

Mobile Messwerterfassung für den Physikunterricht

Vorstellung neuartiger Schülerexperimente
mit einem mobilen Messsystem
und Computerauswertung

von

Martin Lackenbucher

Diplomarbeit zur Erlangung
des akademischen Grades
Magister der Naturwissenschaften
an der Fakultät für
Formal- und Naturwissenschaften
der Universität Wien

Wien, im Juni 2001

Vorwort

Die Idee zur vorliegenden Diplomarbeit ist bei einem einwöchigen Treffen zur Organisation des Projektes „The scientific and cultural aspects of the bicycle“ entstanden, bei dem fünf europäische und fünf amerikanische Universitäten zusammenarbeiteten. Dr. Ellermeijer vom AMSTEL-Institut¹ der Universität Amsterdam nahm auch an diesem Meeting teil. Die von mir in der vorliegenden Arbeit verwendete Computersoftware (COACH 5.2) zur Erstellung der Experimente ist eine Entwicklung des AMSTEL-Institutes. Die Software und das hier verwendete CBL – Messsystem der Firma Texas Instruments wurden bei dem Treffen für verschiedene Experimente rund um das Fahrrad verwendet.

Die Flexibilität und die einfache Bedienung des Systems veranlassten mich, spezielle Experimente zu CBL und COACH zu suchen und entwickeln.

An dieser Stelle möchte ich mich bei dem Betreuer meiner Diplomarbeit, Herrn Univ. Prof. Dr. Kühnelt, herzlich bedanken, der mir bei meinen zahlreichen Besuchen in seinem Büro interessante Denkanstöße gab und mit mir viele fruchtbare Diskussionen führte. Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Univ. Prof. Dr. Rupp vom Institut für Experimentalphysik, der mir während der Sommermonate das Schulversuchslabor für meine Experimente zur Verfügung stellte. In dieser Zeit stand mir Herr Dr. Kabelka bei allen Fragen hilfreich zur Seite. Für dies und für die produktive und gelöste Arbeitsatmosphäre sei ihm an dieser Stelle sehr gedankt.

Während meines dreimonatigen Aufenthalts am New Hampshire Community Technical College in Berlin, New Hampshire, USA, wurden die Grundpfeiler für meine Arbeit gelegt. Dr. Davis, der Leiter der Physikabteilung

¹Amsterdam, Mathematics, Science & Technology Education Laboratory Institut der Universität Amsterdam, Niederlande.

am College, unterstützte mich dabei in jeder Hinsicht. Für die interessante und lehrreiche Zeit in Neuengland möchte ich mich deshalb an dieser Stelle herzlich bei ihm und seiner lieben Frau Elisabeth bedanken.

Dank gebührt auch Herrn Mag. Schweisgut, unter dessen Aufsicht ich an der Max-Eyth-Schule in Alsfeld (Deutschland) ein einmonatiges Praktikum absolvierte, in dem ich einige Experimente entwickelte und testete. Auch Frau Dr. Urban-Wodron vom Sacre Cœur sei an dieser Stelle gedankt, in deren Unterricht ich einen Physikworkshop halten durfte.

Schließlich möchte ich Herrn Mag. Kniendl von Texas Instruments Austria danken, der mir zahlreiche Literatur und TI Testgeräte zur Verfügung stellte.

Wien, im Juni 2001

Zusammenfassung

Zu Beginn wird durch eine eigens dafür angelegte Schülerbefragung, die an einem Wiener Gymnasium durchgeführt wurde, ein Interessensprofil der Schüler in Bezug auf das Unterrichtsfach „Physik“ erstellt. Das Ergebnis soll die Bereitschaft und die Motivation der Schüler zeigen, die sie gegenüber Schülerexperimenten und neuen Medien im Unterricht aufbringen.

Als Datenerfassungsgerät für Schülerversuche wird das mobile CBL-System von Texas Instruments vorgestellt. Zur Datenauswertung wird nicht das TI eigene System mit einem grafischen Taschenrechner gewählt, sondern die Computersoftware COACH der CMA-Foundation.

Unter Verwendung der Schülerexperimentierkästen „Mechanik 1 & 2“ der Firma NTL wurden 16 Experimente aus dem Gebiet der Mechanik entwickelt, die hier vorgestellt und analysiert werden. Die Begleitinformationen zu den Versuchen werden mit Text-, Bild- und Videomaterial am Computer wiedergegeben. Diese Online – Anweisungen ermöglichen nicht nur eine gewisse Interaktivität, die Schülern unterschiedlicher Leistungsniveaus entgegenkommt, sondern bietet auch ein großes Maß an Übersichtlichkeit, da nur der eben benötigte Textteil angezeigt wird.

Neben der Datenaufnahme mit dem CBL-System wurden noch 4 Experimente mit Videoanalyse zur Auswertung vorbereitet. Die Instruktionen erhalten die Schüler auch hier durch Online – Anweisungen.

Zusätzlich zum Experiment existiert ein WinWord Arbeitsblatt (gegebenenfalls mit eingebetteten Excel-Tabellen), in das Messdiagramme kopiert werden und auf dem am Computer in Tabellen Berechnungen durchgeführt werden. Dieses Arbeitsblatt wird nach Durchführung des Versuches ausgedruckt und kann als Lernunterlage verwendet werden.

Ziel der Aufbereitung der Experimente war, ein möglichst selbstständiges

Arbeiten der Schüler zu ermöglichen.

Zur Evaluierung der Experimente wird am Ende der Arbeit eine Abhandlung über drei Physikworkshops geboten, die an einem amerikanischen College, einem deutschen und einem österreichischen Gymnasium durchgeführt wurden.

Inhaltsverzeichnis

1	Physik aus der Sicht der Schüler	10
1.1	Einleitung	10
1.2	Aufbau des Fragebogens	11
1.3	Auswertung des Fragebogens	12
1.3.1	Beliebtheit der einzelnen Unterrichtsfächer	12
1.3.2	Was Schüler interessiert	13
1.3.3	Worauf sollte mehr Wert gelegt werden	14
1.3.4	Bestandteile des Physikunterrichtes	15
1.3.5	Wie Schüler Physik einordnen	16
1.3.6	Änderungswünsche im Physikunterricht	18
1.4	Zusammenfassung	20
2	Vorstellung des CBL	24
2.1	Einleitung	24
2.2	Einsatzgebiet	25
2.3	CBL versus CBL2	26
2.4	Einige technische Daten des CBL	27
2.5	Ansteuerungsmöglichkeiten	27
2.6	Verfügbare Sensoren	28
2.7	Selbst konstruierte Sensoren	28
2.7.1	DiBox Adapter	29
2.7.2	Thermoelement	30
2.8	Zusammenfassung	34
3	Vorstellung von Coach	35
3.1	Einleitung	36

3.2	Benutzeroberfläche	36
3.3	Unterstützte Hardware	37
3.3.1	Unterstützte Messwertadapter	38
3.3.2	Unterstützte Sensoren	38
3.4	Messungen vornehmen	39
3.4.1	Messpunkte mit Sensoren aufnehmen	39
3.4.2	Videoanalyse von Experimenten	40
3.5	Datenauswertung	42
3.5.1	Das Toolbox-Menü	42
3.5.2	Datenanalysefunktionen	42
3.6	Der Projekte – Manager	43
3.7	Der Profile – Editor	44
3.8	Zusammenfassung	45
4	Experimente zu Coach	46
4.1	Einleitung	46
4.2	Methodische Grundlagen	48
4.3	Organisation der Experimente	49
4.3.1	Weg-Zeit–Diagramme treffen	51
4.3.2	Messen der Fallbeschleunigung	53
4.3.3	Gleit- und Haftreibung	57
4.3.4	Die Bewegung auf der Fahrbahn	60
4.3.5	Die Bewegung auf der schiefen Ebene	64
4.3.6	Die Bewegung auf der schiefen Ebene (Videoanalyse)	67
4.3.7	Energiebetrachtungen am Fadenpendel	69
4.3.8	Energie am Fadenpendel (Videoanalyse)	73
4.3.9	Energie auf der schiefen Ebene	75
4.3.10	Energie auf der schiefen Ebene (Videoanalyse)	81
4.3.11	Der Kraftstoß	85
4.3.12	Der (un-)elastische Stoß	89
4.3.13	Der (un-)elastische Stoß (Videoanalyse)	93
4.3.14	Die Gasgesetze	95
4.3.15	Harmonische Schwingungen – das Federpendel	100

4.3.16	Harmonische Schwingungen – das Fadenpendel	105
4.4	Evaluierung	109
4.4.1	Projekt „Trägheitsmoment“ am NHCTC	110
4.4.2	Physikworkshop an „Max-Eyth-Schule“ Alsfeld	114
4.4.3	Physikworkshop am „Sacre Cœur“ Pressbaum	115
4.4.4	Feedback der Workshop-Teilnehmer	115
4.4.5	Konsequenzen aus den Workshops	118
A	Fragebogen	121
B	Online Anleitungen	122
B.1	Vorstellung von COACH	122
B.2	Aufgabenstellung und Einleitung	123
B.3	Versuchsdurchführung	124
B.4	Zusätzliche Textmodule	125
B.4.1	Wie mache ich Messungen mit COACH?	126
B.4.2	Wie passe ich mit Coach Kurven ein?	126
B.4.3	Informationen zum CBR	128
C	Arbeitsblätter	130

Einleitung

Mehrere Untersuchungen [5, 11] belegen, dass vor etwa 5 bis 10 Jahren der Unterrichtsgegenstand „Physik“ unter Schülern nicht besonders beliebt war. Um das Image des naturwissenschaftlichen Unterrichts aufzubessern, sind gerade in dieser Hinsicht große Anstrengungen getroffen worden, um die Physik den Schülern leichter zugänglich zu machen und die Jugendlichen mehr für das Fach zu begeistern. Ein Vorschlag ist, die Schüler in Form von Schülerexperimenten und Projekten am Unterrichtsgeschehen mitwirken zu lassen.

In der vorliegenden Arbeit werden 16 Schülerexperimente aus dem Gebiet der Mechanik vorgestellt, die darauf ausgelegt sind, von den Schülern möglichst eigenständig durchgeführt zu werden. Das Ergebnis ist ein am Computer erstelltes Arbeitsblatt mit automatisch erstellten Diagrammen und Berechnungstabellen, das ausgedruckt als Lernunterlage dient.

Um bei den Messungen möglichst flexibel zu sein, wurde das mobile Datenerfassungssystem „CBL“ von Texas Instruments mit Batteriespeisung gewählt, an das verschiedenste Messsensoren zur Datenaufnahme angeschlossen werden können. Die Experimente sind darauf ausgelegt, dass die Steuerung des Messwertadapters und die Datenauswertung am PC mit der Software COACH der Firma CMA geschieht. Die robuste Ausführung des CBL, das etwa die Größe einer Federschachtel hat, eignet es besonders für didaktische Versuche von Schülern. Die Software COACH bietet neben den Datenaufnahme und Analysefunktionen noch die Möglichkeit, Texte, Bilder und Videos einzubinden.

Diese Funktion wurde genutzt, um die Anweisungen zu den Experimenten online zu gestalten und durch eine Videosequenz des Versuchsablaufs zu ergänzen. Das Video soll kurz den Ablauf des Experimentes erklären, während der Text als Begleitung und Hilfe zur Durchführung der Messungen

und Auswertungen fungiert.

Diese Online – Anweisungen sind modular aufgebaut und bringen am Anfang stets eine Zusammenfassung im Schlagwortstil. Die einzelnen Module erklären Grundfunktionen der Software, geben Detailinformationen zu den verwendeten Sensoren und helfen bei der Auswertung. Auf diese Art können die einzelnen Textteile relativ kurz gehalten werden und der Schüler kann sich, je nach Erfahrungsniveau durch das Programm Hilfe geben lassen.

In COACH werden aus den Messdaten der Sensoren meist Diagramme erzeugt. Diese werden in das Arbeitsblatt² kopiert, in dem auch Fragen zum Versuch zu beantworten sind und gegebenenfalls in Tabellen Berechnungen durchgeführt werden. Nach dem Experiment ausgedruckt hat jeder Schüler die Daten und Diagramme *seines* Versuches als Lernunterlage.

Neben den Experimenten mit dem CBL-Messwerterfassungssystem gibt es auch 4 Versuche, die mittels Videoanalyse ausgewertet werden. Dazu wird in einer Videosequenz des Versuchsablaufes Bild für Bild die Position des Versuchsobjektes durch Mausclick gespeichert, im Maßstab umgerechnet und in einem Diagramm über der verstrichenen Zeit aufgetragen. Auf diese Art können ohne Versuchsaufbau in kurzer Zeit Experimente durchgeführt werden. Die Auswertung funktioniert dann analog zu den konventionellen Experimenten.

Den Abschluss der Arbeit bildet eine Evaluation der Experimente. An einem amerikanischen College in New Hampshire wurde zum Thema „Trägheitsmoment“ ein Experimentenzyklus aus drei Versuchen erstellt, die alle mittels PC ausgewertet wurden. Die Kursteilnehmer sollten anhand der Experimente das Trägheitsmoment entdecken und begründen. Ein Ziel des Projektes war, die Akzeptanz von Online – Anweisungen zu studieren. Weiters wurden an einem deutschen und an einem österreichischen Gymnasium ein Physikworkshop mit einer Auswahl an den vorliegenden Experimenten durchgeführt. Im Evaluationsteil ist die Auswertung der Schüler – Feedbackbögen dieser Workshops nachzulesen.

Die Arbeit beginnt mit einer aktuellen Schülerbefragung zum Unterrichtsfach „Physik“, die eigens an einem Wiener Gymnasium durchgeführt wurde.

²Das Arbeitsblatt ist im MS-WinWord Format, gegebenenfalls mit eingebetteten MS-Excel Tabellen.

Kapitel 1

Physikunterricht aus der Sicht der Schüler

Das folgende Kapitel soll vermitteln, welche Bedeutung das Unterrichtsfach „Physik“ heute für Schüler hat. Aufgrund einer aktuellen Befragung in einem Wiener Gymnasium wird auf die Entwicklung der Schülerinteressen eingegangen. In der Untersuchung wurden Schüler nicht nur über den Status quo des Physikunterrichtes befragt, sie konnten auch Änderungsvorschläge beurteilen.

1.1 Einleitung

Um einen Eindruck der Schülerinteressen bezüglich des Gegenstandes „Physik“ zu bekommen, wurde an einem Wiener Gymnasium im Frühjahr 2001 eine Schülerbefragung durchgeführt. Aus jedem Jahrgang und jedem Unterrichtszweig wurde mindestens eine Schulklasse ausgewählt, in der jeder Schüler einen Fragebogen mit insgesamt 45 Fragen zum Unterrichtsfach „Physik“ beantwortete. Aus den Fragebögen wurden nach dem Zufallsprinzip 10 je Klasse ausgewählt und ausgewertet.

Bei der Auswertung wurden die Fragebögen in folgende Kategorien eingeteilt:

- Unterstufe

- Oberstufe Gymnasium
- Oberstufe Realgymnasium

Im Abschnitt 1.3 sind die Antworten der Schüler in Diagrammen zusammengefasst.

1.2 Aufbau des Fragebogens

Der Fragebogen wurde in Anlehnung an die Untersuchung von R. Dengler [5] aus dem Jahre 1995 entworfen, die an deutschen Gymnasien durchgeführt wurde. Dadurch können die Ergebnisse leicht verglichen werden. Im Anhang A am Ende der Arbeit ist ein Beispielformular beigelegt.

Im ersten Teil des Fragebogens sollten die Schüler die einzelnen Unterrichtsfächer mit einer Skala von 1 bis 4 (*mag ich sehr* bis *mag ich überhaupt nicht*) beurteilen. Danach folgen die Punkte:

- Was gefällt Dir am Physikunterricht?
- Worauf sollte im Physikunterricht mehr Wert gelegt werden?
- Mein Physikunterricht besteht hauptsächlich aus ...
- Wie ordnest Du Physik ein?
- Wenn Du den Physikunterricht ändern könntest, was würdest Du tun?

Um einen Vergleich und eine statistische Auswertung der Antworten zu ermöglichen, wurden zu jeder Frage mehrere Einzelantworten gegeben. Diese sollten durch Ankreuzen auf einer vierstufigen Skala beurteilt werden. Bei der Auswertung wurden die Einzelantworten prozentual in einem Balkendiagramm aufgetragen. Zusätzlich wurde der Balken so weit nach rechts verschoben, dass das arithmetische Mittel genau in der Mitte des Diagrammes war. Auf diese Art ist ein anschaulicher Vergleich der einzelnen Fragen gegeben.

Unter dem Punkt „Wie ordnest Du Physik ein?“ wurden 12 Polaritäten (gegensätzliche Eigenschaftspaare) ausgewählt. Zwischen jedes Eigenschaftspaar wurde eine Skala eingefügt, damit der befragte Schüler sowohl die Richtung als auch die Intensität jeder Beurteilung angeben konnte. Auf diese

Art konnte eine Information über die Grundeinstellung gegenüber dem Gegenstand „Physik“ gewonnen werden. Bei der Auswertung wurden in einem Diagramm neben den Mittelwerten der Antworten noch die Fehlerbalken mit den Standardabweichungen angegeben, um eine zusätzliche Information über die Streuung der Antworten zu geben.

1.3 Auswertung des Fragebogens

1.3.1 Beliebtheit der einzelnen Unterrichtsfächer

Tabelle 1.1 zeigt die Reihung der Unterrichtsfächer nach der Beliebtheit, aufgeschlüsselt in die einzelnen Kategorien. Zur Reihung der Fächer wurde über dem Querschnitt der Befragten der entsprechenden Kategorie das arithmetische Mittel der vierteiligen Beurteilungsskala gebildet und die Fächer danach sortiert.

Die Unterrichtsgegenstände Latein (L) und Informatik (Inf) werden in der Unterstufe nur von einer Minderheit der Schüler besucht. Da deshalb die Reihungen dieser Gegenstände nicht repräsentativ sind, wurden diese in Klammern gesetzt. Ihre Ränge sind als Richtwerte zu verstehen.

Rang	Unterstufe	Realgymnasium	Gymnasium
1	Lü	Inf	Lü
2	BE	Lü	H
3	H	BE	L
4	(Inf)	L	Gg
5	Ph	BiU	D
6	(L)	Me	BE
7	M	H	BiU
8	D	Ph	Inf
9	BiU	D	E
10	E	Gg	M
11	Me	E	Ph
12	Gg	M	Me

Tabelle 1.1: Reihung der Unterrichtsgegenstände nach Beliebtheit.

Das Fach Physik rangiert in der Beliebtheitsskala bei Unterstufenschülern nach dieser Untersuchung noch an fünfter Stelle, während es später in der Oberstufe Plätze einbüßen muss. Besonders im neusprachlichen (gymnasialen) Teil der Oberstufe fällt Physik auf den vorletzten Platz zurück.

Interessanterweise sind es die Burschen des neusprachlichen Zweiges, denen Physik am wenigsten sympathisch ist und damit die Klassierung derart stark drücken. Ihre Kolleginnen reihen Physik mit Informatik (Inf) und Bildnerischer Erziehung (Be) auf Platz 6. Die geschlechtsspezifische Aufschlüsselung in der Unterstufe bringt keine neuen Erkenntnisse. Dort reihen die Mädchen Physik an Platz 4 (Burschen Platz 5). Hingegen die (wenigen) Schülerinnen des Realgymnasiums halten im Durchschnitt Physik hinter Latein als das fünftliebste Fach, wo hingegen die Burschen Physik nur an 8. Stelle anführen.

Resümierend kann man aus diesem Teil der Untersuchung sagen, dass Physik im Laufe der Schulzeit deutlich an Beliebtheit verliert. Entgegen anderen Untersuchungen [5, 11] konnte ein Desinteresse der Mädchen am Unterrichtsfach nicht bestätigt werden. Besonders im neusprachlichen Zweig der Oberstufe fällt die Bewertung der Mädchen deutlich besser aus als die der Burschen.

1.3.2 Was Schüler im Physikunterricht interessant finden

Die Diagramme 1.1 bis 1.3 zeigen die Antworten der Schüler der einzelnen Kategorien auf die Fragen aus dem Punkt „Was gefällt Dir am Physikunterricht?“ in Prozenten. Die Linie in der Mitte des Diagrammes gibt den Mittelwert der Antworten von 1–4 wieder.

Die Diagramme ähneln sich in vielen Punkten. In allen Kategorien bekommen Experimente gute Noten, während Berechnungen und Herleitungen von Gesetzen am anderen Ende der Skala zu finden sind. Praktische Anwendungen haben neben Schülerexperimenten bei allen Schülern einen hohen Stellenwert in der Beliebtheitsskala. Interessanterweise arbeiten Schüler der Unterstufe noch lieber selbst bei Schülerexperimenten, während im Laufe der Zeit eher das Lehrerexperiment an Sympathie gewinnt. Auch der Punkt

	ja	eher ja	eher nein	nein
Lehrerversuche	37	42	15	6
Schülerversuche	74	21	5	
Gruppenversuche	55	27	13	5
Gesetze herleiten	8	13	52	27
Aufgaben rechnen		10	31	58
Erklärungen	40	27	21	11
Fächerübergreifungen	15	42	26	18
Prakt. Anwendungen über Ph. Reden	47	29	18	6
	39	35	19	6

Abbildung 1.1: „Was gefällt Dir am Physikunterricht?“ – Antworten der Unterstufe.

	ja	eher ja	eher nein	nein
Lehrerversuche	62	33	5	
Schülerversuche	57	33	10	
Gruppenversuche	48	19	19	14
Gesetze herleiten		14	29	57
Aufgaben rechnen		5	52	43
Erklärungen	38	48	14	
Fächerübergreifungen	38	48	14	
Prakt. Anwendungen über Ph. Reden	62	29	5	
	62	33	5	

Abbildung 1.2: „Was gefällt Dir am Physikunterricht?“ – Antworten der Oberstufe (neusprachliches) Gymnasium.

„Über Physik reden“ rangiert in allen Klassen an höchster Position.

1.3.3 Worauf sollte im Physikunterricht mehr Wert gelegt werden?

Die Tabellen 1.4 bis 1.6 zeigen die Verteilung der Antworten auf die Fragen im Punkt „Worauf sollte im Physikunterricht mehr Wert gelegt werden?“. Hier sollen Schüler den einzelnen Unterrichtskomponenten Prioritäten zuordnen.

Im Großen und Ganzen decken sich die Verteilungen der Antworten in den drei Kategorien von Schülern. Die Punkte „Phänomene erklären“ und

	ja	eher ja	eher nein	nein	
Lehrerversuche	66	34	0		
Schülerversuche	66	23	6	4	
Gruppenversuche	57	26	13	4	
Gesetze herleiten		11	13	40	36
Aufgaben rechnen		11	17	30	43
Erklärungen	40	38	13	9	
Fächerübergreifungen	17	45	23	15	
Prakt. Anwendungen über Ph. Reden	45	40	11	4	
	28	53	13	6	

Abbildung 1.3: „Was gefällt Dir am Physikunterricht?“ – Antworten der Oberstufe Realgymnasium.

	ja	eher ja	eher nein	nein
Gesetze herleiten		21	58	19
Aufgaben rechnen		13	50	37
Phänomäne erkl.	34	37	23	6
Verknüpfungen	13	42	31	15

Abbildung 1.4: „Worauf sollte im Physikunterricht mehr Wert gelegt werden?“ – Antworten der Unterstufe.

„Verknüpfungen schaffen“ sind bei Schülern sehr beliebt, während „Aufgaben rechnen“ und „Gesetze herleiten“ im anderen Extrem liegen.

Besonders im realistischen Zweig der Oberstufe scheint den Schülern besonders wichtig zu sein, dass bekannte Erfahrungen im Unterricht erklärt werden sollen. 71 von 100 Schülern glauben, dies sollte viel mehr betrieben werden.

1.3.4 Bestandteile des Physikunterrichtes

Die Tabellen 1.7 bis 1.9 geben Aufschluss über die prozentuale Verteilung der Antworten im Punkt „Mein Physikunterricht besteht hauptsächlich aus...“ auf dem Fragebogen. Dieser Punkt soll die die Aufteilung des Physikunterrichtes aus der Sicht der Schüler widerspiegeln.

Alle Schüler meinen, dass ihr Physikunterricht zu einem großen Teil aus

	ja	eher ja	eher nein	nein
Gesetze herleiten		65	86	10
Aufgaben rechnen		10	67	24
Phänomäne erkl.	71	24	5	
Verknüpfungen	38	38	24	0

Abbildung 1.5: „Worauf sollte im Physikunterricht mehr Wert gelegt werden?“ – Antworten der Oberstufe (neusprachliches) Gymnasium.

	ja	eher ja	eher nein	nein
Gesetze herleiten		9 17	55	19
Aufgaben rechnen		9 15	43	34
Phänomäne erkl.	49	40	9	
Verknüpfungen	17	47	26	11

Abbildung 1.6: „Worauf sollte im Physikunterricht mehr Wert gelegt werden?“ – Antworten der Oberstufe Realgymnasium.

Erklärungen besteht. Während in der Unterstufe und im Realzweig die Schüler glauben, Physik stelle einen gewissen Bezug zur Realität her, sind ihre Kollegen aus dem neusprachlichen Zweig anderer Meinung.

Den markantesten Unterschied kann man jedoch bei den Punkten „Herleiten von Formeln“ und „Aufgaben rechnen“ feststellen. In der Unterstufe freilich ist dies noch kein Thema, doch in der Oberstufe finden die Schüler des Realgymnasiums, dass ihr Physikunterricht zum überwiegenden Teil aus Berechnungen und Herleitungen besteht. Im neusprachlichen Zweig hingegen kommt diesen Punkten weniger Bedeutung zu.

Auffallend viel Zustimmung, besonders in der Unterstufe und im Gymnasium, gibt es noch bei dem Punkt „Über Physik reden“, während in diesen Kategorien den Schülern das Ausmaß an Lehrerversuchen eher gering vorkommt.

1.3.5 Wie Schüler Physik einordnen

In den Tabellen 1.10 bis 1.12 soll die grundsätzliche Einstellung der Schüler gegenüber dem Unterrichtsfach Physik erfahren werden. Dazu sind in einer

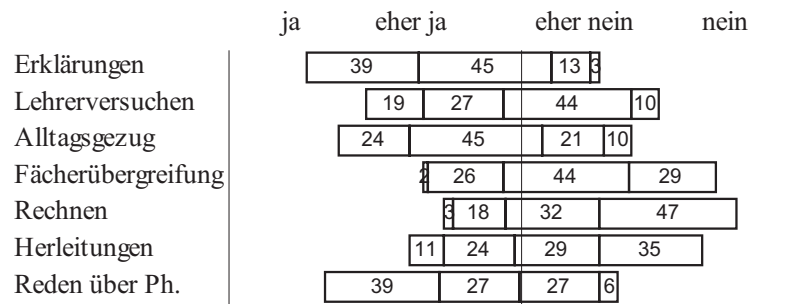


Abbildung 1.7: „Mein Physikunterricht besteht hauptsächlich aus ...“ – Antworten der Unterstufe.

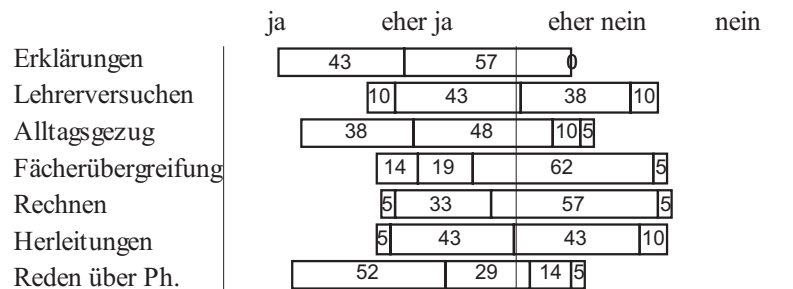


Abbildung 1.8: „Mein Physikunterricht besteht hauptsächlich aus ...“ – Antworten der Oberstufe (neusprachliches) Gymnasium.

Tabelle zwölf polare Eigenschaftspaare angeführt. Zwischen den einzelnen Polen kann in einer siebenteiligen Skala die Grundhaltung der betreffenden Eigenschaft angekreuzt werden.

Bei der Auswertung sind neben den Mittelwerten der Antworten noch die Standardabweichungen als Fehlerbalken angegeben. Je enger diese Fehlerbalken sind, desto geringer ist die Streuung der Antworten.

Die Antworten der Unterstufe sind eher unentschlossen, nur in wenigen Punkten zeigt das Diagramm deutliche Antworten. So sind sich die Schüler ziemlich einig, dass Physik ungefährlich und positiv ist. Die Punkte „entspannend“, „geplant“ und „abwechslungsreich“ zeigen noch einen schwachen Ausschlag. Im Mittel finden die Schüler der Unterstufe Physik ein wenig langweilig, doch ist die Streuung bei diesem Punkt auffallend groß.

	ja	eher ja	eher nein	nein	
Erklärungen	57	34	44		
Lehrerversuchen	36	34	26	4	
Alltagsgezug	19	40	19	21	
Fächerübergreifung		13	19	34	34
Rechnen	47	34	11	9	
Herleitungen	38	43	13	6	
Reden über Ph.	34	23	34	9	

Abbildung 1.9: „Mein Physikunterricht besteht hauptsächlich aus ...“ – Antworten der Oberstufe Realgymnasium.

Im neusprachlichen Zweig der Oberstufe finden die Schüler, dass Physik sehr ungefährlich ist, jedoch ziemlich geplant. Die grundsätzlich positive Einstellung gegenüber Physik kann auch hier gesehen werden. Außerdem finden die Schüler, dass Physik wenigstens etwas nutzbringend ist. Der Unterricht in Physik sei eher unklar (die Streuung ist hier recht groß), aber abwechslungsreich. Die übrigen Antworten sind eher unentschlossen.

Besonders unentschlossen gaben sich die Schüler des Realgymnasiums. Lediglich in den Punkten „ungefährlich“ und „positiv“ gibt es eindeutige Aussagen in diese Richtung. Mit sehr großer Streuung finden diese Schüler Physik ziemlich abwechslungsreich und etwas geplant.

1.3.6 Änderungswünsche im Physikunterricht

Die Diagramme mit der Referenznummer 1.13 bis 1.15 zeigen die Auswertung der Antworten zur Frage „Wenn Du den Physikunterricht ändern könntest, was würdest Du tun?“ aus dem Fragebogen. Die Diagramme sind nach dem Schema entstanden, wie es in den Abschnitten 1.3.2 bis 1.3.4 zur Anwendung gekommen ist. Die prozentuale Häufigkeit der Antworten zu den einzelnen Punkten sind als Balken im Diagramm aufgetragen.

Zweck dieser Fragen ist, Schülerinteressen zum Thema *Physik* auszuloten und die Vorstellung der Schüler über den Bildungsauftrag in Physik herauszufinden.

Sehr eindeutig fallen die Antworten bei den Punkten „mehr Formeln her-

	sehr	mittel	etwas	unentsch	etwas	mittel	sehr	
interessant				●				langweilig
wichtig				●				unwichtig
anstrengend					●			entspannend
spontan					●			geplant
begeisternd					●			abweisend
klar				●				unklar
gefährlich						●		ungefährlich
nutzbringend				●				überflüssig
negativ						●		positiv
angesehen					●			bedeutungslos
friedlich				●				aggressiv
eintönig					●			abwechslungsreich

Abbildung 1.10: „Wie ordnest Du Physik ein?“ – Antworten der Unterstufe.

leiten“ und „mehr Aufgaben rechnen“ aus. Quer durch alle Kategorien werden diese beiden Punkte entschieden abgelehnt. Besonders in der Unterstufe wird auch der Punkt „mehr Beiträge durch Schüler (Referate)“ negativ beurteilt.

Das andere Extremum wird bei Experimenten erreicht. Beim Punkt „mehr Schülerexperimente“ antworten sogar 76 % der Unterstufenschüler mit „ja“ und 16 % mit „eher ja“. 8 % meinen zu dieser Frage „eher nein“ und kein einziger der Befragten findet, dass nicht mehr Schülerexperimente gemacht werden sollten. Ähnlich deutlich antworten die Schüler der beiden Oberstufenzweige zu dieser Frage. Im neusprachlichen Zweig erreicht dieser Punkt im Mittel die drittbeste Note, während im Realgymnasium den Schülern Schülerexperimente am wichtigsten sind. „Lehrerexperimente,“ und „Gruppenarbeiten“ rangieren ebenfalls in allen drei Kategorien an vorderster Stelle.

Die praktischen Anwendungen erzielen in den Oberstufenzweigen höchste Zustimmung. Im Gymnasium wird Platz eins erzielt, im Realgymnasium Platz zwei. Bei den Schülern der Unterstufe fällt dieser Punkt zurück in das Mittelfeld.

Anders jedoch beim „Computereinsatz im Unterricht“. Den Schülern der

	sehr	mittel	etwas	unentsch	etwas	mittel	sehr	
interessant			●					langweilig
wichtig			●					unwichtig
anstrengend			●					entspannend
spontan					●			geplant
begeistert			●					abweisend
klar			●					unklar
gefährlich					●			ungefährlich
nutzbringend		●						überflüssig
negativ				●				positiv
angesehen			●					bedeutungslos
friedlich			●					aggressiv
eintönig			●					abwechslungsreich

Abbildung 1.11: „Wie ordnest Du Physik ein?“ – Antworten der Oberstufe (neusprachliches) Gymnasium.

Unterstufe ist dieser Punkt am zweitwichtigsten und auch die Oberstufenschüler sehen dies als wesentlich.

Hervorzuheben ist schließlich noch der Punkt „durch Entdecken lernen“. Laut Umfrage finden beinahe alle Schüler, dass diese Form des Unterrichts mehr praktiziert werden sollte. Lediglich 6 % im Realgymnasium und 5 % in Unterstufe und Gymnasium stimmen dagegen.

1.4 Zusammenfassung

Das Unterrichtsfach „Physik“ genießt bei Schülern der Unterstufe große Anerkennung. In einer Beliebtheitsskala der Unterrichtsgegenstände rangiert es hinter Leibesübungen, Bildnerischer Erziehung und Geschichte an Platz vier. Im Laufe der Schulkarriere nimmt dieses Interesse jedoch ziemlich stark ab und erreicht im neusprachlichen Zweig der Oberstufe vor Musikerziehung den vorletzten Platz. Entgegen anderer Untersuchungen [5, 11] zeigt diese Umfrage, dass Physik nicht ein Gegenstand ist, der vorwiegend von Burschen favorisiert wird, sondern dass Mädchen die Statistik in der Oberstufe vor

	sehr	mittel	etwas	unentsch	etwas	mittel	sehr	
interessant				●				langweilig
wichtig				●				unwichtig
anstrengend				●				entspannend
spontan					●			geplant
begeisternd				●				abweisend
klar				●				unklar
gefährlich							●	ungefährlich
nutzbringend				●				überflüssig
negativ						●		positiv
angesehen				●				bedeutungslos
friedlich				●				aggressiv
eintönig						●		abwechslungsreich

Abbildung 1.12: „Wie ordnest Du Physik ein?“ – Antworten der Oberstufe Realgymnasium.

noch schlechteren Ergebnissen ‘retten’.

Aus der Auswertung des Fragebogens kann ganz deutlich herausgelesen werden, dass bei den Schülern Herleitungen und Rechnungen sehr unbeliebt sind. Besonders in der Oberstufe empfinden Schüler, diese nähmen einen großen Teil ihres Physikunterrichtes ein. Wenn Schüler etwas zu sagen hätten, würden sie Herleitungen und Aufgaben rechnen im Physikunterricht sehr einschränken.

Sehr beliebt hingegen sind Experimente. Besonders Schülern der Unterstufe gefallen Schülerversuche sehr gut. In der Oberstufe sind diese auch noch recht beliebt, werden jedoch von den Lehrerversuchen eingeholt. Vor allem in der Oberstufe wird Teamarbeit bei Versuchen sehr geschätzt. Physik sollte laut Meinung der Schüler der Oberstufe viel mehr aus praktischen Anwendungen bestehen. Das Prinzip des entdeckenden Lernens sollte viel mehr praktiziert werden, meint ein Großteil der Schüler. Außerdem meinen besonders Schüler der Unterstufe, dass neue Medien, wie der Computer, viel mehr in den Unterricht mit einbezogen werden sollten. Die Kollegen in der Oberstufe sind in diesem Punkt zwar etwas bescheidener, doch eindeutig positiv gegenüber diesem Vorschlag eingestellt.

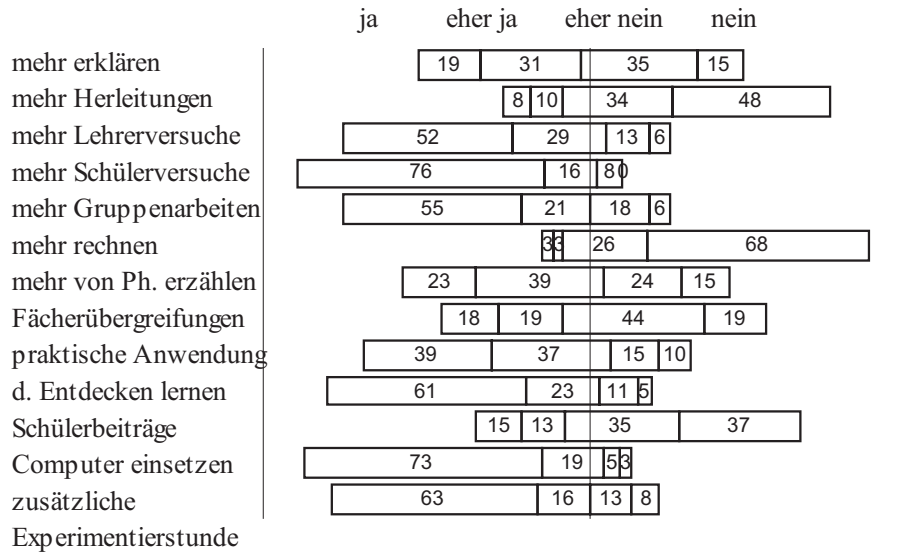


Abbildung 1.13: „Wenn Du den Physikunterricht ändern könntest, was würdest Du tun?“ – Antworten der Unterstufe.

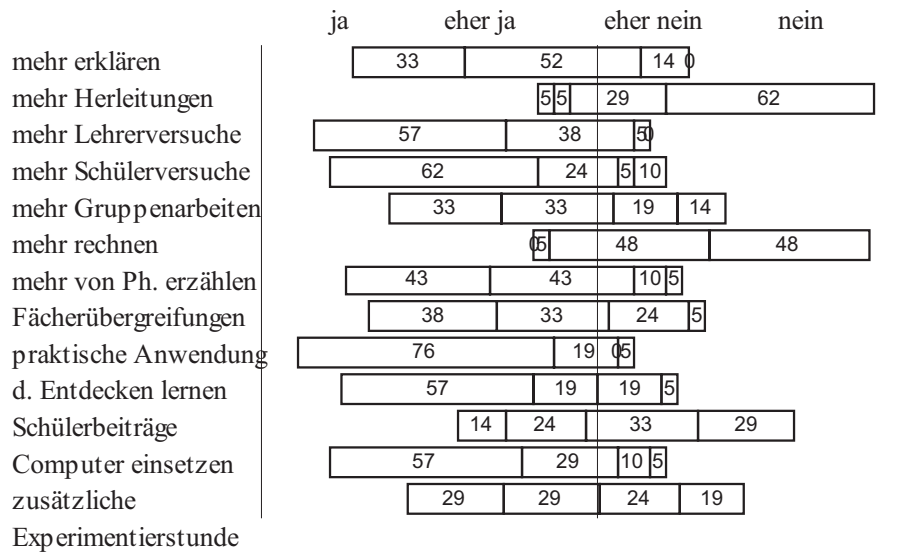


Abbildung 1.14: „Wenn Du den Physikunterricht ändern könntest, was würdest Du tun?“ – Antworten der Oberstufe (neusprachliches) Gymnasium.

	ja	eher ja	eher nein	nein
mehr erklären	32	38	21	9
mehr Herleitungen	0	13	34	53
mehr Lehrerversuche	57	28	11	4
mehr Schülerversuche	55	34	9	2
mehr Gruppenarbeiten	47	36	13	4
mehr rechnen	4	11	45	40
mehr von Ph. erzählen	19	47	26	9
Fächerübergreifungen	17	38	32	13
praktische Anwendung	57	26	13	4
d. Entdecken lernen	43	40	11	6
Schülerbeiträge	19	19	38	23
Computer einsetzen	45	23	21	11
zusätzliche Experimentierstunde	47	23	17	13

Abbildung 1.15: „Wenn Du den Physikunterricht ändern könntest, was würdest Du tun?“ – Antworten der Oberstufe Realgymnasium.

Kapitel 2

Vorstellung des Messwerverfassungssystems „CBL“

Zur Durchführung der Experimente im Kapitel 4 wurde das Messwerverfassungssystem „CBL“ von Texas Instruments¹ verwendet. Zur Datenaufnahme können an das CBL verschiedene Messsensoren angeschlossen werden. Das CBL übernimmt die Steuerung der Sensoren und Speicherung der Messdaten. Diese Daten können dann mit einem grafischen Taschenrechner oder mit dem PC ausgelesen und weiterverarbeitet werden.

Im folgenden Kapitel wird das CBL-System mit seinen Einsatzmöglichkeiten vorgestellt. Es werden kurz die mitgelieferten Sensoren und Produkte anderer Hersteller besprochen. Außerdem wird anhand eines Beispiels gezeigt, wie man solche Sensoren selbst fertigen kann.

2.1 Einleitung

Das CBL (Calculator-Based Laboratory) ist ein tragbares Interface zur Datenaufnahme mit 6 frei programmierbaren Ein-/Ausgängen. Es arbeitet mit 4 Monozellen und kann so auch außerhalb der Reichweite des Netzes betrie-

¹Nähere Informationen zum CBL auf der Homepage von Texas Instruments unter www.ti.com/calc.

ben werden. An die Ein-/Ausgänge kann eine große Auswahl an Messfühlern angeschlossen werden.

Das CBL wird zur Steuerung entweder mit einem grafischen Taschenrechner, oder mit einem PC verbunden. Über eine einfache Macro – Programmiersprache werden dem CBL Messvoreinstellungen wie Messdauer oder Messfrequenz gesendet. Während des Messvorgangs werden die meist analogen Messsignale der Sensoren im CBL digitalisiert und gespeichert, bis sie nach Beendigung der Messung auf Befehl in den PC (Taschenrechner) gesendet werden. Diese „Rohdaten“ geben verschiedene Spannungswerte der Sensoren wieder und müssen erst in entsprechende Einheiten umgerechnet werden. Diese Transformation geschieht mit einem speziellen Programm im PC (Taschenrechner).

Ab diesem Zeitpunkt kann man von eigentlichen „Messpunkten“ sprechen, die in Tabellen und Diagrammen weiterverarbeitet werden können.

2.2 Einsatzgebiet

Das CBL wird, wie eingangs erwähnt, von Batterien versorgt. Die Spannung reicht aus, um auch die meisten Sensoren zu betreiben. Somit ist das Messsystem bei der Datenaufnahme netzunabhängig und kann nicht nur im Klassenzimmer, sondern auch im Freien benützt werden. Falls die Daten in einem Notebook oder einem Taschenrechner ausgewertet werden, braucht man auch dazu keine Steckdose. Selbst bei stationären Computern kann das CBL während der Datenaufnahme abgesteckt sein. Somit handelt es sich beim CBL um ein sehr flexibles System mit vielerlei Anwendungsmöglichkeit.

Da das CBL und die dazugehörigen Messsensoren für didaktische Zwecke entwickelt worden sind, wird mehr auf Verständnis und Anschauung im Experiment, als auf Messgenauigkeit Wert gelegt. Für professionelle Messungen ist das Messsystem unter anderem durch das vergleichsweise beschränkte Signalaufklärungsvermögen nur bedingt einsetzbar.

2.3 CBL versus CBL2

Die aktuelle Entwicklung im Sektor Messwertadapter aus dem Hause Texas Instruments heißt „CBL 2“.² Im Gegensatz zum Vorgängermodell wurde der Datenspeicher erweitert und das System mit einem Flash-BIOS ausgestattet. Mit dieser Technologie ist es möglich, die Übertragungssoftware für die Messdaten zum Taschenrechner immer auf dem letzten Stand zu halten.

Während das CBL ein Display besitzt, auf dem die für die Messvoreinstellungen relevanten Daten angezeigt werden, verwendet das Nachfolgemodell dafür die Anzeige des Taschenrechners. Wird zur Weiterverarbeitung der Daten ein Computer verwendet, so fehlt dieses hilfreiche Feature. Beispielsweise lässt sich damit durch eine Live-Messung recht leicht feststellen, wo fehlgeleitete Messimpulse eines Ultraschall – Bewegungssensors reflektiert werden. In weiterer Folge kann der Sensor schnell justiert werden. Bei Verwendung des CBL 2 ist eine simultane Messung mit Anzeige des Resultates ohne zusätzlichen Taschenrechner nicht möglich. Andererseits fällt die Erweiterung des Speichers beim CBL 2, speziell wenn bei Messungen mehrere Sensoren gleichzeitig verwendet werden, sehr positiv auf. Durch die deutlich kompakteren Abmessungen der Neuentwicklung und der Möglichkeit, den Taschenrechner an die Geräterückwand anzuklicken, bietet das CBL 2 in Verbindung mit einem Taschenrechner neben den technischen auch ergonomische Vorteile.

Zum Zeitpunkt der Entwicklung der Experimente standen zwar CBL und CBL 2 zur Verfügung, doch befand sich der Treiber zur Einbindung des CBL 2 in die Computersoftware noch in einem Betastadium und lieferte manchmal nicht nachvollziehbare Ergebnisse und Programmabstürze. Aus diesem Grund wurde auf das einwandfrei funktionierende CBL zurückgegriffen. In der aktuellen Version der verwendeten Computersoftware steht der CBL 2-Treiber in einer endgültigen Version zur Verfügung.

²Das CBL 2 ist eine gemeinsame Entwicklung der Firma Texas Instruments Incorporated und Vernier Software, Portland.

2.4 Einige technische Daten des CBL

Da die Auslieferung der CBLs demnächst eingestellt wird und nur mehr der Nachfolger, das CBL 2, angeboten wird, werden an dieser Stelle nur Angaben über das CBL 2 gemacht.

Das CBL 2 hat etwa die Abmessungen eines Grafiktaschenrechners, bei einer Dicke von 3 Zentimetern. Es ist kompatibel zu den aktuellen Grafikkalkulatoren der Firma Texas Instruments und kann über ein spezielles Kabel (TI-GraphLink) mit einem Computer (MacIntosh oder Windows) verbunden werden. Über die drei Analogeingänge und den bidirektionalen Digitaleingang können verschiedenste Messsensoren angeschlossen und bis zu 12000 Messpunkte pro Durchgang gespeichert werden.

Zur Umwandlung analoger Messdaten der Sensoren in digitale Information verwendet das CBL 2 einen 10 bit analog/digital Wandler. Die sich daraus ergebende Auflösung von 1024 Abstufungen zwischen Minimum und Maximum jedes Messsignals lässt, speziell für Messungen mit großem Messwertumfang, den Experimentator schnell an die Grenzen der Messempfindlichkeit stoßen.

Ausgeliefert wird das CBL mit drei Messsensoren und zwar einem Temperaturfühler, einem Lichtsensor und einem Spannungskabel.

2.5 Ansteuerungsmöglichkeiten

Besonders das CBL 2, das die Möglichkeit bietet, einen Taschenrechner anzudocken, zeigt, dass das CBL-System zur Verwendung mit Taschenrechnern konzipiert ist. Die zur Datenübertragung benötigte Software ist im Speicher des CBL 2 integriert und kann per Knopfdruck in jeden TI-Taschenrechner übertragen werden. Somit ist zur Datenerfassung keine Programm – Installation erforderlich. Durch die gemeinsame Nutzung des Rechnerdisplays und die einfache Bedienung kann behauptet werden, dass die Symbiose zwischen CBL 2 und Taschenrechner geglückt ist.

Obwohl grafische Taschenrechner heute schon unzählige Funktionen zur Datenauswertung besitzen, kann die Produktivität einer Computersoftware noch nicht erreicht werden. Die wesentlich höheren Performance-Ressourcen

und die ergonomischere Bedienung mit Maus und hochauflösendem Farbgrafik-Bildschirm legen den Grundstein für leistungsfähige und komfortable Software. Das CBL fungiert in diesem Fall als mobiler Datenlogger. Es wird nur an den Rechner angeschlossen, um Voreinstellungen ins CBL zu senden und die fertigen Daten in den Rechner zurückzuschicken. Die Datenaufnahme kann außerhalb der Reichweite des Rechners geschehen. Für diese Funktion wird vom CBL eine große Speicherkapazität verlangt, um möglichst viele Messpunkte aufzeichnen zu können. Wird das CBL im Simultanmodus gefahren, bei dem der Adapter jeden Messwert aus den Sensoren direkt an den Computer weiterleitet, geht die Performance des CBL in die gebotene Messfrequenz ein.

2.6 Verfügbare Sensoren

Das CBL 2 ist, wie eingangs erwähnt, eine Coproduktion der Firmen Texas Instruments und Vernier Software. Während von TI neben einem Ultraschall – Bewegungssensor (CBR – Calculator-Based Ranger) noch die dem CBL beigelegten Sensoren (Lichtsensor, Temperatursonde und Spannungskabel) angeboten werden, bietet die Firma Vernier³ etwa 40 verschiedene Sensoren an. Auch Pasco⁴ bietet einige Sensoren für das CBL-System an.

Prinzipiell können alle analogen Messsensoren mit entsprechendem Anschlusskabel mit dem CBL verwendet werden, da die Umrechnung der Signale in die richtigen Einheiten ohnehin im Rechner geschieht. Da das CBL recht eigenwillige Buchsen verwendet (British Telecom), steht auch ein DIN Adapter zur Verfügung.

2.7 Selbst konstruierte Sensoren

Die Möglichkeit, beliebige analoge Sensoren an das CBL anzuschließen, verleitet natürlich sehr, selbst solche Messfühler zu fertigen, oder zu versuchen, vorhandene Sensoren anderer Hersteller an das CBL-System anzupassen.

³Die Firma Vernier ist im Internet unter www.vernier.com zu finden. Die von Vernier hergestellten Produkte können über diese Adresse bestellt werden.

⁴Homepage von Pasco unter www.pasco.com.

In den folgenden beiden Abschnitten ist je ein Beispiel zu den eben erwähnten Fällen beschrieben.

2.7.1 DiBox Adapter

Der an allen österreichischen Gymnasien angekaufte Physikcomputer „Di-Box“ stellt seinen Sensoren zum Betrieb ± 15 Volt zur Verfügung. Als Steckverbindung kommt ein 7 poliger DIN Stecker zum Einsatz. Abbildung 2.1 zeigt die Belegung der einzelnen Pole der DIN Buchse eines DiBox Sensors. Manche Sensoren älterer Bauart verwenden einen 5 poligen Anschluss. Dabei wird das Ausgangssignal gegenüber der Masse gemessen – (2) und (6) sind also verbunden.

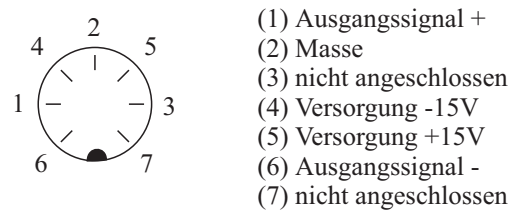


Abbildung 2.1: Steckerbelegung der 7 poligen DIN Buchse eines DiBox Messsensors.

Eine einfache Art diese Sensoren in das CBL einzubinden besteht darin, dass man mit einem zweipoligen Netzgerät den Sensor über die entsprechenden Pole mit +15V, Masse und -15V versorgt und das Messsignal des Sensors mit dem Spannungskabel des CBLs abgreift.

Eine elegantere Lösung ist folgende:

Es stellt sich heraus, dass alle getesteten Messfühler mit ± 9 Volt aus zwei 9 V Blockbatterien anstandslos funktionieren. Zwischen dem 7 poligen DIN Stecker auf der Seite des Sensors und dem BT-Stecker⁵ auf der Seite des CBLs, werden in einer Kunststoffbox zwei 9V Blockbatterien zur Spannungsversorgung gehalten. Auf diese Art können DiBox-Sensoren mobil verwendet werden. Natürlich kann der BT-Stecker eingespart werden, wenn man die Messkontakte aus dem Gehäuse führt und wiederum mit dem Spannungskabel des CBLs abgreift.

⁵Erhältlich als Zubehör bei Vernier.

2.7.2 Thermoelement

Der dem CBL beigelegte Temperatursensor gibt zwar die Temperatur mit einer Genauigkeit von $0,1^\circ\text{C}$ an, doch braucht der Fühler, speziell bei Temperaturmessungen von Gasen, etwa eine Minute, bis er die Temperatur der Umgebung angenommen hat. Eine Möglichkeit, kostengünstig innerhalb von Sekunden auch kleine Temperaturschwankungen aufzuzeichnen, ist ein Thermoelement.

Einleitung

Bei einem Thermoelement wird die Thermospannung U_{th} gemessen, die entsteht, wenn zwei Drähte aus unterschiedlichem Metall zu einem Ring gelötet worden sind und die beiden Lötstellen eine unterschiedliche Temperatur aufweisen. Die abgegriffene Thermospannung U_{th} hat, je nach Metallen, einen Wert bis etwa $100 \mu\text{V}$ pro $^\circ\text{C}$ und ist proportional zur Temperaturdifferenz der Lötstellen.

Um mit dem CBL erfasst zu werden, müssen diese kleinen Spannungswerte etwa um den Faktor 1 000 verstärkt werden. Dies wird durch die Hintereinanderschaltung zweier Operationsverstärker realisiert. Die Stromversorgung geschieht mittels zweier 9V -Blockbatterien.

Theoretischer Überblick

Wenn zwei verschiedene Metalle sich berühren, gehen einige Elektronen vom einen zum anderen über. Der Grund dafür ist die unterschiedliche Austrittsarbeit der Elektronen. Das Metall mit der geringeren Austrittsarbeit gibt Elektronen ab und wird positiv. Der Übertritt hört erst auf, wenn sich eine Kontaktspannung eingestellt hat, die entgegengesetzt gleich der Differenz der Fermi-Niveaus ist. Dann treten in beide Richtungen gleich viele Elektronen über.

Biegt man die beiden Metalle zu einem Ring, so bilden sich an den beiden Kontaktstellen zwei gleich große, aber entgegengesetzt geladene Kontaktspannungen. Erwärmt man eine der beiden Kontakte, so verschieben sich an dieser Stelle die Fermikanten der beiden Metalle und der Elektronenausgleich und damit die Kontaktspannung ändert sich. Es kann also bei einer

Temperaturdifferenz zwischen den beiden Kontaktstellen eine Spannung, die Thermospannung U_{th} , abgegriffen werden.⁶

Die Werte für U_{th} zwischen unterschiedlichen Metallpaaren sind in einer thermoelektrischen Spannungsreihe zu finden. Je nach Messbereich werden die Metalle ausgewählt. Der Vorteil liegt in der Messgenauigkeit und vor allem in der sehr geringen Trägheit, da die Kontaktstellen sehr klein ausgeführt werden können.

Um die Thermospannungen, die im Mikrovolt Bereich pro Grad Celsius liegen, für das CBL messbar zu machen, wird hier eine Verstärkerschaltung mit zwei Operationsverstärkern verwendet, die invertierend geschaltet sind. In Abbildung 2.2 wird anhand eines Operationsverstärkers die invertierende Schaltung demonstriert. Für das Verhältnis zwischen Eingangsspannung U_e

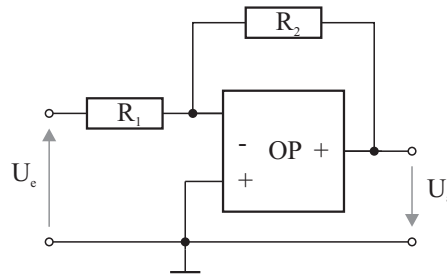


Abbildung 2.2: Elektronischer Bauplan einer invertierenden Schaltung eines Operationsverstärkers OP . R_1 und R_2 sind ohm'sche Widerstände, U_e und U_a die Eingangs- bzw. Ausgangsspannung.

und Ausgangsspannung U_a und damit die Verstärkung gilt:⁷

$$\frac{U_a}{U_e} \approx -\frac{R_2}{R_1} \quad (2.1)$$

Ersetzt man einen der beiden Widerstände R_1 oder R_2 durch ein Potentiometer, so kann der Verstärkungsfaktor eingestellt werden.

Aufbau des Sensors

Für die Thermodrähte kommen beim Sensor Nickel und eine Chrom-Nickel Legierung zum Einsatz, die an einer Seite mit einem Hartlot etwa unter 800°C

⁶Nähere Informationen in [7] im Kapitel 6.6.

⁷Für nähere Informationen zu Operationsverstärkern und dazugehörigen elektronischen Schaltungen, siehe beispielsweise [23].

verlötet werden. Die Thermospannung U_{th} wird mit einer Verstärkerschaltung etwa um den Faktor 2000 vergrößert, um für das CBL messbar zu sein. Diese große Verstärkung wird erreicht, indem zwei Operationsverstärker hintereinander geschaltet werden. Abbildung 2.3 zeigt den Bauplan der Schaltung.

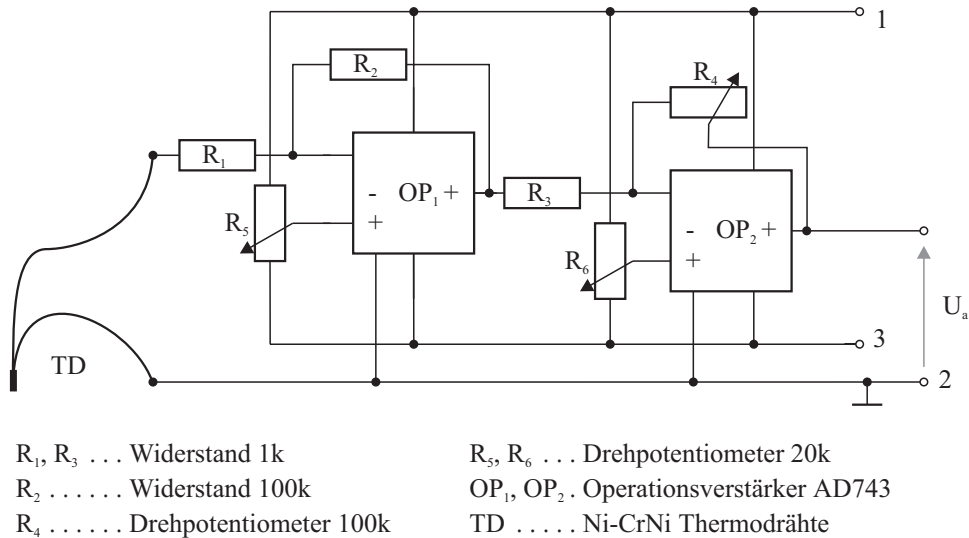


Abbildung 2.3: Elektronischer Bauplan eines selbst konstruierten Thermoelementes mit integrierter Verstärkerschaltung. Der Ein-/Ausschaltmechanismus ist nicht eingezeichnet – er wird an den Kontakten 1, 2 und 3 angeschlossen.

Um bei optimaler Signalqualität für U_a eine möglichst große Verstärkung zu erzielen, wird der Verstärkungsfaktor des zweiten Verstärkers, der sich nach Gleichung 2.1 errechnet,⁸ mit dem Drehpotentiometer R_4 eingestellt. Zur Justierung verwendet man ein Oszilloskop.

Der Ein-/Ausschaltemechanismus mit Kontrolllämpchen, wie er in Abbildung 2.4 gezeigt ist, soll eine energiesparende Nutzung des Sensors ermöglichen. Benötigt wird dazu ein zweipoliger Kippschalter, ein Vorwiderstand (100 k Ω) und eine rote Leuchtdiode (LED). Dieser Schalter wird mit den entsprechenden Polen des Messensors verbunden.

Zusammen mit zwei 9 V Batterien wird die ganze Elektronik in eine 11 \times 6 \times 3 cm große Kunststoffbox geschraubt, wobei die Thermodrähte, der

⁸Die Bezeichnung für die Widerstände aus Gleichung 2.1 sind natürlich der Zeichnung 2.3 entsprechend durch R_3 und R_4 zu ersetzen.

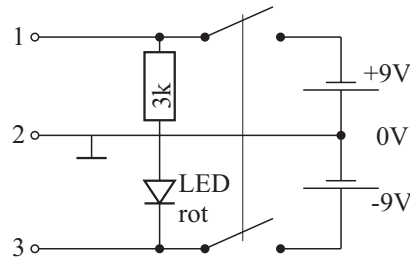


Abbildung 2.4: Bauplan des zweipoligen Ein-/Ausschalters mit Kontrolllämpchen. An den Kontakten 1, 2 und 3 wird der Schalter mit den entsprechenden Kontakten des Messensors verbunden.

Schalter mit LED und die Kontakte des Messsignals U_a nach außen geführt werden. Das U_a kann entweder mit den Spannungskabeln des CBLs abgegriffen, oder über ein Kabel mit BT-Stecker direkt an das CBL angeschlossen werden.

Ein Thermoelement misst keine absolute Temperatur, sondern nur die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Kontaktstellen der Thermodrähte. In diesem Sensor ist nur ein Kontakt ausgeführt – die Thermospannung U_{th} gibt hier den Temperaturunterschied zur Sensorplatine, also etwa zur Raumtemperatur an.

Einsatzgebiet des Sensors

Das Thermoelement hat gegenüber dem Thermowiderstand den großen Vorteil der sehr geringen Trägheit. Dadurch ist es möglich, beispielsweise eine kurze Änderung der Temperatur eines Gases aufzuzeichnen.

Im Experiment „Gasgesetze“ im Abschnitt 4.3.14 wurde mit einem nach diesem Plan selbstgebauten Sensor der Temperaturanstieg von Luft in einer Kanüle gezeigt, der durch adiabatische Kompression auf etwa 3 bar entsteht. Ein paar Sekunden lang steigt die Temperatur um etwa 3°C an, bevor die Wärme an die Umgebung abgegeben wird.

Ein weiterer Vorzug des Sensors ist der hohe Messbereich. Die Kombination Ni – CrNi liefert einen linearen Anstieg der Thermospannung für Temperaturen bis zu 1100°C . Damit könnten Flammentemperaturen bestimmt werden. Obere Temperaturgrenze ist bei dem Sensor nach Anleitung der Schmelzpunkt des Hartlotes, mit dem die beiden Drähte verlötet sind. Dieser

liegt bei etwa 800°C.

2.8 Zusammenfassung

Beim CBL handelt es sich um ein flexibles System, das nicht nur zur Messung in Experimentieranordnungen eingesetzt werden kann, sondern auch zur Datenaufnahme im Freien. Dadurch wird ein neuer Realitätsbezug des Physikunterrichtes ermöglicht – man misst nicht mehr nur an einem Modell, sondern erkennt die Physik im Alltag.

Die Datenauswertung kann über einen grafischen Taschenrechner, oder über Computer erfolgen. Die großen Vorzüge des Taschenrechners sind die Mobilität und die Verfügbarkeit. Hingegen zeigt das Kapitel 3, in dem eine moderne Datenauswertungssoftware vorgestellt wird, dass der Computer mit seiner ergonomischeren Bedienung und größeren Performance eine hohe Produktivität für didaktische Belange bringt. Die situationsabhängige Zusammenarbeit von Taschenrechner und PC ist sicher die richtige Entscheidung.

Die einfache Einbindung unterschiedlichster Sensoren von verschiedenen Herstellern macht das CBL zu einem zukunftssicheren Messsystem, das stark erweiterbar ist. Außerdem kann die einfache Fertigung von eigenen Sensoren auch für didaktische Zwecke (fächerübergreifend) genutzt werden.

Kapitel 3

Vorstellung des Softwarepakets „Coach“

Zur Steuerung der Messsensoren und zur Datenanalyse wurde ausschließlich das Computerprogramm COACH verwendet. COACH wird vom AMSTEL¹ Institut der Universität Amsterdam entwickelt und durch das CMA² vertrieben.

Das AMSTEL Institut der Universität Amsterdam ist eine Forschungs- und Entwicklungsinstitution, die sich zur Aufgabe gemacht hat, den naturwissenschaftlichen, den technologischen und den mathematischen Unterricht zu verbessern. Das CMA, welches im Jahr 1987 gegründet worden ist, dient als Geschäftsarm des AMSTEL Institutes und ist für den Vertrieb pädagogischer Entwicklungen zuständig. Es ist ein non-profit Unternehmen, das alle Erlöse aus Verkauf und Projekten in die eigene Entwicklung und Forschung investiert. Die Produktion der Hardwareentwicklungen wird von professionellen Unternehmen durchgeführt. Das CMA/AMSTEL Institut ist mit seinen Unterrichtsmaterialien an zahlreichen Schulen in vielen Ländern Europas und den Vereinigten Staaten vertreten.

In diesem Kapitel wird die Software vorgestellt und eine Einführung in die Bedienung gegeben. Die Programmteile, welche man für die Durchführung der Experimente im Abschnitt 4 benötigt, werden vorgeführt und deren Funk-

¹Amsterdam, Mathematics, Science & Technology Education Laboratory

²Centre for Microcomputer Applications

tionsweise genauer erläutert. Detailliertere Informationen zur Bedienung sind im COACH Handbuch „Guide to Coach 5“ zu finden, das dem Softwarepaket beiliegt.

3.1 Einleitung

COACH ist ein vielseitiges Softwarepaket für den Naturwissenschaftlichen Unterricht an allgemein bildende höheren Schulen und ist konzipiert für Anwender zwischen 10 und 18 Jahren. Es beinhaltet Funktionen wie Steuerung von Messsystemen, Datenanalyse, Programmierung von Steuergeräten, Datenauswertung, Modellierung und Videoanalyse.

Durch das Autor-Schüler Konzept können Experimente vom Lehrer an die Verhältnisse des Schülers angepasst werden. Auf diese Art können nicht nur Diagramme und Tabellen, deren Erstellung zu zeitaufwendig oder zu anspruchsvoll wären, vorgegeben, sondern auch individueller Online Begleittext zu jedem Versuch bereitgestellt werden. Die Möglichkeit Texte, Bilder und sogar Videos in die Versuche einzubinden, erleichtert die selbstständige Durchführung durch die Schüler und trägt zur Motivation bei.

3.2 Benutzeroberfläche

COACH ist als MS-Windows Anwendung entwickelt worden und hat eine durchgehend grafische Oberfläche mit in Windows üblicher Benutzerführung. Nach dem Start eines Experimentes in COACH stehen vier große Fenster zur Aufnahme von Objekten zur Verfügung. Diese Objekte können Textanweisungen, Diagramme, Tabellen, Bilder, Videos oder Notizen sein, die man aus den entsprechenden Objekt-Menüs auswählen kann. Die beiden unteren Fenster können ausgeblendet und dafür ein Bild des Messwertadapters (CBL) angezeigt werden. Möchte man in COACH einen Sensor an das CBL anstecken, so zieht man mit der Maus das Sensorsymbol zum jeweiligen Eingang der Abbildung vom CBL. Abbildung 3.1 zeigt einen Screenshot eines typischen Experimentes in COACH. Die Datenaufnahme und Auswertung kann durch die eingebauten Analysefunktionen vollständig in COACH durchgeführt wer-

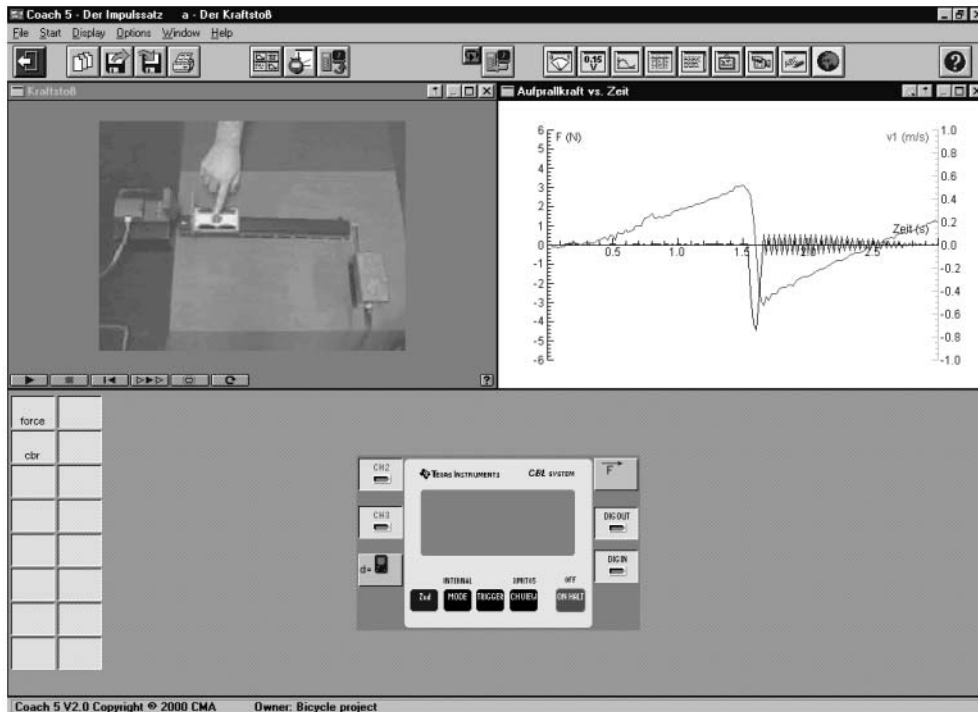


Abbildung 3.1: Programmfenster von COACH. Die untere Hälfte zeigt ein Bild des CBL mit seinen Ein- und Ausgängen. Zwei kleine Symbole an den Eingängen sollen symbolisieren, dass hier Sensoren angeschlossen sind. Anstatt des Messwertadapters können auch zwei weitere Fenster angezeigt werden, denen Tabellen, Texte, Bilder, ... zugewiesen werden können.

den. Will man hingegen Daten mit externen Programmen weiterverarbeiten, so können diese durch „kopieren und einfügen“ einfach übertragen werden

Etwa können Messpunkte in einer externen Tabellenkalkulation ausgewertet, oder Diagramme in Arbeitsblätter, die in einer Textverarbeitung geöffnet sind, kopiert werden.

3.3 Unterstützte Hardware

Die Einbindung der Hardware funktioniert in COACH mittels Treiberdateien. Auf diese Art ist COACH recht flexibel, ohne jedoch auf Komfort bei der Bedienung zu verzichten. Ist ein Messinterface installiert, so wird im Programmfenster ein Bild von diesem mit den Ein- und Ausgängen gezeigt. Will

man einen Sensor mit einem bestimmten Stecker am Interface verbinden, so erkennt dies COACH entweder selbstständig, oder man zieht das Sensorsymbol mit der Maus zum entsprechenden Eingang des Interfaces.

COACH unterstützt nicht nur eine große Anzahl an Messsensoren verschiedenster Hersteller, sondern erlaubt auch eine einfache Einbindung selbst definierter Sensoren.

3.3.1 Unterstützte Messwertadapter

Neben dem hauseigenen Messsystem „CoachLab“ wird unter anderem auch das CBL – System von Texas Instruments unterstützt. Die im Abschnitt 4 vorliegenden Experimente sind für das CBL – System entwickelt worden. Deshalb wird im Folgenden diesem besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

Das CBL kann dabei als Datenlogger oder als direktes System angesprochen werden. Beim direkten System wird jeder aufgenommene Messpunkt sofort an COACH weitergeleitet und ausgewertet. Fungiert das CBL als Datenlogger, so werden die Messwerte erst im CBL gespeichert und dann als Ganzes in COACH eingelesen und verarbeitet. Der Vorteil des Datenloggers besteht darin, dass beim Messvorgang keine Verbindung zwischen CBL und Computer vorhanden sein muss. Dies macht die Messanordnung mobil und flexibel.

3.3.2 Unterstützte Sensoren

Da die Steuerung der Sensoren der Messwertadapter, hier das CBL, übernimmt und dieser die Messwerte als Binärcode an den PC weitergibt, kann jeder vom CBL unterstützte Sensor von COACH ausgewertet werden.

Für etwa 100 Sensoren unterschiedlicher Hersteller wird eine direkte Unterstützung von COACH geboten. Bei Benützung werden diese, wie eingangs beschrieben, aus einer Liste ausgewählt und durch Ziehen mit der Maus mit dem entsprechenden Eingang des Interfaces (softwaremäßig) verbunden. Wird in einer Tabelle oder in einem Diagramm der Sensor ausgewählt, so rechnet COACH den empfangenen Binärwert in entsprechende Einheiten um und definiert den richtigen Messbereich.

Will man einen in der Liste nicht aufgeführten (etwa einen selbst hergestellten) Sensor mit COACH verwenden, so müssen Einstellungen wie Eichung, Kalibrierung, Einheitenangabe und Messbereich selbst definiert werden. In COACH geschieht dies gut dokumentiert in einem grafischen Dialog und kann auch von unerfahrenen Benutzern leicht durchgeführt werden. Dem Sensor wird dann ein Name und ein Symbol zugeordnet und er ist damit von einem professionell erstellten nicht mehr zu unterscheiden.

3.4 Messungen vornehmen

In diesem Abschnitt wird darauf eingegangen, wie man mit COACH, CBL und Sensoren Daten aufnimmt. Das CBL wird als Datenlogger verwendet, da der Treiber zur Einbindung als direktes Messsystem sich zu diesem Zeitpunkt noch in Entwicklungsphase befindet und wenig stabil ist. COACH bietet zur Datenerfassung neben der konventionellen Messadaptersteuerung noch die Möglichkeit, aufgrund eines Videos des Versuchsablaufs Aussagen über Bewegungen eines Versuchskörpers zu treffen.

3.4.1 Messpunkte mit Sensoren aufnehmen

Bevor eine Messung mit CBL und Sensoren durchgeführt werden kann, müssen die Messeinstellungen von COACH an das CBL geschickt werden. In diesen Voreinstellungen wird festgelegt, welche Sensoren angeschlossen sind, wie lange die Messung dauern und wie oft (pro Sekunde) ein Messwert erfasst werden soll. Nachdem das CBL diese Daten empfangen hat, schaltet es in einen Bereitschaftsmodus. Die Messung wird entweder auf Knopfdruck, oder automatisch durch ein in der Voreinstellung definiertes Ereignis gestartet. So kann etwa definiert werden, dass die Messung von selbst beginnt, sobald die Intensität im Lichtsensor unter einen gewissen Wert fällt (Lichtschranke).

Sobald die nach der Messung im CBL zwischengespeicherten Daten in COACH zurückgelesen werden, kann die Auswertung beginnen.

3.4.2 Videoanalyse von Experimenten

Interessiert man sich für die Bewegung eines Objektes, wird die Messung oft vereinfacht, wenn man anstatt der Datenaufnahme mit Messsensoren eine Videoanalyse des Ablaufes heranzieht.

Bei der Aufnahme einer Videosequenz werden pro Sekunde 25 Bilder aufgezeichnet,³ die, in schneller Abfolge gespielt, dem Gehirn des Betrachters eine kontinuierliche Bewegung vortäuschen. Jedes dieser Einzelbilder, auch „Frame“ genannt, hat einen konstanten Zeitabstand zum vorigen und zeigt ein bewegtes Objekt etwas vorgerückt. Aus dieser Ortsveränderung lässt sich mit der verstrichenen Zeit ($\frac{1}{25}s$) die Geschwindigkeit des Objektes bestimmen. Um die verkleinerte Darstellung im Video auszugleichen, muss noch ein Maßstab bestimmt werden.

Bei der Videoanalyse wird Bild für Bild des Films die Position des Wagens aufgezeichnet. Dazu wird das Video im Einzelschrittverfahren durchlaufen und in jedem Frame mit der Maus die sich ändernde Position des Wagens angeklickt. Die Koordinaten werden in eine Tabelle übertragen und können über der verstrichenen Zeit in einem Diagramm dargestellt werden. Die so erhaltenen Messpunkte können, wie bei Daten aus dem CBL, weiterverarbeitet werden. In Abbildung 3.2 ist eine Videosequenz eines Fadenpendels gezeigt, dessen Bewegung mittels Videoanalyse aufgezeichnet worden ist. Die hellen Punkte zeigen die Positionen des Pendelkörpers in den einzelnen Videoframes. Der Abstand zweier benachbarter Punkte ist direkt proportional zur Momentangeschwindigkeit des Pendels an dieser Stelle. Aus verstrichener Zeit und Position des Objektes können weitere Berechnungen angestellt werden.

³Die in Europa übliche PAL-Norm für das Fernsehen nimmt pro Sekunde 25 Bilder auf. Durch Änderung der Bildrate wird bei der Analyse die Anzahl der Messpunkte und damit die Qualität der Messung beeinflusst. Um ein Mittelmaß aus Qualität und Analyseaufwand zu erhalten, wird bei nicht sehr schnell bewegten Objekten üblicherweise eine Bildrate von 12 Bildern pro Sekunde gewählt.

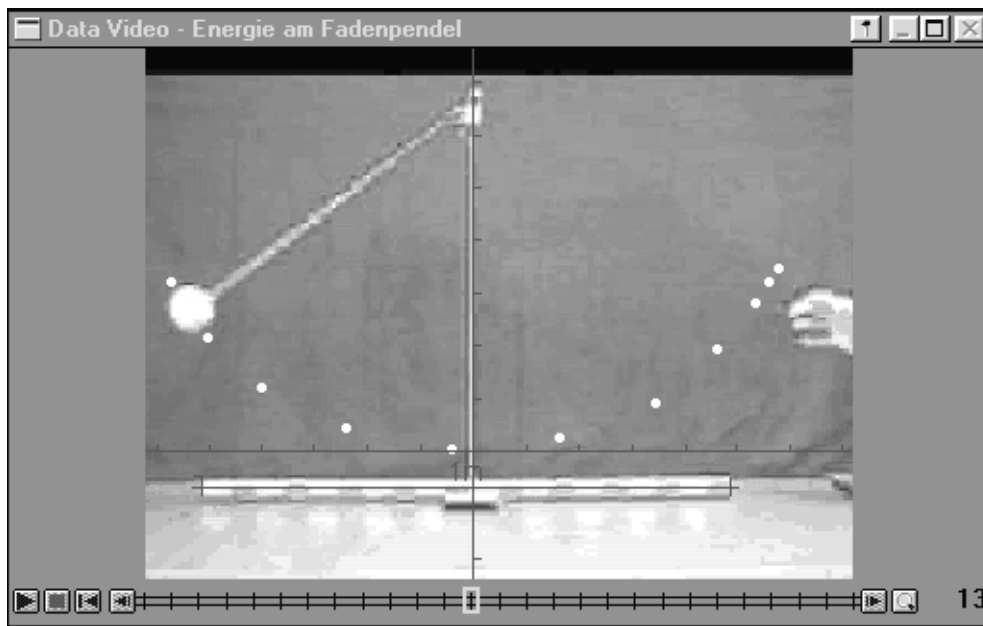


Abbildung 3.2: Screenshot einer Videoanalyse in COACH. Die hellen Punkte entlang der Pendelstrecke sind die Positionen des Pendelkörpers in den einzelnen Frames des Videos. Je größer der Abstand zweier benachbarter Punkte ist, desto höher ist die Momentangeschwindigkeit des Pendels an dieser Stelle.

3.5 Datenauswertung

Die aus CBL oder Video gewonnenen Messpunkte können in COACH in Diagrammen dargestellt werden. Meist ist man jedoch nicht direkt an den Messpunkten interessiert, sondern möchte aus diesen mit Formeln weitere Größen berechnen. Dazu stellt COACH eine interne Tabellenkalkulation zur Verfügung.

In bis zu acht Spalten können mit Hilfe eines Formel-Editors Berechnungen mit den Messwerten angestellt werden. Neben arithmetischen Funktionen stehen auch zahlreiche mathematische Operationen, wie Integral und Ableitung zur Verfügung. Die einzelnen Spalten einer Tabelle können in einem Diagramm gegeneinander aufgetragen und grafisch analysiert werden.

3.5.1 Das Toolbox-Menü

Alle Bearbeitungs- und Analysefunktionen von Diagrammen und Tabellen sind im Toolbox-Menü zusammengefasst. Dort findet man etwa für Diagramme Zoomfunktionen, eine Funktion „Scan“ zum Auslesen einzelner Messpunkte, den Punkt „Create/Edit diagram“, in dem die Diagrammparameter gesetzt werden.

Außerdem gibt es die beiden Untermenüs „Process“ und „Analyse“. Im Menü „Process“ wird neben Filter- und Glättungsfunktionen noch die Möglichkeit geboten, die Ableitungsfunktion und die Stammfunktion einer Messkurve berechnen zu lassen. Die Features unter „Analyse“ werden im folgenden Abschnitt kurz besprochen.

3.5.2 Datenanalysefunktionen

Das Untermenü „Analyse“ des Toolbox-Menüs bietet folgende Optionen:

Slope zur Bestimmung der Steigung einer Messkurve. Durch Klicken und Ziehen mit der Maus wird an einem Punkt der Kurve eine Tangente an die Kurve gezeichnet. Ihre Parameter in Einheiten des Diagrammes können in zwei Feldern abgelesen werden.

Area dient der einfachen Bestimmung der Fläche unter einer Messkurve. Gibt man die horizontalen Grenzen durch Verschieben an, so wird in einem Textfeld die Fläche unter der Messkurve angezeigt. COACH gibt die Fläche in Einheiten der Koordinatenachsen an.

Function fit ermöglicht das Einpassen einer Funktion in die Messkurve. Auf diese Art können verrauschte Messreihen optimiert werden. Dies ist besonders wichtig, wenn diese Grundlage für weitere Berechnungen sind. Wird beispielsweise aus einem Weg-Zeit Grafen durch zweimaliges Differenzieren die Beschleunigung berechnet, so potenzieren sich kleine Schwankungen in der ursprünglichen Kurve derart, dass das Ergebnis unbrauchbar wird. Ersetzt man hingegen die Weg-Zeit Kurve durch eine eingepasste Funktion, so werden Schwankungen eliminiert und die übermäßige Fehlerfortpflanzung bei weiteren Berechnungen eingeschränkt. Speziell bei der Videoanalyse mit der relativ geringen Anzahl an Messpunkten ist „Function fit“ ein wichtiges Hilfsmittel.

Zur Einpassung stehen verschiedenste Funktionstypen zur Auswahl. Wird eine ausgewählt, so zeichnet COACH eine Beispielfunktion über die Messkurve. Jetzt können entweder manuell mit der Maus, oder automatisch die Parameter der Funktion so verändert werden, dass sich das Ergebnis optimal an die Messkurve anpasst. Die angegebene „Fitquality“ gibt Auskunft darüber, wie gut die eingepasste Kurve die Messkurve approximiert. Das Dialogfenster zur Funktion „Funktion fit“ ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

3.6 Der Projekte – Manager

Zur Speicherung von Experimenten sind in COACH zwei Hierarchien vorgesehen – Projekte und Aktivitäten. Projekte sind Übergeordnete Themen, wie etwa „Schwingungen“, oder „Der Impulssatz“. Innerhalb dieser Projekte werden Aktivitäten eingerichtet, zum Beispiel „Gedämpfte Schwingung am Federpendel“, oder „Elastische Stöße zwischen zwei Fahrzeugen“. Zur Erstellung und Verwaltung von Projekten steht in COACH der „Projekt – Manager“ zur Verfügung.

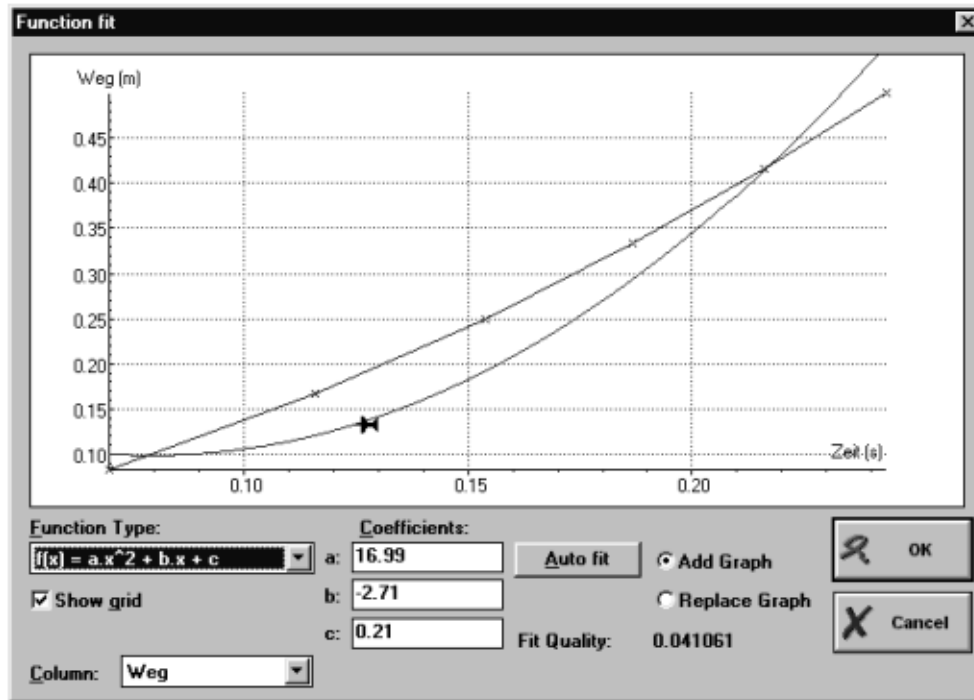


Abbildung 3.3: Screenshot des Dialoges „Function fit“.

Mit dem Projekt – Manager werden für die einzelnen Aktivitäten innerhalb des Projektes die erforderlichen Text-, Bild- und Videodateien kopiert. Die Textanweisungen zu den Experimenten in Kapitel 4 sind in Modulen aufgebaut. Die einzelnen Module sind so konzipiert, dass sie in mehreren Versuchen verwendet werden können. Der Projekt – Manager hilft auf übersichtliche Art und Weise die einzelnen Dateien zu verwalten und sie den entsprechenden Projekten zuzuordnen.

3.7 Der Profile – Editor

Um COACH an das Niveau der Schüler anzupassen besteht die Möglichkeit, verschiedene Benutzerprofile zu erstellen. So können etwa in einem „Grundschüler-Modus“ nicht benötigte Analysefunktionen ausgeblendet werden, um so das Programm übersichtlicher zu gestalten.

Die Profile können auch genutzt werden um Schülern nur Zugang zu Projekten zu gewähren, die ihrer Altersgruppe entsprechen. Zusätzlich können

die Projekte durch Vergabe von bestimmten Rechten vor Beschädigung geschützt werden.

3.8 Zusammenfassung

COACH bietet mit seinem Funktionsumfang und seiner intuitiven Bedienung viele Möglichkeiten, den Physikunterricht durch den Einsatz moderner multimedialer Medien interessant zu gestalten.

Da Anleitungstexte, Bilder und Videos in COACH leicht eingebunden werden können, wird eine selbstständige Arbeit der Schüler unterstützt. Eine Lehrkraft sollte also ohne Schwierigkeiten mehrere unterschiedliche Experimentiergruppen innerhalb einer Klasse beaufsichtigen können.

Diagramme selbst durchgeführter Experimente können einfach in ein Arbeitsblatt kopiert werden, welches in einer externen Textverarbeitung geöffnet ist. Das Arbeitsblatt wird am Computer ausgefüllt und bietet so eine saubere Lernunterlage.

Die Reaktionen der Schüler auf die Verwendung von COACH im Unterricht ist durchwegs positiv. Einzelne Schülerrückmeldungen können im Abschnitt 4.4.4 nachgelesen werden. Dort findet man die Auswertung der Feedback-Bögen zweier Physikworkshops mit COACH.

Der Wermutstropfen bei Experimenten mit COACH ist allerdings, dass jeder Arbeitsplatz einen Computer benötigt. Trotz zunehmender Aufrüstung elektronischer Anlagen in österreichs Schulen sind diese doch meist dem Informatikunterricht vorbehalten. Sind jedoch die Voraussetzungen gegeben, kann mit COACH ein moderner erforschender Physikunterricht betrieben werden.

Kapitel 4

Experimente aus dem Gebiet der Mechanik für Coach

4.1 Einleitung

Im folgenden werden Experimente mit dem Messwerverfassungssystem CBL und COACH für die 5. bzw. 6. Klasse Gymnasium und Realgymnasium vorgestellt. Bis auf die Versuche in den Abschnitten 4.3.1, 4.3.2 und 4.5 sind die Experimente dem Lehrkonzept des Schulbuches „Physik 1“ [20], von Roman Sexl nachempfunden. Der Titel, die Gliederung und die Organisation der Experimente entspricht den dazugehörigen Kapiteln im Schulbuch und bietet sich daher zur Verwendung neben diesen besonders an. Natürlich sind die Versuche eigenständig und können auch als solche verwendet werden.

Die folgenden Experimente sind unterteilt in konventionelle Experimente und in Experimente mit Videoanalyse. Bei den konventionellen Experimenten werden mit CBL und verschiedenen Sensoren Messdaten aufgenommen, die in den Computer übertragen und mit COACH weiterverarbeitet werden.

Bei der Videoanalyse wird mit COACH ein Film des Versuchsablaufs untersucht. Aus den unterschiedlichen Orten des bewegten Objektes auf den einzelnen Frames wird auf die Geschwindigkeit geschlossen.¹

Nachdem das Experiment in COACH geladen wurde, teilt sich der Programmbereich in vier große Fenster auf, in welchen die für die Messung re-

¹Nähere Informationen zur Funktion der Videoanalyse im Abschnitt 3.4.2.

levanten Daten angezeigt werden. Ein Fenster zeigt bei Programmstart stets ein kurzes Video über den Versuchsablauf. Darin wird vorgeführt, wie eine Messung gestartet und durchgeführt wird. Dieses Video kann beliebig oft abgespielt werden und soll so den Experimentator auf das Kommende vorbereiten. Einem zweiten Fenster sind die Textanweisungen zum Versuch zugewiesen. Diese sind modular aufgebaut und bestehen stets aus den Teilen:

- Vorstellung von COACH
- Aufgabenstellung und Einleitung
- Versuchsdurchführung

Weiters stehen noch Textmodule, wie „Wie führt man Messungen mit Coach durch?“, oder Hilfe zu spezifischen Programmfunktionen zur Verfügung. Außerdem wird die Funktion und Handhabung jedes verwendeten Messensors in einem eigenen Textmodul erklärt. Diese Texte bieten zusätzliche Informationen zum Versuch und sind bei der Durchführung nicht obligatorisch. Alle Begleittexte beginnen mit einer Zusammenfassung im Schlagwortstil. Sind nähere Details erwünscht, so findet man diese im nachfolgendem Text. Beispiele für Textmodule zu ausgewählten Experimenten sind im Anhang B, am Ende der Arbeit zu finden. Die Einteilung in Textmodule erlaubt einen leichten Austausch der Elemente zwischen den Experimenten.²

Ziel der aufwendigen Erklärungen und Begleitung durch das Experiment ist eine möglichst selbstständige Durchführung der Versuche durch die Schüler. Auf diese Art sollte es auch möglich sein, mehrere Gruppen mit unterschiedlichen Experimenten in einer Schulklasse gleichzeitig durchführen zu können.

Allen Experimenten ist neben der Datenaufnahme und -analyse in COACH noch ein Arbeitsblatt³ hinzugefügt. Dieses wird separat, neben COACH, gestartet. Auf Hinweis wechselt man zu diesem, um dort angeführte Fragen zu beantworten und Messkurven zu übertragen. Eine Auswahl von Arbeitsblättern zu unterschiedlichen Experimenten sind in „Anhang C“ abgedruckt.

²Nähere Informationen zum Austausch von Modulen innerhalb der einzelnen Projekte in COACH im Abschnitt 3.6.

³Das Arbeitsblatt ist im MS-WinWord Format – teilweise mit eingefügten MS-Excel Tabellen.

Das physische Ergebnis der Experimente ist ein fertig ausgefülltes Arbeitsblatt mit eigenen Messkurven, welches in die Physikmappe eingeklebt und als Lernunterlage verwendet werden kann.

4.2 Methodische Grundlagen

Versucht man im Physikunterricht die gelernte Theorie anhand eines Experiments zu verifizieren, wird man nur allzu oft mit Tücken der Messung konfrontiert. Die in Schulbüchern abgedruckten Diagramme zu Experimenten schauen nach eigenen Messungen meist ganz anders aus. Oft muss noch viel Optimierungsarbeit aufgewendet werden, bis man aus Messkurven Ergebnisse ableiten kann. An diesem Punkt muss die Frage gestellt werden, ob Einflüsse des realen Experimentes durch die Versuchsanordnung immer negative didaktische Konsequenzen mit sich zieht. Manchmal können Fehlmessungen und die damit verbundene Diagnose als pädagogisch wertvolle Aufgabe formuliert werden.

Am Beispiel des CBR ergibt sich mitunter das Problem, dass bei ungünstiger Reflexionsfläche des zu messenden Objektes im Weg-Zeit-Diagramm kleine Schwankungen auftreten. Dies geschieht, wenn der ausgesendete Schallimpuls bei unregelmäßigen Oberflächen, wie etwa die eines Spielzeugautos, mehrmals an vom CBR unterschiedlich weit entfernten Punkten reflektiert wird. Die in der Amplitude kleinen Verzerrungen sind nicht weiter beachtenswert, solange man sich nicht für die Geschwindigkeit oder die Beschleunigung des Objektes interessiert. Ein kleiner Sprung im Weg-Zeit-Diagramm bedeutet innerhalb einer kurzen Zeit eine drastische Änderung des zurückgelegten Weges, d.h. eine starke Änderung der Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit-Zeit-Kurve verstärkt also die Schwankungen erheblich und wirkt dadurch zackig. Wird aus dieser Kurve dann mit dem gleichen Verfahren die Beschleunigung errechnet, so kann daraus durch die Potenzierung des Messfehlers keine Aussage mehr getroffen werden. Es ist also notwendig, diese Störungen in der Messkurve so gering wie möglich zu halten.

Dies kann einerseits durch Verbesserung des Versuchsaufbaus erreicht werden, etwa indem für gute Reflexion des Messstrahls gesorgt wird. Es gibt jedoch auf der anderen Seite auch die Möglichkeit mit COACH die Messkur-

ven zu optimieren. Durch eine Filterfunktion können einzelne Ausreißer einer Messreihe gelöscht werden. Viel effektiver jedoch ist, wenn man die Messkurve durch den Grafen einer Funktion ersetzt.

Mit der Option „Function fit“ von COACH kann aus verschiedensten Funktionstypen ein Graf automatisch oder manuell in die Messkurve eingepasst werden.⁴ Der für die Berechnung der Geschwindigkeit verwendete Differenzenquotient liefert bei Funktionen meist glatte Kurven als Ergebnis. Besonders für Experimente mit Videoauswertung ist die Kurvoneinpassung ein wichtiges Hilfsmittel zur Datenanalyse. Die verhältnismäßig wenigen Messpunkte, aus denen Kurven erstellt werden, bergen große Fehlerquellen. Sollen aus diesen noch weitere Berechnungen angestellt werden, so ist eine Substitution durch eine geeignete Funktion unerlässlich.⁵

Ein Hauptziel der Experimente mit COACH ist ein Vertrautmachen mit Diagrammen. Die Deutung von Funktionen und Grafen stellt viele Schüler vor eine schwierige Aufgabe. Studien zeigen[16], dass selbst Maturanten mitunter große Probleme haben, Diagramme richtig zu interpretieren. Die grafische Darstellung zweier voneinander abhängigen Größen spielt jedoch in vielerlei Hinsicht eine wichtige Rolle und ist daher im Curriculum unentbehrlich.

4.3 Organisation der Experimente

Die Experimente sind den Kapiteln des Schulbuches „Physik 1“ und „Physik 2“ von R. Sexl nachempfunden [20, 21]. Die folgende Aufstellung gibt eine Auswahl aus Kapitelüberschriften von „Physik 1“ mit dazugehörigen Experimenten wieder.

- Die Ursache der Bewegung
 - Weg-Zeit-Diagramme treffen
 - Messen der Fallbeschleunigung

⁴Nähere Informationen zu „Function fit“ in „Datenanalysefunktionen von COACH“ im Abschnitt 3.5.2.

⁵Siehe auch Paragraf „Function fit“ des Abschnitts 3.5.2 auf Seite 43.

- Gleit- und Haftreibung
- Einfache Bewegungen
 - Die Bewegung auf der Fahrbahn
 - Bewegung auf der schiefen Ebene
 - Bewegung auf der schiefen Ebene (Videoanalyse)
- Erhaltungssatz der Energie
 - Energiebetrachtungen am Fadenpendel
 - Energie am Fadenpendel (Videoanalyse)
 - Energie auf der schiefen Ebene
 - Energie auf der schiefen Ebene (Videoanalyse)
- Der Impulssatz
 - Der Kraftstoß
 - Der (un-)elastische Stoß
 - Der (un-)elastische Stoß (Videoanalyse)

Aus dem Band „Physik 2“, der für die 6. Klasse AHS vorgesehen ist, sind noch Experimente zu folgenden Kapiteln vorbereitet:

- Die Gasgesetze
- Harmonische Schwingungen
 - Das Federpendel
 - Das Fadenpendel

In den Abschnitten 4.3.1 bis 4.3.16 werden die Experimente einzeln vorgestellt:

4.3.1 Weg-Zeit–Diagramme treffen

Kurzfassung

Mit einem CBR wird der Abstand des Experimentators zu einer Wand fortlaufend gemessen. Durch vor- und rückwärts Bewegungen soll ein vorgegebenes Weg-Zeit–Diagramm nachvollzogen werden.

Einleitung

Sind die Voreinstellungen für die Messung vom PC in den CBR geschickt worden, kann dieser zur Aufnahme der Messpunkte abgesteckt werden. Hier wird der CBR dazu benutzt, Weg-Zeit–Diagramme des Experimentators bezüglich einer Wand zu messen. Der CBR ist darauf programmiert, 15 Sekunden lang mit einer Frequenz von 10 Hertz den Abstand x aufzuzeichnen. In COACH werden diese Daten in einem „x-t–Diagramm“ gegeneinander aufgetragen. Es gilt, ein gespeichertes Diagramm möglichst genau zu treffen.

In weiterer Folge werden verschiedene Diagramme, die neben dem Abstand x auch die Geschwindigkeit v über der Zeit t zeigen, im Arbeitsblatt diskutiert.

Didaktische Ziele

Auf eine spielerische Weise soll die Verbindung zwischen Schrittmuster und Weg-Zeit–Diagramm geschaffen werden. Das Ergebnis der Messung weist unmittelbar auf Fehldeutungen der vorgegebenen Kurve hin. Die am eigenen Leib verspürte Geschwindigkeit erleichtert die Bestimmung dieser aus dem Weg–Grafen.

Theoretischer Überblick

Der CBR misst die Zeit, die vergeht, bis ein ausgesendeter Schallimpuls, der von einem Objekt reflektiert worden ist wieder im Gerät eintrifft. Aus der Laufzeit der Schallwelle und der Schallgeschwindigkeit rechnet der CBR die Entfernung aus. Durch Bildung des Differenzenquotienten bei multiplen Messungen, kann auf die Momentangeschwindigkeit und die -beschleunigung geschlossen werden.

Versuchsaufbau / verwendete Geräte

Neben dem CBR, das über ein GraphLink Kabel mit dem PC verbunden ist, sind keine zusätzlichen Geräte erforderlich.

Versuchsdurchführung

Bei Programmstart ist neben dem Fenster mit den Online-Anweisungen ein Weg-Zeit-Diagramm geöffnet. Außerdem stehen 6 Beispielfunktionen zur Verfügung.

Im ersten Schritt wird im Arbeitsblatt ein Beispiel eines Weg-Zeit-Diagrammes analysiert. Gefragt wird nach er Anzahl und Größe der Schritte, die bei der Aufzeichnung der Beispieldatei gemacht worden sind.

Dann wird man angehalten, einige der 6 Beispielfunktionen möglichst genau zu treffen. Dazu wird das betreffende Bild des Diagrammes geöffnet und einem Fenster zugewiesen. Im Fenster daneben wird das Weg-Zeit-Diagramm der eigenen Bewegung aufgenommen. Eines der vorgegebenen Diagramme ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Verschiedene Fragen am Arbeitsblatt zur Interpretation von Weg und Geschwindigkeit runden das Experiment ab.

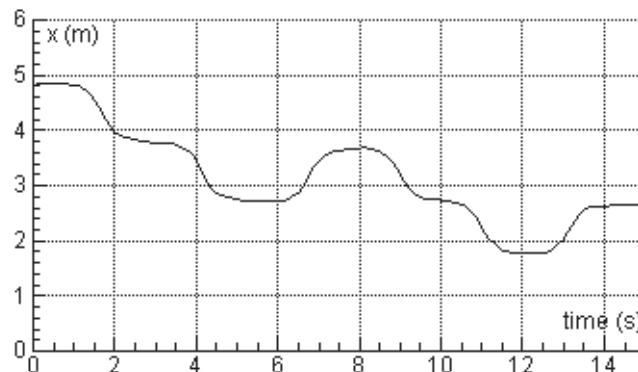


Abbildung 4.1: Beispiel-Diagramm aus dem Experiment „Weg-Zeit-Diagramme treffen“. Über der Zeit *time* wird der Abstand *x* des Experimentators zur Wand aufgetragen.

Ausblick / Erweiterungsmöglichkeiten

Einen Schwierigkeitsgrad höher wäre, nicht ein Weg-Zeit-, sondern ein Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm zu treffen. Speziell die negative Geschwindigkeit, die entsteht, wenn man sich auf die Wand zu bewegt, bedarf näherer Untersuchung.

Interessant ist dann auch zu klären, ob es für ein Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm mehrere Möglichkeiten für den Weg gibt.

4.3.2 Messen der Fallbeschleunigung

Kurzfassung

Ein Holzlineal mit äquidistanten Bohrungen fällt durch eine Lichtschranke. Aus den abnehmenden Zeitabschnitten, die für die Zurücklegung der Strecken zwischen zwei benachbarten Löchern benötigt werden, wird auf die Fallbeschleunigung geschlossen.

Einleitung

In diesem Experiment wird nicht nur mit verhältnismäßig geringem Aufwand die Fallbeschleunigung g ermittelt, sondern auch gezeigt, dass der freie Fall eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist.

Dazu wird ein Holzlineal, welches in regelmäßigen Abständen Bohrungen aufweist, durch eine Lichtschranke, bestehend aus Taschenlampe und Lichtsensor, fallen gelassen. Sobald der Lichtstrahl zum ersten mal unterbrochen wird, startet die Messung. In COACH wird in einem Diagramm die Lichtintensität I des Lichtsensors über der Zeit t aufgetragen. Die Kurve zeigt kleine Spitzen, immer wenn der Lichtstrahl durch ein Loch im Lineal hat dringen können.

In einem weiteren Fenster wird aus den Zeitdifferenzen zwischen den Maxima und dem zurückgelegten Weg x die Geschwindigkeit v und die Beschleunigung g ausgerechnet. Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung werden in einem Diagramm über der Zeit aufgetragen und zur Auswertung im Arbeitsblatt diskutiert.

Didaktische Ziele

Das Experiment soll vor Augen führen, dass der freie Fall eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist. Die Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdiagramme einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung sollen wiederholt und gefestigt werden.

Theoretischer Überblick

Lässt man einen Körper auf die Erde fallen, so nimmt seine Geschwindigkeit v fortlaufend zu, sieht man vom Luftwiderstand ab. Die Geschwindigkeit v wächst proportional zur Fallzeit t . Der Proportionalitätsfaktor a gibt die Geschwindigkeitsänderung, die Beschleunigung an. Sei x der zurückgelegte Weg und g die Fallbeschleunigung, dann gilt für der freien Fall:⁶

$$x = \frac{1}{2}gt^2 \quad (4.1)$$

$$v = gt \quad (4.2)$$

$$g = \textit{konstant} \quad (4.3)$$

Die Beschleunigungsfunktion ist daher konstant, die Geschwindigkeitsfunktion linear und die Wegfunktion quadratisch.

Versuchsaufbau / verwendete Geräte

Im Beispiel wird eine 50 cm lange Buchenholzschiene mit 2,5 cm Breite und 7 mm Stärke als Lineal verwendet. Die 5 Bohrungen sind als 5 mm breite und 15 mm lange Querslitze realisiert worden.

Die Lichtschranke besteht aus einer Stabtaschenlampe und dem TI-Lichtsensor, der an ein CBL angeschlossen wird. Das CBL wiederum ist über ein GraphLink Kabel mit dem PC verbunden. Abbildung 4.2 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus.

Versuchsdurchführung

Bei Programmstart sind neben dem Video und dem Begleittext noch ein Diagramm und eine Tabelle geöffnet. Das „I-t-Diagramm“ zeigt über der

⁶Für nähere Informationen siehe [20], Seite 30.

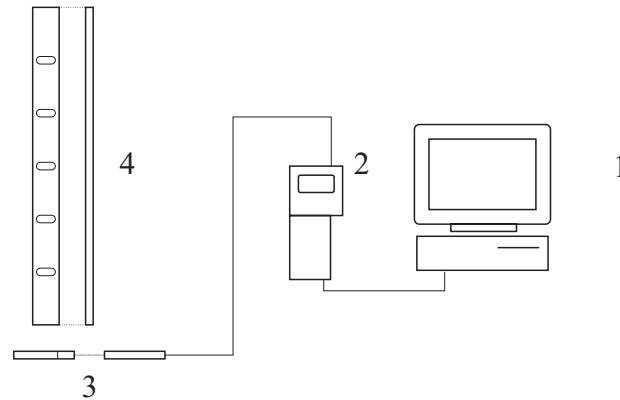


Abbildung 4.2: Versuchsaufbau zum Experiment „Messen der Fallbeschleunigung“. Stückliste: (1) PC mit COACH, (2) CBL, (3) Lichtschranke bestehend aus einer Stabtaschenlampe und einem Lichtsensor, (4) Holzlineal mit äquidistanten Schlitzbohrungen (Auf- und Kreuzriss).

Zeit die Lichtintensität des Lichtsensors in %. Die Tabelle hat die Spalten „Zeit“, „Weg“, „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“. Außerdem steht zur Tabelle noch das entsprechende Diagramm zur Verfügung.

Das CBL ist durch die Voreinstellungen so programmiert, dass die Datenaufnahme selbstständig startet, sobald die Lichtschranke zum ersten Mal unterbrochen wird. Zur Messung wird das Holzlineal aus geringer Höhe so durch die Lichtschranke fallen lassen, dass der Lichtstrahl der Taschenlampe durch die Öffnungen im Lineal dringen kann.

Aus dem „I-t-Diagramm“ werden mit der Funktion „Scan“ die Extrema markiert. Abbildung 4.3 zeigt ein Beispiel dieses Diagrammes. Jedesmal, wenn ein Schlitz im Lineal die Lichtschranke passiert, kann das Licht der Lampe in den Sensor dringen. Im Diagramm ist dies als kleines Maximum der Lichtintensität über der Zeit zu erkennen. Dabei wird in der Tabelle automatisch die Zeile ausgewählt, welche der Zeit des markierten Maximums entspricht. In die Spalte „Weg“ wird manuell der zurückgelegte Weg des Lineals bis zur entsprechenden Bohrung eingetragen. Das der Tabelle entsprechende Diagramm wird geöffnet. Die einzelnen Messpunkte für die Wegstrecken sind über der Zeit als Kreuze eingetragen.

In diese Messpunkte wird eine Kurve eingepasst. Es stellt sich heraus, dass eine Kurve der Form $f(x) \mapsto ax^2 + bx + c$ mit $a, b, c \in \mathbf{R}$ sich mit geringstem

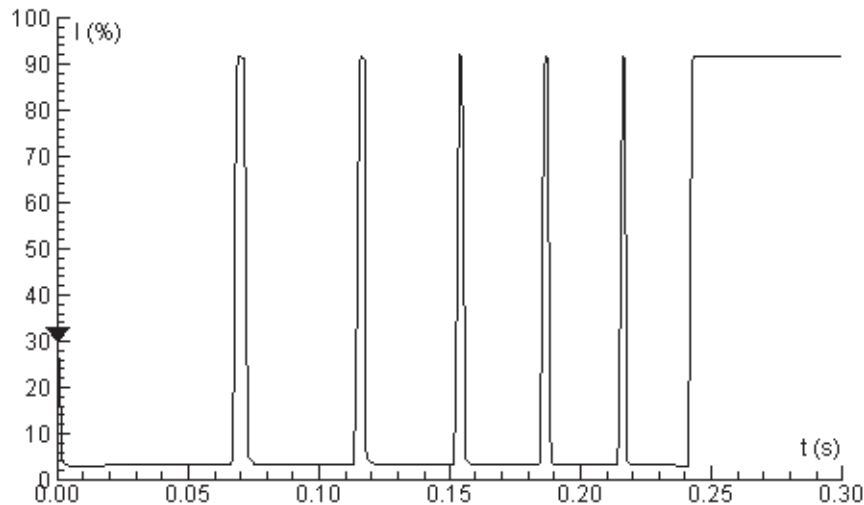


Abbildung 4.3: Diagramm aus dem Experiment „Messung der Fallbeschleunigung“. Über der Zeit *time* ist die Lichtintensität *I* der Lichtschranke aufgetragen. Die Maxima entstehen, wenn beim Durchfallen die Bohrungen im Lineal die Lichtschranke passieren.

Fehler einpassen lässt. Diese Kurve ersetzt die einzelnen Messpunkte.

Daraus werden die Geschwindigkeit v und die Beschleunigung g von COACH durch Bildung der ersten bzw. zweiten Ableitung errechnet und im Diagramm aufgetragen. Die konstante Funktion g über der Zeit gibt die Fallbeschleunigung an. In Abbildung 4.4 sieht man ein Beispiel dieses Diagrammes. Aus der quadratischen Weg-Zeit-Kurve entsteht eine konstante Beschleunigungskurve mit Wert knapp unter 10.

Die beiden Diagramme werden in das Arbeitsblatt kopiert und diskutiert. Sind dort alle Fragen beantwortet, so ist das Experiment beendet.

Ausblick / Erweiterungsmöglichkeiten

Anstatt der Holzschiene kann auch ein transparentes Plexiglaslineal verwendet werden. An Stelle der Schlitzes wird an den betreffenden Stellen ein schmaler Streifen aus undurchsichtigem Klebeband angebracht. Das „Lichtintensitäts-Zeit-Diagramm“ invertiert sich in diesem Fall – aus den Maxima

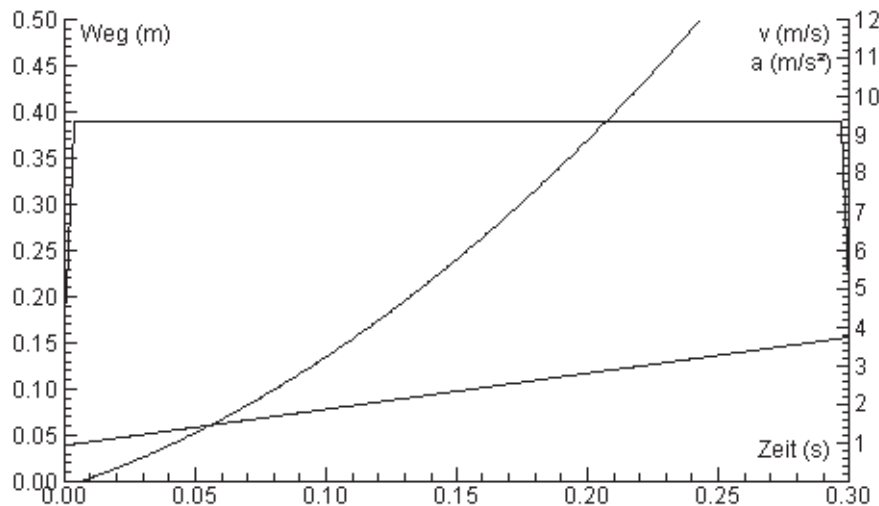


Abbildung 4.4: Diagramm aus dem Experiment „Messung der Fallbeschleunigung“. Über der Zeit *time* sind Strecke x (parabelförmig), Geschwindigkeit v (linear) und Beschleunigung a (konstant) aufgetragen.

werden Minima.

4.3.3 Gleit- und Haftreibung

Kurzfassung

Von einem Holzquader auf einer Papierunterlage wird mit einem Kraftsensor die Kraft ermittelt, die nötig ist, den Körper aus der Ruhelage zu bewegen. Daraus wird die Haft- und Gleitreibungszahl für Holz auf Papier ermittelt. Auflagefläche, Masse des Körpers und Material der Unterlage können variiert werden.

Einleitung

Auf einem Blatt Papier, das mit Klebeband am Tisch fixiert ist, wird ein Holzquader mit Auflagefläche A und Masse m mit einem Kraftsensor verbunden. Durch leichtes Anziehen am Sensor wird das Holz in Bewegung versetzt.

Aus den Messdaten des Sensors wird mit COACH die Haftreibungszahl μ_H und die Gleitreibungszahl μ_G bestimmt.

Durch Ziehen des Quaders auf der schmälere Fläche bei Hinzugabe von Massestücken wird der Einfluss von Masse m und Fläche A auf die Reibungskräfte F_G und F_H untersucht. Außerdem kann die Unterlage durch andere Materialien ersetzt werden.

Didaktische Ziele

Durch Auflegen von Massestücken soll der Schüler den Zusammenhang zwischen Masse und Reibungskraft erkennen. Stellt man den Quader auf seine Schmalseite und wiederholt den Versuch, so ändert sich an der Reibungskraft wenig. Dieser Einfluss der Auflagefläche auf die Reibungskraft soll erkannt werden. Außerdem soll durch Änderung der Unterlage erkannt werden, dass die Angabe eines Reibungskoeffizienten nur für ein Stoffpaar sinnvoll sind.

Theoretischer Überblick

Um einen liegenden Körper zu verschieben muss erst seine Haftreibung bezüglich der Unterlage überwunden werden. Bewegt er sich schließlich, so wirkt die Gleitreibungskraft F_G der treibenden Kraft entgegen. Es gilt:⁷

$$F_G = \mu_G F_N \quad (4.4)$$

$$F_H = \mu_H F_N \quad (4.5)$$

Dabei ist F_H die Haftreibungskraft und F_N die Normalkraft, mit welcher der Körper an die Oberfläche gedrückt wird. Die Größe μ_G ist die Gleitreibungs- und μ_H die Haftreibungszahl. Die Gleitreibungszahl ist stets kleiner als die Haftreibungszahl.

Versuchsaufbau / verwendete Geräte

Als Versuchskörper kommt ein $10 \times 6 \times 3$ cm Holzquader zum Einsatz. An einer Schraubenöse wird dieser über einen Faden mit dem Kraftsensor verbunden. Der Kraftsensor ist am CBL angeschlossen, welches wiederum mit

⁷Für nähere Informationen siehe [20], Seite 36, oder [10], §21.

dem GraphLink Kabel am PC angesteckt ist. Als Unterlagen bieten sich verschiedene Sorten Papier an, die mit Klebeband am Tisch gegen Abrutschen gesichert werden. Abbildung 4.5 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus.

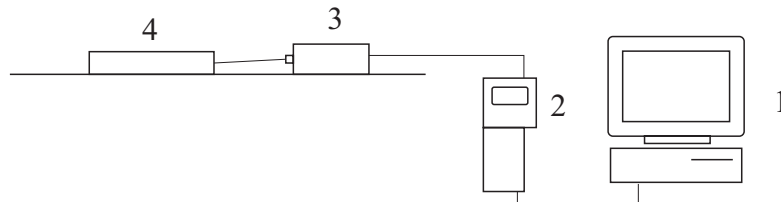


Abbildung 4.5: Schematischer Versuchsaufbau zum Experiment „Gleit- und Haftreibung“. Stückliste: (1) PC mit COACH, (2) CBL, (3) Kraftsensor, (4) Holzquader (liegend) auf Papierunterlage.

Versuchsdurchführung

Beim Start des Programmes steht neben Video und Begleittext noch ein „Kraft-Zeit-Diagramm“ zur Verfügung. Das CBL ist so eingestellt, dass die Datenaufnahme selbstständig startet, nachdem ein Schwellenwert für die Kraft im Sensor überschritten wird.

Die Messung wird gestartet, indem ganz vorsichtig und möglichst gleichmäßig am Kraftsensor angezogen wird, bis sich der Holzquader bewegt. In COACH werden die Daten im Diagramm über der Zeit aufgetragen. Mit der Funktion „Scan“ wird der Maximalwert der Kraft ausgelesen und in eine Tabelle im Arbeitsblatt als Haftreibungskraft „ F_H “ eingetragen. Weiters sind in der Tabelle Spalten für „Auflagefläche A “, „Masse m “ des Quaders, „Normalkraft F_N “ und „Gleitreibungskraft F_G “ des Körpers vorgesehen. Das F_G lässt sich ebenfalls mit „Scan“ ermitteln und zwar als die (konstante) Kraft, die nötig ist, den Körper in Bewegung zu halten.

Die Größen A und m (damit auch F_N) werden variiert und die betreffenden Ergebnisse in die Tabelle eingetragen. Zusätzlich werden in zwei Extraspalten der Tabelle nach Gleichung 4.4 und 4.5 das μ_G und das μ_H errechnet.

In einem weiteren Experiment wird die Gleit- und Haftreibungszahl vom Holzquader auf unterschiedlichen Papiersorten bestimmt. Dazu wird der Versuch wie oben beschrieben durchgeführt, jedoch auf den betreffenden Papier-

sorten. Im Arbeitsblatt sind in einer Tabelle einzutragen: „Papiersorte“, „ F_H “ und „ F_G “. In weiteren Spalten werden μ_G und μ_H errechnet.

Ein Kraft-Zeit-Diagramm wird in das Arbeitsblatt kopiert. Sind alle Fragen beantwortet, dann ist das Experiment beendet.

Ausblick / Erweiterungsmöglichkeiten

Neben der Änderung der Unterlage könnte auch der Holzquader durch andere Materialien und Oberflächen ersetzt werden. Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit könnte so gezeigt werden.

Die Schwingungen im Kraft-Zeit-Diagramm zwischen Haft- und Gleitreibungskraft könnten auch näher untersucht werden, besonders bei Materialien, die klebrig sind.

4.3.4 Die Bewegung auf der Fahrbahn

Kurzfassung

Mit dem CBR (Bewegungssensor) wird die Bewegung eines waagrecht fahrenden Wagens untersucht, der mit einem über eine Umlenkrolle geführten Faden mit einem frei fallenden Massestück verbunden ist. Die Masse des Wagens und die beschleunigende Masse können variiert werden.

Der CBR nimmt ein Weg-Zeit-Diagramm auf, das im Computer mit COACH weiterverarbeitet wird.

Einleitung

Etwa 2000 Jahre lang hielt sich die Meinung Aristoteles' (384 - 322 v. Chr.), dass man einen Körper bei konstanter Geschwindigkeit halten könne, sofern man auf ihn eine gleichbleibende Kraft ausübt. Erst im Jahr 1687 veröffentlichte Sir Isaak Newton seine „Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica“, in denen erstmals der heute noch gültige Trägheitssatz formuliert wurde[9]. Dieser besagt, dass eine auf einen Körper konstant wirkende Kraft nicht eine gleichbleibende Geschwindigkeit, sondern eine gleichbleibende Beschleunigung hervorruft.

Diese Erkenntnis, welche durch die Erfahrung nicht bestätigt wird – schließlich muss man ja beim Geradeausfahren auf der Ebene mit dem Fahrrad Kraft aufwenden – stellt einen zentralen Punkt in der klassischen Mechanik dar. Ein tieferes Verständnis der Materie ist für Schüler deshalb unumgänglich. Im folgenden Experiment werden mittels CBR Weg-Zeit-Tabellen eines Experimentierwagens mit definierter Masse m_1 aufgenommen, der mit einer Schnur, welche über eine Umlenkrolle geführt wird, mit einem frei fallenden Massestück m_2 verbunden ist. Der Wagen läuft möglichst reibungsarm auf einer Aluminiumschiene. Aus den gewonnenen Daten des CBR werden im Programm COACH verschiedene Diagramme erzeugt, mit Hilfe derer die unterschiedliche Beschleunigung bei Variation der Massen m_1 und m_2 bestimmt wird.

Didaktische Ziele

Das wesentliche didaktische Ziel ist die historische Erkenntnis, dass Kraft gleich Masse mal Beschleunigung ist. Gewonnen wird diese durch Variation der Massen m_1 des Wagens und der Masse m_2 am Faden mit anschließender Berechnung der erzielten Beschleunigung mit COACH.

Im Versuchsablauf wird man vor das Problem gestellt, dass Weg-Zeit-Diagramme verschiedener Messdurchgänge nur schwer verglichen werden können, da die Messung per Hand ausgelöst wird und somit der Wagen nie zum selben Zeitpunkt startet. Abhilfe wird durch ein Weg-Geschwindigkeits-Diagramm geschaffen. Dieses gibt Auskunft über die Momentangeschwindigkeit des Experimentierwagens zu jedem Zeitpunkt der Messung. Es besteht auch die Möglichkeit, die Zeit-Geschwindigkeits-Diagramme der beiden Durchgänge durch Verschieben zur Deckung zu bringen.

Theoretischer Überblick

Der auf einer Schiene frei laufende Experimentierwagen habe die Masse m_1 und sei mit einer Schnur mit der frei fallenden Masse m_2 verbunden. Die im Experiment zu bestätigende Grundformel $F = m \cdot a$ bedarf keiner näheren Erläuterung.⁸ Interessant ist jedoch die Überlegung, wie groß die Kraft im

⁸Siehe gegebenenfalls [9]

Faden zwischen Wagen und Masse m_2 während des Versuches ist. Die Zugkraft F_1 entspricht nicht der Kraft, die durch den freien Fall der Masse m_2 entsteht – sie ist kleiner. Der Grund für dieses überraschende Ergebnis liegt darin, dass auch die Masse m_2 eine beschleunigte Bewegung durchführt, die eine Kraft F_2 erfordert. Es gilt:⁹

$$F_1 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} g$$

$$F_2 = \frac{m_2^2}{m_1 + m_2} g$$

Erst die Summe der Kräfte F_1 und F_2 entspricht der durch die Masse m_2 hervorgerufenen Kraft $m_2 \cdot g$.

Im klassischen Versuchsaufbau ist eine Messung der Zugkraft nicht vorgesehen, doch kann diese leicht mittels eines am Wagen befestigten Kraftsensors¹⁰ realisiert werden. Die Schnur mit dem Massestück m_2 wird dann direkt am Sensor befestigt.

Versuchsaufbau / verwendete Geräte

Neben dem CBR wurden bis auf die Umlenkrolle ausschließlich Teile des NTL-Schülerexperimentiersets „Mechanik 1 & 2“ verwendet. Natürlich können auch Produkte anderer Hersteller verwendet werden. Es ist darauf zu achten, dass der Experimentierwagen eine genügend große Reflexionsfläche für den CBR Messstrahl aufweist. Gegebenenfalls leistet ein mit Klebeband befestigtes Stück Karton am Wagen gute Dienste. Abbildung 4.6 zeigt eine schematische Darstellung der Versuchsanordnung zum Experiment. Der CBR hat eine Mindestmessweite von 40cm , die aus Platzgründen in der Zeichnung nicht maßstabsgetreu wiedergegeben ist. Zum Auffangen der frei fallenden Masse und des Wagens empfiehlt sich ein Kunststoffeimer mit einem schweren Tuch (Tafeltuch). Soll neben dem CBR noch ein zusätzlicher Sensor (etwa: Kraftsensor) eingesetzt werden, so ist dieser und das CBR an ein CBL anzuschließen. Die Messung wird in diesem Fall am CBL gestartet.

⁹Details und Herleitung der Formeln in [20], Seite 42.

¹⁰z.B. Verniers Student-force-sensor, mit Messbereich -17N bis 17N

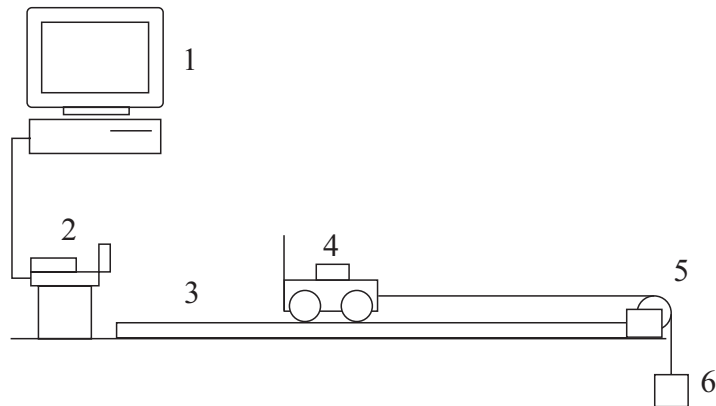


Abbildung 4.6: Skizze des Versuchsaufbaus zum Experiment „Bewegung auf der Fahrbahn“. Stückliste: (1) Computer mit COACH, (2) CBR, (3) Aluminiumschiene, (4) Experimentierwagen mit Masse m_1 und Reflektorfläche aus Karton, (5) Umlenkrolle, (6) Masse m_2 .

Versuchsdurchführung

Durch Aufbringen von Schlitzgewichten auf den Experimentierwagen und den Gewichtsteller sind die vorgegebenen Massen m_1 und m_2 einzustellen. Der Faden wird über die Umlenkrolle gelegt und der Wagen zur Startposition zurückgezogen und festgehalten. Durch Drücken der „Trigger“-Taste am CBR misst dieser 2 Sekunden lang mit einer Abtastrate von 50Hz den Abstand zum Wagen. Gleich nach Start der Messung wird der Wagen losgelassen. Die Masse m_2 am Faden beschleunigt diesen in Richtung Umlenkrolle.

Die nun im CBR gespeicherten Messdaten werden in COACH durch den Befehl „Get result“ in den Computer eingelesen und weiterverarbeitet. COACH erstellt zur Datenanalyse aus den Messdaten folgende Diagramme:

- Zeit-Weg-Diagramm
- Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm
- Weg-Geschwindigkeits-Diagramm

Mit Hilfe dieser soll der Experimentator die Bewegung deuten können und die Grundformel für die Bewegung, $F = m \cdot a$, verifizieren. Er wird dazu aufgefordert, eines der erhaltenen Diagramme in das Arbeitsblatt zu kopieren und dort zu diskutieren.

Ausblick / Erweiterungsmöglichkeiten

Für besonders Interessierte Experimentatoren bietet sich als Ergänzung zum Versuch die Überlegung an, wie groß die Zugkraft im Faden während des Versuchsablaufs ist.¹¹ Die Proportionalitäten dieser Zugkraft könnten mittels eines Kraftsensors, der am Wagen befestigt wird, experimentell angenähert werden.

4.3.5 Die Bewegung auf der schiefen Ebene

Kurzfassung

Mit dem CBR wird die Bewegung eines Wagens registriert, der eine geneigte Schiene hinunterrollt. Aus den Messdaten berechnet COACH die Beschleunigung des Wagens. Es soll nun untersucht werden, wovon der Betrag dieser Geschwindigkeitszunahme abhängt. Variabel sind die Masse des Wagens und die Neigung der Schiene zur Ebene.

Einleitung

Versuche mit schiefen Ebenen haben eine große historische Bedeutung. Galilei benutzte bekanntlich eine Kugel in einer Fallrinne dazu, den sehr schnellen und zu damaligen Zeiten schwer messbaren freien Fall verlangsamt zu simulieren[2]. Er kam zu dem Ergebnis, dass die zurückgelegten Wegstrecken der Kugeln sich wie die Quadrate der Zeiten verhielten.

In diesem Versuch soll der Experimentator die Zusammenhänge zwischen Neigung der Ebene, Masse des Wagens und erreichter Beschleunigung herausfinden. Bei eingestelltem Neigungswinkel der Schiene und definierter Masse des Wagens wird mittels CBR und COACH die erreichte Beschleunigung ermittelt. Die Variation des Winkels und der Masse in weiteren Durchgängen soll zum Ergebnis führen. Auf das beigegefügte Arbeitsblatt sind mit COACH erstellte Messdiagramme zu kopieren und zu diskutieren. Außerdem sind dort noch Fragen zum Thema zu beantworten.

¹¹Vergleiche Abschnitt „Theoretischer Überblick“.

Didaktische Ziele

Bei vielen Schülern ist der Gedanke fest verwurzelt, dass auf einer schiefen Ebene die Masse des bewegten Körpers direkt mit der erreichten Endgeschwindigkeit, bzw. mit der Beschleunigung zusammenhängt. Danach sollte ein korpulenter Schiläufer gegenüber einem schlanken beim Abfahrtslauf Vorteile genießen. Ein Ziel dieses Experiment soll sein, die Rolle der Masse des bewegten Wagens auf der schiefen Ebene herauszufinden. Da die Messdaten aus dem CBR in COACH zu Diagrammen verarbeitet werden, kommt der Deutung von Diagrammen auch ein wesentlicher didaktischer Punkt zu.

Theoretischer Überblick

Der Wagen mit Masse m kann sich mit vernachlässigbar kleiner Reibung auf der Schiene, die um den Winkel φ zur Horizontalen geneigt ist, bewegen. Angetrieben wird er durch die zur Schiene parallelen Komponente F_{\parallel} der Gewichtskraft F des Wagens. Durch Zerlegung der Kraft F in F_{\perp} und F_{\parallel} ergibt sich für die treibende Komponente $F_{\parallel} = F \sin \varphi$. Da gilt, dass $F = ma$, erhält man durch Einsetzen für die Bewegung des Wagens auf der Ebene:

$$\begin{aligned} ma &= mg \sin \varphi & \text{oder} \\ a &= g \sin \varphi \end{aligned}$$

Die Masse m in der Gleichung lässt sich kürzen. Mit anderen Worten:

Die Masse hat auf die Bewegung keinen Einfluss.¹²

Da eine konstante Kraft F_{\parallel} in Fahrtrichtung auf den Wagen wirkt, handelt es sich nach dem Trägheitsgesetz¹³ um eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Dabei ist der zurückgelegte Weg $s = \frac{1}{2}gt^2$. Der quadratische Zusammenhang zwischen s und t lässt darauf schließen, dass

der zurückgelegte Weg mit dem Quadrat der Laufzeit wächst.

¹²von der sich ändernden Reibungskraft bei unterschiedlicher Masse wird hier abgesehen

¹³Siehe [20], Seite 32.

Versuchsaufbau / verwendete Geräte

Alle im Experiment verwendeten Geräte sind Bestandteil des Schüler – Experimentierkits „Mechanik 1 & 2“ von NTL. Zur Neigung der Aluminiumschiene wurde auf einer Seite eine 10 cm Stativstange angeschraubt. Eine Federwaage (bis max. 2 N) zur Ermittlung der treibenden Kraft, ein Winkelmesser und ein Maßband zur Bestimmung der Neigung sind beizulegen. Abbildung 4.7 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus zum Experiment. Der Abstand zwischen CBR und Wagen ist aus Platzgründen nicht maßstäblich gezeichnet – er muss mindestens 40 cm betragen. Damit der Wagen nach der Beschleunigungsphase auf der Rampe sicher angehalten wird, empfiehlt sich ein Stück Schaumgummi, welches gegen Wegrutschen gesichert ist. Der CBR kann direkt über das TI-GraphLink Kabel an den PC angeschlossen werden.

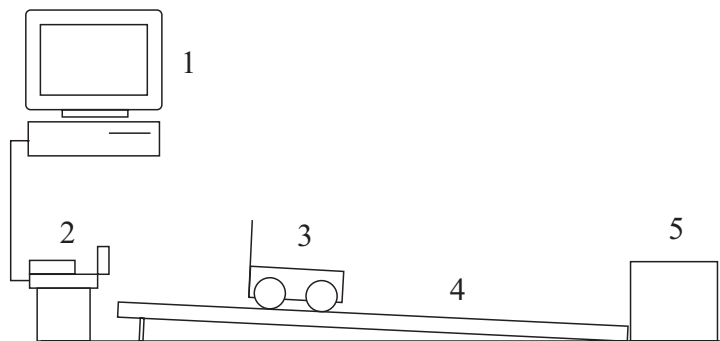


Abbildung 4.7: Skizze des Versuchsaufbaus zum Experiment „Bewegung auf der schiefen Ebene“. Stückliste: (1) Computer mit COACH, (2) CBR, (3) Experimentierwagen mit Reflektorfläche aus Karton, (4) geneigte Aluminiumschiene mit kurzer Stativstange, (5) gegen Abrutschen gesicherte Schaumgummibarriere.

Versuchsdurchführung

Auf dem dem Experiment beigelegten Arbeitsblatt ist eine Tabelle mit unterschiedlichen Kombinationen für Masse m des Wagens und Neigungswinkel φ (bzw. Höhen h) der Rampe vorgegeben. Einzutragen sind die Laufzeit des Wagens, seine erreichte Höchstgeschwindigkeit, sowie die erfahrene Beschleunigung und die Größe der treibenden Kraft in Fahrtrichtung. Letztere wird

nach Wahl der Masse und der Neigung (bzw. Höhe) mit einer Federwaage bestimmt. Der CBR ist programmiert, 5 Sekunden lang mit einer Abtastrate von 20 Hertz zu messen. Die Messung wird per Hand durch Drücken der Taste „Trigger“ am CBR gestartet.

Nach dem Einlesen der Daten durch COACH werden am Bildschirm ein Zeit-Weg- und ein Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm gezeichnet. Dem Letzteren ist zusätzlich der Beschleunigungsgraf beigelegt. Nach dem ersten Messdurchgang sind die beiden Diagramme in das Arbeitsblatt zu kopieren und zu diskutieren. Da nach jeder Messung die Kurven überschrieben werden,¹⁴ ist darauf zu achten, dass die Daten rechtzeitig im Arbeitsblatt eingetragen werden.

Ausblick / Erweiterungsmöglichkeiten

Die Theorie und das Experiment beweisen, dass die Masse des bewegten Körpers keinerlei Einfluss auf die erreichte Beschleunigung auf der schiefen Ebene hat. Und doch gibt es Beispiele, die das Gegenteil vermuten lassen. So versucht man im Sport, Wettkampfrodeln möglichst schwer zu machen. Der Grund dafür ist, dass der Druck auf die Bahn dadurch größer wird und das Eis lokal unter den Kufen schmelzen lässt. Eis von 0 °C hat einen niedrigeren Reibungskoeffizient als kälteres. Auch wenn eine genauere Untersuchung für Schüler der 5. Klasse schwierig ist, könnte man wenigstens auf die Problematik hinweisen.

Die schiefe Ebene wird auch im Beispiel „Kraftstoss“ auf Seite 85 zur gezielten Beschleunigung eines Objektes verwendet.

4.3.6 Die Bewegung auf der schiefen Ebene (Videoanalyse)

Kurzfassung

Mittels Videoanalyse wird die Bewegung eines Wagens mit variabler Masse untersucht, der eine schiefe Ebene mit einstellbarer Neigung hinunterrollt.

¹⁴Näheres dazu im Abschnitt „Messungen vornehmen“ mit COACH auf Seite 39.

Einleitung

Auf die Bedeutung des Experiments wurde schon in der Einleitung des Abschnittes 4.3.5 hingewiesen. Falls für die Durchführung des Versuchs wenig Zeit zur Verfügung steht, oder die Experimentieranordnung nicht verfügbar ist, so bietet sich die Videoanalyse hervorragend an. Anstatt die Masse des Wagens und die Neigung der Ebene zu variieren, untersucht man hier unterschiedliche Videos mit den entsprechenden Einstellungen. Für drei verschiedene Werte für Neigungen sind je 4 Videos mit unterschiedlichen Wagenmassen gespeichert. Die Untersuchung der einzelnen Filmsequenzen liefert den im Theorieteil des Abschnitts 4.3.5 näher erläuterten Zusammenhang:

Die zurückgelegten Wege verhalten sich wie die Quadrate der Laufzeiten und die Beschleunigung ist von der Masse unabhängig.

Wie in allen vorliegenden COACH-Experimenten ist auch hier ein Arbeitsblatt zugefügt. Ein Diagramm der Messung wird dorthin kopiert und diskutiert. Die Fragen sind analog zu dem der konventionellen Messung im Abschnitt 4.3.5.

Versuchsdurchführung

Bei Programmstart wird bereits ein Beispielfideo angezeigt. Das Bild ist schon kalibriert und die Koordinatenachsen so eingestellt, dass die x-Achse genau in Fahrtrichtung des Wagens zeigt.¹⁵ Auf diese Art kann auf die y-Achse verzichtet werden und der Analysevorgang vereinfacht sich beträchtlich. Mit diesen Voreinstellungen kann bereits mit der Untersuchung begonnen werden.

Im Fenster unter dem Video ist das für die Analyse zugehörige Diagramm, in dem als Graf der zurückgelegte Weg über der Bildnummer angezeigt wird. Zusätzlich wird im Fenster noch ein Geschwindigkeitsgraf von der Bewegung aufgenommen. Obwohl der Weg-Zeit-Graf einer quadratischen Kurve recht nahekommt, ist die Geschwindigkeitskurve sehr zackig. Der Grund liegt in der Berechnung der Geschwindigkeit aus dem Differenzenquotienten des Weges

¹⁵Für nähere Informationen zur Videoanalyse siehe Abschnitt 3.4.2.

– eine kleine Unstetigkeit zeigt sich sehr verstärkt im Grafen. Deshalb bedient man sich der Kurvoneinpassungsfunktion von COACH. Es zeigt sich, dass eine Polynomfunktion 2. Ordnung sich mit dem kleinsten Fehler einpassen lässt. Man ersetzt die Messkurve durch die eingepasste und erhält für Geschwindigkeit und Beschleunigung vernünftige Werte.

Bevor das nächste Video zur Analyse geladen wird, wechselt man zum Arbeitsblatt und trägt die erhaltenen Ergebnisse in eine vorgefertigte Tabelle ein. Es ist natürlich nicht vorgesehen, dass alle Videos durchgearbeitet werden. Um den Einfluss der Masse auf die Beschleunigung zu bestimmen, reicht aus, wenn man erst die Sequenz mit der kleinsten und dann die mit der größten Masse untersucht. Ähnlich kann mit der Erforschung der Einwirkung der Neigung der Ebene vorgegangen werden. Das nächste Video ist wieder zu kalibrieren und die Koordinatenachsen sind neu einzurichten, bevor mit der Messung begonnen werden kann.

Ausblick / Erweiterungsmöglichkeiten

Wählt man das Koordinatensystem nicht parallel zur Fahrtrichtung sondern parallel zum Bildrand, so muss die Bewegung entlang der Schiene aus den beiden Koordinatenrichtungen zusammengesetzt werden. Zur Verifizierung des Unabhängigkeitsprinzips von Bewegungen¹⁶ könnten die Geschwindigkeiten in den Koordinatenrichtungen getrennt untersucht werden.

Die Funktion der Kurvoneinpassung könnte auch ausgereizt werden, indem man nicht den Rechner die beste Annäherung bestimmen lässt, sondern der Anwender selbst durch probieren die besten Kurvenparameter findet.

4.3.7 Energiebetrachtungen am Fadenpendel

Kurzfassung

Ein Fadenpendel wird bis zu einer bestimmten Höhe ausgelenkt und losgelassen. Ein CBR misst die erreichte Geschwindigkeit am tiefsten Punkt und ermöglicht damit eine Untersuchung der Lage- und Bewegungsenergie des Pendels.

¹⁶Nähere Informationen zum Unabhängigkeitsprinzip der Bewegungen in [10], §23.

Einleitung

Ohne beträchtlichen Aufwand ist man bei der Bestimmung der kinetischen Energie meist darauf angewiesen, die Geschwindigkeit indirekt aus der Fallzeit zu bestimmen. Diese Berechnung trägt zum eigentlichen Experiment wenig bei. Mit dem CBR ist es auf eine unkomplizierte Art möglich, die Maximalgeschwindigkeit zu erhalten und sich auf das Wesentliche des Versuchs zu konzentrieren.

Für unterschiedliche Fallhöhen einer an einem Faden schwingenden Kugel wird mit dem CBL die Geschwindigkeit im tiefsten Punkt bestimmt. Aus den Daten der Höhe und Geschwindigkeiten soll verifiziert werden, dass die potentielle Energie bei Versuchsbeginn am tiefsten Punkt vollkommen in kinetische übergegangen ist.

Didaktische Ziele

Der Zusammenhang zwischen Fallhöhe und erreichter Geschwindigkeit soll die Begriffe „potentielle Energie“ und „kinetische Energie“ festigen und den Erhaltungssatz der Energie verifizieren. Das Ablesen und Deuten des mitunter komplizierten Weg-Zeit- bzw. des Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammes dieser schwingenden Bewegung dient zusätzlich als gute Übung.

Theoretischer Überblick

Dem Versuch liegt der „Erhaltungssatz der Energie“ zugrunde, der wie folgt formuliert werden kann:

In einem abgeschlossenen System bleibt die Gesamtenergie konstant. Die einzelnen Energieformen können sich ineinander umwandeln.

Die Gesamtenergie E setzt sich zusammen aus der potentiellen (oder Lage-) Energie E_{pot} und der kinetischen (oder Bewegungs-) Energie E_{kin} . Es gilt:¹⁷

$$E_{pot} = mgh \quad \text{und} \quad (4.6)$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.7)$$

¹⁷Für Herleitungen und nähere Hinweise siehe [20] Seite 49, 50.

Bei der Auslenkung des Pendels auf die Höhe h wird dem Körper die potentielle Energie E_{pot} erteilt. Diese wird beim Schwingen zunehmend in kinetische Energie umgewandelt, bis schließlich am tiefsten Punkt des Pendels alle Energie in Geschwindigkeit v transformiert ist. Es können also in diesem Punkt die potentielle und die kinetische Energie gleichgesetzt werden:

$$\begin{aligned} E_{kin} &= E_{pot} \\ \frac{1}{2}mv^2 &= mgh \\ v &= \sqrt{2gh} \end{aligned}$$

Durch messen der Höhe h und der Geschwindigkeit v soll der Erhaltungssatz der Energie verifiziert werden.

Versuchsaufbau / verwendete Geräte

Als schwingender Körper ist ein glatter Tennisball gut geeignet, der mit einer Schnur an einem Stativ befestigt ist. Der Filz auf der Oberfläche des Balles absorbiert einen Teil der vom CBR ausgesandten Schallimpulse und wird deshalb am besten durch Abbrennen entfernt. Kleinere Körper führen bei der Messung mit dem CBR oft zu Fehlmessungen. Zur Bestimmung der Auslenkhöhe verwendet man ein Maßband oder einen Meterstab. Der Messimpuls des CBR braucht den Ball nur im tiefsten Punkt des Pendels zu erfassen, deshalb kann der Sensor waagrecht in entsprechender Höhe aufgestellt werden. Es ist jedoch unbedingt darauf zu achten, dass der Ball beim Ausschwingen den CBR nicht beschädigt! Abbildung 4.8 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus. Der Abstand des CBR vom Ball in Ruheposition sollte mehr als 50cm betragen.

Versuchsdurchführung

Am dem Experiment beigelegten Arbeitsblatt ist eine Tabelle vorgegeben, bei der Werte für Auslenkhöhe und erreichte Geschwindigkeit des Pendels einzutragen sind. Daraus errechnet der Computer E_{kin} und E_{pot} in weiteren Spalten. Die Messungen werden, wie im Video vorgeführt, gestartet, indem nach Drücken der „Trigger“-Taste am CBL das bis zur definierten Höhe h

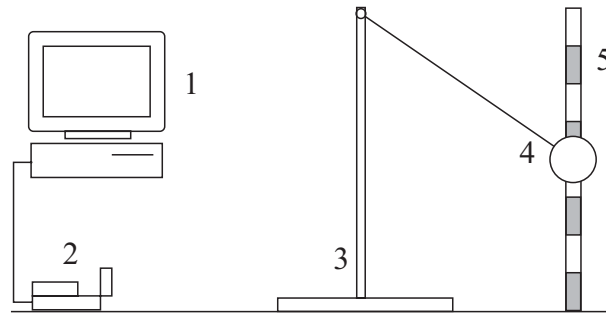


Abbildung 4.8: Versuchsaufbau zum Experiment „Energie am Fadenpendel“. Stückliste: (1) Computer mit COACH, (2) CBR, (3) Stativ mit Querstange, (4) Tennisball als Pendelkörper mit Aufhängung, (5) Meterstab

ausgelenkte Pendel losgelassen wird. Nach dem Einlesen der Daten in COACH wird daraus ein Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm gezeichnet. Da der CBR oft nicht die ganze Bewegung des Balles aufnimmt, kann dieser Graf recht verwirrend aussehen. Aus dem Diagramm wird die Maximalgeschwindigkeit im Tiefpunkt des Balles gelesen und im Arbeitsblatt mit der zugehörigen Höhe eingetragen. Das Diagramm wird ebenfalls ins Arbeitsblatt kopiert und dort diskutiert. Nach Beantwortung aller Fragen am Blatt ist der Versuch beendet.

Ausblick / Erweiterungsmöglichkeiten

Im Experiment wurde die Luftreibung immer außer Acht gelassen. Bälle unterschiedlicher Größe als Pendelkörper könnten diesen Faktor in Betracht beziehen.

Im Theorieteil wurde vorgeführt, dass nach Gleichsetzung von E_{kin} und E_{pot} die Masse aus der Gleichung fällt. Der Tennisball eignet sich deshalb besonders für das Experiment, da er mit Massestücken befüllt werden kann ohne seine äußere Form zu ändern. Auf diese Art kann auf die Bedeutung der Masse in Bezug auf die Energie hingewiesen werden.

4.3.8 Energie am Fadenpendel (Videoanalyse)

Kurzfassung

Mittels Videoanalyse wird eine Pendelschwingung untersucht. Aus dem Zusammenhang zwischen Auslenkungshöhe und Geschwindigkeit des Pendelkörpers soll der Erhaltungssatz der Energie bestätigt werden.

Einleitung

Anders als beim entsprechenden Experiment mit konventionellen Messmethoden kann bei diesem Versuch die Auslenkhöhe des Pendels nicht variiert werden. Der Energiesatz wird hier nicht anhand von mehreren Messdurchgängen mit jeweiliger Bestimmung von Geschwindigkeit und Fallhöhe bestimmt, sondern aufgrund einer einzelnen Schwingung. Da mit der Videoanalyse die Höhe und die Geschwindigkeit des Pendelkörpers in jedem Punkt bestimmt werden kann, zielt das Experiment darauf ab, dass die Gesamtenergie E sich zusammensetzt aus der kinetischen Energie E_{kin} und der potentiellen Energie E_{pot} . Es wird gezeigt, dass die Summe der beiden Energiekomponenten in jedem Punkt der Pendelbewegung konstant ist. In einem Diagramm wird die potentielle, die kinetische und die Gesamtenergie aufgetragen. Die kinetische Energie errechnet sich aus der Bahngeschwindigkeit v des Pendelkörpers. Da die Bahngeschwindigkeit v durch Bildung des Differenzenquotienten aus nur wenigen Messpunkten errechnet wird, ist sie stark fehlerbehaftet und wird mit einem Korrekturfaktor angepasst.

Didaktische Ziele

Da die zeitliche Auflösung der Auslenkungshöhe eines Pendels eine Sinuskurve ergibt,¹⁸ und diese Kurve dem Schüler zu diesem Zeitpunkt üblicherweise noch nicht bekannt ist, stellt die Deutung der Diagramme in diesem Experiment eine besondere Herausforderung dar.

¹⁸Das Federpendel ist nur näherungsweise und für kleine Auslenkwinkel eine harmonische Schwingung. Nähere Informationen in „Theoretischer Überblick“ von Abschnitt 4.3.16.

Versuchsdurchführung

Bei Programmstart sind neben dem Video und dem Fenster mit dem Begleittext bereits zwei Diagramme geöffnet. Das erste zeigt die Auslenkungshöhe h und die Bahngeschwindigkeit v des Pendelkörpers. Im zweiten Diagramm sind über der Zeit die kinetische Energie E_{kin} , die potentielle Energie E_{pot} und die Gesamtenergie $E = E_{kin} + E_{pot}$ aufgetragen. Die Gesamtenergie sollte laut Voraussetzung konstant sein. Abbildung 4.9 zeigt ein Bild dieses Energie-Zeit-Diagramms.

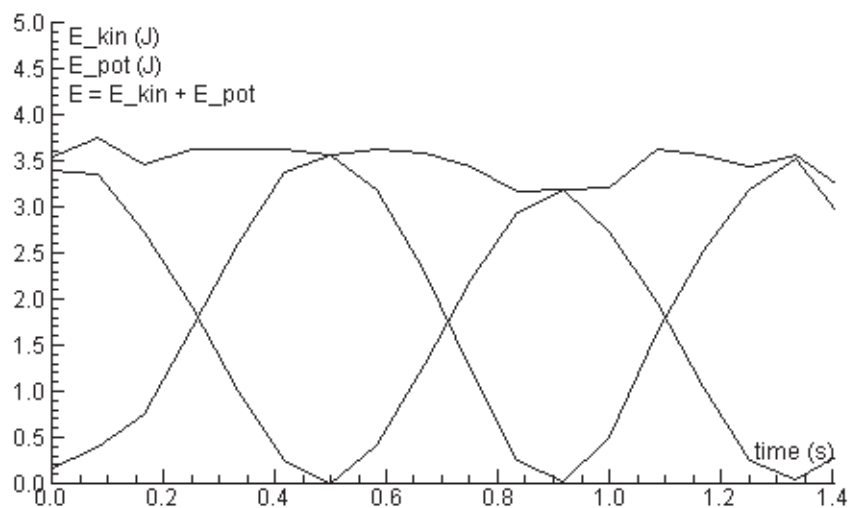


Abbildung 4.9: Energie-Zeit-Diagramm des Experiments „Energie am Fadenpendel (Videoanalyse)“. Dabei sind E_{kin} und E_{pot} die Sinus- bzw. die Kosinusfunktion und $E = E_{kin} + E_{pot}$ die annähernd konstante Summe der beiden Energieformen.

Beim Start der Videoanalyse werden die Grafen in den Diagrammen simultan mitgezeichnet. Die Hauptaufgabe besteht in der Interpretation der Diagramme, die am Arbeitsblatt unter anderem durchgeführt werden soll.

Ausblick / Erweiterungsmöglichkeiten

Die komplizierte Schwingungsbewegung bietet für Experimentatoren viel Möglichkeit, Berechnungen anzustellen. So kann durch Einpassen von Sinuskurven das Ergebnis optimiert werden. Die Funktion „Function fit“ in COACH

erlaubt ein manuelles Anpassen der Kurve mit der Maus, oder durch Eingabe der Kurvenparameter.¹⁹

Die Notwendigkeit des Korrekturfaktors bei der Bestimmung der kinetischen Energie bedarf auch einer genaueren Untersuchung. Am besten versucht man dazu in die Bahngeschwindigkeitskurve eine Sinuskurve einzupassen.²⁰ Es zeigt sich, dass die beste Näherungskurve ein um etwa 20% größeres Maximum besitzt, daher die Korrektur.

Für nähere Untersuchungen zur Pendelbewegung, insbesondere die Analyse der Bewegungen in Koordinatenrichtung wird auf den Versuch „Das Fadenpendel“ im Abschnitt 4.3.16 verwiesen.

4.3.9 Energie auf der schiefen Ebene

Kurzfassung

Die Bewegung eines Wagens mit bestimmter Masse auf einer schiefen Ebene mit definierter Neigung wird mittels CBR untersucht. Aus Neigung der Ebene und erreichter Endgeschwindigkeit soll der Energiesatz verifiziert werden.

Einleitung

Ähnlich dem Experiment „Bewegung auf der schiefen Ebene“ aus Abschnitt 4.3.5 misst ein CBR die Momentangeschwindigkeiten v des Wagens²¹ mit Masse m , wenn er die schiefe Ebene mit Neigungswinkel φ bzw. Höhe h hinunterrollt. Als Höhe h ist der Höhenunterschied des Bahnanfangs und des Endes der Bahn zu verstehen. Im ersten Experiment wird die Lageenergie E_{pot} des Wagens bei Versuchsbeginn mit der Bewegungsenergie E_{kin} aus der Endgeschwindigkeit verglichen. Laut Voraussetzung sollte alle potentielle in kinetische Energie umgewandelt worden sein.²²

¹⁹Nähere Informationen zu „Function fit“ im Abschnitt 3.4.

²⁰Der Graf der Bahngeschwindigkeit hat die Form einer $|\sin x|$ -Funktion. Es kann also durch eine Sinusfunktion nur jeder zweite Bauch angenähert werden.

²¹Der CBR misst eigentlich fortlaufend den Abstand zwischen Sensor und Objekt. COACH bestimmt daraus die Geschwindigkeit.

²²Reibung und andere Verluste werden in diesem Versuch nicht berücksichtigt.

Im zweiten Experiment wird mittels eines Geschwindigkeits-Weg-Diagrammes die Momentangeschwindigkeit v an jedem Ort der Bewegung aufgetragen. Aus der Höhe h , der Länge l der Bahn und aus dem zurückgelegten Weg s kann die Höhe $h(s)$ und damit die potentielle Energie jedes Wegpunktes ermittelt werden. Die dazugehörige Momentangeschwindigkeit $v(s)$ liefert die entsprechende kinetische Energie. In einem Energie-Weg-Diagramm werden die beiden Energien und deren Summe $E = E_{kin} + E_{pot}$ über dem Weg aufgetragen.

Didaktische Ziele

Speziell beim Grafen im Geschwindigkeits-Weg-Diagramm, der die Form einer Wurzelfunktion hat, bedarf es zum Verständnis einiger Überlegungen. Gewöhnlich wird man bei gleichmäßig beschleunigten Körpern meist mit Geschwindigkeits-Zeit-Diagrammen konfrontiert, doch nur im Weg-Diagramm lässt sich die kinetische und potentielle Energie als lineare Funktion auftragen. Durch Quadrieren der Wurzelfunktion der Geschwindigkeit erhält man die lineare Funktion der kinetischen Energie (bis auf den Faktor $\frac{1}{2}$).

Bei der Bestimmung der potentiellen Energie wird die Höhe $h(s)$ des Wagens auf der Bahn in Abhängigkeit vom zurückgelegten Weg s benötigt.²³ Wird auf lückenloses Verständnis des Experiments Wert gelegt, so bietet dieses Detail Möglichkeit zur Diskussion.

Das Hauptaugenmerk wurde im vorliegenden Experiment natürlich auf die Verifizierung des Energiesatzes gelegt. Dem Experimentator soll näher gebracht werden, dass die Gesamtenergie konstant ist und sich aus der kinetischen und der potentiellen Energie zusammensetzt.

Theoretischer Überblick

Der Erhaltungssatz der Energie wurde schon im Abschnitt „Theoretischer Überblick“ im Experiment „Das Fadenpendel“ auf Seite 69 diskutiert. Das gegenwärtige Experiment führt eine kontinuierliche Überführung der kinetischen Energie E_{kin} in die potentielle E_{pot} vor. Die Summe der beiden Ener-

²³Nähere Erläuterung der Problematik und Lösungsstrategie im Abschnitt „Theoretischer Überblick“ des Experimentes.

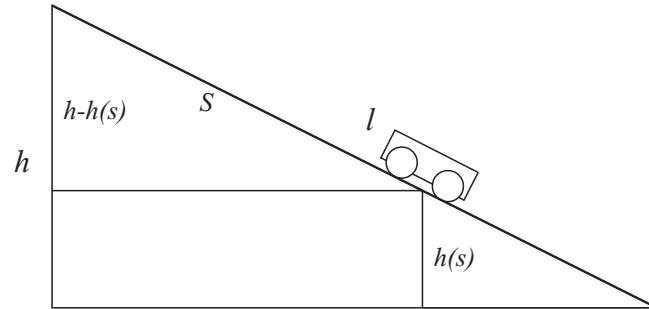


Abbildung 4.10: Vereinfachte Darstellung des Wagens auf der schiefen Ebene zur Berechnung der Höhe $h(s)$ in Abhängigkeit des zurückgelegten Weges s .

giekomponenten ergibt die Gesamtenergie E . Weiters gilt, dass die Gesamtenergie E konstant ist.

Bei der Bestimmung der potentiellen Energie zu jedem Messpunkt ist die Ermittlung der momentanen Höhe $h(s)$ des Wagens als Funktion von dem zurückgelegten Weg s auf der Ebene notwendig. Da der CBR bei Versuchsbeginn mindestens 40 cm vom Wagen entfernt sein muss um korrekte Messwerte zu liefern, ist s als gemessener Weg zum Wagen minus Abstand des CBR bei Versuchsbeginn zu verstehen. Aus Abbildung 4.10 lässt sich aus der Länge l und der Höhe h der schiefen Ebene und aus dem zurückgelegten Weg s des Wagens aufgrund ähnlicher Dreiecke folgende Relation aufstellen:

$$\begin{aligned}
 l : h &= s : (h - h(s)) && \text{nach Umformung folgt:} \\
 h(s) &= h \left(1 - \frac{s}{l} \right) && (4.8)
 \end{aligned}$$

Versuchsaufbau / verwendete Geräte

Der Versuchsaufbau ist ident mit dem im Experiment „Bewegung auf der schiefen Ebene“ im Abschnitt 4.3.5. Alle Bestandteile sind aus dem NTL-Schülerversuchssset „Mechanik 1 & 2“. Als schiefe Ebene kommt eine 50 cm lange Aluminiumschiene zum Einsatz, die mit Hilfe einer 5 cm langen Stativstange geneigt wird. Abbildung 4.3.9 zeigt eine schematische Darstellung der Versuchsanordnung zum Experiment. Die Zeichnung ist nicht maßstäblich. Der Abstand des CBR zum Experimentierwagen sollte, um spätere Korrek-

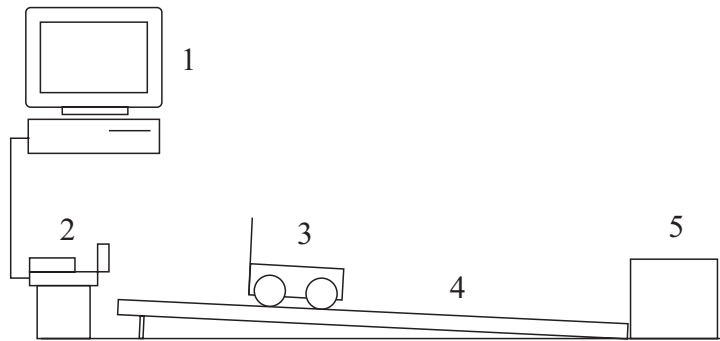


Abbildung 4.11: Skizze des Versuchsaufbaus zum Experiment „Energie auf der schiefen Ebene“. Stückliste: (1) Computer mit COACH, (2) CBR, (3) Experimentierwagen mit Reflektorfläche aus Karton, (4) geneigte Aluminiumschiene mit kurzer Stativstange, (5) gegen Abrutschen gesicherte Schaumgummibarriere.

turen von Parametern zu vermeiden, 40 cm betragen. Mit dem GraphLink Kabel kann der CBR direkt am Computer angeschlossen werden. Am Ende der Schiene stoppt eine gegen Abrutschen gesicherte Schaumstoffbarriere den Wagen. Zur Bestimmung der Höhe h der schiefen Ebene ist ein Massband oder ein Lineal beizulegen.

Versuchsdurchführung

Wie in der Einleitung beschrieben, besteht das Experiment aus zwei Teilen. Im ersten Teil wird mit dem Maßband die Höhe h der Bahn und damit die kinetische Energie des Wagens in Startposition bestimmt. Aus dem Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm, welches COACH aus den Messdaten des CBR erstellt, wird die Geschwindigkeit des Wagens am Ende der geneigten Bahn abgelesen. Die Höhe h und die gemessene Geschwindigkeit v werden in eine Tabelle am Arbeitsblatt eingetragen. Diese Tabelle enthält die Spalten: Höhe der Bahn, Endgeschwindigkeit des Wagens, potentielle Energie des Wagens bei Versuchsbeginn, kinetische Energie des Wagens am Ende der Bahn, Gesamtenergie bei Versuchsbeginn und Gesamtenergie bei Versuchsende. Es ist vorgesehen, dass für wenigstens drei unterschiedliche Werte der Höhe, Messwerte bestimmt werden. Zusätzlich wird noch je ein Weg-Zeit- und ein Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm in das Arbeitsblatt kopiert und diskutiert.

Der zweite Teil des Experiments zeigt nicht nur die Werte der Energie des

Wagens am Anfang und am Ende der Bahn, sondern errechnet einen Verlauf der beiden Energieformen E_{kin} und E_{pot} des Objekts an jedem Punkt der Strecke. In einem Diagramm ist dann abzulesen, dass die Summe von E_{kin} und E_{pot} an jedem Ort konstant gleich E ist. Abbildung 4.12 zeigt ein Bild des Energiegrafens über dem Weg, wie er als Ergebnis erwartet wird.

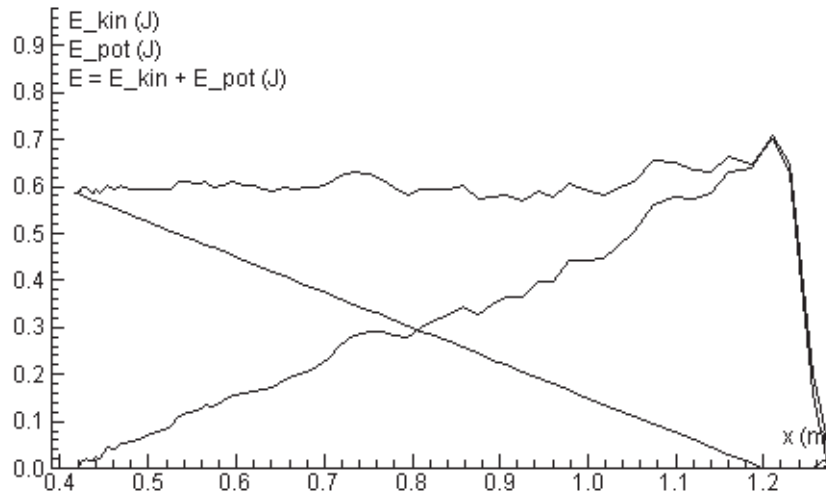


Abbildung 4.12: Energie-Weg-Diagramm zum Versuch „Energie auf der schiefen Ebene“. Die Bewegungsenergie E_{kin} des Wagens nimmt gleichmäßig zu, während dieser am Weg x die Ebene hinunterrollt. Gleichzeitig nimmt seine Lageenergie E_{pot} linear ab. Die Gesamtenergie $E = E_{kin} + E_{pot}$ ist zu jedem Zeitpunkt annähernd konstant.

Dazu wählt man in COACH aus dem Diagramme-Menü folgende Objekte aus und weist sie je einem Fenster zu:

- Weg-Zeit-Diagramm
- Geschwindigkeit-Weg-Diagramm
- Energie-Weg-Diagramm

Um Korrekturen von Parametern in Diagrammen zu vermeiden, welche die Auswertung unnötig verkomplizieren würden, ist darauf zu achten, dass der Abstand des CBR von der Startposition des Wagens genau 40 cm und die

Höhe h der schiefen Ebene 5 cm beträgt. Jetzt können die Messeinstellungen mit „Send settings to datalogger“ an den CBR übertragen und die Messung durchgeführt werden. Dazu wird der Wagen an die Startposition gebracht und nach Drücken der Taste „Trigger“ am CBR losgelassen. Nach dem Rücklesen der Daten in den Computer werden die aufgerufenen Diagramme berechnet. Im Geschwindigkeits-Weg-Diagramm wird zusätzlich die Höhe $h(s)$ nach Gleichung 4.8 als Funktion des zurückgelegten Weges s berechnet. Diese lineare Funktion mit negativem Anstieg bildet die Basis für die Berechnung der potentiellen Energie E_{pot} nach Gleichung 4.6 im Energie-Weg-Diagramm. Sollte für die Höhe h der schiefen Ebene oder für den Abstand des CBR zum Startpunkt des Wagens ein anderer Wert als vorgegeben gewählt worden sein, so sind diese im Menüpunkt „Edit diagramm“ des Toolbox Menüs einzutragen.²⁴ Die Formel zur Berechnung des $h(s)$ versus s Grafen liegt im entsprechenden Menü in der Form der Gleichung 4.8 vor. Anstatt s ist der „Minimalabstand des CBR minus s “ einzutragen. Der Graf der Geschwindigkeit im Geschwindigkeits-Weg-Diagramm hat die Form einer Wurzelfunktion. Laut Gleichung 4.7 wird diese quadriert und damit hat der Graf der kinetischen Energie E_{kin} , aufgetragen über dem zurückgelegten Weg, das Aussehen einer linearen Funktion mit positivem Anstieg.

Die beiden Energiekomponenten E_{kin} und E_{pot} werden inklusive der Gesamtenergie $E = E_{kin} + E_{pot}$ im Energie-Weg-Diagramm über dem Weg s aufgetragen. Es zeigt sich, dass diese Gesamtenergie E entlang jedes Punktes der Strecke auf der schiefen Ebene einen konstanten Wert hat. Die drei Diagramme werden in das Arbeitsblatt eingefügt und dort diskutiert.

Ausblick / Erweiterungsmöglichkeiten

Speziell der zweite Teil des Experiments lädt ein, weitreichende ergänzende Untersuchungen anzustellen. Da der Graf der kinetischen Energie aus der Geschwindigkeit und die wiederum aus der Weg-Zeit-Kurve ermittelt wird, ist dieser nach dem Prinzip der Fehlerfortpflanzung stark fehlerbehaftet. Speziell die Berechnung der Geschwindigkeit aus dem Differenzenquotienten liefert

²⁴Erklärungen zum Toolbox Menü und zu den Editierfunktionen von Diagrammen siehe „Das Toolbox-Menü“ im Abschnitt 3.5.1.

bei kleinen Unregelmäßigkeiten des Weg–Grafen schnell große Irritationen in der Geschwindigkeit. Berechnet man daraus nach Gleichung 4.7 die kinetische Energie, so werden diese durch Quadrieren noch stark verstärkt. Eine Erweiterungsmöglichkeit des Experiments könnte darin bestehen, die Kurven zu optimieren. COACH bietet dazu eine Kurvoneinpassungsfunktion an.²⁵ Wird im Weg-Zeit-Diagramm der Graf durch eine Parabel der Form $x \mapsto ax^2 + bx + c$ mit $a, b, c \in \mathbf{R}$ ersetzt, so können Störungen ausgefiltert werden, was dem Geschwindigkeits- und insbesondere dem Energiegrafen zugute kommt.

Ein weiterer Punkt, der genauerer Untersuchung bedarf, ist die Bestimmung von $h(s)$, der vom zurückgelegten Weg des Wagens abhängigen Höhe. Verändert man den vorgeschlagenen Abstand des CBRs vom Wagen und führt eine Messung durch, so wird man auf die Problematik hingewiesen. Die Kurven im Energiediagramm für die potentielle Energie E_{pot} ist in der x -Richtung verschoben. Der Grund liegt in der Berechnung von $h(s)$ als Funktion vom Weg s nach Gleichung 4.8. Dasselbe gilt für die Änderung der Höhe h der Schiene. Ähnlich wie in Abbildung 4.10 dargestellt, könnte eine Formel für die Berechnung von $h(s)$ erstellt werden.

4.3.10 Energie auf der schiefen Ebene (Videoanalyse)

Kurzfassung

Mittels Videoanalyse wird die Energie eines Wagens mit veränderlicher Masse untersucht, der eine schiefe Ebene mit variablem Neigungswinkel hinunterrollt. Aus den einzelnen Messpunkten wird der Übergang von potentieller in kinetische Energie gezeigt.

Einleitung

In diesem Experiment lässt sich ohne materiellen Aufwand die Überführung der Lageenergie eines Wagens am Startpunkt einer schiefen Ebene in Bewegungsenergie während der Fahrt demonstrieren. Insgesamt zwölf Videos

²⁵Nähere Informationen zur Kurvoneinpassung in „Datenanalysefunktionen“ im Abschnitt 3.5.2.

mit unterschiedlichen Kombinationen aus Wagenmasse und Fahrbahnneigung bieten viel Spielraum für ausgedehnte Untersuchungen zum Thema Energieerhaltung.

Aus der Bild-für-Bild Analyse einer Filmsequenz wird ein Weg-Zeit-Diagramm der x-Richtung des Wagens erstellt. Da die Höhendifferenz h der Fahrstrecke relativ gering ist und damit bei der Analyse mit großem Fehler behaftet wäre, wird die Höhe $h(s)$ des Wagens an jedem Punkt der Fahrstrecke nicht aus der y-Koordinate der Bildanalyse, sondern wie im Abschnitt 4.3.9 aus zurückgelegtem Weg s , Länge der Wegstrecke l und Höhe h nach Gleichung 4.8 bestimmt.²⁶

Die Koordinatenachsen für die Analyse sind parallel zur Fahrtrichtung mit Ursprung im Startpunkt des Wagens. Dadurch kann die Bewegung entlang der geneigten Ebene alleine durch die x-Koordinate beschrieben werden. Die zur Berechnung der Bewegungsenergie E_{kin} benötigte Geschwindigkeit errechnet COACH durch Bildung des Differenzenquotienten der Bewegung in x-Richtung. In einem neuen Diagramm werden über dem Weg s die Geschwindigkeit $v(s)$ des Wagens und dessen Höhe $h(s)$ aufgetragen.

Ebenso wie im entsprechenden Experiment mit CBR-Messung, werden in einem „Energie-Diagramm“ über dem zurückgelegten Weg s die kinetische Energie E_{kin} , die potentielle Energie E_{pot} und aus deren Summe die Gesamtenergie $E = E_{kin} + E_{pot}$ aufgetragen. Das Diagramm soll zeigen, dass auf der schiefen Ebene die beiden Energiekomponenten lineare Funktionen sind, deren Grafen bezüglich der Wegmitte der Bahn spiegelsymmetrisch sind. Die potentielle Energie wird also gleichmäßig in kinetische übergeführt. Der Erhaltungssatz der Energie von Seite 70 ist damit erfüllt.

Im Arbeitsblatt werden die erstellten Diagramme eingefügt und diskutiert. Dabei kommt dem Energiediagramm besondere Aufmerksamkeit zu. Die Untersuchung von Filmen mit unterschiedlichen Wagenmassen und Höhen der Ebene soll den Einfluss der variablen Größen auf die Energie verdeutlichen.

²⁶Einen schematischen Versuchsaufbau zeigt Abbildung 4.10 auf Seite 77.

Versuchsdurchführung

Bei Programmstart sind im ersten Video die Koordinatenachsen schon optimal eingestellt und das Bild ist schon maßstäblich geeicht. Zusätzlich ist ein Lineal eingeblendet, das die Höhendifferenz h der Fahrstrecke misst. Das Diagramm zur Aufzeichnung der Bewegung des Wagens ist auf die richtige Höhe h und die Fahrstrecke l eingestellt. Das Textfenster mit den Begleit- anweisungen zum Experiment stellt kurz die Diagramme vor und gibt in gewohnter Weise eine Lösungsstrategie zur Durchführung vor.²⁷ Die Videoanalyse kann, ohne dass weitere Einstellungen vorgenommen werden müssen, durchgeführt werden.

Da bei einer Videoanalyse verhältnismäßig wenige Messpunkte aufgenommen werden und der Berechnungsalgorithmus der Geschwindigkeit sehr empfindlich gegenüber Schwankungen ist, wird im Video-Diagramm die Weg-Kurve mit der Funktion „Function fit“ durch eine Parabel der Form $x \mapsto ax^2 + bx + c$ mit $a, b, c \in \mathbf{R}$ ersetzt. Die Kurvenparameter können entweder durch manuelles Einpassen der Kurve mit der Maus gefunden, oder von COACH automatisch berechnet werden. Neben der des Weges s wird im „Video-Diagramm“ noch die Geschwindigkeit v als Funktion der Zeit angezeigt. Im Geschwindigkeits-Weg-Diagramm wird zusätzlich noch die Höhe $h(s)$ des Wagens über dem Weg aufgetragen. Aus diesen beiden Kurven werden die Energiekomponenten E_{kin} und E_{pot} berechnet. Das Videodiagramm wird mit dem Befehl „Clipboard copy“ aus dem Toolbox-Menü kopiert und in das Arbeitsblatt eingefügt, welches aus dem Menü „Display Webpage“ geöffnet wird.

Zurück in COACH wird das Energie-Diagramm aus dem Diagramme-Menü ausgewählt und dem Fenster zugewiesen, in dem das Videodiagramm abgebildet ist. Die beiden Diagramme, die nun zu sehen sind, sind beide Funktionen des Weges. Auch diese beiden Fenster werden kopiert und in das Arbeitsblatt eingefügt. Dort sind auch Fragen über den Zusammenhang der drei Diagramme zu beantworten. Das Energiediagramm, welches die beiden Energiekomponenten und die Gesamtenergie des Wagens an jedem Punkt der

²⁷Der Umfang der Hilfestellung ist, wie bei allen Versuchen, abhängig vom Benutzerlevel des Experimentators

Strecke zeigt, wird genauer diskutiert.

In weiteren Messdurchgängen kann die Energie des Wagens bei geänderter Masse m oder bei anderer Höhe h der Fahrbahn untersucht werden. Dazu wird im Video-Menü die gewünschte Filmsequenz ausgewählt und dem Video-Bearbeitungsfenster zugewiesen. Vor der Messung sind die neuen Parameter für Höhendifferenz h und Länge l der Fahrstrecke zur Berechnung von $h(s)$ im Video-Diagramm einzutragen. Danach kann die Videoanalyse und die Auswertung, wie oben beschrieben, durchgeführt werden.

Ausblick / Erweiterungsmöglichkeiten

Im Gegensatz zur konventionellen Messung mit dem CBR werden bei der Videoanalyse nur wenige Messpunkte aufgenommen. Die damit verbundenen Streuungen und Fehler bei der Berechnung macht eine Kurvoneinpassung mit einer mathematischen Funktion unabdingbar. Doch, obwohl die Wegkurve über der Zeit durch eine geeignete Parabel ersetzt worden ist, ergibt die daraus berechnete Geschwindigkeit nicht die gewünschte lineare Funktion. Die Kurve weist am Anfang und am Ende leichte Knicke auf. Diese lassen sich auf den Algorithmus der Geschwindigkeitsberechnung zurückführen. COACH verwendet anstatt der ersten Ableitung für die Geschwindigkeitsberechnung den Differenzenquotienten der an die Parabel angepassten Messpunkte. Die Einpassung von geeigneten Funktionen in Messkurven ist komplex und könnte Gegenstand einer genaueren Untersuchung sein. Besonders der manuelle Modus, bei dem eine Standardkurve durch verschieben und ziehen mit der Maus in die gewünschte Form gebracht wird ist didaktisch besonders wertvoll, da die Parameter der Funktion simultan Neuberechnet werden.

Im Energiediagramm ist abzulesen, dass nicht alle potentielle Energie in kinetische umgewandelt wird. Der Einfluss der Reibung ist im Experiment nicht berücksichtigt worden. Speziell bei der Filmsequenz mit der größten Wagenmasse ($240g$) und geringster Fahrbahnneigung ($h = 5cm$) sind die Verluste deutlich auszumachen. Wie sich das auf die Diagramme auswirkt und welche Größenordnung die Verluste in Abhängigkeit von Wagenmasse und Neigung haben, bietet eine interessante Erweiterung zum Experiment.

4.3.11 Der Kraftstoß

Kurzfassung

Ein Wagen mit veränderlicher Masse rollt über eine schiefe Ebene mit einstellbarem Neigungswinkel. Am Ende der Fahrbahn trifft er auf einen Kraftsensor. Ein CBR misst die Geschwindigkeit des Wagens entlang der Schiene. Aus Geschwindigkeit und Kraft wird auf den Impuls geschlossen.

Einleitung

In diesem Experiment wird über die zeitliche Einwirkung der Kraft auf den Impuls geschlossen. Eine schiefe Ebene mit verstellbarer Höhendifferenz h beschleunigt einen Wagen der Masse m auf eine Endgeschwindigkeit v , bevor dieser gegen einen Kraftsensor prallt. Der Sensor zeichnet den zeitlichen Verlauf der Krafteinwirkung auf. Ein CBR am Anfang der Fahrbahn misst laufend den Abstand zum Wagen, woraus mittels COACH der Geschwindigkeitsverlauf bestimmt wird.

Die Fläche unter der Kraft-Zeit-Kurve des Kraftsensors gibt Aufschluss über den Impuls der nötig war, die Geschwindigkeitsänderung vor und nach dem Aufprall hervorzurufen. Dazu bietet COACH ein Feature an, mit dem zwischen frei wählbaren Grenzen die orientierte Fläche unter Kurven bestimmt werden kann. Aus der Masse m und der Aufprallgeschwindigkeit v des Wagens kann die Erhaltung des Impulses demonstriert werden.

Didaktische Ziele

Die Möglichkeit der Bestimmung der Fläche unter einer Kurve durch COACH eröffnet neue Möglichkeiten bei Berechnungen. Ohne komplizierte mathematische Methoden anzuwenden, kann der Impuls als Fläche unter dem distributionsförmigen zeitlichen Kraftverlauf ermittelt werden. Ein Ziel des Experimentes soll sein, das Werkzeug der Flächenberechnung näher kennenzulernen.

Der Zugang zum Impuls mit $\Delta p = m\Delta v$, eine Geschwindigkeitsänderung bewirkt eine Änderung des Impulses, kann anhand des Versuches als Fläche unter der Kurve im Kraft-Zeit-Diagramm veranschaulicht werden.

Zusammen mit der Formel $p = mv$ soll bei Variation von m und v die Erhaltung des Gesamtimpulses gedanklich verarbeitet werden.

Theoretischer Überblick

Bei der Fahrt gegen ein festes Hindernis wirkt auf das Fahrzeug über eine kurze Zeit eine zeitlich nicht konstante Kraft, die eine Bewegungsänderung verursacht. Der erteilte Kraftstoß $F(t)$ ist dabei gleich der Änderung des Impulses p , die das Fahrzeug erfährt. Es gilt folgender Ansatz:

$$F \cdot \Delta t = \Delta p = \Delta(m \cdot v) = m \cdot \Delta v \quad \text{bzw.}$$

$$\int_{t_A}^{t_E} F(t) dt = m \cdot (v_E - v_A) = m \cdot \Delta v$$

Wobei t_A, t_E gleich der Zeitpunkt des Beginnes, bzw. des Endes der Krafteinwirkung auf den Sensor bedeutet und v_A und v_E die dazugehörigen Geschwindigkeiten des Wagens sind.

Aus der Zeitkurve der wirkenden Kraft kann bei bekannter Stoßdauer $t = t_E - t_A$ Masse m oder Geschwindigkeit v des Wagens bestimmt werden, wenn die jeweils andere Größe bekannt ist. Die Geschwindigkeit v des Wagens, kurz bevor dieser auf den Ausleger des Kraftsensors trifft, wird aus der Weg-Zeit-Kurve des CBR durch Bildung der ersten Ableitung bestimmt.

Versuchsaufbau / verwendete Geräte

Neben der geneigten Fahrbahn, wie sie etwa im Versuch „Schiefe Ebene“ im Abschnitt 4.3.5 benutzt wird, kommt als zusätzlicher Sensor noch ein Kraftmesser²⁸ zum Einsatz, der gegen Abrutschen gesichert am Ende der Fahrbahn positioniert wird. Kraftsensor und CBR werden an ein CBL angeschlossen, welches über das GraphLink Kabel an den Computer angesteckt wird. Für den CBR ist dazu ein spezielles Kabel nötig, um diesen an die „Sonic“-Buchse des CBL anzuhängen. Abbildung 4.13 zeigt eine Skizze der Versuchsanordnung. Diese ist jedoch aus Platzgründen nicht maßstäblich korrekt. Der CBR muss bei Versuchsbeginn mindestens 40 cm vom Wagen entfernt sein, um richtige Messwerte zu liefern. Zur Bestimmung der Höhe h der Fahrbahn

²⁸etwa Verniers Student-Force-Sensor mit Messbereich $-17N$ bis $17N$.

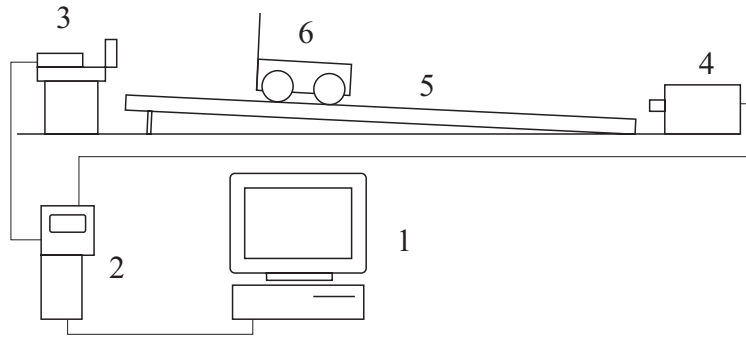


Abbildung 4.13: Schematischer Aufbau des Experimentes „Der Kraftstoß“. Stückliste: (1) Computer mit COACH, (2) CBL, (3) CBR, (4) Kraftsensor, (5) geneigte Fahrbahn mit verstellbarer Höhe, (6) Experimentierwagen mit veränderlicher Masse.

wird ein Lineal oder Maßband benötigt. Außerdem sind zur Variation der Wagenmasse noch 3 Schlitzgewichte zu je 10 g erforderlich.

Versuchsdurchführung

Nach dem Laden des Experimentes in COACH sind neben dem Demonstrationsvideo und dem Fenster mit den Online Anweisungen noch ein Weg-Zeit-Diagramm und ein Kraft-Zeit-Diagramm geöffnet. In beiden Diagrammen wird zusätzlich der Geschwindigkeitsverlauf des Wagens aufgetragen. Abbildung 4.14

Nachdem die Messvoreinstellungen an das CBL geschickt worden sind, wird der Wagen in Startposition gebracht und festgehalten. Die Messung beginnt mit Drücken der „Triggertaste“ am CBL. Jetzt kann das Fahrzeug losgelassen werden. Mit „Get result“ werden die zwischengespeicherten Daten aus dem CBL in den Computer gelesen.

Je nach verwendeter Kraftsensortype wird der Wagen mehr oder weniger stark zurück nach oben gestossen. Während der „Dual-range force sensor“ viel von der Bewegungsenergie aufnimmt, gibt die Biegefeder des „Student-force-sensors“ die aufgenommene Spannungsenergie an den Wagen zurück und reflektiert diesen zurück bis beinahe an die Startposition. Zum Zeitpunkt des Aufpralls nimmt die aufgezeichnete Kraft im Sensor stark zu.

Mit der Option „Area“ aus dem Toolbox-Menü wird durch Einschränken

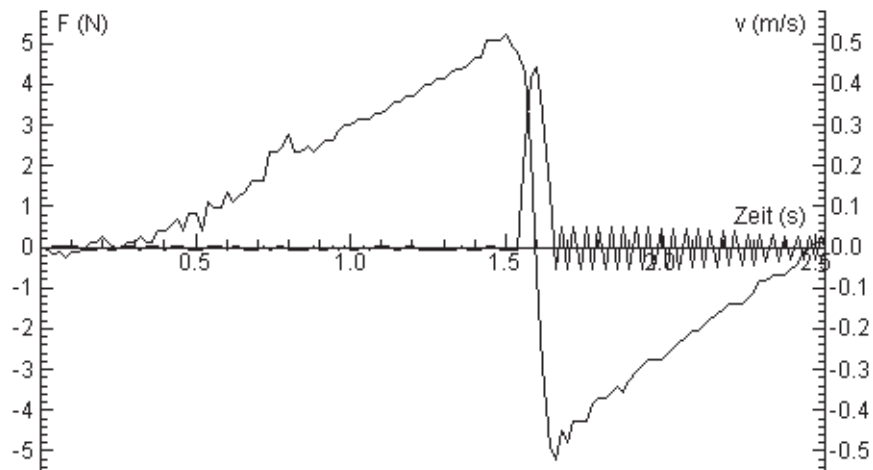


Abbildung 4.14: Geschwindigkeits-, Kraft-Zeit-Diagramm zum Versuch „Kraftstoß“. Über der Zeit t ist der Geschwindigkeitsverlauf v des Wagens angegeben. v nimmt gleichmäßig zu, bis der Wagen auf den Kraftsensor trifft. Durch die Spannkraft der Biegefeder des Sensors wird der Wagen zurückgestoßen. Dies resultiert in einer negativen Geschwindigkeit. Außerdem ist die Kraft des Sensors im Diagramm eingezeichnet. Beim Aufprall registriert dieser einen kurzen Stoß von etwa 5 N.

der Grenzen die Fläche $F \cdot t$ unter der Kraftkurve während des Aufpralls bestimmt. Dieser Wert wird neben der Aufprallgeschwindigkeit v_A , welche aus dem Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm abgelesen werden kann, in einer Tabelle am Arbeitsblatt eingetragen. Weitere Spalten in der Tabelle sind: Wagenmasse m , Höhe h der Fahrbahn, Rückstoßgeschwindigkeit v_E , Geschwindigkeitsänderung $\Delta v = |v_E| + |v_A|$ und Gesamtimpuls $p = m\Delta v$. Die beiden letzten Spalten werden nach den angegebenen Formeln aus den übrigen Spalten berechnet. Jede Zeile ist für einen Versuchsdurchgang reserviert, in dem entweder die Höhe h der Ebene, oder die Masse m des Wagens variiert worden ist.

Die beiden Diagramme werden zur näheren Analyse in das Arbeitsblatt kopiert. Das Experiment ist beendet, wenn alle Fragen am Arbeitsblatt beantwortet sind.

Ausblick / Erweiterungsmöglichkeiten

Das Kraft-Zeit-Diagramm zeigt bei Verwendung des Kraftsensortyps mit Biegefeder nach dem Aufprall ein deutliches Nachschwingen der Blattfeder. Diese Schwingung beinhaltet die Differenz zur Gesamtenergie. Durch die Größe der Rückstoßgeschwindigkeit, oder durch die Länge der erreichten Strecke (bzw. Höhe) auf der Fahrbahn könnte der Verlust abgeschätzt werden.

Das gleiche gilt für den zweiten Sensortyp, der beinahe die gesamte Energie absorbiert. Es handelt sich dabei um einen unelastischen Stoß. Dabei wird der Großteil der Bewegungsenergie in innere Energie (Wärme) umgewandelt.

4.3.12 Der (un-)elastische Stoß

Kurzfassung

Auf einer ebenen Fahrbahn befinden sich zwei Experimentierwagen mit veränderlichen Massen. Beim elastischen Stoß sind auf beiden Wagen Federkupplungen montiert, die diese voneinander abprallen lassen. Will man den unelastischen Stoß untersuchen, so ersetzt man diese Kupplungen durch die beiden Teile eines Klettverschlusses. Wagen Nummer 1 wird von Hand in Richtung Wagen Nummer 2 beschleunigt. Mit einem CBR wird die Geschwindigkeit des ersten Wagens bestimmt. Der zweite Wagen fährt nach dem Aufprall durch eine Lichtschranke. Aus Abdeckungszeit und Länge des Wagens kann auf seine Geschwindigkeit geschlossen werden. Durch Variation der Wagenmassen sollen die Stoßgesetze verifiziert werden.

Einleitung

Da an das CBL nur ein CBR angeschlossen werden kann, muss zur Bestimmung der Geschwindigkeit des zweiten Wagens ein Umweg in Kauf genommen werden. Aus einem Lichtsensor und einer Taschenlampe wird eine Lichtschranke gebaut. Die Zeit t , die benötigt wird, bis der Wagen der Länge l die Lichtschranke passiert, gibt Auskunft über die Durchschnittsgeschwindigkeit des Wagens. Da bei optimalen Verhältnissen die Bewegung gleichförmig ist und die dazugehörige Geschwindigkeit konstant ist, kann diese Durchschnitts-

geschwindigkeit gleich als Geschwindigkeit des Wagens Nummer zwei gesehen werden.

Dem ersten Wagen mit Masse m_1 wird per Hand die Geschwindigkeit v_1 erteilt. Der zweite Wagen mit Masse m_2 hat zu diesem Zeitpunkt noch die Geschwindigkeit v_2 gleich null. Nach dem Zusammenstoß der beiden Wagen haben sie die Geschwindigkeiten v'_1 bzw. v'_2 .

Durch Variation der Wagenmassen m_1 und m_2 soll der Zusammenhang zwischen Anfangsgeschwindigkeiten v_1, v_2 und Endgeschwindigkeiten v'_1, v'_2 der beiden Wagen beim elastischen und unelastischen Stoß gezeigt werden.

Didaktische Ziele

Hauptanliegen des Experimentes ist, ein tieferes Verständnis des Impulssatzes herzustellen. Durch Probieren und Messen sollen die Formeln für die Endgeschwindigkeiten der Wagen beim elastischen und unelastischen Stoß verifiziert werden.

Als Anwendung könnte ein Golfschläger gesehen werden. Erst soll die Erkenntnis gewonnen werden, dass der Golfball beim Abschlag eine höhere Geschwindigkeit als die Schlagfläche des Golfschlägers bekommt. Dann soll die Frage beantwortet werden, welche Masse ein Golfschläger idealerweise haben soll, um Bälle möglichst weit abschlagen zu können.

Die Messung der Geschwindigkeit des zweiten Wagens mit der Lichtschranke kann zur Wiederholung und Festigung der gleichförmigen Bewegung herangezogen werden.

Theoretischer Überblick

Die Grundlage für das Experiment bildet der Impulssatz:

Im abgeschlossenen System bleibt der Gesamtimpuls konstant.

Man versteht darunter die Summe aller Einzelimpulse, d.h. die

Größe $m_1v_1 + m_2v_2 + \dots = p$.

Wendet man den Impulssatz und den Energiesatz²⁹ für die beiden Wagen vor und nach dem Zusammenstoß an, so ergibt sich für den elastischen Stoß

²⁹Formuliert im Abschnitt 4.3.7 auf Seite 70.

nach einigen Umformungen:

$$v'_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 \quad \text{und} \quad v'_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 \quad (4.9)$$

Beim unelastischen Stoß bleiben die beiden Wagen nach dem Aufprall zusammen und haben somit die selbe Geschwindigkeit v' . Es gilt:³⁰

$$v' = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1 \quad (4.10)$$

Versuchsaufbau / verwendete Geräte

Als Fahrbahn kommt aus dem NTL-Schülerexperimentierkasten „Mechanik 1 & 2“ eine 1 m Aluschiene zum Einsatz. Neben den zwei Experimentierwagen wird noch die Federkupplung für den elastischen Stoß aus dem Kasten benötigt. Verschiedene Schlitzgewichte dienen der Massenvariation der beiden Wagen. Für den unelastischen Stoß verwendet man als Kupplung am besten ein Stück Klettverschluss, der an den Wagen befestigt wird.

Zur Messung wird ein CBR und ein Lichtsensor³¹ an ein CBL angeschlossen. Mit dem CBR wird die Geschwindigkeit des Wagen Nummer 1 gemessen. Deshalb ist darauf zu achten, dass dieser eine gute Reflexionsfläche für die vom CBR ausgesendeten Schallimpulse bietet. Am besten wird mit Klebeband ein Stück Karton an der Rückfläche des Wagens befestigt.

Im hinteren Drittel der Fahrbahn wird mit einer kleinen Stablampe³² und dem Lichtsensor eine Lichtschranke aufgebaut. Mit Hilfe dieser kann die Geschwindigkeit des durchfahrenden zweiten Wagens bestimmt werden. Das CBL wird über das GraphLink Kabel mit dem PC verbunden. Abbildung 4.15 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaues.

Versuchsdurchführung

Da in den Versuchen zum elastischen und unelastischen Stoß mit den gleichen Verfahren gemessen wird, und sich die Experimente in der Durchführung nur

³⁰Die Herleitungen der Formeln 4.9 und 4.10 können in [20] auf Seite 60-63 nachvollzogen werden.

³¹Zum Beispiel „TI-Lightsensor 0513“ von Texas Instruments, Messbereich 0 bis $10 \frac{W}{m^2}$.

³²Zum Beispiel „MAG-Lite Solitaire“.

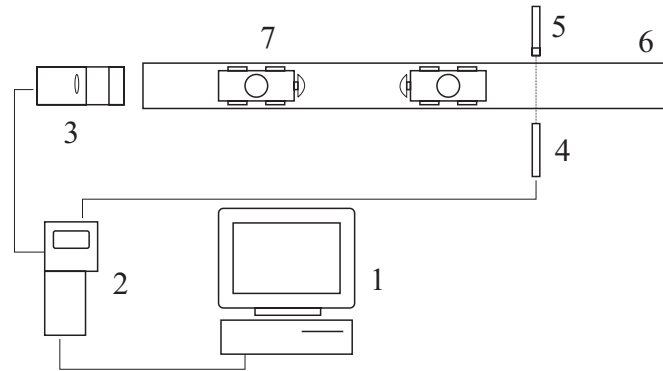


Abbildung 4.15: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zum Experiment „(un-)elastischer Stoß“. Stückliste: (1) PC mit COACH, (2) CBL, (3) CBR, (4) Lichtsensor, (5) Stabtaschenlampe, (6) Aluminiumschiene 1 m und (7) Experimentierwagen mit veränderlicher Masse und Kupplung für elastischen und unelastischen Stoß. An den linken Wagen ist zusätzlich eine Reflexionsfläche aus Karton angebracht.

wenig unterscheiden, sind sie zu einem Programm in COACH zusammengefasst. Es gibt jedoch zwei unterschiedliche Arbeitsblätter die, wie gewohnt, im Menü „Display Web Page“ aufgerufen werden.

Bei Programmstart ist neben dem Video und dem Fenster mit dem Begleittext noch je ein Diagramm des CBR und des Lichtsensors zu sehen. Im ersten werden über der Zeit die Entfernung zum Wagen und die daraus bestimmte Geschwindigkeit des Wagens Nummer eins angezeigt. Im zweiten Diagramm ist der zeitliche Verlauf der Lichtintensität des Lichtsensors dargestellt. Je nach Untersuchung des elastischen oder des unelastischen Stoßes werden die dafür vorgesehenen Kupplungen an den Wagen angebracht. Vor dem Start werden die Wagen in geeigneter Position aufgestellt.³³

Mit Drücken der Taste „Trigger“ am CBL beginnt die Datenaufnahme. Der linke Wagen wird von Hand mit einem leichten Stoß beschleunigt. Nach dem Aufeinandertreffen der Fahrzeuge wird der rechte vom anderen weg gestoßen und passiert die Lichtschranke.

Nach dem Rücklesen der Daten in den Computer können die Geschwindigkeiten v_1 und v'_1 gleich aus dem Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm des CBR gelesen werden. Zur Bestimmung von v'_2 wird mit der Funktion „Scan“ aus dem Toolbox-Menü die zeitliche Länge des Minimums der Lichtintensitäts-

³³Siehe dazu Skizze des Versuchsaufbaus.

kurve bestimmt. Diese entspricht der Zeit t , die der Wagen mit Länge l braucht, um die Strecke l zurückzulegen. Der Wert für t wird im Arbeitsblatt in eine Tabelle eingetragen. Daraus wird die Geschwindigkeit v'_2 des zweiten Wagens nach dem Stoß errechnet. Außerdem werden aus den Wagenmassen und der Anfangsgeschwindigkeit v_1 des ersten Wagens die theoretischen Endgeschwindigkeiten $v'_{1,th}$ und $v'_{2,th}$ nach dem Stoß nach den Formeln 4.9 bzw. 4.10 bestimmt. Ein direkter Vergleich zwischen Theorie und Experiment wird so ermöglicht.

Zur Vervollständigung der Tabelle sind noch mehrere Messdurchgänge mit unterschiedlichen Massenkombinationen von m_1 und m_2 vorgesehen. Die beiden Diagramme aus COACH werden ebenfalls in das Arbeitsblatt kopiert und diskutiert. Nach Beantwortung aller Fragen ist das Experiment beendet.

Ausblick / Erweiterungsmöglichkeiten

Die im Abschnitt „Didaktische Ziele“ erwähnte Anwendung des elastischen Stoßes beim Golfschläger birgt viele Untersuchungsmöglichkeiten. So könnte eine optimale Kombination aus Länge und Masse eines Golfschlägers gefunden werden. Die logarithmische Zunahme der Geschwindigkeit des Balles bei ansteigender Masse des Schlägers könnte im Arbeitsblatt durch eine Einbettung eines Excel-Diagrammes realisiert werden.

4.3.13 Der (un-)elastische Stoß (Videoanalyse)

Kurzfassung

In einer Videosequenz, die den elastischen bzw. unelastischen Stoß zweier Experimentierwagen mit bestimmten Massen zeigt, werden mittels Videoanalyse die Geschwindigkeiten vor und nach dem Aufprall bestimmt. Für die verschiedenen Kombinationen der Wagenmassen stehen je Stoßtyp acht unterschiedliche Videos zur Verfügung. Aus den gegebenen Ressourcen sollen die Formeln für die Geschwindigkeiten verifiziert werden.

Einleitung

Der erhebliche Aufwand der konventionellen Messmethode mit Sensoren bei der Bestimmung der Geschwindigkeiten mehrerer Objekte spricht hier besonders für die Videoanalyse. Mit COACH können bis zu acht Messpunkte zur Analyse gleichzeitig definiert werden. Um die Position der Wagen im Video mit der Maus besser treffen zu können, wurden diese mit einer hellen Kartonscheibe bestückt.

Aus den gewonnenen Daten für die Positionen der Fahrzeuge in den einzelnen Frames wird die jeweilige Momentangeschwindigkeit durch Bildung der ersten Ableitung durch COACH errechnet. Die bestimmten Geschwindigkeiten v'_1 und v'_2 der beiden Wagen nach dem Zusammenstoß werden im Arbeitsblatt mit den theoretischen Werten nach Gleichung 4.9 bzw. Gleichung 4.10 verglichen.

Der Zusammenhang zwischen Wagenmassen m_1 , m_2 und erreichten Geschwindigkeiten v'_1 , v'_2 wird verdeutlicht, indem die unterschiedlichen Videosequenzen analysiert werden.

Versuchsdurchführung

Anders als bei der konventionellen Messung ist für den elastischen und für den unelastischen Stoß ein eigenes Programm vorgesehen. Die Versuche sind in der Ausführung sehr ähnlich, sie unterscheiden sich nur im Text der Online-Anweisungen und natürlich in den zu untersuchenden Videos. Das Arbeitsblatt ist ident aufgebaut, verwendet für die Berechnung der theoretischen Werte bloß die entsprechenden Formeln. Im Folgenden wird die Durchführung des elastischen Stoßes, mit Hinweisen auf Abweichungen beim unelastischen Stoß, erläutert.

Bei Programmstart sind neben dem Video und dem Begleittext noch zwei Diagramme geöffnet. Das erste zeigt die x-Position der beiden Wagen über der Zeit. Im zweiten werden aus diesen Daten die einzelnen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge berechnet.

Die Geschwindigkeiten v_1 und v_2 der beiden Wagen vor dem Zusammenstoß und die dazugehörigen Geschwindigkeiten v'_1 und v'_2 nach dem Stoß werden neben den Wagenmassen m_1 und m_2 in einer Tabelle am Arbeitsblatt

eingetragen. Da beim unelastischen Stoß die Wagen nach dem Zusammentreffen aneinander heften, entspricht v'_1 gleich v'_2 und wird deshalb als v' bezeichnet. Zum Vergleich werden in einer weiteren Spalte nach Gleichung 4.9 bzw. 4.10 die theoretischen Werte für v'_1 und v'_2 (bzw. v') angegeben.

Zusätzlich zur Tabelle ist noch vorgesehen, dass die beiden Diagramme in das Arbeitsblatt kopiert und dort diskutiert werden. Wenn alle dort gestellten Fragen beantwortet sind, ist das Experiment beendet.

Ausblick / Erweiterungsmöglichkeiten

Für dieses Experiment gelten die gleichen Erweiterungsmöglichkeiten wie die im Abschnitt 4.3.12. Zusätzlich kann in den Diagrammen durch Kurvoneinpassungen das Ergebnis noch optimiert werden.

4.3.14 Die Gasgesetze

Kurzfassung

Das Verhalten von Luft als ideales Gas wird untersucht. Um zu zeigen, dass die ideale Gasgleichung $pV = nRT$ erfüllt ist, wird abwechselnd je eine der Größen p, V und T im Experiment konstant gehalten und die übrigen als Funktion gegeneinander aufgetragen. Als Sensoren kommen ein Druckmesser, ein Thermoelement und ein Volumenmeter zum Einsatz.

Einleitung

Das folgende Experiment versucht zu zeigen, dass Luft in guter Näherung als ideales Gas bezeichnet werden kann. Die drei Größen Druck p , Volumen V und Temperatur T sind über das ideale Gasgesetz folgend verknüpft: $pV = nRT$, wobei n die Stoffmenge und R die ideale Gaskonstante, unveränderliche Größen sind. In drei Schritten wird gezeigt, dass

1. bei konstanter Temperatur $p \sim \frac{1}{V}$,
2. bei konstantem Druck $V \sim T$ und
3. bei konstantem Volumen $p \sim T$ ist.

Um das Experiment in der Länge ungefähr den übrigen anzupassen, sind in COACH den einzelnen Schritten unterschiedliche Programme zugeordnet. Da diese jedoch ein gemeinsames didaktisches Konzept aufweisen, werden sie hier unter dem Abschnitt „Gasgesetze“ zusammengefasst.

Der Zusammenhang von Druck p und Volumen V bei gleichbleibender Temperatur wird mit einem Volumenmeter demonstriert, das an einen Drucksensor angeschlossen ist. COACH zeichnet Volumen und Druck auf und trägt die Werte in einem Diagramm gegeneinander auf. In einem weiteren Diagramm kann man beobachten, dass das Produkt aus p und V über der Zeit konstant ist. Damit ist dieser Teil der Gleichung erfüllt.

Der Druck p wird konstant gehalten, indem an eine Kanüle ein Schlauchstück mit Skala angesteckt wird, in der ein Wassertropfen das Volumen anzeigt. Zusätzlich wird mit einem Thermoelement die Temperatur im Inneren des Zylinders gemessen. Wird die Kunststoffkanüle mit der Hand erwärmt, so dehnt sich die darin befindliche Luft aus und drückt den Wassertropfen nach oben. Bei jedem Skalenteil, den der Tropfen nach oben wandert, wird manuell am CBL ein Messpunkt der Temperatur aufgenommen. In COACH wird das Volumen über der Temperatur aufgetragen. Der lineare Verlauf bestätigt auch den zweiten Teil der Gleichung.

Der dritte Teil des Experimentes zielt auf eine Konstanthaltung des Volumens V und der Variation der Größen p und T ab. Realisiert wird dies, indem die Kanüle mit dem eingeführtem Thermoelement zusätzlich an einen Drucksensor angeschlossen wird. Je nach Empfindlichkeit des Drucksensors wird die Luft im Zylinder durch die Hand oder externe Wärmequellen, wie zum Beispiel durch Sonneneinstrahlung, erwärmt. Wird in COACH der Druck p über der Temperatur T aufgetragen, so kann die direkte Proportionalität erahnt werden. Damit ist auch der letzte Teil der Gleichung gezeigt.

Für die drei Abschnitte des Experimentes gibt es je ein Arbeitsblatt, in das die Diagramme kopiert und dort diskutiert werden.

Didaktische Ziele

Primär dienen die Experimente dazu, dem Schüler das ideale Gasgesetz näher zu bringen. Die Deutung von Proportionalitäten aus Diagrammen stellt eben-

falls einen wichtigen Teil der Auswertung dar.

Theoretischer Überblick

Druck, Volumen und Temperatur sind Zustandsgrößen. Für Gase gibt es eine einfache Beziehung zwischen diesen Zustandsgrößen und der Stoffmenge n :

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (4.11)$$

Dabei ist p der Druck, V das Volumen, n die Stoffmenge und T die Temperatur, die in Kelvin anzugeben ist. R ist die ideale Gaskonstante mit dem Wert $R \approx 8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$.

Die meisten Gase erfüllen unter gewöhnlichen Bedingungen recht gut diese Gleichung. Unter extremen Bedingungen (sehr tiefe Temperaturen und hohe Drücke) kommt es allerdings zu Abweichungen. Ein hypothetisches Gas, das unter allen Bedingungen die Gleichung 4.11 erfüllt, nennt man ein ideales Gas. Gleichung 4.11 wird deshalb die Zustandsgleichung eines idealen Gases, oder kurz *ideales Gasgesetz* genannt.

Versuchsaufbau / verwendete Geräte

Für alle drei Experimente kommt eine 100 ml Einwegkanüle als Gefäß zum Einsatz. Zur Messung der Temperatur der Luft ist, wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Gasen, ein Thermoelement³⁴ nötig. Der Druck wird mit einem Drucksensor, am besten mit zwei Messbereichen, gemessen. Ein Volumenmeter erleichtert die Aufnahme der pV -Kurve erheblich. Das Volumenmeter besteht aus einer Einwegkanüle, deren Kolben mit einem Schiebepotentiometer verbunden ist. Wird der Kolben verschoben und damit das Volumen verändert, so ändert sich der Widerstand im Schieberegler und somit die abgegriffene Spannung. In COACH wird von der Spannung auf das Volumen zurückgerechnet. Die Verbindung zwischen Kanüle und Drucksensor wird mit durchsichtigen 4 mm Kunststoffschläuchen realisiert. Da bei einer Messung Temperatur und Volumsausdehnung gleichzeitig gemessen wird,

³⁴Eine Anleitung zum kostengünstigen Selbstbau eines solchen Sensors ist im Abschnitt 2.7.2 zu finden.

ist ein T-Stück aus dem Schlauch nötig. Um luftdichte Verbindungen herzustellen, werden die einzelnen Schlauchstücke am besten mit Heisskleber versiegelt. Abbildung 4.16 zeigt eine schematische Darstellung der Versuchsanordnungen für die einzelnen Experimente.

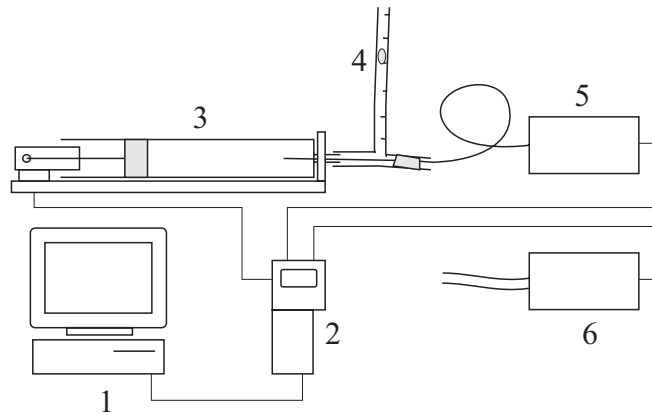


Abbildung 4.16: Skizze des Versuchsaufbaus zum Experimentenzyklus „Gasgesetz“. Stückliste: (1) Computer mit COACH, (2) CBL, (3) Volumenmeter, (4) T-Stück mit Steigrohr und Wassertropfen zur Messung der Volumsvergrößerung, (5) Thermoelement mit Thermodraht, (6) Drucksensor mit Schlauchstück zum Anschluss an Volumenmeter.

Versuchsdurchführung

Beim Programmstart von „pV variabel, T konstant“ wird neben dem Demonstrationsvideo und dem Begleittext noch je ein Diagramm für Druck über dem Volumen und $p \cdot V$ über der Zeit angezeigt. Wenn das Volumenmeter mit dem Verbindungsschlauch an den Drucksensor angeschlossen ist, kann die Messung beginnen. Sobald die Werte in COACH eingelesen sind, werden die beiden Diagramme gezeichnet. Sollte das pV-T-Diagramm nicht einigermaßen konstant sein, so wurde das Volumen wahrscheinlich zu schnell verringert und die Kompression hat unter Abgabe von Wärme stattgefunden. In diesem Fall ist das Experiment mit gegebener Sorgfalt zu wiederholen. Die Diagramme werden in das Arbeitsblatt kopiert und dort diskutiert.

Im Programm „VT variabel, p konstant“ wird ein V-T-Diagramm geöffnet. Der Thermodraht aus dem Thermoelement mit dem angeklebten T-Stück wird in die Kanüle eingeführt. In das Steigrohr wird durch vorsichtiges

Herausziehen des Kolbens ein Tropfen Wasser bis zum Beginn der Skala eingesaugt. Nun kann der Messvorgang beginnen. Der Zylinder der Spritze wird mit einer Hand fest umfasst. Die Handwärme lässt das Volumen der Luft steigen und damit den Tropfen das Steigrohr nach oben wandern. Jedesmal wenn der Tropfen einen Skalenpunkt passiert, wird durch Drücken der Taste „Trigger“ am CBL ein Messpunkt des Thermoelements aufgenommen. In COACH werden die Daten im Diagramm gegeneinander aufgetragen. Der lineare Zusammenhang deutet auf die direkte Proportionalität von V und T hin. Die wenigen Messpunkte können durch eine eingepasste lineare Funktion hervorgehoben werden. Auch hier wird das Diagramm in das Arbeitsblatt kopiert und dort diskutiert.

Schließlich im Versuch „pT variabel, V konstant“ wird neben Video und Online Anweisungen ein Diagramm geöffnet, in dem die Temperatur über dem Druck aufgetragen ist. An das Volumenmeter, oder an ein Gefäß mit geeignetem Verschluss, wird die Thermosonde über das T-Rohr eingeführt. Der Drucksensor wird mit dem dritten Ende des Schlauches luftdicht verbunden. Da die Druckzunahme bei steigender Temperatur recht gering ist, muss entweder der Druckmesser sehr sensibel sein, oder die Temperaturzunahme groß. Wenn die Handwärme zur Auflösung der Drucksteigerung nicht ausreicht, kann die Luft in der Spritze zum Beispiel durch Sonneneinstrahlung oder heißes Wasser erwärmt werden. Gegebenenfalls ist in COACH im Menü „Measurement settings“ die Messzeit anzupassen. Nach dem Rücklesen der Daten in den Computer wird das pT-Diagramm gezeichnet. Die möglicherweise zackige Form lässt sich auf die beschränkte Auflösung des Drucksensors zurückführen. In diesem Fall kann eine Kurve eingepasst werden. Das Ergebnis soll sein, dass $p \sim T$ und damit das pT-Diagramm eine Gerade ist. Wie in den beiden vorigen Experimenten wird auch hier das Diagramm in das Arbeitsblatt kopiert und dort diskutiert.

Ausblick / Erweiterungsmöglichkeiten

Die drei einzelnen Experimente sind recht kurz und bilden zusammen eine abgeschlossene Einheit. Deshalb bietet sich hier eine Gruppenarbeit mit drei Gruppen an, die danach zu einem gemeinsamen Ergebnis kommen.

Das Volumenmeter wird eigentlich nur im Experiment „pV variabel, T konstant“ benötigt. In den übrigen Versuchen kann ein geeignetes Kunststoffgefäß mit Möglichkeit der luftdichten Anbringung von Laborschläuchen ebenfalls verwendet werden.

Steht ein Volumenmeter nicht zur Verfügung, so kann mit einer normalen 100 ml Spritze ebenfalls gemessen werden. Der Druck wird in diesem Fall, wie im Experiment „VT variabel, p konstant“, manuell durch Drücken der „Trigger“-Taste am CBL gemessen, sobald das Volumen um einen gewissen Betrag abgenommen hat. Diesen Betrag (z.B. 5 ml) setzt man auf der Skala der Spritze fest.

4.3.15 Harmonische Schwingungen – das Federpendel

Kurzfassung

Die harmonische Schwingung eines Federpendels wird mit einem CBR untersucht. In einem weiteren Versuch misst zusätzlich ein Kraftsensor an der Aufhängung der Feder die wirkende Kraft. Außerdem wird eine gedämpfte Schwingung erzeugt, indem eine Styroporplatte an das schwingende Ende der Feder angebracht wird.

Einleitung

Von einer Schraubenfeder wird erst die Federkonstante k bestimmt. Durch Variation der an die Feder angehängten Masse m wird zur Formel für die Schwingungsdauer T geführt. Da für T auch die Federkonstante k berücksichtigt werden muss, stehen mehrere Schraubenfedern zur Verfügung.

Im nächsten Experiment wird mit einem Kraftsensor die Kraft in der Feder während der Schwingung aufgezeichnet. In COACH wird die Kraft und die Auslenkung über der Zeit in einem Diagramm dargestellt. Mit dieser Darstellung kann der Trägheitssatz $F = m \cdot a$ verifiziert werden.

Schließlich wird an das schwingende Ende der Feder ein Stück Styropor angebracht. Der dadurch vergrößerte Luftwiderstand erzeugt bei Auslenkung eine gedämpfte Schwingung. Mit dem CBR wird die Auslenkung x gemessen und in COACH über der Zeit aufgetragen. Die exponentielle Abnahme der

Einhüllenden der Amplitude wird dazu genutzt, auf den quadratischen Zusammenhang der Luftreibungskraft F mit der Geschwindigkeit des Pendels v hinzuweisen.

Didaktische Ziele

Hauptziel des Experimentes ist, den Schüler auf den Zusammenhang zwischen Schwingung und Sinuskurve hinzuweisen. Speziell, wenn zur Amplitude der Schwingung auch noch die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und die Kraft in der Feder hinzu kommt, ist eine genaue Auseinandersetzung mit Grafen harmonischer Schwingungen über der Zeit nötig. Bei der Bestätigung des Trägheitssatzes ist ja die Relation zwischen Kraft und Beschleunigung zu jedem Zeitpunkt der Schwingung zu zeigen.

Im Arbeitsblatt wird die Frage gestellt, ob und wie ein Federpendel am Mond oder im schwerelosen Raum funktionieren würde. Mit dieser Überlegung soll der Schüler auf den Unterschied zwischen Masse und Gewicht aufmerksam gemacht werden.

Die Formel für die Schwingungsdauer $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ soll durch Probieren bestätigt und verstanden werden. Durch Variation der Masse m , der Federkonstanten k und der Auslenkung x wird gezeigt, welche Größen die Schwingungsdauer T verändern.

Im Experiment mit der gedämpften Schwingung wird gezeigt, dass die Amplitude von der Frequenz unabhängig ist. Außerdem soll darauf hingewiesen werden, dass die Dämpfung vom Quadrat der Geschwindigkeit des Pendelkörpers abhängt.

Theoretischer Überblick

Ein Federpendel besteht aus einer Schraubenfeder, an der ein Körper hängt. Bleibt der Körper in Ruhe, so wird das Gewicht des Körpers durch die Kraft der Feder aufgehoben. Wird die Feder etwas gedehnt und ausgelassen, so wird der Körper durch die Feder nach oben getrieben, schießt wegen der Trägheit über die Gleichgewichtslage hinaus, wird von der Feder abgebremst und wieder nach unten gezogen. Er schießt wegen der Trägheit wiederum über die Gleichgewichtslage hinaus, wird von der Feder abgebremst und neu-

erlich nach oben getrieben. Der Körper schaukelt also auf und nieder. Das Federpendel schwingt.

Die Schwingungsdauer T ist die Zeit, die der Körper für eine Hin- und Herbewegung (volle Schwingung) braucht. Es gilt:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4.12)$$

Dabei ist m die Masse des Pendelkörpers und k die Federkonstante. Wird eine Feder mit der Kraft F um die Länge x gedehnt, so gilt der Zusammenhang:

$$F = -k \cdot x \quad (4.13)$$

Da die zeitliche Auftragung der Auslenkung x mit einer Kosinusfunktion beschrieben werden kann, nennt man die Schwingung eines Federpendels *harmonische Schwingung*.

Wirkt auf eine Schwingung eine Reibungskraft, so nimmt die Amplitude fortwährend ab, man spricht von einer gedämpften Schwingung. Im vorliegenden Experiment handelt es sich bei der Reibungskraft F_R um Luftreibung, welche mit dem Quadrat der Geschwindigkeit v zusammenhängt. Es gilt also $F_R \sim v^2$. Die (positive) Einhüllende der Amplituden der Schwingung hat in diesem Fall die Form einer $\frac{1}{e^x}$ Funktion. Die Amplitude nimmt also nach jeder Schwingung um den gleichen Faktor ab. Da im Experiment dieser Sachverhalt nur angedeutet werden soll, wird hier auf nähere Details verzichtet.³⁵

Versuchsaufbau / verwendete Geräte

Aus dem NTL-Schülerversuchskasten „Mechanik“ werden die zwei Schraubenfedern mit $k = 3\frac{N}{m}$ und $k = 20\frac{N}{m}$ als Federpendel verwendet. An die Feder wird eine Waagschale aus dem Versuchssset angehängt. Dies dient nicht nur zur einfachen Anbringung von Massestücken, sondern auch der besseren Reflexion der vom CBR ausgesendeten Schallimpulse. Um die Masse der Waagschale auf 20 g zu tarieren, wird eine 1 Schilling Münze mit Klebeband befestigt. Weiters sind mehrere Schlitzgewichte zu je 10 g und 50 g nötig. Für die gedämpfte Schwingung bringt man an die Waagschale eine etwa 10×10 cm große, 5 mm starke Styroporplatte an. Zur Aufhängung des

³⁵Mehr Informationen zu gedämpften Schwingungen in [7] auf Seite 150.

Federpendels wird außerdem Stativmaterial benötigt. Bei der Bestimmung der Federkonstanten k wird die Auslenkung der Feder mit einem Lineal bestimmt, das beizulegen ist.

Als Messgeräte kommen neben dem Computer mit COACH ein daran angeschlossenes CBL, ein Kraftsensor und ein CBR zum Einsatz. Das CBR wird mit einem speziellen Kabel an den „Sonic“-Ausgang des CBL gesteckt, während der Kraftsensor mit dem Kanal 1 des CBL verbunden wird. Abbildung 4.17 zeigt eine Zeichnung des Versuchsaufbaus. Aus platzgründen ist diese jedoch nicht maßstabsgetreu. Der CBR muss mindestens 40 cm von der Waagschale entfernt sein um korrekte Messwerte zu liefern.

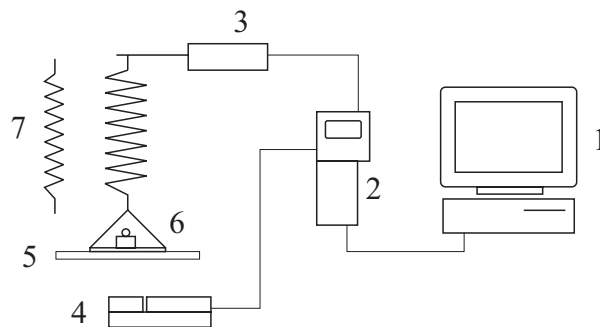


Abbildung 4.17: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus „Das Federpendel“. Stückliste: (1) PC mit COACH, (2) CBL, (3) Kraftsensor mit Biegefeder, (4) CBR, (5) Styroporplatte zur Schwingungsdämpfung, (6) Waagschälchen mit Massestücken, (7) Schraubenfedern mit unterschiedlichen Federkonstanten k .

Versuchsdurchführung

Bei Programmstart werden neben dem Video und dem Anweisungsfenster noch ein Diagrammfenster geöffnet, in dem über der Zeit die Auslenkung des Federpendels aufgenommen wird („x-t-Diagramm“). Weiters stehen noch zwei Diagramme zur Verfügung. Im ersten („xva-t-Diagramm“) wird neben der Auslenkung noch die Geschwindigkeit und die Beschleunigung über der Zeit dargestellt. Das zweite („aF-t-Diagramm“) zeigt neben der Beschleunigung des Pendelkörpers noch die Federkraft aus dem Kraftsensor über der Zeit.

Bevor die Messungen mit dem CBL beginnen, wird man durch die Online-

Anweisungen auf das Arbeitsblatt verwiesen. Dort gilt es, zur Bestimmung der Federkonstanten, eine Tabelle für angehängte Masse m und resultierende Federauslenkung x auszufüllen. Daraus wird in der dritten Spalte die Federkonstante k aus der Beziehung 4.13 ermittelt.

Um die Pendelschwingung zu messen wird der CBR und der Kraftsensor an das CBL angeschlossen und ein Massestück in die Waagschale gelegt. Durch Drücken der Taste „Trigger“ am CBL wird die Messung gestartet. Das Pendel wird durch leichtes Anheben ausgelenkt und dann losgelassen. Nach dem Rücklesen der Daten in COACH wird das Auslenkungs-Zeit-Diagramm gezeichnet. Um die Formel 4.12 für die Schwingungsdauer T des Pendels zu verifizieren, wird man aufgefordert erst das T mit der Funktion „Scan“ aus der Sinuskurve der Auslenkung abzumessen und in eine Tabelle im Arbeitsblatt einzutragen. Weiters sind die Masse m , die (ungefähre) Auslenkung x und die Federkonstante k der verwendeten Feder einzutragen. Das x lässt sich aus der Amplitude der Sinusschwingung bestimmen. Durch Variation der einzelnen Werte gelangt man zum Ergebnis.

Im nächsten Schritt wird das Trägheitsprinzip $F = m \cdot a$ überprüft. Dazu werden das „xv-t-Diagramm“ und das „aF-t-Diagramm“ geöffnet. Da die Berechnung der Geschwindigkeit und vor allem der Beschleunigung sehr sensibel auf kleine Schwankungen in der Messung der Auslenkung reagiert, wird mit der Funktion „Function fit“ die Auslenkungskurve durch eine eingepasste Sinuskurve ersetzt. Im Arbeitsblatt werden die Zusammenhänge zwischen Auslenkung X , Geschwindigkeit v , Beschleunigung a und Federkraft F diskutiert.

Zur Messung einer gedämpften Schwingung wird an die Waagschale eine Styroporplatte angebracht. Für die Auswertung interessiert nur das „x-t-Diagramm“. Mit der Funktion „Scan“ werden die Maxima der Schwingungen gelesen und in eine Tabelle im Arbeitsblatt eingetragen. In weiteren Spalten wird die Differenz dieser Maxima errechnet und der daraus resultierende Dämpfungsfaktor D . Auch diese Kurve wird ins Arbeitsblatt kopiert.

4.3.16 Harmonische Schwingungen – das Fadenpendel

Kurzfassung

Mit einem CBR wird die Schwingung eines Fadenpendels aufgezeichnet. Als Pendelkörper kommt ein Tennisball zum Einsatz, dessen Masse durch Füllung mit Massestücken erhöht werden kann. Ein Kraftsensor misst zusätzlich die Kraft im Faden.

Einleitung

Ein Pendelkörper der Masse m hängt an einer Schnur der Länge l am Ausleger eines Kraftsensors. Das Pendel wird um einen Winkel φ ausgelenkt und losgelassen. Ein CBR zeichnet den sich periodisch ändernden Abstand x zum Pendelkörper auf, während der Kraftsensor die Kraft F im Faden registriert. Wird dieser Abstand x von der Entfernung zwischen CBR und Pendel in Ruhelage abgezogen, so erhält man die Auslenkung a des Pendels.

Durch Abänderung der Pendelmasse, des Auslenkwinkels und der Pendellänge wird die Formel für die Schwingungsdauer T bestätigt. Diese wird aus der Sinusschwingung bestimmt, welche durch Auflösen des Pendelabstandes x nach der Zeit in einem x - t -Diagramm entsteht. Die Parameter werden in eine Tabelle am Arbeitsblatt eingetragen.

In einem weiteren Experiment wird als Pendelkörper eine Styroporkugel verwendet. Durch die geringe Dichte von Styropor spielt der Luftwiderstand eine erhebliche Rolle und das Pendel führt damit eine gedämpfte Schwingung aus. Aus der Einhüllenden der Amplituden über der Zeit soll auf den Dämpfungsfaktor D geschlossen werden.

Schließlich wird mit dem Kraftsensor die Kraft F im Faden während der Schwingbewegung aufgenommen. In COACH wird diese in einem Diagramm über der Auslenkung a aufgetragen. Aufgabe ist es, die parabelförmige Kurve qualitativ zu deuten.

Didaktische Ziele

Wie auch im Experiment mit dem Federpendel zielt dieser Versuch darauf ab, Sinuskurven lesen und interpretieren zu üben. Weiters soll durch Probie-

ren erkannt werden, dass die Schwingungsdauer unabhängig von Masse und Auslenkwinkel des Pendels ist. Durch eine Frage am Arbeitsblatt wird man zur Überlegung angeregt, wie ein Pendel am Mond mit $\frac{1}{6}$ der Erdfallbeschleunigung verändert werden müsste, damit es die gleiche Schwingungsdauer wie auf der Erde habe. Der Versuch mit der gedämpften Pendelschwingung soll die Eigenschaft der exponentiellen Abnahme wiederholen, dass in gleichen Zeitabständen die Amplitude um den gleichen Faktor abnimmt. Schließlich wird im Experiment mit der Fadenkraft die Zentripetalkraft wiederholt.

Theoretischer Überblick

Ein Fadenpendel besteht aus einem Körper der Masse m , welcher an einen Faden der Länge l angehängt ist. Für kleine Auslenkungen gilt,³⁶ dass das Fadenpendel harmonische Schwingungen ausführt. Es gilt:³⁷

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (4.14)$$

Dabei ist $g \approx 10\frac{m}{s^2}$ die Fallbeschleunigung.

Zur Berechnung der Fadenkraft $F(a)$ in Abhängigkeit von der Auslenkung a wird eine Gleichung für die Rotationsbewegung mit dem Parameter t und Radius l aufgestellt:

$$\begin{aligned} a = l \sin t &\rightarrow t = \arcsin \frac{a}{l} \\ v = l\omega = l \cos t &\rightarrow \omega = \cos t \end{aligned}$$

Dabei ist v die Tangentialgeschwindigkeit und ω die Winkelgeschwindigkeit des Pendels. Wird in der Zentripetalkraft³⁸ $F_Z = ml\omega^2$ für ω eingesetzt, erhält man nach einigen Umformungen:

$$F(a) = ml \left(1 - \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right) \quad (4.15)$$

Dies ist die Gleichung einer nach unten geöffneten Parabel mit Scheitelpunkt in $(0|ml)$.

³⁶Nähere Informationen in [21], Seite 108.

³⁷Herleitung in [21] auf Seite 109.

³⁸Definition und Herleitung siehe [20], Seite 46.

Versuchsaufbau / verwendete Geräte

Als Pendelkörper eignet sich am besten ein Tennisball, dessen Filzbezug durch abbrennen entfernt worden ist. Der raue Filz absorbiert einen großen Teil der Schallimpulse des CBR und führt daher manchmal zu falschen Ergebnissen bei der Entfernungsmessung. Der Tennisball wird etwa zu einem Drittel aufgeschnitten und eine Schnur mit Knoten am Ende wird in den Schlitz gezwängt. Gegebenenfalls kann auf diese Weise durch Füllung mit Schlitzgewichten die Masse des Pendelkörpers erhöht werden, ohne die äußere Form zu verändern und damit die Messung zu beeinflussen. Zur Messung der Fadenlänge liegt ein Maßband bei. Der Auslenkwinkel φ wird mit einem Winkelmesser (Geodreieck) bestimmt.

Das Pendel wird an den Ausleger des Kraftsensors gehängt, der wiederum an einem Stativ befestigt ist. Ein CBR misst den Abstand zum Pendelkörper. CBR und Kraftsensor sind an einem CBL angeschlossen, das über ein GraphLink Kabel mit dem Computer verbunden ist. Abbildung 4.18 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus. Um die Übersicht zu bewahren, wurde auf das Stativ verzichtet.

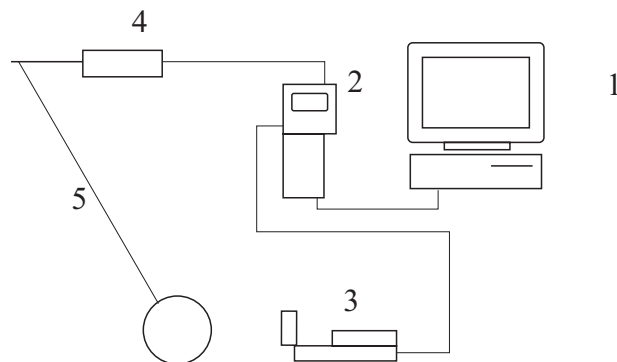


Abbildung 4.18: Schematischer Aufbau des Experiments „Fadenpendel“. Stückliste: (1) Computer mit COACH, (2) CBL, (3) CBR, (4) Kraftsensor mit Biegefeder, (5) Tennisball an Schnur als Fadenpendel (ausgelenkt).

Versuchsdurchführung

Nach Programmstart ist neben dem Video und dem Fenster mit den Online-Anweisungen noch ein „x-t-Diagramm“ geöffnet, das über der Zeit den Ab-

stand zwischen CBR und Pendel anzeigt. Weiters stehen ein „xv-t-“ und ein „F-x-Diagramm“ zur Verfügung. Im letzteren wird über dem Abstand die Fadenkraft aus dem Kraftsensor aufgetragen, während das „xv-t-Diagramm“ neben dem Abstand auch die Geschwindigkeit v des Pendels in Abhängigkeit von der Zeit darstellt.

Im ersten Experiment soll durch Variation der Pendelmasse m , der Pendellänge l und des Auslenkwinkels φ ein Zusammenhang für die Schwingungsdauer T gefunden werden. Dazu ist am Arbeitsblatt eine Tabelle mit diesen Parametern und zusätzlich der errechnete theoretische Wert für T nach Gleichung 4.14 angegeben. Die Pendelmasse m wird vergrößert, indem Schlitzgewichte in den Tennisball gegeben werden. Nach dem Auslenken des Pendels wird durch Drücken der Taste „Trigger“ am CBL die Messung gestartet. Das „x-t-Diagramm“ in COACH zeigt den sich periodisch ändernden Abstand des Pendels vom CBR. Aus dieser Sinusschwingung wird mit der Funktion „Scan“ die Zeit T gemessen, die für eine volle Schwingung benötigt wird.

Im einem weiteren Versuch wird der Tennisball durch eine Styroporkugel ersetzt. Die weit geringere Dichte der Kugel verdeutlicht den Einfluss des Luftwiderstandes. Speziell bei größerer Auslenkung ist die Dämpfung der Schwingbewegung klar festzustellen. Im „x-t-Diagramm“ wird die abnehmende Amplitude mit der Funktion „Scan“ abgelesen und in eine Tabelle am Arbeitsblatt eingetragen. Weitere Spalten der Tabelle zeigen die absolute und die relative Abnahme der Amplitude.

Schließlich wird die Styroporkugel wieder durch den Tennisball ersetzt. Beim letzten Experiment wird neben dem CBR auch der Kraftsensor ausgewertet. In einem „F-a-Diagramm“ wird die Kraft F in der Pendelschnur, abhängig von der Auslenkung a des Pendels, dargestellt. Zusammen mit dem „xv-t-Diagramm“ soll am Arbeitsblatt diskutiert werden, welche Größen in die Fadenkraft eingehen. Durch Variation von m , φ und l kann dies empirisch gefunden werden.

Von jedem Versuch wird ein Diagramm in das Arbeitsblatt kopiert und dort näher analysiert. Sind alle Fragen dort beantwortet, so ist das Experiment beendet.

Ausblick / Erweiterungsmöglichkeiten

Wird das Fadenpendel mehr ausgelenkt, so zeigt die „x-t-Kurve“ eine deutliche Abweichung von einer Sinusfunktion. Dies lässt sich einerseits darauf zurückführen, dass der CBR eigentlich nicht die Tangentialgeschwindigkeit, sondern perspektivisch bedingt die Geschwindigkeit entlang einer Sekante misst. Auf der anderen Seite gilt die harmonische Schwingung des Fadenpendels nur näherungsweise und nur für kleine Auslenkwinkel.³⁹ Durch die Kreisbewegung des Pendels ist die rücktreibende Kraft nicht proportional zum Auslenkwinkel φ sondern zum $\sin \varphi$. Die Linearisierung $\sin \varphi \approx \varphi$ gilt nur für kleine φ . In einem zusätzlichen Experiment könnte auf diese Problematik hingewiesen werden.

Eine nähere Untersuchung, möglicherweise mit mathematischem Beweis, dass der Graf des Diagrammes „Fadenkraft über Auslenkung“ eine Parabel ist, geht nach Meinung des Autors über das Verständnis vieler Schüler dieser Altersstufe.

Eine interessante Erweiterungsmöglichkeit besteht, wenn in den Tennisball ein 3-Achsen-Beschleunigungsmesser gesteckt wird. Die Achse, welche in einer Linie zum Aufhängepunkt des Pendels ist, gibt Auskunft über die Fadenkraft. Aus den Messwerten in den beiden anderen Achsen kann durch Bildung der Resultierenden die Kraft in Tangentialrichtung bestimmt werden.

4.4 Evaluierung

Zur Evaluierung einiger Experimente in COACH wird ein Projekt zum Thema „Trägheitsmoment“ in einem amerikanischen College und zwei Physik-Workshops an einem deutschen und einem österreichischen Gymnasium herangezogen. In den Abschnitten 4.4.1 bis 4.4.3 werden die Aktivitäten kurz vorgestellt.

Im Abschnitt 4.4.4 werden die häufigsten Antworten eines Feedbackbogens, der an den beiden Gymnasien nach dem Workshop von den Schülern ausgefüllt worden ist, wiedergegeben.

³⁹Nähere Informationen dazu in [21] auf Seite 108 unten.

4.4.1 Projekt „Trägheitsmoment“ am NHCTC

Einleitung

Durch ein internationales Austauschprogramm, gesponsert vom FIPSE (Fund for the Improvement of Postsecondary Education) des amerikanischen Unterrichtsministeriums und von der Europäischen Union, hatte ich im Herbst 1999 die Möglichkeit, drei Monate lang am New Hampshire Community Technical College (NHCTC) als Assistent von Dr. Doyle Davis zu arbeiten. Neben anderen universitären Aktivitäten entwickelte ich, zusammen mit meinem Kollegen Gernot Psota, eine Unterrichtssequenz zum Thema „Trägheitsmoment“.

Durchführung

Ein Physikkurs mit 12 Teilnehmern wurde dazu in drei gleich große Gruppen aufgeteilt. Die einzelnen Gruppen sollten anhand unterschiedlicher Experimente das Trägheitsmoment entdecken und quantifizieren. Im gemeinsamen Unterricht wurde nur eine Einführung in das Kapitel „Rotation“ gegeben, ohne auf ein Trägheitsmoment hinzuweisen. Nach 45 minütiger Experimentiertätigkeit, hatten die Schüler eine Woche Zeit, eine Präsentation des Ergebnisses ihrer Gruppe vorzubereiten. In der Vorführung stellten die Teilnehmer den anderen Gruppen ihre Versuchsanordnung vor und präsentierten ihre Auswertung. Nach der letzten Präsentation wurde das Thema „Trägheitsmoment“ in der Klasse diskutiert. Dabei versuchte jede Gruppe ihre Theorie zum Thema zu verteidigen.

Gruppe 1 verwendete eine von der Firma PASCO vorgefertigte Versuchsanordnung.⁴⁰ Auf einer zentral drehbar gelagerten Stange konnten zwei Massestücke symmetrisch zur Drehachse fixiert werden. Auf der Drehachse war eine Spule mit aufgewickeltem Faden mit der Stange festgemacht. Der Faden wurde über eine Umlenkrolle mit einem Massestück verbunden. Auf diese Art wurde durch die am Faden hängende Masse die Spule abgerollt und damit die Stange mit den darauf fixierten Massen in Rotation versetzt.

⁴⁰Bezeichnung: CI-6691 – Rotational Accessory.

Es zeigte sich, dass je weiter außen die beiden Massen auf der Stange montiert wurden, desto langsamer die Rotationsbewegung war. Gemessen wurde die Winkelgeschwindigkeit der Stange durch einen Rotationsbewegungssensor,⁴¹ der mit der Spule verbunden war.

Am Computer wurden mit der Software „Physics workshop“ von PASCO die Daten ausgewertet. Dabei wurden die erreichte Endwinkelgeschwindigkeit ω und der Abstand r der Massen auf der Stange von der Drehachse in eine Tabelle eingetragen. Die wichtigste Frage, die es zu beantworten galt war: „Warum, glaubst Du, ändert sich der Höchstwert für die Winkelgeschwindigkeit ω , wenn die beiden Massestücke auf der Stange von innen nach außen geschoben werden?“

Gruppe 2 untersuchte die Geschwindigkeitsverläufe einer Holzscheibe und eines massegleichen Metallringes, die eine schiefe Ebene hinunterrollten. Dabei kam zur Auswertung ein CBR und COACH zum Einsatz. Ähnlich der in den Abschnitten 4.3.1 bis 4.3.16 vorgestellten Experimente, wurden die Anweisungen zur Durchführung in einem Textfenster in COACH gegeben. COACH errechnete aus den Daten des CBR ein „Geschwindigkeits-Weg-Diagramm“.

In einem Online-Arbeitsblatt wurden in einer Tabelle die Momentangeschwindigkeiten des Ringes und der Scheibe eingetragen, nachdem diese 50 cm, 1 m, 1.5 m, . . . des Weges zurückgelegt hatten, und das Verhältnis der Geschwindigkeiten von Ring und Scheibe bestimmt. Auch diese Gruppe hatte die Frage zu klären, warum die Scheibe jedesmal schneller das Ende der Bahn erreichte.

Gruppe 3 schließlich verwendete den selben Versuchsaufbau wie Gruppe 2, doch wurden hier die Daten mittels Videoanalyse ausgewertet. Dazu wurde das Experiment mit einer S-VHS Video-Kamera aufgenommen und über eine Videokarte⁴² im Computer digitalisiert. Die Videos wurden mit der Software „VidShell“, eine komfortable Eigenentwicklung von Dr. Davis, analysiert.

⁴¹Verwendet wurde ein „CI-6538 Rotary Motion Sensor“ von PASCO. Nähere Details zu Sensor und Versuchsanordnung auf der Pasco-Homepage unter www.pasco.com.

⁴²Marke der Videokarte: Miro V20, Software: Adobe Premiere LT.

Aus den gewonnenen Daten für Position und Zeit der Objekte wurde in MS-Excel in verschiedenen Diagrammen und Tabellen das Verhältnis der Momentangeschwindigkeiten des Ringes und der Scheibe an jedem Ort der Bahn bestimmt.

Auch für diese Gruppe war das Hauptziel, eine Theorie aufzustellen, warum die Scheibe den Ring jedesmal überholte.

Allen drei Gruppen standen zusätzlich zwei Computersimulationen unter „Interactive Physics“⁴³ zur Verfügung. Die von mir und meinem Kollegen Herrn Psota erstellten Anwendungen zeigten zwei Rampen, auf denen eine Scheibe bzw. ein Ring hinunterrollten. Im ersten Programm wurde die Energieäquivalenz der beiden Objekte gezeigt, indem beide auf einer gegenüberstehenden Rampe gleich weit hinaufrollten. Im zweiten Programm konnte die Neigung der Rampen geändert werden. Aufgabe war es, Neigungswinkel herauszufinden, bei denen beide Objekte gleich schnell rollten. Mit dem Verhältnis der (kleinen) Winkel konnte das unterschiedliche Trägheitsmoment von Ring und Scheibe quantifiziert werden. Beide Programme zeichnen „Geschwindigkeits-Weg-Diagramme“ der beiden Objekte auf.

Die Simulationen waren dazu gedacht, dass die Schüler innerhalb der Woche, in der die Präsentation vorbereitet wurde, selbstständig Unklarheiten beseitigen konnten.

Ergebnis

Zwei der drei Gruppen, nämlich die beiden, die Ring und Scheibe auf der Rampe untersucht hatten, kamen zu dem richtigen Ergebnis. Sie vermuteten, dass die Verteilung der Masse eines rotierenden Objektes Einfluss auf die erreichte Geschwindigkeit hat. Die Gruppe mit den beiden verschiebbaren Massen auf der rotierenden Stange befanden, dass der Luftwiderstand der Massen den maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis hatte.

In der Diskussion im Anschluss an die Präsentation der Ergebnisse, konnten die Teilnehmer der Gruppen 1 und 2 die restlichen vom richtigen Ergebnis überzeugen.

⁴³©Knowledge Revolution Corp., Näheres unter www.krev.com.

Diskussion

Gruppe 1 war möglicherweise dadurch beeindruckt, dass im Unterricht auf die zunehmende Bahngeschwindigkeit bei steigendem Radius hingewiesen wurde. Die Teilnehmer hatten gelernt, dass der Luftwiderstand mit der Geschwindigkeit quadratisch zunimmt. Der Schluss, dass der Luftwiderstand steigt, je weiter die relativ großen Massstücke von der Drehachse entfernt wurden, ist richtig und nachvollziehbar. Dass jedoch das Trägheitsmoment einen wesentlich größeren Einfluss auf die Hemmung der Rotation hat, wurde nicht erkannt. Verwunderlich ist, dass diese These nicht durch die Computersimulation entkräftet worden ist.

Die Gruppe mit der Videoanalyse (Gruppe 3) brauchte für die Auswertung am meisten Zeit. Der Grund dafür war die recht langwierige Videoaufzeichnung und Digitalisierung. Trotz meiner Hilfe bei der Bedienung der Digitalisierungssoftware, verging viel wertvolle Zeit, die später bei der Beantwortung der Fragen fehlte. Die sehr motivierten Kursteilnehmer beendeten jedoch ihre Arbeit, obwohl die vorgesehene Zeit von 45 Minuten schon überschritten war. Die Auswertung in „VidShell“ und „Excel“ ging verhältnismäßig schnell vonstatten.

Gruppe 2 mit der COACH-Analyse war bei der Durchführung am schnellsten. Nach etwa 30 Minuten waren alle Fragen beantwortet und die restliche Zeit wurde dazu genutzt, die Simulationen zu untersuchen. Ob das mit der besseren Organisation der Gruppenteilnehmer, oder mit dem Experiment selbst etwas zu tun hatte, ist schwer zu sagen. Obwohl die Gruppe das Programm COACH nicht gekannt hatte, konnte sie praktisch selbstständig den Versuch durchführen. Gruppe 1 und besonders Gruppe 3 brauchte trotz Anweisungszettel zur Versuchsdurchführung oft Hilfe seitens der Betreuer. Man konnte beobachten dass, sobald der Computer benutzt wurde, dem Anweisungsblatt keine Aufmerksamkeit mehr geschenkt wurde.

Das Feedback der Kursteilnehmer war ausnahmslos positiv. Viele waren enthusiastisch bei der Arbeit. Da die Teilnehmer jedoch nicht gewohnt waren vor Publikum zu sprechen, fühlten sich einige bei der Präsentation sichtlich unwohl.

Zusammenfassung

Das Projekt hatte gezeigt, dass Gruppenarbeit mit unterschiedlichen Zugängen zu einem Problem recht effektiv ist. Innerhalb zweier Unterrichtssequenzen (je 90 Minuten) wurde das Thema Rotation von der Definition der Winkelgeschwindigkeit bis zum Trägheitsmoment in Theorie und Experiment gelernt und gefestigt.

Die Erstellung einer Theorie aus einem Experiment mit anschließender Präsentation und Diskussion dient nicht nur der Aufnahme physikalischer Gesetzmäßigkeiten, sondern bezieht auch Kreativität in den Lernprozess wesentlich ein.

Außerdem wurde ersichtlich, dass separate Anweisungstexte neben dem Computer nicht so gut angenommen werden als Online-Anweisungen, die zur gegebenen Zeit in wenigen Zeilen die eben gebrauchte Information anzeigen.

4.4.2 Physikworkshop an „Max–Eyth–Schule“ Alsfeld

Im Zuge eines einmonatigen Praktikums im April 2000 an der „Max–Eyth–Schule Alsfeld“, Deutschland, konnte ich in drei elften Klassen (entspricht der 7. Klasse in Österreich) einen Physik-Workshop abhalten. Dabei konnten die Schüler vier der im Abschnitt 4.3 vorgestellten Experimente durchführen. Je nach Größe der Klasse wurden vier bis sechs Gruppen zu je zwei bis vier Teilnehmern gebildet. Die benötigten Sensoren wurden von der Firma Texas Instruments geliehen.⁴⁴

Der Workshop zielte darauf ab zu testen, wie selbstständig Schüler mit den Anweisungen in COACH die Experimente durchführen konnten. Nach dem 90 minütigen Workshop füllten die Schüler einen Feedbackbogen aus.

Zur Auswahl standen folgende Versuche:

- Weg-Zeit-Diagramme treffen (Abschnitt 4.3.1)
- Bestimmung der Fallbeschleunigung (Abschnitt 4.3.2)
- Gleit- und Haftreibung (Abschnitt 4.3.3)

⁴⁴Nähere Informationen zum kostenlosen Leihprogramm von Sensoren und Interfaces im Internet unter www.ti.com/calc/oesterreich/.

- Bewegung auf der Fahrbahn (Abschnitt 4.3.4)

In der Zeit des Workshops machten die meisten Gruppen drei Experimente.

4.4.3 Physikworkshop am „Sacre Cœur“ Pressbaum

Die Versuche, die ich in Deutschland entwickelt hatte, testete ich zwei Monate später mit leicht modifiziertem Anleitungstext in einer 7. Klasse Gymnasium am „Sacre Cœur Institut“ in Pressbaum, Niederösterreich. Der Workshop dauerte eine Unterrichtsstunde (50 Minuten), wovon die letzten fünf Minuten dazu genutzt wurden, die Feedbackbögen auszufüllen. Die Schüler vollzogen innerhalb des Workshops zwei Experimente. Die dazu benötigten Sensoren wurden wieder durch das TI-Leihprogramm organisiert.

4.4.4 Feedback der Workshop–Teilnehmer

Am Ende der Workshops an der Max-Eyth-Schule und am Sacre Cœur füllten die Teilnehmer einen Feedbackbogen aus.

Dieser bestand aus den Fragen:

1. Hat dir der Workshop gefallen? Warum / warum nicht?
2. Waren die Textanweisungen für die Experimente schwierig zu verstehen?
3. Wie empfandest Du die Arbeitsatmosphäre, wie das Arbeiten in Gruppen?
4. Wie bewertest Du die Materialien? (Hard- und Software?)
5. Wärest Du an einer Fortsetzung der Experimentierstunden dieser Art interessiert?
6. Was hättest Du gerne geändert?

Es war vorgesehen, dass die Fragen erst nach dem Schulnotensystem von 1 (Sehr gut) bis 5 (Nicht genügend) beurteilt und dann mit schriftlichem Kommentar versehen werden.

In der folgenden Auswertung werden die Schülerkommentare zusammengefasst, und für die Fragen 1 bis 4 wird das arithmetische Mittel der Noten inklusive Standardabweichung angegeben.

Frage 1 erreichte den Notendurchschnitt $1,8 \pm 0,8$.

Typische Rückmeldungen waren:

War lustig; mal etwas anderes; Abwechslung zum Schulalltag; der Unterricht war lockerer gestaltet; eigenständiges Arbeiten war gefordert; Schüler arbeiten selbstständig; Arbeit am Computer hat Spaß gemacht; tolle Benutzeroberfläche [des Programmes]; Interessante Experimente, aber langweilig; es war alles gut erklärt und der Lehrer hat keine Fragen gestellt; [...] angenehmer als eine normale Physikstunde; freies Arbeiten im Team; arbeiten in Gruppen hat Spaß gemacht; praktische Anwendung, nicht nur Theorie; leider nur Messungen gemacht; neue Erfahrung; nicht wirklich informativ, aber lustig; Physik ist nicht das Meine; warum male ich Sachen ab und mache Dinge stur nach Anleitung?; etwas fad für nichtbegeisterte Physikschüler; es war mal eine andere Sache, physikalische Experimente durchzuführen und zu verstehen.

Frage 2 erreichte den Notendurchschnitt $2,0 \pm 1,0$.

Typische Kommentare waren:

Es war eigentlich gut zu verstehen; man musste einige Textstellen mehrmals durchlesen; [Texte waren] zu lang; zu kompliziert [...] ausgedrückt; war alles gut beschrieben und gut umzusetzen; waren punktweise ausgeführt und leicht verständlich; einige wenige hätten genauer beschrieben werden müssen, aber allgemein gut verständlich; alle Experimente waren durchaus ausschließlich mit den Anweisungen lösbar; die waren deppensicher; waren einfach und informativ; teilweise [schwierig zu verstehen]; waren genau richtig; fast schon zu ausführlich; nur unnötiges [steht in den Anweisungen].

Frage 3 wurde mit $1,8 \pm 0,7$ beurteilt.

Kommentare dazu waren:

Gut; einfacher [Gruppenarbeit]; arbeiten in Gruppen war interessant und schön, doch sehr hektisch; gute Arbeitsatmosphäre innerhalb der Gruppe;

[.] es war gut, dass man sich die Leute in der Gruppe aussuchen konnte; locker und witzig, Gruppenarbeit macht eigentlich immer Spaß; ruhig und produktiv; sehr gut, aber manchmal stressig; angenehm, Gruppenarbeit war mir lieber als Einzelarbeit; die Klasse war zwar ein wenig chaotisch aber im Großen und Ganzen gut; hat mir gut gefallen; Gruppenarbeit erleichtert die Versuchsdurchführung; Teamarbeit ist wichtig; es war sehr anstrengend, weil der Wille zum Arbeiten nicht da war; strebsam; locker und gut; es war sehr schön, dass man sich gegenseitig beraten und geholfen hat.

Frage 4 bewerteten die Teilnehmer mit $2,1 \pm 0,8$.

Dazu wurde geschrieben:

Nicht schlecht für einen Studenten; gut; mit 13 Punkten; Programm kompliziert, Sensoren gut; Software: 1, Hardware: 2; leicht zu bedienen; kann nicht klagen; Software könnte eine bessere Oberfläche haben; ausgezeichnet; benutzerfreundlich; Aufgaben gut vorbereitet; Software nicht ausgereift; alt; instabil → Verlust von Ergebnissen; interessant bis annehmbar; sehr gut vorbereitet und leicht verständlich; hilfreich; lange nicht modern; geht – teilweise nicht so gut; sehr gute Ausrüstung, jedoch ungewohnt; das Programm hätte auf Deutsch sein können.

Frage 5 beantworteten 66 % mit „ja“. Je 17 % entfielen auf „vielleicht“ und „nein“.

Dazu gab es folgenden Kommentar:

[.] mehr Zeit für Experimente; auf jeden Fall; ja, da man sich auf diese Art um einiges mehr merkt als im Unterricht; der Unterricht ist so interessanter; nicht als Ersatz zum Unterricht, nur ergänzend; warum nicht, besser als pure Theorie; anders vielleicht.

Frage 6 wurde so kommentiert:

Garnichts; [.] ich fand es gut so; mehr Zeit und mehr Stille; eventuell leichtere, genauere Anweisungen; alles OK; weniger Gruppen; 2 Stunden sind zu lange, [.] da ich danach nicht mehr konzentriert war; das Arbeiten an besseren Computern; interessantere Themen (z.B. Messung der Lichtgeschwindigkeit); mehr Versuche, mehr Auswahlmöglichkeiten; [.] vielleicht könnte man

das am TI-92 machen?; kleinere Gruppen und mehr Arbeitsmoral [...]; nicht nur Messungen und Übungen; mehr Zeit; weniger Kurven in Word kopieren, mehr lustiges, sinnvolles.

Zusammenfassung

Wie man der Auswertung der Feedbackbögen entnehmen kann, stehen die Teilnehmer der Workshops den Experimenten mit Computerauswertung positiv gegenüber. Zwei Drittel aller Teilnehmer würden sich Experimente dieser Art in ihrem Physikunterricht wünschen. Der Unterricht würde dadurch interessanter. Außerdem ist ein Experiment einprägsamer als theoretisches Lernen.

Als besonders motivierend empfanden die Schüler die Arbeit in Gruppen. Einige Schüler fanden, dass durch den Teamgeist nicht nur die Motivation steigt, sondern auch das Arbeitsklima durch die Möglichkeit gegenseitiger Beratung verbessert wird. Die Arbeit sei so ruhig und produktiv geworden.

Auf die Frage nach den Online-Textanweisungen zu den Experimenten waren die Meinungen der Schüler unterschiedlich. Ein Teil der Schüler empfand die schrittweise Abarbeitung nach den Anweisungen als angenehm, während einige sich gegen dieses Rezept aussprachen. Da bei diesem Workshop alle Teilnehmer die Bedienung von COACH erlernen mussten und außerdem nicht gewohnt waren Experimente durchzuführen, entschied ich mich, die Online-Anweisungen sehr detailliert zu gestalten.

4.4.5 Konsequenzen aus den Workshops

Durch die positiven Ergebnisse der Workshops motiviert, entwickelte ich zwölf weitere Experimente (siehe Abschnitt 4.3) mit ähnlichem Aufbau. Ergänzend zu den Online-Anweisungen erstellte ich zu jedem Versuch ein kurzes Video, das den Ablauf zeigt. Auf diese Art sollte es noch schneller möglich sein, den Aufbau zu verstehen und mit den Messungen zu beginnen.

Die Online-Texte wurden vom Konzept her neu überdacht. Um ein möglichst großes Spektrum an unterschiedlich begabten Schülern zu erreichen, wurden die Texte modular aufgebaut und stärker strukturiert.⁴⁵ Ein Beispiel

⁴⁵Nähere Erklärungen zum Aufbau der Textmodule in der Einleitung des Kapitels 4.

eines Online-Textes zu einem COACH-Experiment ist im Anhang B abgedruckt.

Schließlich wurden auch die Arbeitsblätter zu den Versuchen erweitert. Zur Zeit der Workshops wurden in den Arbeitsblättern noch keine Berechnungen am Computer durchgeführt. Um zu vermeiden, dass bei einem computergestützten Experiment noch zum Taschenrechner gegriffen werden muss, wurden die WinWord Arbeitsblätter gegebenenfalls durch eingebettete Excel-Tabellen erweitert, in denen mit dem Komfort einer Tabellenkalkulation Berechnungen durchgeführt werden können.

Schlusswort

Eine wesentliche Motivation zu dieser Arbeit war, einen Weg vorzuführen, wie neue Technologie kostengünstig im Schülerexperiment eingesetzt werden kann. Das mobile Messwerterfassungssystem „CBL“ von Texas Instruments mit den dazu passenden Sensoren ist hervorragend dazu geeignet, physikalische Messungen auch außerhalb des Klassenzimmers durchzuführen. Die Auswertung kann entweder über einen geeigneten TI-Grafiktaschenrechner erfolgen, oder wie hier, mit dem Computer durchgeführt werden.

Der didaktische Vorteil der Computerlösung liegt auf der Hand. Die einfach zu bedienende und äußerst leistungsfähige Software COACH bietet nicht nur viele Möglichkeiten der Datenverarbeitung. In das Experiment eingebundene Bilder und Videosequenzen helfen neben Texterklärungen den Versuch transparent und anschaulich zu gestalten. Auf diese Art können auch weniger motivierte Schüler angesprochen werden. Besonders wichtig ist auch die Dokumentation der Ergebnisse im Arbeitsblatt, welches am PC ausgefüllt und dann ausgedruckt wird. Da alle Berechnungen entweder im Messprogramm COACH, oder in einer Tabelle im Arbeitsblatt vorgenommen werden, ist ein Taschenrechner zur Auswertung hinfällig.

Da der Computer dem Schüler viel von der Rechenarbeit abnimmt, liegt der Schwerpunkt wirklich im Experimentieren und Deuten der Ergebnisse und nicht im Eintippen von Zahlenkolonnen in den Taschenrechner. Aussagekräftige Diagramme werden automatisch vom Computer berechnet und müssen nicht mühevoll gezeichnet werden.

Die extensive Nutzung des Computers im Physikunterricht soll ein Selbstverständnis gegenüber neuen Medien unter den Jugendlichen herbeiführen und die Lust zum Experimentieren wecken.

Anhang A

Fragebogen zur Interessensforschung

Mit dem folgenden Fragebogen wurden die Schüler eines Wiener Gymnasiums über ihre Einstellung und ihr Interesse im Physikunterricht befragt. Zusammen mit einer ähnlichen Untersuchung aus dem Jahre 1995 [5], wird im Kapitel 1 eine Entwicklung der Schülerinteressen im Physikunterricht dargestellt.

Anhang B

Online Anleitungen zu Experimenten

Anhand des Experimentes „Messen der Fallbeschleunigung“ aus Abschnitt 4.3.2, wird das Konzept der Online-Anweisungen demonstriert.

B.1 Vorstellung von Coach

In diesem Abschnitt wird COACH kurz vorgestellt und auf die verfügbaren Anweisungsfenster hingewiesen.

Hallo!

Das vorliegende Programm heißt Coach 5 und dient zur Messwerterfassung und Auswertung am Computer. Coach 5 wird an der Uni Amsterdam entwickelt und soll den Schülern ermöglichen, selbst Versuche durchzuführen und alleine oder im Team Erkenntnisse zu gewinnen.

Um die Fortsetzung des Textes zu sehen, einfach die Rollliste auf der rechten Seite dieses Fensters bedienen.

Erklärung des Programmfensters:

Der Bildschirm ist in zwei (oder vier) Fenster aufgeteilt, die frei zuweisbar sind. Zuweisen kann man Texte, Bilder, Diagramme, Tabellen usw. Die untere Hälfte soll das Messinstrument zur Datenaufnahme andeuten.

Oberhalb der Fenster gibt es eine Symbolleiste mit verschiedenen Knöpfen. Für eine

kurze Erklärung der einzelnen Knöpfe nur mit dem Mauszeiger drauffahren und etwas warten.

Die gelben Knöpfe auf der rechten Hälfte der Symbolleiste verwalten die Elemente (Texte, Diagramme,..), die man einem Fenster zuweisen kann.

Falls es Probleme gibt: Ganz rechts, der Knopf mit dem Fragezeichen öffnet das Hilfesystem von Coach.

Im folgenden Experiment werden an die einzelnen Fenster die Messreihen und die Diagramme zur Auswertung adressiert.

Das linke obere Fenster zeigt meist ein kurzes Video des Versuchsablaufs. Du kannst es mit der Play-Taste, die unter dem Bild zu finden ist starten.

Die Textanweisungen bestehen aus 2 Kapiteln:

1. Aufgabenstellung und Einleitung
2. Versuchsdurchführung

Zusätzlich stehen zur Verfügung:

- Wie führt man Messungen mit Coach durch?
- Wie passe ich mit Coach Kurven ein (Function fit)?
- Informationen über die Messgeräte

Diese Abschnitte können mit der Tastenkombination

Strg+Bild auf

Strg+Bild ab

durchgeschaltet werden.

VIEL VERGNÜGEN BEIM EXPERIMENTIEREN!!

Probiere gleich aus: → nächster Abschnitt: Strg+Bild ab

B.2 Aufgabenstellung und Einleitung

Die Problemstellung und die Durchführung wird kurz umrissen. Neben dem Demonstrationsvideo, das jedem Experiment beiliegt, sollte geklärt werden, wie Messdaten aufgenommen werden. Außerdem werden didaktische Ziele formuliert.

Aufgabenstellung:

Es soll die gleichmäßig beschleunigte Translation untersucht werden. Neben der Auswertung in Coach ist zusätzlich ein Arbeitsblatt zu erstellen. Auf dieses wird im lau-

fenden Text noch verwiesen.

Einleitung:

Die Fallbewegung einer Masse wird über einen Faden auf einen Experimentierwagen übertragen. Dadurch erfährt dieser eine Beschleunigung, solange, bis die Masse den Boden erreicht.

Die Bewegung des Wagens wird mit einem Bewegungssensor aufgezeichnet. Die gewonnenen Daten werden über ein Kabel in den Computer zur weiteren Analyse übertragen. Dieser berechnet daraus verschiedene Diagramme, aus denen Du leicht Geschwindigkeiten, Wege, Beschleunigungen und Zeiten ablesen kannst.

Ziele des Experimentes:

Ziel des Versuches ist es, Diagramme lesen und interpretieren zu lernen. Durch Variation der Wagenmasse und der beschleunigenden Masse am Faden sollen die Zusammenhänge zwischen Kraft, Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung entdeckt werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Experimente ist dass Du lernst, mit deinen Kollegen im Team zu arbeiten. Versuche also die Experimente nicht möglichst schnell allein durchzuackern, sondern profitiere möglichst viel von den Kollegen in der Gruppe.

B.3 Versuchsdurchführung

Dies ist der Begleittext zur Durchführung des Experimentes. Zu Beginn des Textes ist in fünf Punkten der Ablauf zusammengefasst. Außerdem wird im Eingang noch auf optionale Hilfetexte hingewiesen. Der Zusammenfassung folgt eine genauere Aufschlüsselung der Handlungsabfolge. Die Chronologie entspricht der Reihenfolge der Fragen auf dem Arbeitsblatt.

Kurzfassung:

- Aufnehmen und Diskutieren eines s - t - Diagramms im AB
- Einpassung einer Kurve im v - t -Diagramm
- Variation der Massen von Wagen und Masse an Faden
- Bestimmung der Beschleunigung des Wagens
- Fertigstellung des (WinWord-) Arbeitsblattes

HINWEIS: Nutze gegebenenfalls die Texte:

- Wie mache ich Messungen mit Coach?
- Wie passe ich mit Coach Kurven ein (Function fit)?
- Informationen zum CBR (Bewegungssensor)

Du kannst Dir die Texte in einem separaten Fenster anzeigen lassen! (Aus 'Display Text' auswählen und gewünschtem Fenster zuweisen)

Durchführung:

Für die Erstellung eines s-t - und v-t - Beispieldiagramms im Arbeitsblatt wird eine Wagenmasse m_1 von 60g ausgewählt (Masse des Wagens mit Waage bestimmen!). An den Faden werden $m_2 = 20g$ gehängt.

Beantwortet damit die Fragen 1 bis 5 im AB!

In Frage 6 wird aus dem v-t - Verlauf die Beschleunigung a ausgerechnet. Im „v-t - Diagramm“ ist neben der Geschwindigkeit noch die Beschleunigung über der Zeit aufgetragen.

Der Berechnungsalgorithmus für a ist sehr empfindlich gegenüber kleinsten Schwankungen. Deshalb wird die v-t - Kurve durch eine eingepasste Funktion ersetzt.

Dies wird mit der Funktion „Function fit“ aus dem Unterpunkt „Analyse“ aus dem Toolbox - Menü realisiert.

Vorsicht!! Die Kurve manuell (mit der Maus) einpassen!! Mit „Auto-fit“ werden hier oft unerwünschte Ergebnisse erzielt!

Für jede neue Messung muss die alte Kurvoneinpassung gelöscht werden!!

Nähere Informationen zu „Function fit“ im Textmodul „Wie passe ich in Coach Kurven ein?“

Sind alle Fragen im Arbeitsblatt beantwortet, drucke dieses für jedes Gruppenmitglied einmal aus.

Das Experiment ist damit beendet. Ich hoffe, du hattest Spaß in deinem Team!

B.4 Zusätzliche Textmodule

Diese optionalen Textmodule sind nicht spezifisch für ein einzelnes Experiment, sondern sind dazu gedacht, allgemeine Informationen, Bedienungshinweise und Tipps zu einzelnen Themen zu geben. Die Module können bei Bedarf verschiedenen Experimenten zugewiesen werden. Sie stellen eine Er-

weiterung des COACH Hilfesystems dar.

Die angeführten Module sind dem Experiment „Bewegung auf der Fahrbahn“ zugewiesen.

B.4.1 Wie mache ich Messungen mit Coach?

Kurzfassung:

- 1) Voreinstellungen an CBL/CBR schicken ('Send settings')
- 2) Messung starten ('Trigger')
- 3) Messdaten in Computer rücksenden ('Get result')

Hintergründe:

Das CBL und das CBR sind sogenannte Datenlogger. Das heißt, sie zeichnen Daten auf und speichern diese zwischen.

Um eine vernünftige Messung zu machen, müssen dem Datenlogger erst Voreinstellungen vom Computer gesendet werden. In diesen Voreinstellungen steht, welche Sensoren angeschlossen sind, wie lange die Messung dauern und wie oft pro Sekunde ein Messwert genommen werden soll.

Sind diese Voreinstellungen vom PC mit 'Send settings' in den Datenlogger übertragen worden, so kann die Messung beginnen.

Meist wird der Messvorgang durch Drücken der 'Trigger'-Taste am CBR/CBL initiiert. Die nach der Messung zwischengespeicherten Daten werden mit 'Get result' in den Rechner gespielt und können für weitere Auswertungen herangezogen werden.

B.4.2 Wie passe ich mit Coach Kurven ein (Function fit)?

Kurzfassung:

Die Option „Function-fit“ oder „Kurveneinpassung“ findet man unter
Analyse → Function Fit
im Toolbox-Menü.

- in „Column“ Messkurve auswählen
- in „Function Type“ geeigneten Funktionstyp auswählen
- Kurve einpassen (manuell oder automatisch)
- „Add-“ oder „Replace graph“ auswählen → „OK“

- bei neuem Messdurchgang eingepasste Kurve LÖSCHEN!!

Function Type:

Hier wird der Funktionstyp ausgewählt, welcher der Messkurve am ähnlichsten ist. Nachdem man sich für eine Funktion entschieden hat, wird ein Beispielgraf gezeichnet, der entweder manuell oder automatisch an die Messkurve angepasst wird.

automatisches Einpassen

Mit der Option „Auto fit“ berechnet der Computer die optimalen Parameter der ausgewählten Funktion, dass diese mit kleinstmöglichem Fehler in die Messkurve passt. Manchmal führt das automatische Einpassen zu nicht erwünschten Ergebnissen. Einige Gründe dafür sind:

- falsch ausgewählter Messbereich
- falsch ausgewählte Funktionstypen
- zu grobe Voreinstellung der Kurvenparameter

Zur Kurveneinpassung wird die gesamte Messkurve herangezogen. Um unerwünschte Kurventeile auszublenden, mit der Funktion „Select data“ aus dem Menüpunkt „Process“ vor der Kurveneinpassung die Messkurve entsprechend vorbereiten.

Um zu entscheiden, welche Kurventyp sich am besten einpassen lässt, kann die automatisch berechnete „Fit quality“ helfen.

Bevor die Funktion „Auto fit“ gewählt wird, sollte die Funktion manuell ungefähr eingepasst werden. Siehe dazu „manuelles Kurveneinpassen“. In seltenen Fällen liefert der Berechnungsalgorithmus bei groben Startwerten falsche Ergebnisse.

manuelles Einpassen einer Funktion

Auf dem Grafen der ausgewählten Funktion ist ein Nagelsymbol zu erkennen. Dieses kann entlang der Kurve frei verschoben und durch Doppelklick fixiert werden. Während ohne Fixierung die Kurve nur translatorisch verschoben werden kann, werden nach Festhalten mit dem Nagelsymbol zusätzlich andere Kurvenparameter entsprechend der Funktionsgleichung verändert, wenn die Kurve mit gedrückter linker Maustaste gezogen wird.

löschen einer eingepassten Kurve

Wird eine Messkurve durch eine eingepasste Funktion ersetzt, so bleibt dieses Bildungsgesetz bei weiteren Messdurchgängen erhalten. Es werden also nicht die neuen Messwerte angezeigt!

Um dem Abhilfe zu schaffen, kann entweder bei jedem neuen Messdurchgang der Versuch neu geladen werden, oder die Einpassung im Diagramm gelöscht werden.

Der erste Vorschlag bedarf keiner weiteren Erklärung. Um im Diagramm die ursprünglichen Einstellungen wiederherzustellen wählt man im entsprechenden Fenster

„create/edit a diagram“ aus.

Unter „column“ → „data range“ wählt man die entsprechende Spalte und weist ihr aus „Connection“ die richtige Formel zu.

B.4.3 Informationen zum CBR

Kurzfassung:

Der CBR (Bewegungssensor) kann entweder direkt an den Computer, oder aber an das CBL angeschlossen werden.

Messbereich: 0.5 - 6 m

Öffnungswinkel des Messkegels: ca. 15

Hinweise:

- auf gute Reflektorfläche achten!
- achten, dass Objekt immer im Messkegel ist
- achten, dass kein anderes Objekt im Messkegel ist
- passende Messfrequenz wählen

Etwas mehr Detail:

Neben der übrigen Experimentieranordnung wird bei dem Versuch noch ein Bewegungssensor benützt.

Dieser Sensor, auch CBR (CalculatorBased Ranger) genannt, misst mittels Ultraschall die Entfernung zum nächsten Objekt im Messstrahl.

Dabei sendet es einen Schallimpuls aus und misst die Zeit, die vergeht, bis dieser vom Objekt reflektiert wieder zum Sensor zurückkommt. Man hört während der Messung ein 'Knacken' wenn ein Schallimpuls ausgesandt wird.

Aus vielen Weg-Zeit Wertepaaren kann der Computer Geschwindigkeit und Beschleunigung errechnen.

Da jedoch Schall vergleichsweise langsam ist (ca. 340 m/s in Luft) ist der Messbereich und die Messfrequenz beschränkt.

Kurzes Beispiel: Um ein 6 m entferntes Objekt zu messen, braucht der Schall (hin und zurück) 35 ms (ca. 1/30 s). Man könnte also (Rechenzeit des CBR unberücksichtigt)

höchstens mit einer Frequenz von 30 Hz die Entfernung messen, sonst würde schon ein neuer Schallimpuls ausgesandt, bevor der alte wieder eingetroffen ist. Realistisch ist eine Messfrequenz von 15 Hz.

Vorteile des Anschlusses des CBR an das CBL:

- Anschluss weiterer Sensoren möglich
- Livemessungen mit sofortiger Anzeige am CBL möglich

Für die Livemessungen am CBL die Taste 'Mode' drücken. Im Sekundenabstand wird am CBR eine Messung gemacht und am CBL ausgegeben. Auf diese Weise kann die Messanordnung leicht justiert werden.

Vor jeder Messung müssen Einstellungen wie Messfrequenz und Messdauer vom PC an den CBR geschickt werden.

Anhang C

Arbeitsblätter zu Experimenten

Im folgenden werden Arbeitsblätter zu den Experimenten gezeigt:

- Bewegung auf der Fahrbahn (aus Abschnitt 4.3.4)
- Weg-Zeit-Diagramme treffen (Abschnitt 4.3.1)

Zur besseren Illustration des Ergebnisses wurden die Arbeitsblätter teilweise ausgefüllt. Messdiagramme aus COACH sind eingefügt und kommentiert worden.

Bei Durchführung des Experimentes wird das Arbeitsblatt von den Schülern zur Gänze am Computer ausgefüllt. Jeder Experimentator soll *sein* Arbeitsblatt (bzw. das Arbeitsblatt seiner Gruppe) in die Physikunterlagen heften.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Altrichter, P. Posch: *Lehrer erforschen ihren Unterricht*, Klinkhardt, Bad Heilbrunn 1990
- [2] E. Bellone, Galilei: Leben und Werk eines unruhigen Geistes, **Biographie: Galilei**, Seite 38-41, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg 1998
- [3] T. Breitschuh: *Impulse Physik 2, Messen mit dem Taschenrechner*, Ernst Klett Verlag GmbH, Stuttgart 1999
- [4] C. Brueningsen, W. Krawiec: *Exploring Physics and Math with the CBL System*, The Kiski School, Saltburg, Pennsylvania 1994
- [5] R. Dengler: *Physik – ein Teil unserer Kultur?*, Palm und Enke, Jena 1995
- [6] J. Gastineau, K. Appel, C. Bakken, R. Sorensen, D. Vernier: *Physics with CBL*, Vernier Software, Portland 1998
- [7] Ch. Gerthsen, H. Vogel: *Physik*, 18. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 1995
- [8] M. Grote: *CBL-Praktikum mit dem TI-92*, Texas Instruments, Austin
- [9] N. Guicciardini, Newton: Ein Naturphilosoph und das System der Welten, **Biographie: Newton**, Seite 53-59, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg 1998
- [10] Hager-Stütz-Uhlmann: *Von der Physik 1, Oberstufe*, E. Dorner, Wien 1997

- [11] P. Häußler, W. Bündler, R. Duit, W. Gräber, J. Mayer: *Perspektiven für die Unterrichtspraxis*, IPN, Kiel 1998
- [12] H. Hinkelmann: *Experimente zur Mechanik mit dem CBR*, bk teachware, Hagenberg (Austria) 1999
- [13] A. Jaros, A. Nussbaumer, P. Nussbaumer: *Basiswissen 1 – Physik compact*, hpt Verlag, Wien 1992
- [14] A. Jaros, A. Nussbaumer, P. Nussbaumer: *Basiswissen 2 – Physik compact*, hpt Verlag, Wien 1992
- [15] J. Kirstein: *Interaktive Bildschirmexperimente*, Technische Universität Berlin, Dissertation, Berlin 1999
- [16] C. Kösters: *Didaktische Probleme des Funktionsbegriffes*, Universität Wien, Diplomarbeit, Wien 1995
- [17] G. Merzyn: *Physikschulbücher, Physiklehrer und Physikunterricht*, IPN, Kiel 1994
- [18] H. Pietschmann: *Phänomenologie der Naturwissenschaft*, Springer Verlag Berlin, Heidelberg 1996
- [19] E. Schmidt: *CBL made easy*, Vernier Software, Portland 1998
- [20] R. Sexl: *Physik 1 AHS*, övb & hpt, Wien 1999
- [21] R. Sexl: *Physik 2 AHS*, övb & hpt, Wien 1999
- [22] G. Stangl: *Physik im Spiegel der Meinung von Schülern und Erwachsenen*, Schriftliche Hausarbeit, Universität München 1992
- [23] H. Stöcker: *Taschenbuch der Physik – Formeln, Tabellen, Übersichten*, Verlag Harri Deutsch AG, Thun 1997
- [24] H. Urban-Woldron: *CBL und CBR im Unterricht, Skriptum zur Lehrerfortbildung im Umgang mit dem CBR und dem CBL*, Skriptum zum Seminar des Österreichischen CA-Projekts III, PI Kärnten, Ossiach 1999

- [25] D. Volz, S. Sapatka: *Physical science with CBL*, Vernier Software, Portland 1997