. Dadurch können die Schüler Ein- und Ausfall des Pucks leichter verfolgen.



(a) (b)

Abbildung 45: Ein- und Ausfallswinkel des Pucks (ca. 49°)

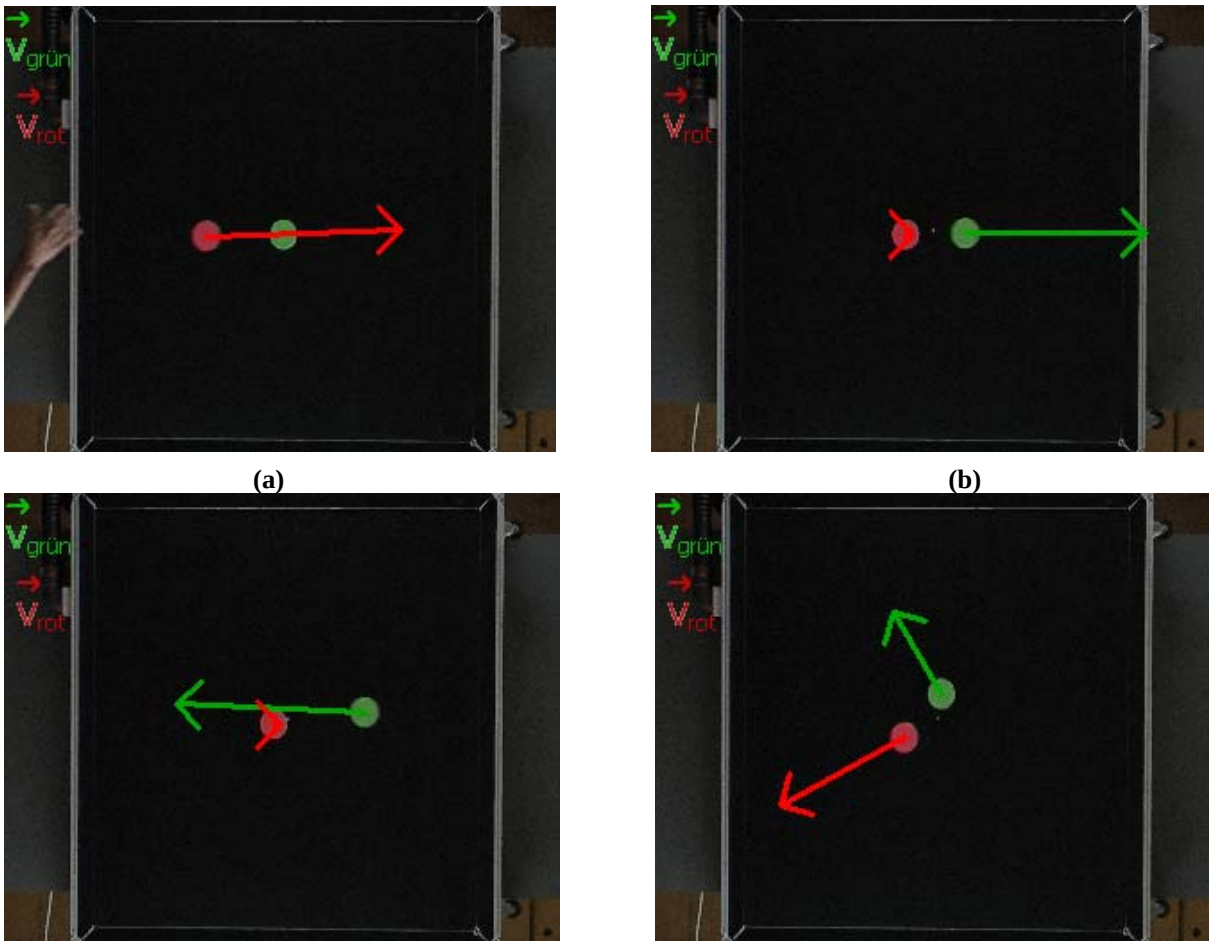
Das Reflexionsgesetz wird hier nur qualitativ dargestellt. Es kann jedoch nachträglich in „measure Dynamics“ quantitativ mittels der Winkelmessung ausgewertet werden. Das exportierte Video zeigt nur den Verlauf des Pucks und blendet nicht die Funktion des Winkelmessers, wie in Abbildung 45a und 45b gezeigt ist, ein, da diese Option in der derzeitigen Version von „measure Dynamics“ nicht vorhanden ist.

3.3. Stoß zweier Pucks

Auf dem Luftkissentisch wurden zwei Pucks so aufeinander zu bewegt, dass sie sich trafen. Die nachfolgenden zwei Projekte unterscheiden sich darin in ihrem Aufbau folgender maßen: Bei Projekt „gleiche Massen-Ruhe.prj“ wird ein Pucks auf einen gleich großen ruhenden Puck geschossen. Bei Projekt „1-1,77-Ruhe.prj“ wird ein kleiner Puck auf einen größeren ruhenden Puck geschossen. Das Masseverhältnis der beiden Pucks beträgt dabei 1 : 1,77.
Die Aufnahmen wurden erneut im Vollbildmodus gemacht und jeder zweite Frame bei „VirtualDub“ entfernt. Die Messwerte für alle Größen wurden mit einer Schrittweite von 1 (entspricht 0,08s) erstellt.

3.3.1. Stoß zweier gleicher Massen

Projekt „gleiche Massen-Ruhe.prj“ zeigt den Zusammenstoß zweier gleich großer Massen. Eine der beiden Pucks ist vor dem Zusammenstoß in Ruhe und wird durch den anderen in Bewegung gesetzt. Die Geschwindigkeit der Körper wird durch dynamische Pfeile visualisiert und der Betrag der Geschwindigkeiten in einem Diagramm aufgetragen. Nach dem ersten Zusammenstoß bleibt der rote Puck fast in Ruhe, während der grüne Puck sich nun mit annähernd der Anfangsgeschwindigkeit des roten Pucks fortbewegt (vergleiche Abbildung 46a und 46b). Nach der Reflexion des grünen Pucks an der Bande trifft er den roten Puck nicht ganz zentral und beide Körper bewegen sich nun von einander weg. Die Summe des Betrags der Geschwindigkeiten ergibt nicht ganz den Betrag der Anfangsgeschwindigkeit des roten Pucks, da durch Reibung und Stöße Energie verloren gegangen ist (vergleiche Abbildung 47).



(a) (b) (c) (d)

Abbildung 46: Geschwindigkeiten der Pucks vor und nach dem Zusammenstößen bei gleich großen Massen

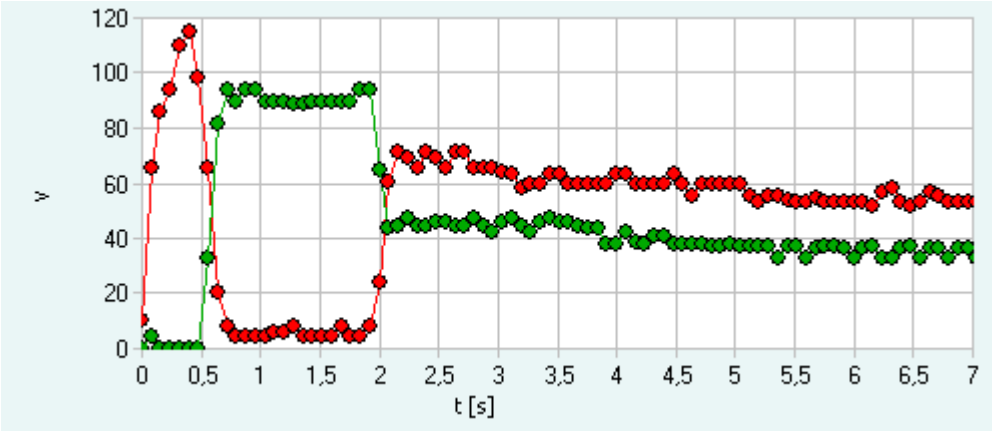


Abbildung 47: Zeitlicher Verlauf des Betrags der Geschwindigkeit v des roten und grünen Puck in cm/s

3.3.2. Stoß zweier ungleicher Massen

Das Projekt „1-1,77-Ruhe.prj“ zeigt zwei unterschiedlich große Pucks mit einem Masseverhältnis von 1 : 1,77. Der schwerere (weiße) Puck ist zu Beginn des Versuchs in Ruhe und wird erst durch den Zusammenstoß mit dem kleineren (roten) Puck in Bewegung versetzt. Die Geschwindigkeit der Körper wird durch dynamische Pfeile repräsentiert. Man erkennt gut, dass der Betrag der Geschwindigkeit des kleinen Pucks vor dem Aufprall deutlich größer ist als nach dem Zusammenstoß.

(a) **(b)**

Abbildung 48: Geschwindigkeiten der Pucks vor und nach dem Zusammenprall bei einem Masseverhältnis von 1 : 1,77

Bei der genauen Betrachtung der Messwerte zeigt sich sogar, dass der Betrag der Geschwindigkeit des kleinen Pucks vor dem Stoß 110 cm/s (entspricht 1,1 m/s) beträgt und sich nach dem Stoß auf beide Pucks verteilt hat. Der größere Puck bewegt sich dann mit einem Tempo von 70 cm/s (entspricht 0,7 m/s) und der kleinere mit einem von 40 cm/s (entspricht 0,4 m/s) weiter (vergleiche Abbildung 49).

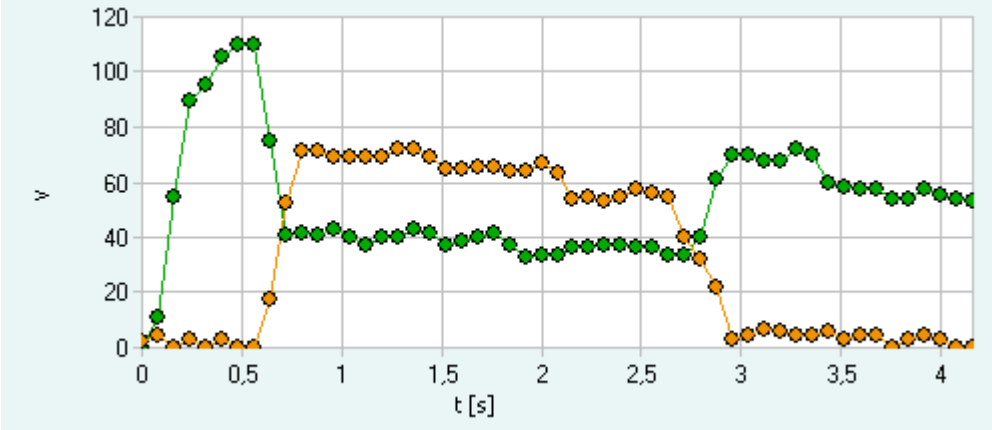


Abbildung 49: Zeitlicher Verlauf des Betrags der Geschwindigkeit v des großen (gelbe Kurve) und kleinen (grüne Kurve) Pucks in cm/s

4. Die Berg- und Talfahrt

Die letzte Projektreihe in dieser Arbeit beinhaltet die Analyse eines Wagens, der auf einer Schiene eine Berg- und Talfahrt absolviert. Es wurden zwei verschiedene Strecken aufgebaut und die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Wagens durch dynamische Vektoren dargestellt. Die dadurch entstandenen Projekte können im Unterricht im Rahmen der Betrachtung zweidimensionaler Bewegungen eingesetzt werden und bieten eine interessante Alternative oder Ergänzung zur Bewegung auf der schiefen Ebene. Zudem kann dieser Versuchsaufbau zur Darstellung der Umwandlung von potentieller in kinetische Energie und zurück verwendet werden. Dafür wurden jeweils drei Zeit-Diagramme mit E_{kin}, E_{pot} und E_{ges} erstellt und beschrieben.

4.1. Versuchsaufbau

Auf der Tafel wurde eine magnetische und beliebig formbare Schiene aufgebracht (Artikelnummer bei PHYWE: P1296400). Der äußere Rand dieser Bahn besitzt eine durchgehende Kante, die den Wagen während der Bewegung auf der Spur hält. Insgesamt wurden zwei verschiedene Bahnen realisiert und die Bewegung des Wagens jeweils analysiert (vergleiche Abbildung 48a und 48b).

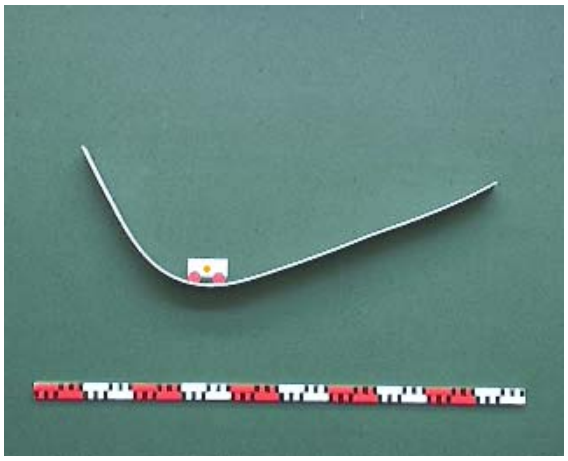


Abbildung 48a: Streckenaufbau des Projekts „Berg-undTalfahrt_Strecke1.prj“

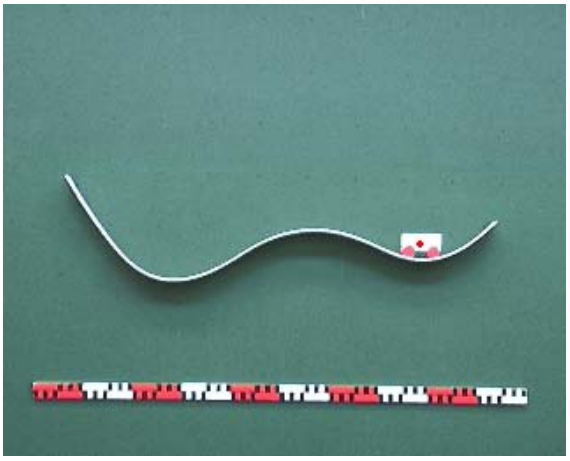


Abbildung 48b: Streckenaufbau des Projekts „Berg-undTalfahrt_Strecke2.prj“

Die Videos wurden im Vollbildmodus aufgenommen, jedes zweite Frame mit „VirtualDub“ entfernt und für die Analyse eine Schrittweite von 1 (entspricht t = 0,08 Sekunden) verwendet. Als Filter wurden die Geschwindigkeit, die Geschwindigkeitsänderung, die alte Geschwindigkeit und die Beschleunigung eingestellt. Im Projekt selbst sind jedoch nur die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Wagens sichtbar gemacht. Die anderen Filter können, wie bei fast allen anderen Projekten, optional eingeschaltet werden.

4.2. Streckenführung 1

Im Unterricht sollte zunächst mit den Schülern der Strecken Aufbau 1 besprochen werden, da hier deutlich der Zusammenhang zwischen Oberflächenform und Beschleunigung gesehen werden kann. Es zeigt sich hier, dass im niedrigsten Punkt der Bahn die Beschleunigung maximal ist und senkrecht nach oben zeigt (vergleiche Abbildung 49a). Zudem erkennt man, wie die Beschleunigung beim Bremsvorgang und beim Schnellerwerden wirkt (vergleiche Abbildung 49b und 49c).

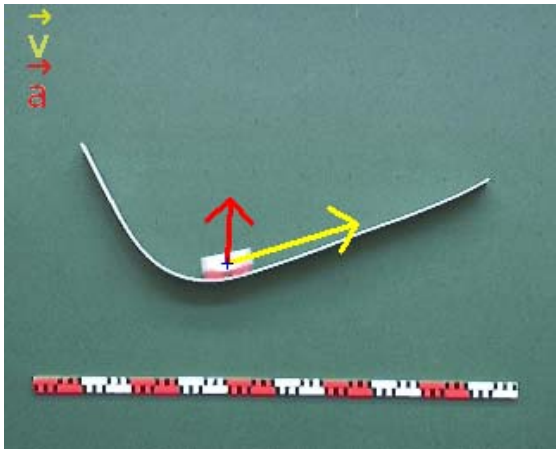


Abbildung 49a: Geschwindigkeit und Beschleunigung im tiefsten Punkt der Bahn

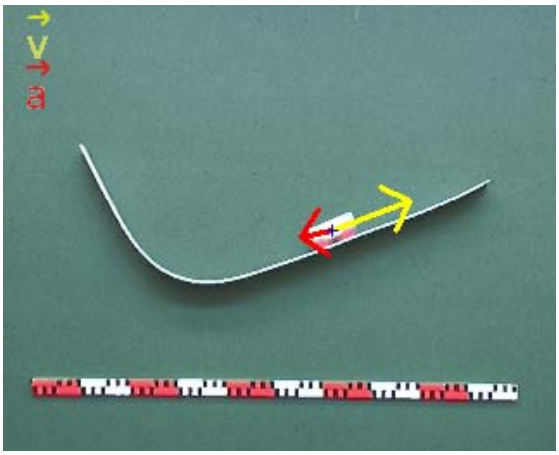


Abbildung 49b: Geschwindigkeit und Beschleunigung beim Bremsen

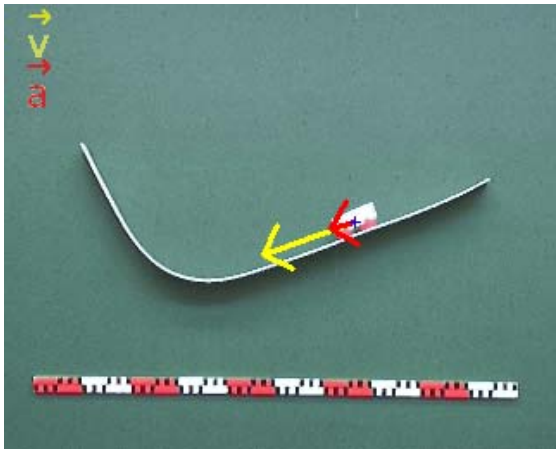


Abbildung 49c: Geschwindigkeit und Beschleunigung beim Schnellerwerden

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, kann man mit Hilfe der Berg- und Talfahrt des kleinen Modellwagens die Energien E_{kin}, E_{pot} und $E_{ges} = E_{kin} + E_{pot}$ verdeutlichen. Betrachtet man die Graphen der verschiedenen Energien im zeitlichen Verlauf ab Beginn der Bewegung des Wagens, so sieht man, dass sich die kinetische Energie in die potentielle Energie umwandelt und umgekehrt (vergleiche Abbildung 50a und 50b). Man sieht natürlich auch, dass es sich hierbei um kein abgeschlossenes System handelt und Energie durch die Reibung und den Luftwiderstand verloren geht. Daher ist die Gesamtenergie im Laufe des Versuchs nicht konstant, sondern nimmt deutlich ab (vergleiche Abbildung 50c).

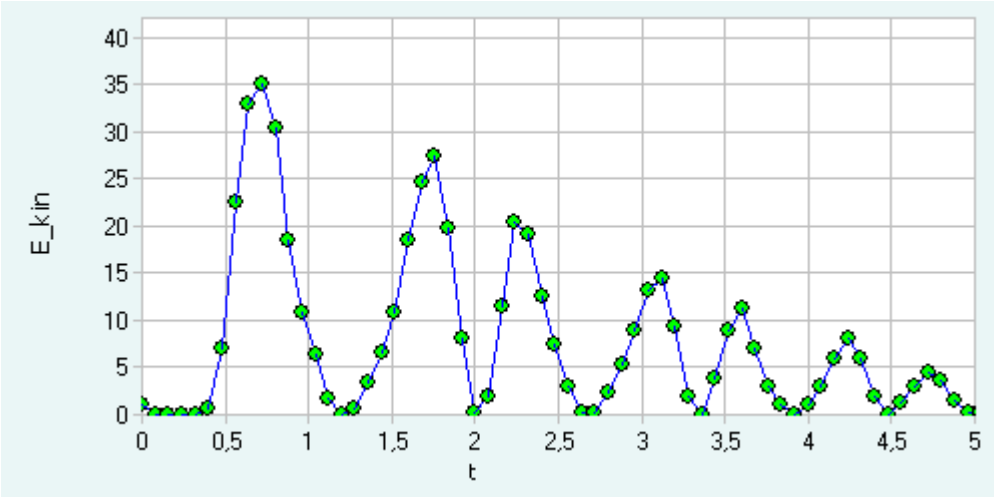


Abbildung 50a: Zeitlicher Verlauf der kinetischen Energie des Wagens bei Streckenführung 1

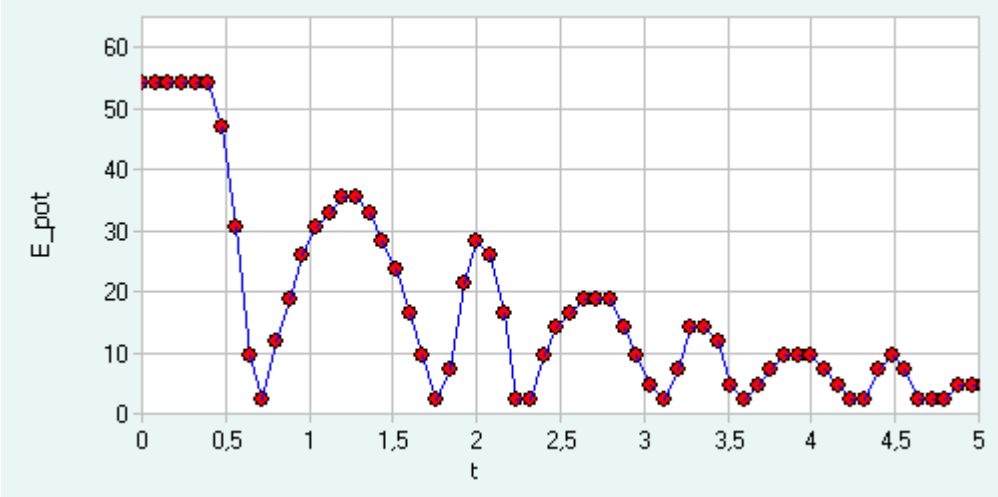


Abbildung 50b: Zeitlicher Verlauf der potentiellen Energie des Wagens bei Streckenführung 1

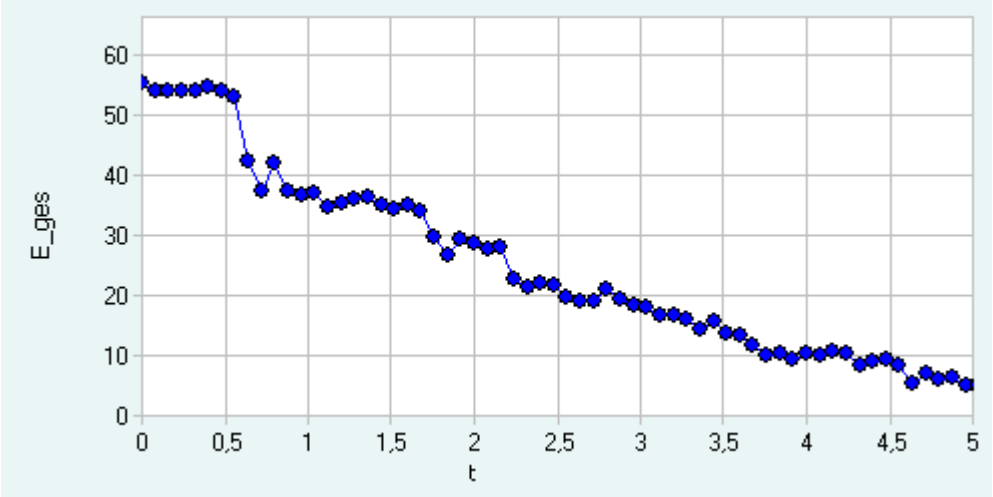
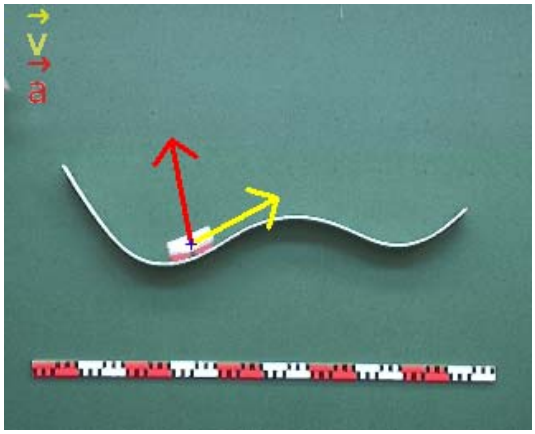


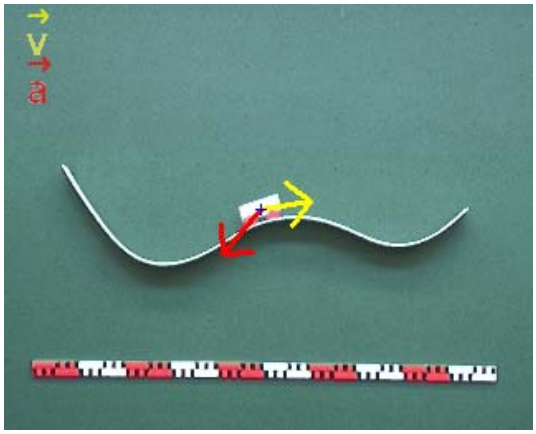
Abbildung 50c: Zeitlicher Verlauf der Gesamtenergie des Wagens bei Streckenführung 1

4.3. Streckenführung 2

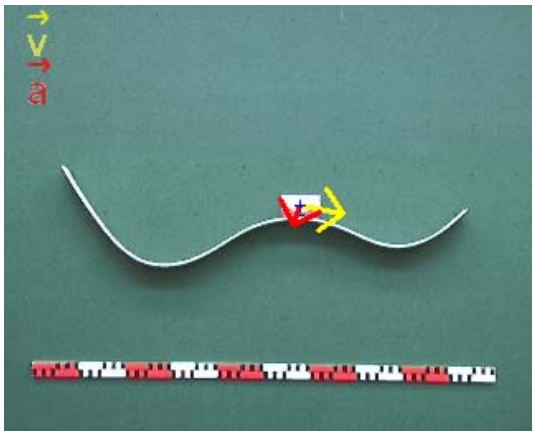
Haben die Schüler die in Kapitel 4.2. besprochenen Beziehungen verstanden, so kann die etwas kompliziertere Streckenführung 2 behandelt werden (vergleiche Abbildung 51a bis e). Die Schüler sehen wieder, dass die Beschleunigung an den Extrempunkten senkrecht zur Geschwindigkeit steht (vergleiche Abbildung 50a, 50c und 50e). Genauso erkennen sie wieder, dass die Beschleunigung einmal bremsend (wenn die Beschleunigung in entgegen gesetzte Richtung wie die Geschwindigkeit zeigt) (Abbildung 50b) und einmal schneller werdend (wenn Geschwindigkeit und Beschleunigung die gleiche Richtung besitzen) wirkt (vergleiche Abbildung 50d).



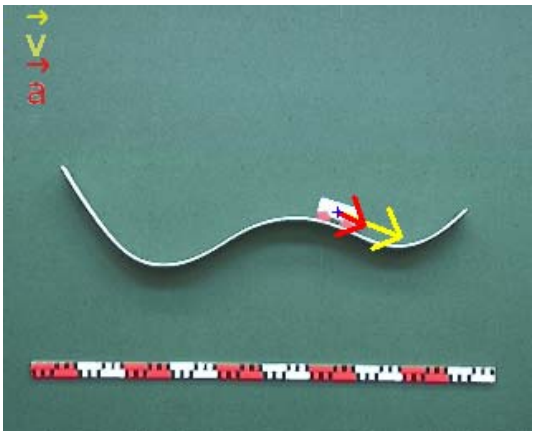
(a)



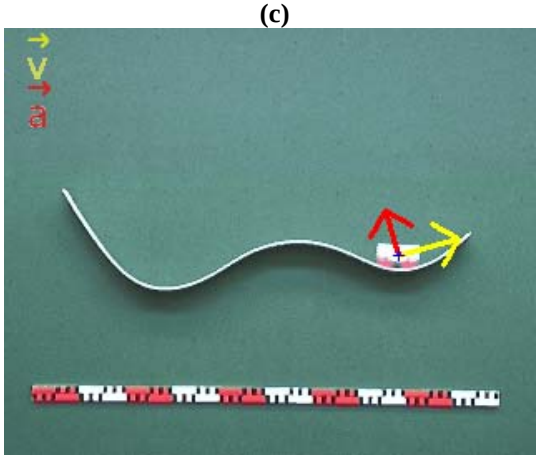
(b)



(c)



(d)



(e)

Abbildung 51: Geschwindigkeit und Beschleunigung im Projekt „Berg und Talfahrt_Strecke2.prj“

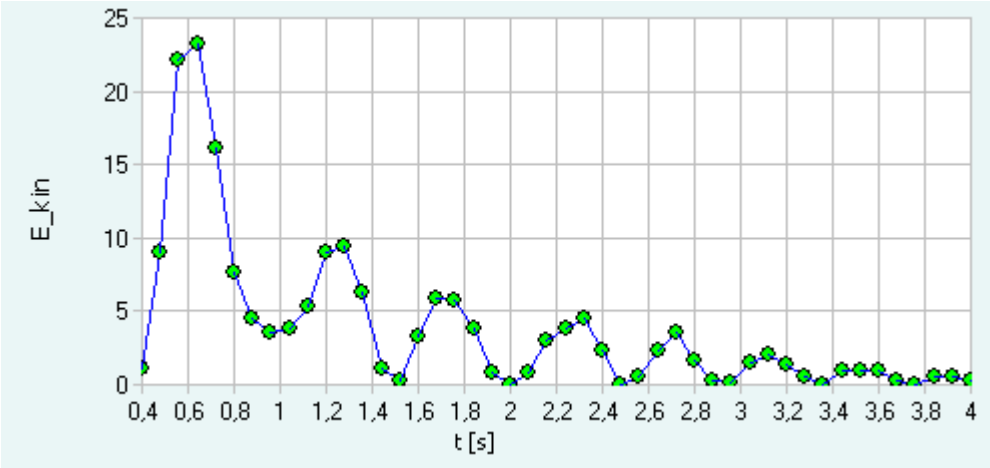


Abbildung 51a: Zeitlicher Verlauf der kinetischen Energie (in mJ) des Wagens bei Streckenführung 2

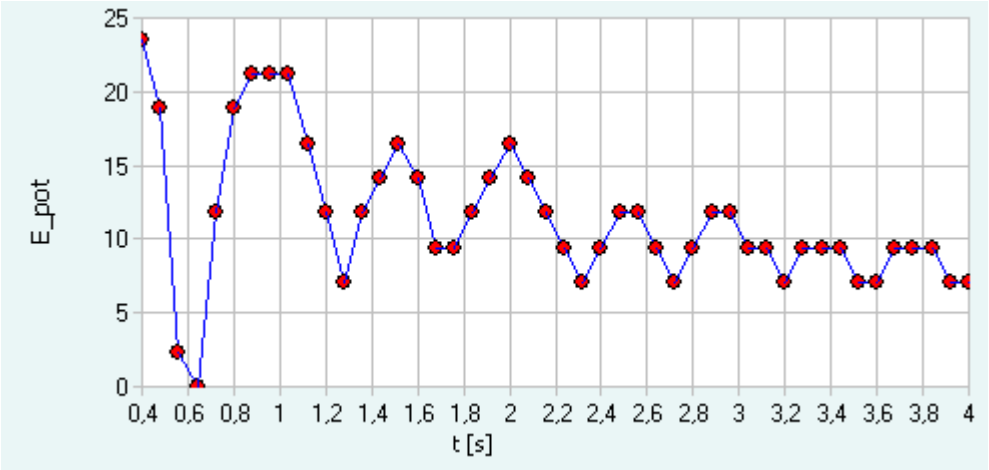


Abbildung 51b: Zeitlicher Verlauf der potentiellen Energie (in mJ) des Wagens bei Streckenführung 2

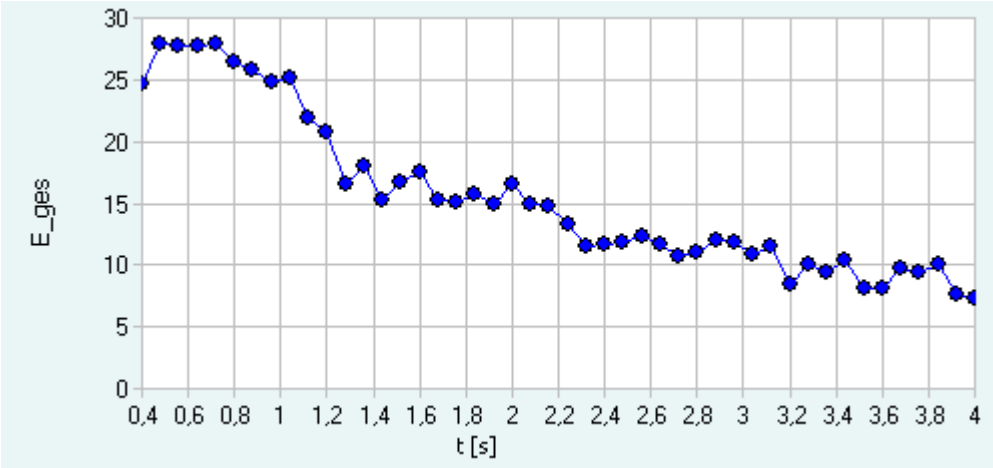


Abbildung 51c: Zeitlicher Verlauf der Gesamtenergie (in mJ) des Wagens bei Streckenführung 2

Auch bei dieser Streckenführung sehen die Schüler an den Energiediagrammen, dass die potentielle Energie in die kinetische Energie umgewandelt wird und umgekehrt. Zudem ist der Energieverlust des Wagens durch Reibung und Luftwiderstand zu erkennen. Dieser Energieverlust ist auch dafür verantwortlich, dass der Wagen nachdem er über den Sattelpunkt gefah-

ren ist nicht mehr aus dem zweiten Tal heraus fährt, sondern in diesem nach einiger Zeit zum Stillstand kommt (vergleiche Abbildungen 51a bis 51c).

5. Probleme bei der Erstellung und Analyse der Videos

Bei der Analyse in „measure Dynamics“ ergaben sich einige Schwierigkeiten, die bei der Erstellung der Videos bereits beachtet werden sollten. So wird bei der Analyse nur der Ort bestimmt und Geschwindigkeit und Beschleunigung des Objekts erst in weiteren Schritten durch die erste beziehungsweise zweite Ableitung berechnet. Das kann bei nicht regelmäßig bewegten Objekten dazu führen, dass vor allem die dargestellte Beschleunigung stark von der theoretisch zu erwartenden Abbildung abweicht und die Schüler den gewünschten Effekt nicht erkennen können. In diesem Fall ist es sinnvoll die Beschleunigung über einen größeren Zeitraum zu mitteln, damit eventuelle Fehler, die durch die Analyse des Ortes entstehen, nicht so stark zur Geltung kommen. Bei der Darstellung der Eisenbahn konnte so der Einfluss sehr unregelmäßiger, durch äußere Kräfte „verunreinigter“ Bewegungen kompensiert werden. Bei der derzeitigen Version von „measure Dynamics“ ergab sich dabei eine weitere–Schwierigkeit. Wenn die Analyse eines Objektes bei einer Schrittweite größer als 1 durchgeführt wird, kann die Geschwindigkeit nicht mehr als Vektor angezeigt werden. Dieser Fehler wird aber sicher in folgenden Versionen des Programms behoben sein.

Ein anderes Problem der Videoanalyse liegt in der Bearbeitung der Videos. Durch die Komprimierung der Filme sowohl in „VirtualDub“, als auch beim Exportieren aus „measure Dynamics“ nimmt die Qualität der Filme drastisch ab. Zudem können nur die Videos exportiert werden, so dass die Diagramme nicht mehr mit der Bewegung des Objekts gekoppelt sind. Der große Vorteil, dass sich das Diagramm entsprechend der Bewegung des Körpers entwickelt, geht dadurch verloren. Es ist daher sinnvoll die Videos, die in Kombination mit Diagrammen bearbeitet wurden als Projekte in „measure Dynamics“ zu öffnen und die exportierten Filme nur einzusetzen, wenn die Betonung auf der Pfeildarstellung liegt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass trotz dieser geringen Defizite „measure Dynamics“ für die Bearbeitung von Videos und die Analyse zweidimensionaler Bewegungen im Physikunterricht deutlich besser geeignet ist als die meisten anderen Videoanalyseprogramme. Es bietet zahlreiche Vorteile und erlaubt den Schülern sowohl bearbeitete Filme zu betrachten als auch eigene Projekte zu erstellen. Der Unterricht kann dadurch anschaulicher und alltagsnäher gestaltet und das Interesse der Schüler für die Physik geweckt werden.

Bei der Verwendung von Videos und Videoanalyseprogramme tritt leider ein generelles Problem auf: Es gibt zurzeit noch keine einheitlichen Standards bezüglich der Kodierung der Videos. Das führt dazu, dass sich die Videos, die mit der Kamera aufgenommen und auf den Computer gespielt wurden zunächst nicht in „measure Dynamics“ öffnen ließen. Bevor das Programm zu Analyse verwendet werden konnte musste ein geeigneter Codex herunter geladen und installiert werden, damit die Videos mit dem Programm kompatibel wurden. Hier liegt das wohl größte Problem der derzeitigen Videoanalyse, da sie so lange anwenderunfreundlich ist, solange keine einheitlichen Standards bestehen.

IV: ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSGEDANKE

Im Zuge der Modernisierung vieler Schulen in Deutschland hat der Computer in den letzten 10 Jahren die Schulgebäude erobert und ein eigener Computerraum oder mobile Rechner mit Beamern sind keine Seltenheit mehr. Dem Lehrer ermöglicht dieser Fortschritt seinen Lehrstoff neu und vielfältiger zu präsentieren und noch flexibler auf die verschiedenen Lerntypen der Schüler einzugehen. Die neuen Kodierungsmöglichkeiten erlauben ihm gezielt diejenige Darstellungsform für seinen Lehrstoff zu wählen, die den Inhalt am Besten vermittelt und den Erwerb eines geeigneten Schemas beziehungsweise Modells in den Köpfen der Schüler zu fördert. Aus lerntheoretischen Gesichtspunkten eignet sich für die Darstellung physikalischer Sachverhalte (vor allem im Bereich der Mechanik) die Videoanalyse. Sie besitzt gegenüber anderer Darstellungsformen den Vorteil, dass es sich hierbei um bewegte Bilder handelt, die in Kombination mit dynamisch ikonischer Repräsentationen Größen sichtbar machen können, die sonst für das Auge nicht fassbar wären. Dabei handelt es sich um Größen wie „Ort“, „Geschwindigkeit“, „Beschleunigung“ und „Kräfte“. Ihr vektorieller Charakter wird durch die Darstellung von bewegten Pfeilen betont und das Verständnis der Schüler bewusst in diese Richtung geschult. Dadurch können eventuelle Fehlvorstellungen vermieden oder korrigiert werden. Im ersten Teil dieser Arbeit werden die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu diesem Thema zusammengetragen. Ihnen zufolge ist das Lernen mit Multimedia und somit die Verwendung verschiedener Codesysteme die Grundlage eines erfolgreichen Lernprozesses, da die Aufmerksamkeit der Schüler gezielter gelenkt werden kann. Nach der Cognitive-load-Theorie von SWELLER (Sweller et al., 1998) kann zudem durch eine systematische Aufarbeitung des Lernstoffs (exraneous cognitive load) und eine Förderung der Schemabildung (germane cognitive load) die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses optimal ausgenutzt werden, ohne eine kognitive Überlastung zu verursachen. Dabei unterstützen kann die Darstellung von Größen durch dynamisch ikonische Repräsentationen und somit die Videoanalyse, da Pfeile eine deutlich geringere Belastung für das Gedächtnis darstellen als Graphen. Ein treffendes Beispiel dafür bietet die Darstellung des Fadenpendels im zweiten Teil dieser Arbeit. Die Graphen der Beschleunigungen sind erstens weniger aussagefähig als eine äquivalente Pfeildarstellung und zweitens sind Graphen deutlich schwerer zu verstehen, da man eine Vielzahl von Einzelinformationen (Skalierung, Verständnis des Betrags…) gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis präsent haben muss. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wurden im zweiten Teil dieser Arbeit zahlreiche Projekte erstellt und beschrieben, mit deren Hilfe der vektorielle Charakter der kinematischen Grundgrößen („Ort“, „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“) erarbeitet und betont werden kann.

Die Projekte sind so aufgebaut, dass mit ihrer Hilfe der gesamte Mechanikunterricht der Unterstufe und ein Teil des Mittel- beziehungsweise Oberstufeunterrichts durchgeführt werden könnte. Die Projekte sollen Originalversuche im Unterricht nicht ersetzen, sondern lediglich ergänzen.

Bei der Erstellung der Projekte wurde ausschließlich das Videoanalyseprogramm „measure Dynamics“ verwendet. Der Vorteil gegenüber anderen Videoanalyseprogrammen ist zum einen, dass die Analyse nach einmaligem markieren des Objekts automatisch abläuft, und zum anderen, dass die analysierten Filme exportiert werden können. Der Benutzer kann sie auf jedem beliebigen Rechner abspielen, ohne dass auf das Programm zurückgegriffen werden muss. Zudem bietet das Programm die Möglichkeit der Stroboskopdarstellung. Die Schüler können dadurch genau den Verlauf des analysierten Objekts verfolgen, ohne dass eine Schematisierung des Gegenstandes vorgenommen werden muss. Neben diesen Vorteilen zeigten sich auch einige Nachteile, die hoffentlich in Zukunft beseitigt werden und die Videoanalyse noch benutzerfreundlicher wird. Vor allem allgemein gültige Standards in der Kodierung der Videos wären dafür wünschenswert.

Der Fortschritt der Technik und die Verwendung von analysierten Videos als Unterrichtsmedium ermöglicht es Lehrer und Schülern die verschiedensten Bewegungen - so komplex sie auch sein mögen - aufzunehmen und zu analysieren. Dem Ruf der Physik, sie behandle nur Spezialfälle und sei kompliziert und unanschaulich, kann so erfolgreich begegnet werden. Zudem besteht die Hoffnung, dass viele Laborversuche bald geeigneten „Alltagversuche“ weichen könnten.

Durch den gezielten Einsatz geeigneter Videos kann das Interesse der Schüler an der Physik verstärkt und der Bezug zur Realität für den Lernenden hergestellt werden. Er nimmt dieses Fach wieder als das war, was es ist: eine Naturwissenschaft. Also etwas, was die Natur beschreibt und erklärt. Ein guter und zeitgemäßer Unterricht kann die schönste Gabe der Natur, die Freude am Schauen und Begreifen, wie EINSTEIN es nannte, wieder entfachen und vergrößern.

V: LITERATURVERZEICHNIS

ANDERSON, J.R. (1989): *Kognitive Psychologie. Eine Einführung*, 2. Auflage, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg

BAERISWYL, F. (1989): *Verarbeitungsprozesse und Behalten im Arbeitsgedächtnis*, 1. Auflage, Roland Asanger Verlag, Heidelberg

BALLSTAEDT, S.P. (1997): *Wissensvermittlung. Die Gestaltung von Lernmaterial*, 1.Auflage, Psychologie Verlags Union, Weinheim

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*, inaugural-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)

BROADBENT, D.E. (1958): *Perception and communication*. Pergamon Press. London

DUTKE, S. (1994): *Mentale Modelle: Konstrukte des Wissens und Verstehens, Kognitions -psychologische Grundlagen für die Software-Ergonomie*, Arbeit und Technik: Praxisorientierte Beiträge aus Psychologie und Informatik, Band IV, 1. Auflage, Verlag für Angewandte Psychologie, Göttingen, Stuttgart

EBBINGHAUS, H. (1988): *Über das Gedächtnis. Untersuchungen zur experimentelle Psychologie*, Duckner & Humbolt, Leipzig

GIRWIDZ, R. (2004): *Lerntheoretische Konzepte für Multimediaanwendungen zur Physik* – In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, PhyDid 1/3, S.9-19

GIRWIDZ, R.; RUBITZKO, T.; SPANNAGEL, C. (2004): *Animationen in multimedialen Lernumgebungen* – In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A. (Hrsg.): *Didaktik der Physik. Beiträge der Frühjahrstagung – Düsseldorf 2004*, Berlin

HEUER, D. (1993): *Computerunterstützes 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 (GDCP), Leuchtturm-Verlag, S.130-132

HEUER, D. (1996a): *Dynamische Repräsentationen. Verständnishilfe für Physikalische Experimente* – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik 45, Nr.4, S.12-18

HEUER, D. (1996b): *Konzepte für Software zum Physikverstehen* – In: Praxis der Naturwissenschaft – Physik 45, Nr.4, S.2-11

HEUER, D. (2003): *Physikunterricht, gestaltet mit Multimedia-Elementen* – In: Praxis der Naturwissenschaft Physik in der Schule 52, Nr.3, S.2-15

ISB (2007): *Bayerische Lehrpläne für das achtstufige Gymnasium*, Homepage des ISB (http://www.isb-gym8-lehrplan.de)

ISSING, L.J. (1983): *Bilder als didaktische Medien* – In: ISSING, L.J.; HANNEMANN, J. (Hrsg.): *Lernen mit Bildern*, Institut für Film und Bild in Wissenschaft und Unterricht Grünewald, S.9-39

ISSING, L.J. (1994): *Wissenserwerb mit bildlichen Analogien* – In: WEIDEMANN, B. (Hrsg.): *Wissenserwerb mit Bildern. Instruktionale Bilder in Printmedien, Film/Video und Computer*, Verlag Hans Huber, Bern, S.149-176

JOHNSON-LAIRD, P.N. (1980): *Mental Models in Cognitive Science* – In: Cognitive Science, 4, Erlbaum, Mahwah (New Jersey), S. 71-115

JUNG, W. (1980): *Mechanik für die Sekundarstufe I*, Verlag Moritz Diesterweg, Frankfurt, Berlin, München

KAHNEMANN, D. (1973): *Attention and effort.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs (New Jersey)

KIRCHER, E. (1995): *Studien zur Physikdidaktik. Erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Grundlagen*, IPN, Kiel

KIRCHER, E.; GIRWIDZ, R.; HÄUßLER, P. (2000): *Physikdidaktik. Eine Einführung in Theorie und Praxis*, Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden

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

LISS, E. (2000): http://home.arcor.de/eberhard.liss/zitate/lebensregeln.htm

LUKESCH, H. (2001): *Psychologie des Lernens und Lehrens*, 1. Auflage, Roderer Verlag, Regensburg

MANDL, H.; SPADA, H. (Hrsg.) (1988): *Wissenspsychologie*, 1. Auflage, Psychologie Verlags Union, München, Weinheim

MAYER, R.E. (2001): *Multimedia Learning*, 1. Auflage, Cambridge University Press, Cambridge

MAYER, R.E.; MORENO, R. (2002): *Animation as an Aid to Multimedia Learning* – In: Educational Psychology Review, Vol.14, No.1, S.87-99

MEYER, H. (2007): *Was ist guter Unterricht?* 4. Auflage, Cornelsen Verlag, Berlin

RYLE, G. (1949): *The concept of mind*, Hutchinson, London

RUBITZKO, T. (2006): *Aktives Lernen mit multiplen Repräsentationen – Zur Vermittlung komplexer physikalischer Inhalte mit Texten, Bildern, Animationen und Simulationen*, Dissertation, Pädagogische Hochschule Ludwigsburg

SCHECKER, H. (1985): *Das Schülervorverständnis zur Mechanik, Eine Untersuchung in der Sekundarstufe II unter Einbeziehung historischer und wissenschaftlicher Aspekte*, Dissertation, Universität Bremen

SCHNOTZ, W. (1994): *Wissenserwerb mit logischen Bildern* – In: WEIDEMANN, B. (Hrsg.): *Wissenserwerb mit Bildern. Instruktionale Bilder in Printmedien, Film/Video und Computer*, Verlag Hans Huber, Bern, S.59-94

SCHNOTZ, W. (2004): *TELEMAP – Informationssystem zum Lehren und Lernen mit neuen Medien*, Arbeitsstelle Multimedia der Universität Koblenz-Landau, Landau (http://www.uni-landau.de/lima/Telemap2004/gestaltung_didaktisch_repraesentation_multiple.htm)

SCHNOTZ, W.; BANNERT, M. (1999): *Einflüsse der Visualisierungsform auf die Konstruktion mentaler Modelle beim Text und Bildverstehen* - In: Zeitschrift für Experimentelle Psychologie, Vol.46, Nr.4, Hogrefe & Huber, S. 317-236

SCHÜLLER, F. (2007): *Ein Unterrichtskonzept zur Mechanik in Jahrgangsstufe 7 – zweidimensional und multimedial*, Schriftliche Hausarbeit für die erste Staatsprüfung für das Lehramt Gymnasium, Universität Würzburg, unveröffentlicht

SCHWARZE , H. (2003): *Elektrische Schaltungen in der Simulation – Das Programm Crocodile Physics als methodische Alternative* – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 52, Nr.7, S.19-26

SINZ, R (1979): *Neurobiologie und Gedächtnis: Neuronennetzwerke und Infospeicherung im menschlichen Gehirn.* Verlag Volk und Gesundheit, Berlin

SPIRO, R.J.; COULSON, R.L.; FELTOVICH, P.J.; ANDERSON, D.K. (1988): *Cognitive flexibility theory: Advanced knowledge acquisition in ill-structured domains* – In: PATEL, V. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th annual conference of the cognitive Science Society*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, S.375-383

SULEDER, M.; HEUER, D. (2004): *Neue Medien als Werkzeug* – In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A. (Hrsg.): *Didaktik der Physik. Beiträge der Frühjahrstagung – Düsseldorf 2004*, Berlin

SULEDER, M.; WILHELM, T.; HEUER, D. (2004): *Neue Möglichkeiten durch Kombination von Videoanalyse und Modellbildung* – In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A. (Hrsg.): *Didaktik der Physik. Beiträge der Frühjahrstagung – Düsseldorf 2004*, Berlin

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

TREIZ, N. (2000): *cliXX Physik in bewegten Bildern*, Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt am Main

WEIDEMANN, B. (1991): *Lernen mit Bildmedien. Psychologische und didaktische Grundlagen*, 1. Auflage, Beltz Verlag, Weinheim, Basel

WEIDEMANN, B. (1994): *Informierende Bilder* – In: WEIDEMANN, B. (Hrsg.): *Wissenserwerb mit Bildern. Instruktionale Bilder in Printmedien, Film/Video und Computer*, Verlag Hans Huber, Bern, S.9-58

WEIDEMANN, B. (2002): *Multicodierung und Mulimodalität im Lernprozess* – In: ISSING, L.J.; KLIMSA, P. (Hrsg.): *Information und Lernen mit Multimedia und Internet. Lehrbuch für Studium und Praxis*, 3. Auflage, Verlagsgruppe Beltz, Psychologische Verlags Union, Weinheim

WIESNER, H. (1994): *Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Mechanik. Schülervorstellungen, Lernschwierigkeiten und fachdidaktische Forschungen* – In: Physik in der Schule 32, Nr.4, S.164-169

WILHELM, T. (2005): *Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung* – In: NIEDDERER, H.; FISCHLER, H.; SUMFLETH, E. (Hrsg.): *Studien zum Physik- und Chemielernen*, Band 46, Logos Verlag, Berlin

WILHELM, T. (2007): *Vektorverständnis und vektorielles Kinematikverständnis von Studienanfängern* – In: Didaktik der Physik, Frühjahrstagung Regensburg 2007, Regensburg

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

WODZINSKI, R. (1996): *Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen mit Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht*, Lit Verlag, Münster

VI: ANHANG

Dieser Arbeit angehängt sind alle bearbeiteten Videos der in Teil 2 dieser Arbeit besprochenen Projekte. Die Projekte sind gemäß ihres Versuchsaufbaus in vier Hauptordner unterteilt: Berg- und Talfahrt, Eisenbahn, Fadenpendel und Luftkissentisch. Die einzelnen Hauptordner sind in Unterordner gegliedert, die gegebenenfalls wieder in Unterordner unterteilt sind. Die exportierten Videos der Projekte sind in dem „exportierte Projekte“ gespeichert und auch gemäß ihrem Versuchsaufbau in Ordner unterteilt. Sie tragen den Namen des Projektes und zusätzlich den Vermerk „_exp“ am Ende des Namens. Die Gliederung der angehängten CD sieht folgender maßen aus:

- eigene Projekte
  - Berg- und Talfahrt
    - Strecke 1
    - Strecke 2
  - Eisenbahn
    - Kreis
      - Herleitung der Geschwindigkeit
      - Konstantes Tempo
      - Offener Kreis
      - Schneller werden
    - Oval
      - Anfahren bis stehen bleiben
      - Hin und Her
      - Konstantes Tempo
    - Schlangenlinien
    - Strecke
      - Hin und Her
      - Über Schiene Hinaus
  - Fadenpendel
    - 10°
    - 30°
    - 60°
  - Luftkissentisch
    - Radius konstant
    - Radius variabel
    - Reflexion
    - Stoß
      - Stoß zweier gleicher Massen
      - Stoß zweier ungleicher Massen

- Exportierte Videos
  - Berg- und Talfahrt
  - Eisenbahn
  - Fadenpendel
  - Luftkissentisch

VII: DANKSAGUNG

Bedanken möchte ich mich bei allen, die tatkräftig durch ihre Unterstützung dazu beigetragen haben, diese Hausarbeit in dieser Form durchzuführen.
Zum einen gilt mein Dank der Firma PHYWE und Dipl. Phys. Markus Grumann im Speziellen, die mir nicht nur das Programm „measure Dynamics“ zur Verfügung gestellt haben, sondern dem Lehrstuhl auch schnell und unbürokratisch alle Versuchsaufbauten, die benötigt und angefordert wurden, zukommen haben lassen.
Des weiteren Danke ich Dipl. Phys. Michael Suleder, dem Programmierer und Erschaffer von „measure Dynamics“, der auf Fragen bezüglich des Programms gerne und schnell reagiert hat. Er erweiterte das Programm zudem um verschiedene Features, die ich speziell in meiner Arbeit benötigte.
Ganz herzlich bedanke ich mich bei allen Helfern, die mir bei der Erstellung der Videos geholfen und geduldig eine Einstellung nach der anderen aufgenommen haben. Besonders möchte ich hier Martin Jung und Michael Benz danken, die immer zur Stelle waren, wenn ich Hilfe brauchte.
Danke möchte ich zudem Daniel Wilhelm sagen, der mir seine Spielzeugeisenbahn für die Realisierung mancher Videos zur Verfügung gestellt hat und so lange Zeit auf sie verzichten musste.
Ein besonderer Dank gilt dem Betreuer dieser Arbeit AR Dr. Thomas Wilhelm. Seine tatkräftige Unterstützung bei der Umsetzung meiner Ideen ging weit über das selbstverständliche Maß hinaus. So stand er mir immer mit Rat und Tat bei den verschiedensten Fragen und Problemen zur Seite und ermöglichte mir so, meine Vorstellungen zu strukturieren und umzusetzen.
Vielen Dank!

VIII: SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich,

Christine Michel, Matrikel-Nummer: **1397400**

dass ich diese Hausarbeit für die Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium mit dem Thema:

Videoanalyse zweidimensionaler Bewegungen mit dynamisch ikonischen Repräsentationen im Physikunterricht

selbstständig gefertigt und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate kenntlich gemacht habe. Die Zeichnungen und bildlichen Darstellungen habe ich – soweit nicht anders vermerkt – selbst erstellt.

_____ _____

(Ort, Datum) (Unterschrift)