
Entwicklung einfacher Mess- und Datenerfassungssysteme für Demonstrations- und Schülerexperimente

Wissenschaftliche Arbeit
nach der Gymnasiallehrerprüfungsordnung I von 2009

vorgelegt von
Wasja Aurelius Kleider
geboren in Darmstadt

Physikalisches Institut
Fakultät für Physik und Astronomie
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Betreuung: Prof. Dr. Ulrich Uwer

01. April 2015 { 03. August 2015

Abstract

In this thesis, new systems for data acquisition and measurements based on single-board microcontrollers were devised, and their applicability in the context of physics lessons was examined.

By providing exemplary demonstration and pupil-based experiments, the system's simplicity and wide range of implementation possibilities are shown. The focus is both on optimising lesson preparation as well as realisation and increasing pupil motivation by means of new and unconventional experiments, performed within as well as outside the classroom. Especially the potential of the presented measurement systems for project-oriented work is noteworthy. Sensors that exceed a smartphone's measuring capabilities allow for experiments that have, thus far, been impossible or extremely complicated to perform in a teaching environment.

Furthermore, the functioning of the sensors used is outlined, and detailed information on how to assemble the respective measuring systems without any particular technical background is made available. Moreover, all measurement systems and applications exemplified in this thesis can be downloaded from a project website, to be used or even customised for other experimental purposes.

Zusammenfassung

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit befasst sich mit Mess- und Datenerfassungssystemen, die auf Basis von Mikrocontroller-Boards neu entwickelt wurden, sowie deren Einsatz im Kontext des Physikunterrichts.

Anhand ausgewählter Demonstrations- und Schülerexperimente wird gezeigt, wie einfach und vielfältig einsetzbar diese Systeme sind, wobei der Fokus einerseits auf einer Optimierung der Unterrichtsvorbereitung und -durchführung für Lehrer und andererseits auf einer gesteigerten Schülermotivation durch anregende und außergewöhnliche Messideen innerhalb und auch außerhalb des Klassenzimmers liegt. Die Möglichkeit, die Systeme für projektorientiertes Arbeiten zu nutzen, ist dabei besonders wichtig. Durch Verwendung von Sensoren, deren Messmöglichkeiten die der typischen Smartphone-Sensoren erweitern, werden auch Experimente zugänglich, die im Unterricht bisher nicht oder nur schwierig durchgeführt werden konnten.

Über die Experimente hinaus beschäftigt sich die Arbeit auch mit der Funktionsweise der verwendeten Sensoren und bietet eine detaillierte Anleitung, wie die entwickelten Messsysteme durch interessierte Lehrer oder Schüler nachgebaut werden können. Alle im Rahmen der Arbeit gezeigten Messsysteme und -programme werden auf einer Projektwebseite zum Herunterladen bereitgestellt.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
1. Einleitung	1
2. Hintergrund der Arbeit und Zielsetzung	3
3. Hardware und Software	7
3.1. Pro Lab	7
3.2. Digitalmultimeter	9
3.3. Arduino	10
3.4. Sensoren	18
3.5. In vier einfachen Schritten zur eigenen Sensorbox	30
Schritt 1: Bau der allgemeinen Sensorbox für mobile Messungen	32
Schritt 2: Bau des Sensor-Aufsteckboards	42
Schritt 3: Installation der Arduino-Software und der benötigten Bibliotheken	51
Schritt 4: Hochladen eines Messprogrammes	53
Messauswertung mit Pro Lab und Excel	57
Kurzanleitung: Einstellungen der Pro Lab-Programme	61
4. Demonstrationsexperimente	65
4.1. Mechanische Schwingungen	67
4.1.1. Physikalische Pendel mit Winkelauslese	68
4.1.2. Messung horizontaler mechanischer Schwingungen mit Ultraschall	77
4.1.3. Messung einer vertikalen Federpendelschwingung mit Ultraschall .	87
4.2. Messung gleichmäßig beschleunigter Bewegungen mit Ultraschall	93
4.3. Messungen mit Digitalmultimetern	100
4.4. Messung der Erdbeschleunigung	101
5. Schülerexperimente	103
5.1. Barometrische Höhenmessung	105
5.2. Beschleunigungsmessungen	110
5.2.1. Beispielmessung: Parabelwurf	111
5.2.2. Beispielmessung: Achterbahnfahrt	113
5.2.3. Beispielmessung: Rotationsbewegungen	115

5.3. Geschwindigkeitsmessung am Fahrrad	128
6. Ausblick	132
7. Zusammenfassung und Fazit	134
Anhang	141
A. Aufgabenstellung für den Test der Sensorboxen	141
B. Evaluationsbogen für den Test der Sensorboxen	149
Danksagung	151
Antiplagiatserklärung	153

Abbildungsverzeichnis

1.	Pro Lab-Programmierungsumgebung	7
2.	Digitalmultimeter UT803 von UNI-T	9
3.	Arduino UNO (Draufsicht)	11
4.	Arduino UNO mit Adafruit Datalogging Shield	14
5.	Eine Sensorbox mit Beschleunigungssensor-Modul	15
6.	Grundprinzip eines Arduino-Programms	17
7.	MEMS-Beschleunigungssensoren - Messprinzip und REM-Aufnahme . . .	20
8.	Aufsteckboard für Beschleunigungsmessungen	21
9.	MEMS-Luftdrucksensor { Messprinzip und Foto	23
10.	Aufsteckboard für Luftdruckmessungen	24
11.	Ultraschall-Abstandssensor { Messprinzip und Foto	25
12.	Hallsensor { Messprinzip und Foto	29
13.	Fertige Sensorbox mit Bohrlochern und Ultraschall-Sensorboxdeckel . . .	31
14.	Beispiele für Sensorbox-Bohrschablonen	34
15.	Bohrschablonen auf Sensorbox und Deckel	35
16.	Bohrlöcher im Sensorbox-Gehäuse	36
17.	Verkabelung des Batteriehalters mit Einschalter und Arduino-Board . . .	38
18.	Sensorbox mit Arduino-Board, Batteriehalter und Einschalter	39
19.	Datalogging Shield mit aufgelöteten Steckerbuchsen	40
20.	Allgemeine Sensorbox für mobile Messungen	41
21.	Ausschneiden des Aufsteckboards aus einer Lochrasterplatine	43
22.	Materialien für den Bau des Aufsteckboards für mobile Luftdruckmessungen	44
23.	Bestückung eines Aufsteckboards für Luftdruckmessungen (Foto)	46
24.	Bestückung eines Aufsteckboards für Luftdruckmessungen (schematisch)	47
25.	Lötlhilfe für das Aufsteckboard für Luftdruckmessungen	48
26.	Fertiges Luftdruck-Sensorboard mit Verdeutlichung der Verdrahtung . . .	50
27.	Arduino-Programmierungsumgebung	54
28.	Auswertung einer Luftdruckmessung mit Excel	58
29.	Auswertung einer Luftdruckmessung mit Pro Lab	60
30.	Einstellung der COM-Ports in Pro Lab-Programmen	63
31.	Veränderung der Einstellungen eines Pro Lab-Diagramms	64
32.	Sensorbox für die Messung von Wechselspannungen am Hallsensor	69
33.	Benutzeroberfläche für Messungen am Physikalischen Pendel	70

34.	Versuchsaufbau für Messungen am Physikalischen Doppelpendel	71
35.	Schwingungsverlauf bei gekoppeltem Physikalischem Doppelpendel	72
36.	Eigenfrequenzen der Doppelpendel bei kleinen und gro en Amplituden	74
37.	Eigenschwingungsmodi eines Doppelpendels	74
38.	Reibungsreduzierte Aufhängung der Physikalischen Pendel	75
39.	Schwingungsfrequenzen in den Eigenschwingungsmodi eines Doppelpendels	76
40.	Versuchsaufbau für Ultraschall-Messungen mechanischer Schwingungen	78
41.	Massenabhängigkeit der Frequenz mechanischer Schwingungen	80
42.	Versuchsaufbau für Messung erzwungener mechanischer Schwingungen	81
43.	Resonanzkurven für eine erzwungene mechanische Schwingung	84
44.	Vergleich der Einschwingvorgänge für verschiedene Dämpfungen und Erregerfrequenzen	86
45.	Versuchsaufbau für Ultraschall-Messung einer Federpendelschwingung	87
46.	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Federkonstante nach dem Hooke-schen Gesetz	89
47.	Benutzerober äche für Messungen mechanischer Schwingungen mit Ultra-schall	90
48.	Versuchsaufbau für Messung von Luft- und Gleitreibung am Federpendel	91
49.	Diagramme für Luft- und Gleitreibung beim Federpendel	92
50.	Versuchsaufbau für beschleunigte Bewegungen mit Ultraschallsensor	94
51.	Benutzerober äche für Ultraschall-Messungen von Bewegungen	95
52.	Vergleich der beschleunigten Bewegungen für zwei Neigungswinkel	96
53.	Versuchsaufbau für Ultraschall-Messungen gleichmä ßig beschleunigter Be-wegungen mit Alltagsgegenständen	98
54.	Messung einer realen beschleunigten Bewegung mit Alltagsgegenständen	99
55.	Temperatur-, Luftdruck- und Luftfeuchtigkeitsverlauf an einem warmen Sommertag	102
56.	Benutzerober äche für Einlese und Darstellung gespeicherter Messungen { Luftdruckverlauf bei einer Bergbahn-Fahrt	107
57.	Längenpro l der Heidelberger Bergbahnen	108
58.	Höhendi erenzen bei einer Bergbahn-Fahrt	109
59.	Versuchsdurchführung zum Parabelwurf	111
60.	Beschleunigungsmessung bei einem Parabelwurf	112
61.	Beschleunigungsmessung bei einer Achterbahnfahrt	114
62.	Sensorbox für Messung von Rotationsbewegungen	116

63.	Flugbahnen bei vertikalen und horizontalen Rotationsbewegungen der Sensorbox an einem Seil	117
64.	Beschleunigungsmessung bei einer horizontalen Rotation der Sensorbox an einem Seil	119
65.	Beschleunigungsmessung bei einer vertikalen Rotation der Sensorbox an einem Seil	120
66.	Beschleunigungsmessung bei einer vertikalen Rotation { Überschreitung des Messbereichs	121
67.	Versuchsaufbau zur Messung der Zentripetalbeschleunigung bei vertikaler Rotation einer Fahrradfelge	122
68.	Beschleunigungsmessung bei einer vertikalen Rotation einer Fahrradfelge	123
69.	Auftragung der Zentripetalbeschleunigung gegen die Kreisfrequenz und das Quadrat der Kreisfrequenz	125
70.	Versuchsaufbau zur Messung der Zentripetalbeschleunigung bei horizontaler Rotation einer Fahrradfelge	126
71.	Beschleunigungsmessung bei einer horizontalen Rotation einer Fahrradfelge	127
72.	Fahrrad-Geschwindigkeitsmessung { Versuchsaufbau und Messprinzip . .	129
73.	Geschwindigkeitsverlauf bei einer Fahrradfahrt	131
74.	Messung einer freien Fallbewegung durch eine Schülergruppe	136

Tabellenverzeichnis

1.	Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit { Einuss auf Ultraschall-Abstandsmessungen	27
2.	Liste der auf der Projektwebseite verfügbaren Arduino-Messprogramme .	55
3.	Liste der auf der Projektwebseite verfügbaren Pro Lab-Messprogramme .	61
4.	Messreihe zur Massenabhängigkeit der Frequenz mechanischer Schwingungen	79
5.	Messreihe für die Aufnahme von Resonanzkurven	83
6.	Luftdruck-Messwerte an den Stationen der Heidelberger Bergbahn	109
7.	Messreihe zur Untersuchung der Zentripetalbeschleunigung	124

1. Einleitung

Ein berühmtes Sprichwort, an das sich viele erinnern, wenn sie an den naturwissenschaftlichen Unterricht ihrer Schulzeit zurückdenken, lautet:

„Chemie ist das, was knallt und stinkt, Physik ist das, was nie gelingt.“

Doch ist das damit verbundene Image des nicht funktionierenden Physikexperimentes wirklich gerechtfertigt? Zweifelsohne gibt es Versuche, deren Verlauf unzuverlässiger ist als bei anderen Versuchen, und es gibt solche, die einen sehr großen Vorbereitungsaufwand erfordern und daher bei Lehrern eher unbeliebt sind. Um aber das Schülerinteresse zu wecken und eine Basis für eine gute naturwissenschaftliche Grundausbildung zu schaffen, sind Experimente unverzichtbar.^[5, S. 45]

In der vorliegenden Arbeit soll daher anhand einiger exemplarisch ausgewählter Demonstrations- und Schülerexperimente gezeigt werden, wie einfach und zuverlässig Messaufgaben { auch in Projekten durch die Schüler selbst { bearbeitet werden können. Die gezeigten Systeme sollen dazu dienen, typische Schulexperimente einfacher und zeitsparender, möglichst auch mit Alltagsgegenständen als Versuchsobjekten, durchführen zu können; auch Experimente, die bisher nur kompliziert oder gar nicht zugängliche Messgrößen leicht zugänglich machen, sollen exemplarisch vorgestellt werden.

Über die Anwendung bei Demonstrationsversuchen hinaus sollen die Messsysteme Schüler dazu anregen, die Physik auch außerhalb des Klassenzimmers zu erleben und sich an neue Messaufgaben zu wagen, um die Welt um sie herum zu erforschen. Den Lehrern sollen die vorgestellten Systeme gleichzeitig dabei helfen, ihren Unterricht durch neue oder veränderte Experimente noch spannender zu gestalten und gleichzeitig die Schüler noch intensiver mit einzubinden als bisher. Für besonders interessierte, bastelbegeisterte Lehrer soll diese Arbeit zugleich eine Anregung sein, weitere Experimentiersysteme zu entwickeln, Phänomene einmal aus einer ganz neuen Perspektive zu betrachten oder mit ihren Schülern noch interessantere Themen für Referate oder Projektarbeiten auszuwählen.

Zunächst sollen in Kapitel 2 der Hintergrund und die Zielsetzung der Arbeit näher erläutert werden. Dabei ist die zugrunde liegende Motivation für die Entwicklung einfacher Mess- und Datenerfassungssysteme ein zentraler Aspekt. Im darauf folgenden Kapitel 3 werden die für die vorgestellten Demonstrations- und Schülerexperimente verwendete Hardware und Software vorgestellt. Hier sind insbesondere Arduino-Boards und einige Sensoren, die mit Hilfe der Arduino-Boards ausgelesen werden, von Interesse, ebenso wie die Darstellung und Auswertung der Daten mit Pro Lab-Expert 4.0. Der

Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit sind Demonstrations- und Schülerexperimente, die mit Arduino-Messsystemen durchgeführt werden können; sowohl für die Messsysteme selbst als auch für die Darstellung und Auswertung von Messungen werden Beispielprogramme zur Verfügung gestellt, die von Lehrern und Schülern genutzt werden können. Ausgewählte Experimente werden exemplarisch in den Kapiteln 4 und 5 beschrieben. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk darauf, aussagekräftige Beispiele für die Nutzung von analogen und digitalen Sensoren im Schulkontext zu geben; das Potential des vorgestellten Mikrocontrollers und der verfügbaren Sensoren ist hiermit natürlich bei Weitem nicht vollständig ausgeschöpft, weswegen in Kapitel 6 ein kurzer Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen gegeben wird, sowohl im Bezug auf Arduino als auch auf verwendbare Sensoren. Im abschließenden Kapitel 7 werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst, wobei auch ein Testlauf einiger Experimente mit einer Schülergruppe besprochen wird.

Zur Verbesserung der Lesbarkeit ist in dieser Arbeit von Schülern, Lehrern, Anwendern, etc. immer in der männlichen Form die Rede. Dabei sind jedoch stets Personen des männlichen, weiblichen oder sonstigen Geschlechtes gleichermaßen eingeschlossen (Schüler*innen, Lehrer*innen, Anwender*innen, etc.).

2. Hintergrund der Arbeit und Zielsetzung

Das Experiment ist für ein tiefergehendes Verständnis der Physik von elementarer Bedeutung. Bereits Galileo Galilei begann damit, Experimente zur Untersuchung kontrollierbarer physikalischer Vorgänge unter definierten Bedingungen durchzuführen, und auch heute werden Hinweise auf die Korrektheit von (nicht nur physikalischen) Theorien durch gezielte Experimente überprüft, wobei die Theorien auch widerlegt werden können. Während der Durchführung eines Experimentes werden möglichst alle störenden Einflüsse erkannt und weitestgehend beseitigt, um das Problem oder die Fragestellung anschließend möglichst einfach lösen zu können, denn das „Ziel aller Experimente ist es, Gesetzmäßigkeiten aufzufinden, die die Fälle der Beobachtungen in einen größeren, überschaubaren Zusammenhang bringen“, wobei durch die Ergebnisse der Experimente vor allem auch quantitative Vorhersagen über physikalische Vorgänge getroffen werden können.^[3, S. 1]

Auch im schulischen Kontext haben physikalische Experimente eine große Bedeutung. Hier ist das Primärziel im Gegensatz zur wissenschaftlichen Forschung jedoch nicht, neue Erkenntnisse oder Gesetzmäßigkeiten aufzufinden { denn die hier behandelten Gesetzmäßigkeiten sind bereits seit langer Zeit bekannt {, sondern das Experiment dient vor allem dem Zweck, Schülern die experimentelle Vorgehensweise und Methodik der Physik näher zu bringen. Gerade im Anfangsunterricht müssen die Schüler zunächst einmal lernen, „zwischen wichtigen Einflüssen und unwesentlichen Störgrößen zu unterscheiden und gezielt einzelne Variablen oder funktionale Zusammenhänge zu untersuchen, bevor sie in der Lage sind, eigene Experimente zu planen, durchzuführen und auszuwerten.“^[9, S. 236] Engeln und Euler stellen zudem fest, dass „das Experiment [einerseits] als Teil des Erkenntnisprozesses eine methodische Schlüsselrolle [spielt]; andererseits wird es als zentral angesehen, um das Schülerinteresse zu steigern und Lernprozesse zu fördern.“^[5, S. 45] Gerade ein gesteigertes Schülerinteresse sollte meiner Meinung nach eines der zentralsten Ziele des modernen Physikunterrichts sein, damit das verstaubte Image der „Kreidephysik“ durch ein modernes Image { in dem die Physik als die interessante Naturwissenschaft angesehen wird, die sie ist { ersetzt werden kann. Der Unterricht sollte die Schüler deshalb dazu motivieren, ihre Alltagserfahrungen verstehen zu wollen, sie zu hinterfragen, und diese Fragen mit Hilfe physikalischer Methoden zu lösen.

Der Anspruch dieser Arbeit ist { im Gegensatz zu vielen anderen wissenschaftlichen Arbeiten { dementsprechend nicht, etwas physikalisch Neues zu entdecken. Die Arbeit

greift das physikalische Experiment im Schulkontext auf; so sollen einfache, übersichtliche Aufbauten und Experimentieransätze genutzt werden, um den Schülern physikalische Größen im Experiment leichter zugänglich zu machen und ihnen darüber hinaus auch zu ermöglichen, einige dieser Größen selbst zu untersuchen. Die Eigeninitiative der Schüler soll hier insbesondere bei den Schülerexperimenten im Vordergrund stehen, da Schüler im Unterricht allgemein nur selten mit „[p]roblemorientierte[n] Situationen und Projekte[n] konfrontiert sind, anhand derer sie ihr Wissen selbstständig erarbeiten können.“^[5, S. 46] Doch auch bei den Demonstrationsexperimenten soll unter anderem durch übersichtliche Programme die Möglichkeit eröffnet werden, zu untersuchende Phänomene intuitiver zu verstehen, anstelle den Blick der Schüler durch komplizierte Aufbauten vom Wesentlichen abzulenken, was { nach Kircher et al. { eine wichtige, aus der Wahrnehmungspsychologie stammende Richtlinie für guten Physikunterricht ist.^[9, S. 237] In beiden Fällen sollen durch das Experiment „naturwissenschaftliche Konzepte oder Gesetze [...] erfahrbar gemacht, veranschaulicht und kontextualisiert werden.“^[16, S. 53] Dass die Absicht, mehr Experimente in den Unterricht einzubinden und den Unterricht dadurch lebendiger zu gestalten, in die richtige Richtung geht, wird auch in einer Videostudie von Tesch und Duit bestätigt: „Je stärker der Unterricht durch Experimente bestimmt ist, desto besser ist die Leistungsentwicklung.“^[17, S. 64] Entscheidend sei dabei aber mehr „die Einbettung der Experimente in den Unterricht“ als die Zeit, die insgesamt für Experimente genutzt wird.

Besonders für Demonstrationsexperimente verfügen die meisten Schulen über Systeme, mit denen eine computergestützte Messwerterfassung möglich ist. Das bekannteste Beispiel für ein solches System ist wohl CA von Leybold (LD Didactic), das aus einem Grundmodul besteht, das durch viele Sensoren oder Messinstrumente erweitert werden kann. Aus Gesprächen mit verschiedenen Lehrern habe ich den Eindruck gewonnen, dass solche Messsysteme häufig genau dann, wenn man sie einsetzen möchte, durch andere Kollegen im Gebrauch sind und man daher frühzeitige Reservierungen vornehmen muss; manchmal fehlten auch einzelne Bauteile, weswegen sich im Laufe der Zeit eine gewisse Ablehnungshaltung gegenüber den Datenerfassungssystemen entwickelt hat. Im Gegensatz zu dieser Position stehen andere Kollegen, die so viele Versuche wie möglich mit einem digitalen Messsystem durchführen möchten, weil sie dessen Vorteile schätzen: Direkte grafische Darstellung der Messung am PC, die dann über Beamer auch für die Schüler sichtbar gemacht werden kann, Speicherung der Messwerte für erneute Verwendung zu einem späteren Zeitpunkt, Eingabe von Formeln, mit denen die Messdaten

direkt in andere Größen umgerechnet werden können, das Wegfallen der aufwändigen Aufnahme von Messtabellen und Zeichnen vieler Diagramme von Hand, etc.

Die genannten Kritikpunkte habe ich zum Anlass genommen, einfache Messsysteme aufzubauen, die die genannten Vorteile, die Mess- und Datenerfassungssysteme mit sich bringen, sogar noch erweitern können. Als Basis hierfür wurden Mikrocontroller-Boards der Firma Arduino verwendet (siehe Kapitel 3.3), die in der Anschaffung recht günstig sind und sich sehr vielfältig verwenden lassen. Dies steht im direkten Gegensatz zu Messsystemen wie CASSY, bei denen bereits das Grundmodul sehr teuer ist und jeder zusätzliche Sensor, der für ein neues Experiment benötigt wird, erneut viel Geld kostet. Arduino-Messsysteme kann sich jeder Lehrer auch privat anschaffen, sodass er seinen Unterricht schnell und einfach zu Hause vorbereiten kann und der Vorbereitungsaufwand in der Schule verringert wird. Auch die angesprochenen Probleme, dass Teile fehlen oder man sich ein System immer lange im Voraus reservieren muss, werden dadurch gelöst.

Der größte Vorteil aber, den die entwickelten Messsysteme mit sich bringen, ist die Möglichkeit, dass auch den Schülern ein solches Messsystem mit nach Hause gegeben werden kann, sodass sie eigene Messideen umsetzen und Experimente durchführen können. Hiermit wird an den oben genannten Missstand angeknüpft, dass Schüler nur sehr selten an problemorientierten Situationen oder Projekten arbeiten, denn auch für Projektarbeiten oder GFS¹ sind die hier gezeigten Systeme gut geeignet. Ein weiterer Vorteil solcher günstigen Systeme ist, dass sie auch in größerer Zahl angeschafft werden können und so robust sind, dass damit Schülerexperimente durchgeführt werden können.

Dass die gezeigten Systeme im Eigenbau entstehen, sollte nicht als Problem, sondern als Chance betrachtet werden: Dadurch beschäftigen sich die Schüler mit technischen Fragen, was insbesondere im Fach NwT² ein zentrales Anliegen ist; so können sie sich sowohl praktische technische Fähigkeiten aneignen als auch theoretische Grundlagen der Elektronik sowie der Mess- und Sensortechnik erlernen. Die vorliegende Arbeit bietet unter anderem eine ausführliche und bebilderte Bauanleitung für eine Sensorbox anhand eines konkreten Beispiels, sodass sich auch unerfahrene Lehrer oder Schüler ohne große Mühe eine eigene Sensorbox bauen können. Neben Anleitungen zum Nachbauen werden auch die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Mess- und Darstellungspro-

¹Eine GFS ist die „gleichwertige Feststellung von Leistungen der Schüler“, zu der auch experimentelle Untersuchungen und Projekte zählen. Die Rahmenbedingungen sind in §9 der Verordnung des baden-württembergischen Kultusministeriums über die Notenbildung (NVO) festgelegt.

²Seit dem Schuljahr 2007/2008 gibt es an den Gymnasien in Baden-Württemberg das Schulfach NwT (Naturwissenschaft und Technik) als Profulfach des naturwissenschaftlichen Profils. Hier sollen Themen, „die sich an der Erfahrungs- und Gedankenwelt der Schülerinnen und Schüler orientieren“, fächervernetzend betrachtet werden. (Quelle: <http://www.nwt-bw.de>, Abruf 24.07.2015)

gramme selbst auf einer Projektwebseite bereitgestellt, sodass interessierte Lehrer auch ohne jegliche Programmiererfahrung die gezeigten Systeme nutzen können; für bastel- und programmierbegeisterte Lehrer bietet sich auch die Möglichkeit, neue Programme zu entwickeln und bisher nicht genutzte Sensoren für den Unterricht aufzubereiten und gemeinsam mit Schülern für Messungen anzuwenden.

An der Entwicklung und dem breiten Einsatzspektrum der Arduino-Sensorbox zeigt sich auch das Potential für fachübergreifendes Lernen, indem die Schüler sich beispielsweise im NwT-Unterricht mit dem Bau einer Sensorbox und den technischen Hintergründen der Sensoren beschäftigen, im Informatikunterricht Messprogramme schreiben, im Sportunterricht verschiedene Messungen durchführen und diese dann im Physikunterricht auswerten. Hierfür ist die Option nötig, dass die Messsysteme mobil eingesetzt werden können; auch damit setzt sich die vorliegende Arbeit auseinander (siehe Kapitel 3.3), indem die mobile Datenerfassung mit Arduino-Shields genutzt wird, um Messungen durchzuführen, die kabelgebunden gar nicht oder nur sehr kompliziert möglich sind.

Gezeigt werden nur einige beispielhafte Experimente, die mit den entwickelten Sensorboxen durchgeführt werden könnten, wodurch Lehrer und Schüler dazu angeregt werden sollen, eigene Experimentierideen zu entwickeln und umzusetzen. Aus diesem Grund wird das Potential der Arduino-Messsysteme und der nutzbaren Sensoren in der vorliegenden Arbeit auch nicht voll ausgeschöpft; es soll lediglich gezeigt werden, dass viele verschiedene Messungen möglich sind, die je nach gewähltem Lernziel eingesetzt und ausgewertet werden können. Die zentrale Hoffnung für außerunterrichtliche Schülerexperimente wie die hier gezeigten ist aber, dass die Schüler mit Freude an eigene Messungen herangehen und durch die Experimente ihre Ideen und Vorstellungen von ihrer täglichen Umgebung untersuchen. Wenn das Interesse der Schüler erst einmal geweckt ist, lassen sie sich meiner Meinung nach viel eher auf die Physik ein und beschäftigen sich auch deutlich über den Physikunterricht hinaus damit.

3. Hardware und Software

3.1. ProfiLab

Bei Pro Lab handelt es sich um eine Software, mit der Programme zur Messwerterfassung oder Steuerung von Applikationen entwickelt werden können. Eine Besonderheit liegt darin, dass man dabei keine Programmierkenntnisse benötigt, da die Programme grafisch entwickelt werden. Ein Beispiel für ein Pro Lab-Programm zur Auslese von Digitalmultimetern ist in Abbildung 1 gezeigt. Im Hintergrund befindet sich die Programmieroberfläche, auf der die im Projekt benutzte Hardware, alle Anzeigeelemente der Benutzeroberfläche (z.B. Leuchtdioden oder Y(t)-Schreiber) sowie Steuerelemente (z.B. Schalter oder Schieberegler) logisch miteinander verknüpft werden. Im Vordergrund ist die sogenannte Frontplatte zu sehen, die später als Benutzeroberfläche dient und alle Frontplattenelemente enthält, deren Größe, Form, Farbe und Position sehr leicht verändert werden können. Die Benutzung der Programmieroberfläche ist intuitiv, der Anwender wird zudem durch ausführliche Hilfedokumente zu allen Bauteilen unterstützt.

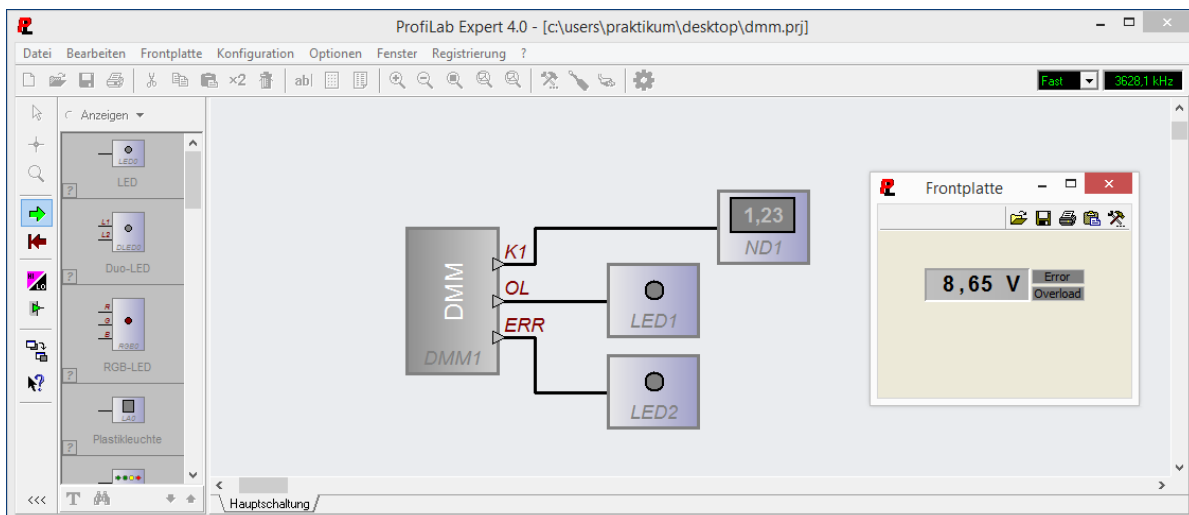


Abbildung 1: Pro Lab-Programmierungsumgebung mit Benutzeroberfläche. Gezeigt ist ein einfaches Programm zur Auslese eines Digitalmultimeters. Im Hintergrund befindet sich die Programmieroberfläche, auf der die Hardware, Anzeigeelemente und Steuerelemente logisch miteinander verknüpft werden. Vorne rechts ist die sogenannte Frontplatte gezeigt, die als grafische Benutzeroberfläche zur Anzeige der Messwerte dient und die Steuerung durch den Benutzer ermöglicht. In diesem Beispiel wurde die Spannung einer 9V-Blockbatterie gemessen.

Die in dieser Arbeit gezeigten Programme wurden mit *fi* -*E* 4.0 erstellt. Es gibt auch verschiedene sogenannte „Light-Versionen“ mit verkleinertem Funktionsumfang, wie beispielsweise *D* - *fi* 4.0 zur Messung, Steuerung und Regelung mit Digitalmultimetern oder *D* - *fi* 4.0 zur Entwicklung rein digitaler Steuerungen. Für die meisten Anwendungen werden jedoch Elemente beider Light-Versionen benötigt, weswegen die Nutzung der Vollversion sinnvoll ist. Mit dieser können neue Projekte erstellt oder bestehende Projekte bearbeitet werden.

Ist ein Projekt einmal fertig entwickelt, kann auch eine compilierte Version erstellt werden, die dann als Standalone-Anwendung auch ohne installierte Pro Lab-Software genutzt werden kann, beispielsweise für Schülerexperimente oder in Schülerlabors. Die Konfiguration der Hard- und Software kann hierbei immer noch direkt von der Frontplatte aus vorgenommen werden, wenn dies vom Programmentwickler gewünscht ist. So können beispielsweise die Werte für Triggerschwellen, Auslesefrequenzen oder die COM-Port-Adressen der verwendeten Hardware eingestellt werden. Die optimierten Einstellungen können dann auch gespeichert und bei der nächsten Programmanwendung wieder geladen werden. Ebenso ist es möglich, Graphen zu speichern oder zu laden sowie die Zoomeinstellungen der Diagramme an die durchgeführten Messungen anzupassen. Eine Anleitung zu den genannten Funktionen am Beispiel der in der vorliegenden Arbeit gezeigten Messprogramme kann auf der Projektwebseite, <http://schulmaterial.physi.uni-heidelberg.de>, gefunden werden. Eine sehr kurze Übersicht über diese Funktionen ist auch im Anhang gezeigt.

Weitere Informationen zur Pro Lab-Software sind direkt auf der Website des Herstellers ABACOM Ingenieurbüro GbR verfügbar.³ Hier können auch Demoversionen heruntergeladen werden, um den Funktionsumfang der verschiedenen Pro Lab-Versionen zu testen, bevor die Software gekauft wird. Das Speichern von Schaltungen ist mit den Demoversionen jedoch nicht möglich, ebenso wenig eine Nutzung der Software für einen Zeitraum von mehr als drei Minuten pro Anwendung. Eine Kurzanleitung zur Benutzung von Pro Lab-Expert 4.0 mit Beispielen für einige einfache Messungen kann online gefunden werden.⁴

³<http://www.abacom-online.de/html/profilab-expert.html>, Abruf 06.07.2015

⁴<http://www.physi.uni-heidelberg.de/~eisele/KurzanleitunProfilabexperimente.pdf>, Abruf 06.07.2015

3.2. Digitalmultimeter

Digitalmultimeter sind Messgeräte, die neben den typischen Messgrößen wie Spannung und Strom häufig auch Größen wie Widerstände, Kapazitäten oder Frequenzen messen können. Im Unterricht können sie sowohl mit PC (mit entsprechenden Treibern über eine RS232-Schnittstelle/USB) genutzt werden als auch als alleinstehendes Messgerät. Abbildung 2 zeigt beispielhaft das Digitalmultimeter UT803 von UNI-T.



Abbildung 2: Digitalmultimeter UT803 von UNI-T. Das Tischmultimeter kann alleinstehend oder über USB an einen PC angeschlossen genutzt werden. Für die Kommunikation mit dem PC muss die RS232-Schnittstelle per Knopfdruck aktiviert werden (Mitte). Die aktive RS232-Schnittstelle wird dann im Display angezeigt (links).

Durch Verwendung von Analogensensoren sind auch weitere Messgrößen zugänglich; so können beispielsweise als Wärmestrahlungssensoren Thermopiles genutzt werden, zur Temperaturmessung sind Pt100-Widerstände geeignet, mit Dehnungstreifen können Durchbiegungen gemessen werden. Digitalmultimeter arbeiten mit einer Grundfrequenz von etwa 40 kHz zudem recht schnell. Digitalmultimeter sind meiner Meinung nach eine sinnvolle Anschaffung sowohl für den privaten Gebrauch als auch für die Verwendung im Unterricht. Eine kurze Anleitung mit zwei Experimentieranschlägen aus der Heidelberger Lehramtsausbildung kann online gefunden werden.⁵

⁵<http://www.physi.uni-heidelberg.de/~eisele/Experimentsheets/MesswertaufnahmeMitDMM.pdf>, Abruf 06.07.2015

3.3. Arduino

Bei Arduino handelt es sich um Mikrocontroller-Boards, die inzwischen in vielen verschiedenen Varianten vertrieben werden. Gleichzeitig werden die zugehörige Open Source-Software und die Treiber mitgeliefert, mit Hilfe derer die Boards programmiert und ausgelesen werden können. Die Software kann direkt von der Website der Entwickler, <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>, heruntergeladen werden.⁶ Im Gegensatz zu den Pro Lab-Programmen, die nur mit Windows funktionieren, kann Arduino auf allen gängigen Betriebssystemen (Windows, Linux, Mac) programmiert, angewendet und ausgelesen werden.

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Board Arduino UNO ist beispielhaft in Abbildung 3 gezeigt. Es verfügt über 14 digitale Ein- und Ausgänge (sogenannte Pins) sowie sechs analoge Eingänge, an denen elektronische Bauteile angeschlossen werden können. Das Board wird für die Kommunikation mit dem PC mit einem Standard-USB-Kabel angeschlossen, über das auch die Stromversorgung erfolgt. Für Standalone-Anwendungen kann eine externe Spannungsquelle angeschlossen werden. Die Grundspannung des Arduino ist 5 V, an den Pins fließen Ströme bis 40 mA. Das Board arbeitet mit einer Frequenz von 16 MHz noch deutlich schneller als Digitalmultimeter und ist daher auch zur Messung schnellerer Phänomene geeignet. Dabei ist zu beachten, dass das Durchlaufen von Arduino-Programmen und Befehlen auch eine gewisse Zeit beansprucht, sodass keine Messung mit einer so hohen Ausleserate erfolgen kann. Der interne Speicher des Mikrocontrollers ist 32 kB groß, sodass nicht allzu aufwändige Messprogramme ohne Weiteres genutzt werden können.

Da sowohl die Arduino-Hardware als auch die Software verbreitet sind, gibt es mittlerweile mehrere Firmen, die nachgeahmte Produkte verkaufen, die nicht in Italien oder den USA, sondern in Asien produziert werden und daher etwas günstiger sind. Ich persönlich bevorzuge die Original-Hardware; für einen Kauf im Klassensatz können jedoch andere Angebote interessant sein, beispielsweise bietet die Firma Funduino recht günstige Komplettpakete an, die ein nachgeahmtes Arduino-Board und sogar schon verschiedene Sensoren enthalten, mit denen die Schüler arbeiten können. Mit der Qualität und Lebensdauer dieser nachgeahmten Produkte habe ich bisher allerdings keine Erfahrung gemacht.

Die Vorteile bei der Verwendung von Arduino-Messsystemen im schulischen Kontext liegen auf der Hand: Sie sind sehr kompakt, günstig, vielfältig einsetzbar und dank der vielen online verfügbaren Ergänzungen, Hilfen und Bibliotheken leicht zu benutzen und an eigene Messideen anzupassen. Für physikalische Messungen ergeben sich { insbeson-

⁶<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>, Abruf 19.07.2015

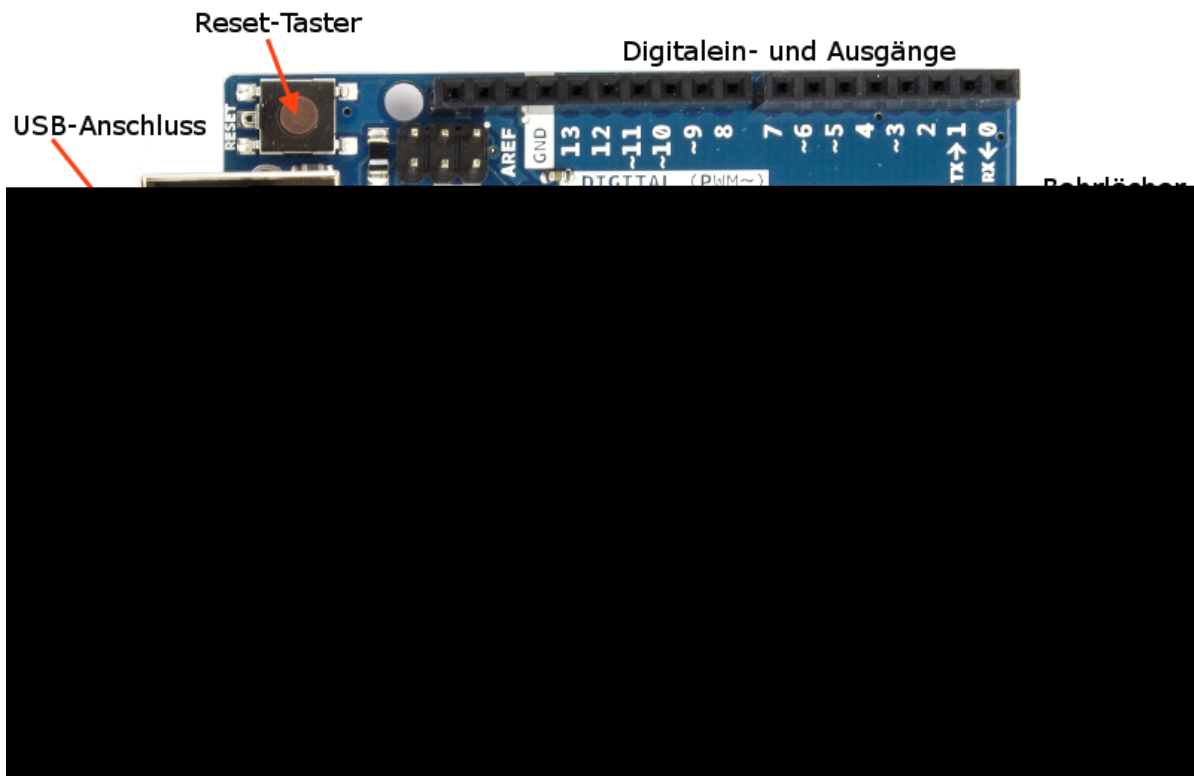


Abbildung 3: Foto (Draufsicht) eines Arduino UNO. Links befinden sich Eingänge für ein USB-Kabel und eine externe Spannungsquelle, die schwarzen Pfostenstecker oben und unten ermöglichen das Aufstecken von Erweiterungsboards (sogenannter Shields, z.B. Datalogging Shield) auf die digitalen und analogen Ein- und Ausgänge. Unten rechts ist das Herzstück des Arduino zu sehen, der Mikrocontroller ATmega328. Mit den bereits vorgefertigten Bohrlochern kann das Board sehr einfach mit M3-Schrauben in einem Gehäuse festgeschraubt werden. Quelle: Arduino.cc (<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>, Abruf 21.07.2015).

dere gegenüber Messungen mit dem Smartphone { einige signifikante Vorteile. In einem Gehäuse verbaut und gepolstert sind Arduino-Boards recht robust. Gerade für Würfe oder Fallbewegungen kann von Schülern nicht erwartet werden, dass sie eine Messung mit ihrem Smartphone durchführen und dabei riskieren, dass es zu Bruch geht; eine Arduino-Sensorbox allerdings kann ohne Weiteres geworfen werden, ohne dass die Schüler Angst um ihr teures Eigentum haben müssen. Mit entsprechenden Sensoren können darüber hinaus deutlich größere Beschleunigungen gemessen werden als mit Smartphones { mit modernen Beschleunigungssensoren sind sogar Beschleunigungen bis zum 16-fachen der Erdbeschleunigung messbar. Dies kann für einige Messungen sehr hilfreich sein, beispielsweise bei Achterbahnfahrten oder schnellen Rotationsbewegungen. Auch bei Magnetfeldmessungen können mit den passenden Sensoren deutlich größere Messbereiche abgedeckt werden als mit dem Smartphone. Da die Messprogramme selbst entwickelt und nicht auf einem Smartphone installiert werden müssen, fallen keine Kontrollen und eventuell sogar Blockaden der Software durch den Apple App Store oder den Google Play Store an. Die Verteilung von Messprogrammen an die Schüler ist ohne Downloads von Drittanbietern möglich und verzichtet darüber hinaus vollständig auf Werbung.

Selbstverständlich ist der Bau einer Sensorbox vor der Verwendung mit einiger Arbeit verbunden. Die Investition zahlt sich aber meiner Meinung nach insofern aus, dass danach die Freiheiten in der Benutzung sehr viel größer sind als mit vorgefertigten Messlösungen oder Smartphones. Gerade, wenn eine Sensorbox mit austauschbaren Sensoren und Deckeln für verschiedene Messungen angefertigt wird, ist der Nutzen für den Unterricht sehr groß, da für die Vorbereitung des Experiments lediglich ein Sensorboard aufgesteckt bzw. der Deckel gewechselt und ein anderes Arduino-Programm hochgeladen werden müssen. Da der Grundaufbau immer gleich bleibt und die Bedienung von Pro Lab-Ausleseprogrammen recht intuitiv ist, muss man sich nicht ständig in andere Benutzerhandbücher einlesen.

Kommunikation mit dem PC und Datenauslese

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Arduino-Programme kommunizieren über eine sogenannte Serielle Schnittstelle mit dem PC. Dafür müssen die mit der Arduino-Software gelieferten Treiber installiert werden. Verfügt die Schule nicht über Windows-PCs, sodass die Pro Lab-Programme nicht genutzt werden können, oder sind alternative Auswertungsprogramme erwünscht, können die von den Arduino-Boards gesendeten Daten auch anderweitig ausgelesen werden. Die Form, in der die Daten an den PC übertragen werden, ist jeweils in der Beschreibung der Programme angegeben, sodass

der Endverbraucher frei darüber entscheiden kann, wie er die Messprogramme verwendet. Die Befehle, die in den jeweiligen Programmen zur Steuerung des Arduino-Boards genutzt werden, sind in einer auf der Projektwebseite, <http://schulmaterial.physi.uni-heidelberg.de>, hinterlegten Kurzanleitung erklärt.

Inzwischen gibt es auch kleine Mikrocontroller-Boards, die das Senden und Empfangen von WLAN-Signalen ermöglichen, beispielsweise der Mikrocontroller ESP8266 vom Hersteller Espressif. Dadurch waren auch drahtlose Live-Messungen denkbar, jedoch nicht für sehr schnelle Vorgänge, da die Übertragung eine gewisse Zeit beansprucht. Hierfür sind zudem tiefere IT-Kenntnisse Voraussetzung.

Mobile Messungen mit Datalogging Shield

Um auch mobile Messungen durchführen zu können, wird eine Möglichkeit benötigt, die Messdaten möglichst zusammen mit einer Echtzeit-Zeitmarke des Aufnahmezeitpunktes zwischenspeichern, um sie später am PC auswerten zu können. Hierzu bietet sich ein sogenanntes Datalogging Shield von Adafruit Industries an, das gleichzeitig eine Schnittstelle für SD-Karten und eine Echtzeituhr bereitstellt und sich daher sehr gut für mobile Messungen eignet. Auf diesem Shield kann auch direkt eine Schaltung mit Sensoren verlötet werden, da ein Bereich mit Lochraster zur Verfügung steht (siehe Abbildung 4); um eine flexiblere Handhabung mit verschiedenen Sensoren zu ermöglichen, wurden diese jedoch auf zusätzlichen kleinen Lochrasterplatinen verlötet, die dann auf das Datalogging Shield aufgesteckt werden können. In Abbildung 4 sind ein auf ein Arduino-Board aufgestecktes Datalogging Shield und seine Komponenten gezeigt.

Das Board muss für Messungen unterwegs zusätzlich mit einer mobilen Spannungsquelle versorgt werden. Diese externe Gleichspannungsquelle muss eine empfohlene Spannung von 7-12 V liefern, die auf dem Board durch einen Spannungsregler auf 5 V reduziert wird. Aus diesem Grund bieten sich 9 V-Blockbatterien an, da sie relativ günstig sind und relativ lange halten; hierbei muss aber beachtet werden, dass die Spannung nicht unter etwa 7.5 V fällt, da andernfalls die Programme nicht mehr stabil laufen { vor einer Messung sollte die Batterie also ausgetauscht oder zumindest eine Ersatzbatterie bereitgehalten werden. Damit bei mobilen Messungen kein Stecker von der Aueiseite an das Board angeschlossen werden muss, wurde die Batteriehalterung hier direkt von unten an das Arduino-Board angelötet und ein Schiebeschalter zum Abklemmen der Spannungsquelle zwischengeschaltet. So sind sowohl kabelgebundene Messungen als auch mobile Messungen mit der selben Sensorbox möglich, was erneut für eine Reduktion der Kosten für die Sensorboxen sorgt. In Abbildung 5 ist eine Sensorbox zur mobilen

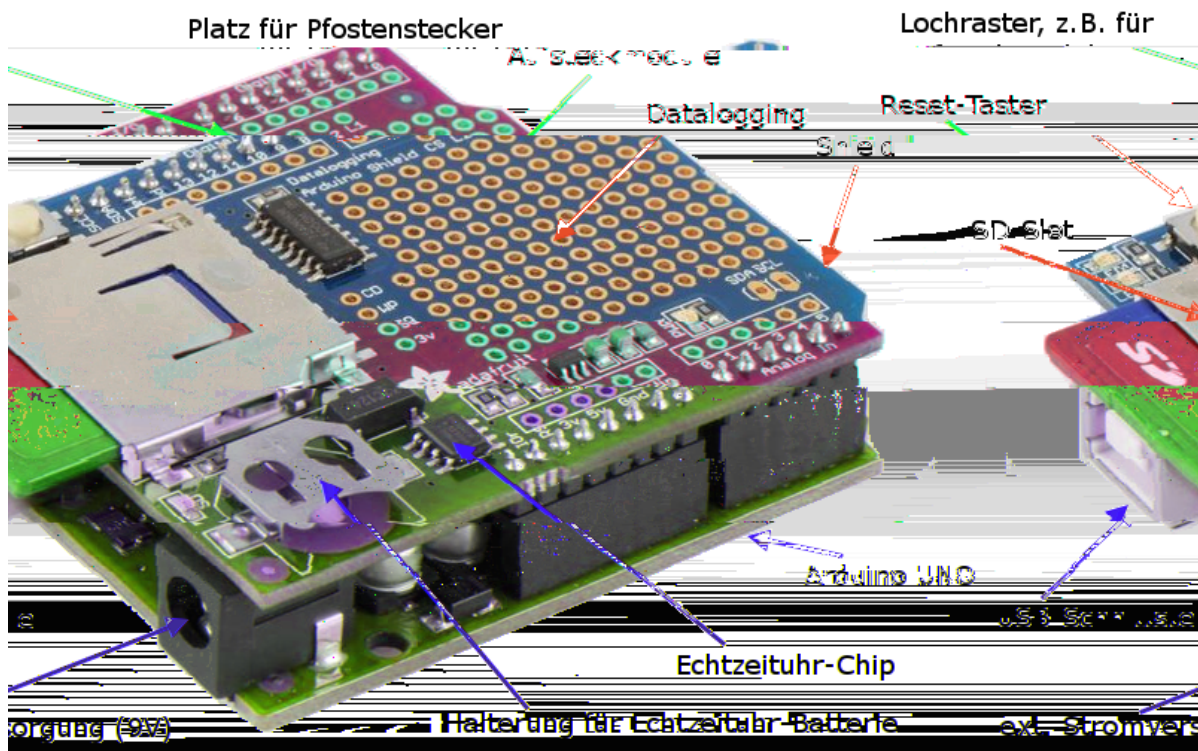


Abbildung 4: Foto eines auf einem Arduino UNO aufgesteckten Adafruit Datalogging Shields. Werden auf das Shield erneut Pfostenstecker aufgelötet, können darauf Sensor-Aufsteckboards gesteckt werden. Dadurch können mit dem selben Arduino mit Datalogging Shield verschiedene Sensoren verwendet werden. Die Sensoren können alternativ auch direkt auf dem Lochraster verlötet werden. Durch die Echtzeituhr und die Schnittstelle für SD-Karten ist ein solches Modul für mobile und kabellose Messungen sehr gut geeignet. Quelle: Adafruit Industries (<https://learn.adafruit.com/adafruit-data-logger-shield>, Abruf 21.07.2015).

Messung von Beschleunigungen gezeigt. Der Deckel mit den Löchern, durch die die Taster betätigt und die Statusleuchten gesehen werden können, wurde hier entfernt. Auch die Schaumstoffpolsterung, mit der die aufgesteckten Komponenten und die Batterie vor einem Herausfallen bei starken ruckartigen Bewegungen gesichert werden sollten, ist hier nicht gezeigt, da sie die anderen Komponenten verdecken würde.

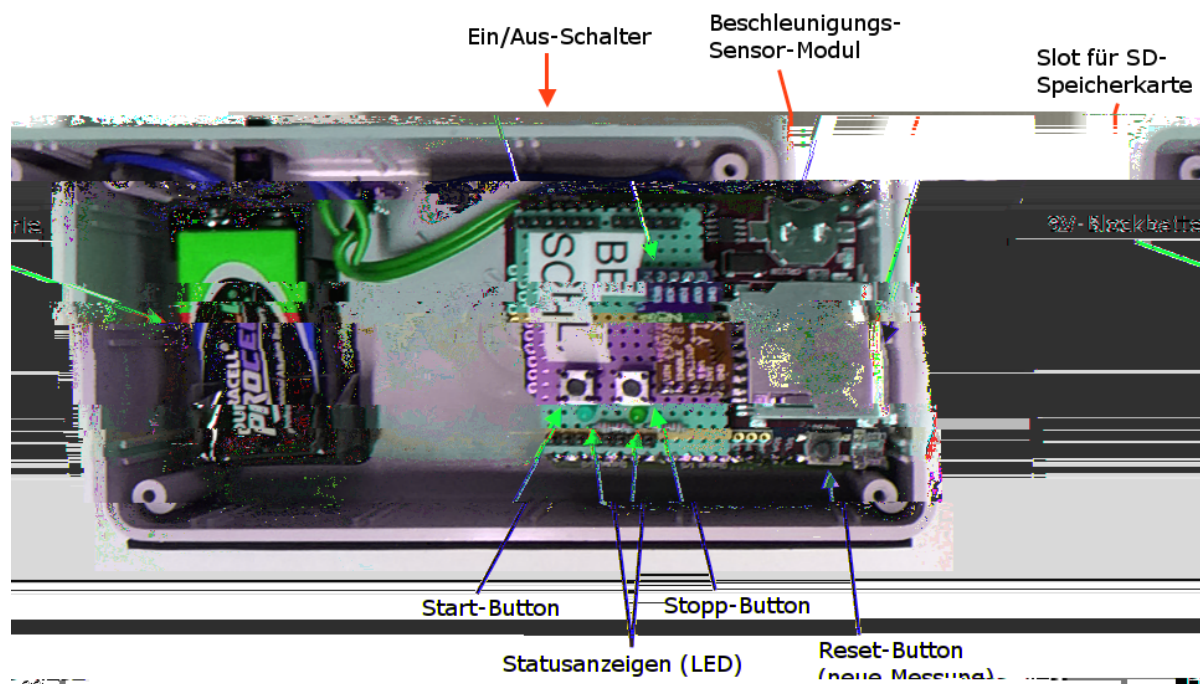


Abbildung 5: Foto der Sensorbox mit Beschleunigungssensor-Modul. Um nicht angeschraubte Teile wie die Batterie oder das aufgesteckte Sensor-Modul gegen Ablösen beim Aufprall zu sichern, sollten vor Anschrauben des Deckels Schaumstoffstücke in die Sensorbox gelegt und letztere zusätzlich mit Luftpolsterfolie umwickelt werden. Das Drücken der Start- und Stopp-Knopfe kann auch noch durch die Polsterung hindurch erfolgen, indem ein dünner Stift durch ein kleines Loch in der Polsterung auf den jeweiligen Knopf gedrückt wird.

Warum Arduino und nicht z.B. Raspberry Pi?

Das Grundprinzip der Arduino-Programme ist, dass nach jedem Start und einmaligem Durchlaufen einer Setup-Funktion eine Schleife so lange immer wieder durchlaufen wird, bis die Stromversorgung unterbrochen oder das Board durch die Software zum Anhalten gezwungen wird. Dieses Prinzip ist in Abbildung 6 schematisch und mit einem Programm

ohne auszuführende Inhalte verdeutlicht. Raspberry Pi hingegen arbeitet mit einem eigenen Betriebssystem, das von einer Speicherkarte geladen wird. Die Programmierung von Messprogrammen ist zwar ähnlich einfach wie mit Arduino, das Board benötigt jedoch einen Bildschirm und Eingabemedien (z.B. Maus und Tastatur), um benutzt werden zu können.⁷ Zudem sind auf dem Board keine analogen Eingänge verfügbar. Für sehr einfache Anwendungen mit möglichst wenig Benutzerabhängigkeit kann es daher nicht genutzt werden. Die Einfachheit des gezeigten Programmablaufes und der Arduino-Befehle sowie die günstigen Konditionen haben mich dazu bewegt, das Arduino-System gegenüber anderen Systemen zu bevorzugen. Darüber hinaus gibt es eine sehr große Arduino-Community, in der verschiedene Nutzer ihre Ideen und Programme anderen Nutzern zur Verfügung stellen. Auch bieten viele Sensor-Hersteller Beispielquelltexte und Bibliotheken an, mit denen ihre Sensoren einfach in Arduino genutzt werden können.

Weitere Informationen

Die hier gezeigten Informationen zeigen nur einen sehr kleinen Ausschnitt der verfügbaren Arduino-Produkte. Je nach Anwendung und preislicher Flexibilität können auch andere Boards in Frage kommen, für die die bereitgestellten Messprogramme aber gegebenenfalls nicht ohne Weiteres funktionieren. Dennoch kann es für bastelbegeisterte Lehrer und Schüler interessant sein, sich über die weiteren Möglichkeiten zu informieren. Hierzu ist die Arduino-Website { <https://www.arduino.cc> } die beste Adresse. Dort finden sich auch weitere Informationen zu den Arduino-Befehlen, Tutorials zum Erlernen der Programmiersprache, Projektideen und viele weitere Angebote.

⁷Die Steuerung ist auch per Remotekontrolle möglich, aber komplizierter als mit Maus, Tastatur und Display.

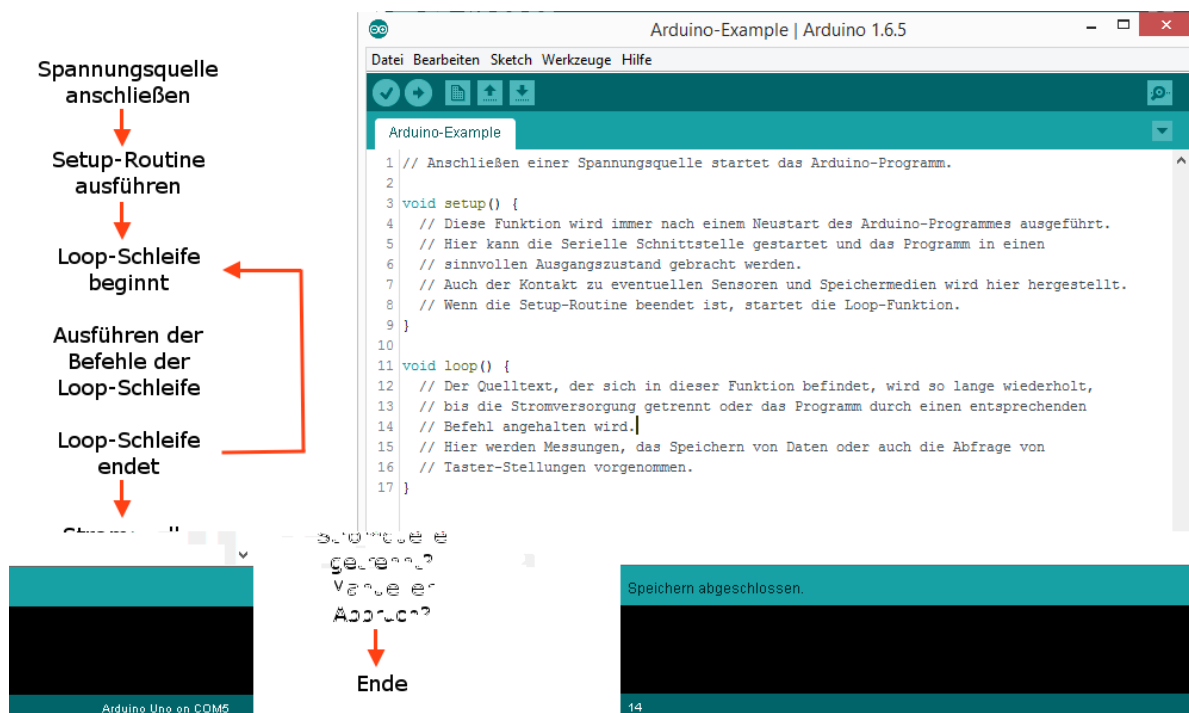


Abbildung 6: Grundprinzip eines Arduino-Programmes. Sobald das Board an eine Spannungsquelle angeschlossen wird, durchläuft es zunächst einmal eine Setup-Routine, bevor es in eine Endlos-Schleife übergeht, die nur durch Trennen der Stromversorgung oder ein Anhalten durch die Software unterbrochen wird. In dieser Schleife werden alle Messbefehle, Datenspeicherungen, Taster-Abfragen und Leuchtanzeigen-Steuerungen vorgenommen.

3.4. Sensoren

Sensoren sind allgemein Objekte, die auf eine physikalische Veränderung durch Ausgabe eines Signals reagieren. Physikalische Veränderungen sind beispielsweise Bewegungen, Druckänderungen, Wärmeänderungen, Strahlung oder Änderungen des magnetischen Flusses. Vielen Sensoren liegen heute sogenannte mikro-elektromechanische Systeme (MEMS, engl. *Micro Electro Mechanical Systems*) zugrunde, also miniaturisierte Systeme, die auf elektromechanischen Prinzipien basieren. Der Grund dafür ist, dass diese Systeme sehr klein konstruiert und daher in vielen elektronischen Anwendungen genutzt werden können. Heute wurden solche Sensoren ursprünglich für bestimmte Anwendungsbereiche wie beispielsweise die Automobilindustrie (Beschleunigungssensoren für Airbag-Kontrolle) entwickelt; da sie mittlerweile jedoch auch in vielen anderen Bereichen wie der Smartphone- oder Spielzeugindustrie genutzt und daher in großen Mengen hergestellt werden, sind sie deutlich kostengünstiger geworden.^[12, S. 523ff.]

In diesem Abschnitt werden die für die vorliegende Arbeit verwendeten Sensoren und ihre Funktionsweise kurz vorgestellt werden. Für nähere Informationen zu den jeweiligen physikalischen Eigenschaften und Messbereichen der Sensoren können die zugehörigen Datenblätter herangezogen werden, die von den Herstellern veröffentlicht werden. Die Besprechung der Funktionsweise von MEMS-Sensoren und der Bau von Sensorboxen, die ebensolche Sensoren nutzen, bietet sich auch für den NwT-Unterricht⁸ an, denn hier sollen „technische Fragestellungen und praktische Aufgaben“ mit einem besonders großen Alltagsbezug behandelt werden.⁹

Zusätzlich zu den gezeigten gibt es noch sehr viele weitere Sensoren, die für Experimente genutzt werden könnten; für diese Arbeit wurden bewusst nur einige exemplarische Sensoren ausgewählt. Einen Überblick über verfügbare Sensoren bieten die Kataloge der Elektronik-Versandhäuser und viele Bücher und Online-Berichte über die Verwendung von Sensoren mit Mikrocontrollerboards wie Arduino. Für Interessierte ist das Buch „Sensoren“^[8] empfehlenswert; hier werden zusätzlich zu den vorgestellten Sensoren auch kurze und gut erklärte Programmbeispiele für die Verwendung mit Arduino gegeben. Interessante Versuche könnten beispielsweise noch mit Dehnungsmessstreifen, Strahlungssensoren, Thermopiles, Gyroskopen, Lichtsensoren, Magnetfeldsensoren, etc. durchgeführt werden; alle Sensoren können in Kombination mit Arduino verwendet wer-

⁸Naturwissenschaft und Technik, siehe Fußnote 2.

⁹<http://www.kultusportal-bw.de/Lde/Startseite/schulebw/Naturwissenschaftliches+Profil>, Abruf 23.07.2015

den, sodass interessierte Lehrer (oder auch Schüler) sich neue Messideen überlegen und im besten Fall eigene Experimente entwickeln und teilen können.

Beschleunigungssensor

Für die in dieser Arbeit gezeigten Beschleunigungsmessungen wurde ein Bausatz von ELV Elektronik genutzt, auf dem der 3-Achsen-Beschleunigungssensor BMA020 von Bosch Sensortec verbaut ist. Der Sensor kann laut Datenblatt Beschleunigungen bis zu $\pm 8g$ in drei senkrecht zueinander stehenden Achsenrichtungen messen.¹⁰

Die meisten Beschleunigungssensoren arbeiten mit einer MEMS-Struktur mit sogenannter differentieller kapazitiver Auslese. Vereinfacht beschrieben besteht der Sensor je Achse aus einer an Federn gelagerten seismischen Testmasse, die aufgrund ihrer Massenträgheit bei beschleunigten Bewegungen ihre Position weniger stark ändert als der feste Rahmen um sie herum (vergleiche Abbildung 7). Sowohl am Gehäuse, als auch an der Testmasse, sind dabei viele kleine Kammzähne aus Siliziumkristallen^[12, S. 534] nebeneinander angeordnet. Durch die Bewegung der beiden Komponenten relativ zueinander ändert sich die Kapazität; diese Änderung wird gemessen und in eine Beschleunigung umgerechnet.

In allen gängigen Smartphones sind solche oder ähnliche Beschleunigungssensoren eingebaut. Die meisten dieser Sensoren haben jedoch einen sehr kleinen Messbereich von $\pm 2g$, da sie hauptsächlich für die Bestimmung der Neigung des Bildschirms benötigt werden. Für Messungen größerer Beschleunigungen werden Sensoren wie der BMA020 (Messbereich: $\pm 8g$) benötigt. In Abbildung 8 ist ein Aufsteckboard mit diesem Beschleunigungssensor gezeigt, das zusammen mit einem Datalogging-Shield und einem Arduino in einer robusten, mobilen Sensorbox untergebracht und für verschiedene Beschleunigungsmessungen genutzt werden kann. Eine Sensorbox mit diesem Sensor wurde bereits in Abbildung 5 gezeigt.

¹⁰http://files.elv.de/Assets/Produkte/9/915/91521/Downloads/91521_bma020_data.pdf, Abruf 20.07.2015

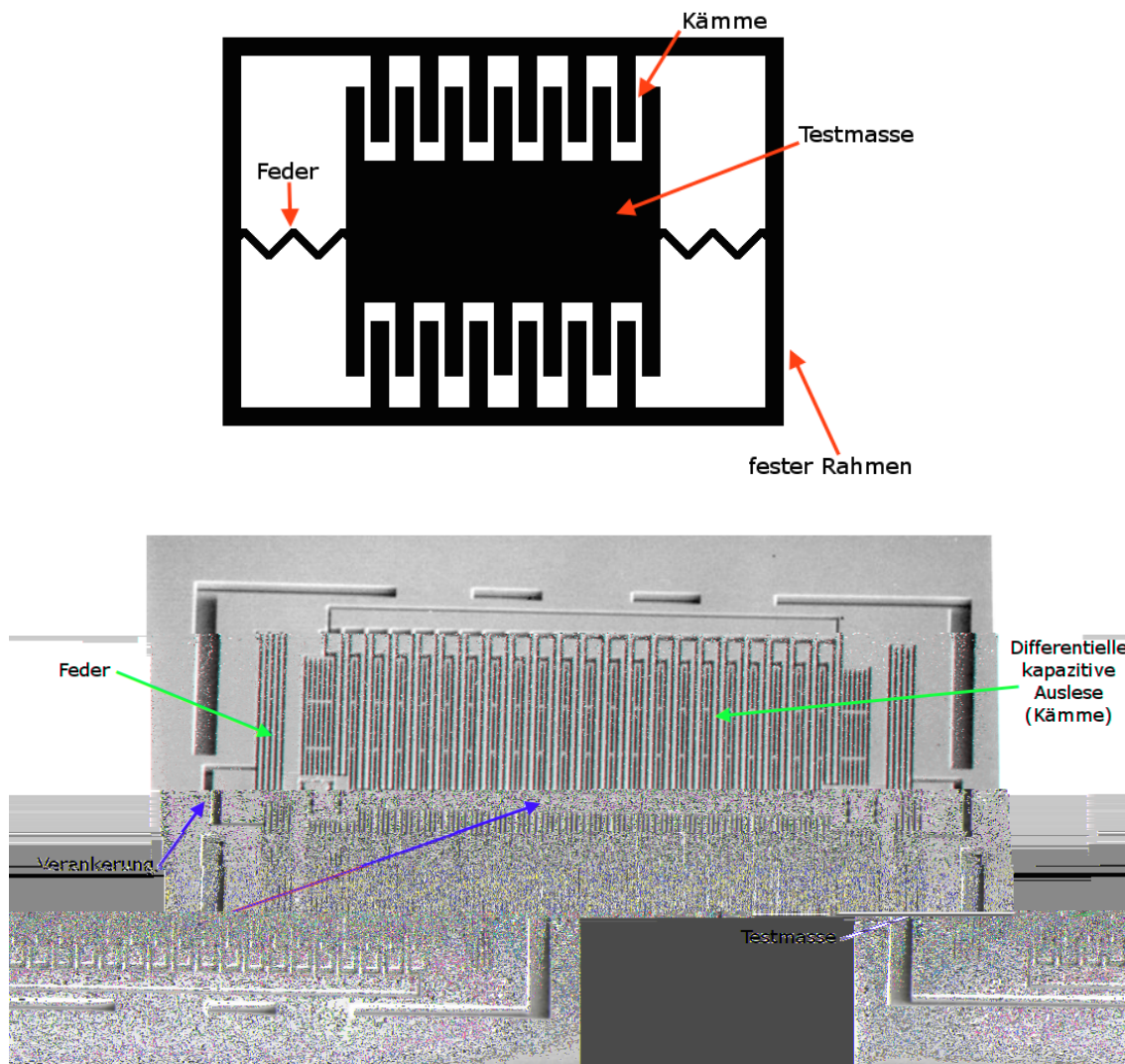


Abbildung 7: Oben: Stark vereinfachte Skizze zum Messprinzip von MEMS-Beschleunigungssensoren (hier eindimensional dargestellt). Die Kamme, die seitlich an einer an Federn aufgehängten Testmasse befestigt sind, verändern aufgrund der Massenträgheit bei Bewegungen ihre Position zu zwei benachbarten Zähnen des am festen Rahmen angebrachten Kamms. Durch Messung der Veränderung der Kapazität an den beiden benachbarten Kammzähnen kann die Beschleunigung ermittelt werden. In anderen Modellen erfolgt die Änderung der Kapazität durch Vergrößerung der Metallfläche, die sich zwischen den Rahmen-Zähnen auf einer Seite befindet und gleichzeitige Verkleinerung der Metallfläche auf der gegenüberliegenden Seite des Rahmens (Bewegung der Testmasse entlang der senkrechten anstatt der horizontalen Achse). Unten: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Accelerometers. Hier können Beschleunigungen in der liegenden Ebene (entlang der horizontalen Achse) gemessen werden. Aus: Korvink (2006).^[10, S. 535]

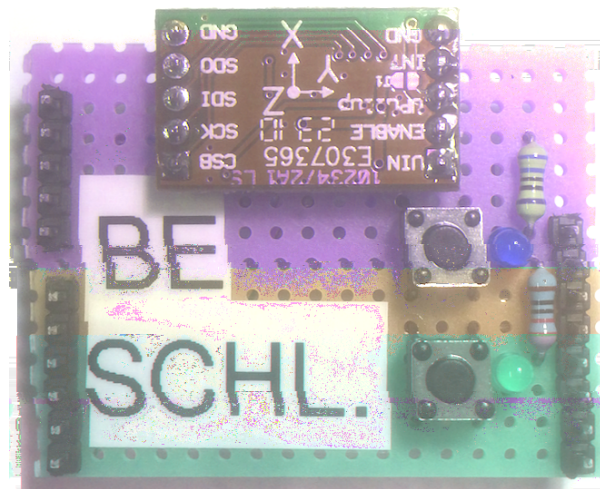


Abbildung 8: Foto eines Aufsteckboards für Beschleunigungsmessungen. Auf einer Lochrasterplatine wurden neben dem 3-Achsen-Beschleunigungssensormodul von ELV (grünes Modul oben) auch Taster für das Beginnen und Beenden einer Messung sowie Leuchtdioden zur Statusanzeige verlötet (rechts unten). Das Aufsteckboard kann mit den schwarzen Stiftleisten auf die Pfostenstecker auf einem Arduino Datalogging Shield aufgesteckt werden.

Luftdrucksensor

Für die in dieser Arbeit gezeigten Luftdruckmessungen wurde ein Luftdrucksensormodul der Firma Adafruit Industries verwendet, auf dem der Luftdrucksensor BMP180 von Bosch verbaut ist. Dem Datenblatt ist zu entnehmen, dass mit diesem Sensor Luftdruckmessungen im Bereich zwischen 300 und 1100 hPa möglich sind, was Höhen zwischen -500 und 9000 m ü. NN. entspricht.¹¹

Das Messprinzip beruht auch hier auf der MEMS-Technologie. Für Drucksensoren gibt es sowohl kapazitive als auch piezoresistive Ausleseansätze. Der BMP180 arbeitet mit piezoresistiver Auslese, weswegen diese hier kurz beschrieben werden soll. Eine Skizze, die stark vereinfacht die Funktionsweise eines Luftdrucksensors mit piezoresistiver Auslese beschreibt, ist in Abbildung 9 gezeigt. Durch Druck wird piezoresistives Material verformt und ändert dabei seinen Widerstand. Wird eine solche Anordnung an mehreren Seiten einer dünnen Membran angebracht, kann mit Hilfe einer Wheatstone-Brückenschaltung der durch die Verformung veränderte Widerstand sehr genau bestimmt und mit Hilfe von Kalibrationsdaten in einen Luftdruck umgerechnet werden.

In Abbildung 10 ist ein Aufsteckboard mit dem genannten Adafruit-Luftdrucksensormodul gezeigt. Anstelle des Beschleunigungssensor-Aufsteckboards kann dieses Board in der Sensorbox verwendet werden, um mobile Luftdruckmessungen vorzunehmen, beispielsweise für eine barometrische Höhenmessung. Für eine Messung des Luftdrucks muss zunächst jeweils die Temperatur gemessen werden. Dadurch kann der Sensor mit Hilfe von Kalibrationsdaten automatisch die in Kapitel 5.1 beschriebene Temperaturabhängigkeit des Luftdrucks korrigieren und liefert direkt den korrekten Luftdruck.

¹¹<https://ae-bst.resource.bosch.com/media/products/dokumente/bmp180/BST-BMP180-DS000-12~1.pdf>, Abruf 20.07.2015

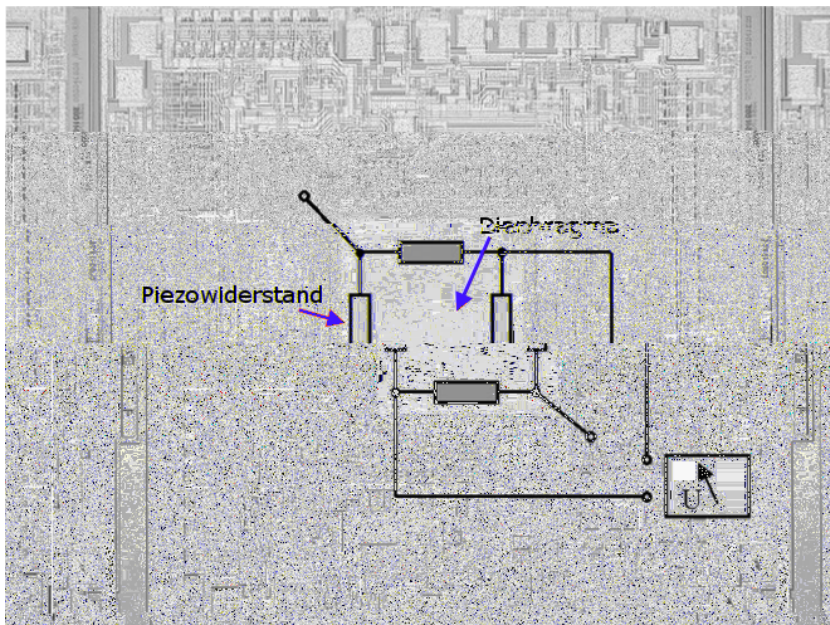
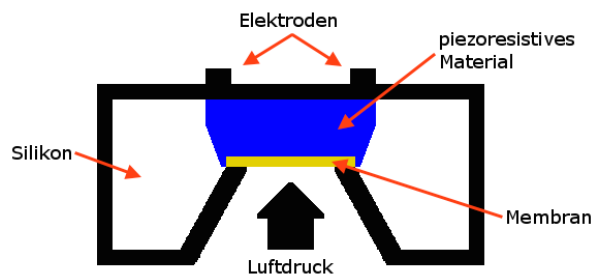


Abbildung 9: Oben: Messprinzip eines Luftdrucksensors mit piezoresistiver Auslese. Durch den Luftdruck wird piezoresistives Material, das auf eine dünne Membran aufgedampft ist, zusammengedrückt. Dadurch wird der elektrische Widerstand zwischen den Elektroden verändert.^[15, S. 62ff.] Der Widerstand kann mit Kalibrationsdaten in einen Luftdruckmesswert umgerechnet und ausgegeben werden. Skizze nach Su (2000). { Unten: Foto eines piezoresistiven Drucksensors auf einem Chip (Draufsicht). Die Position der vier Piezowiderstände ist schematisch eingezeichnet. Aus: Korvink (2006).^[10, S. 553]

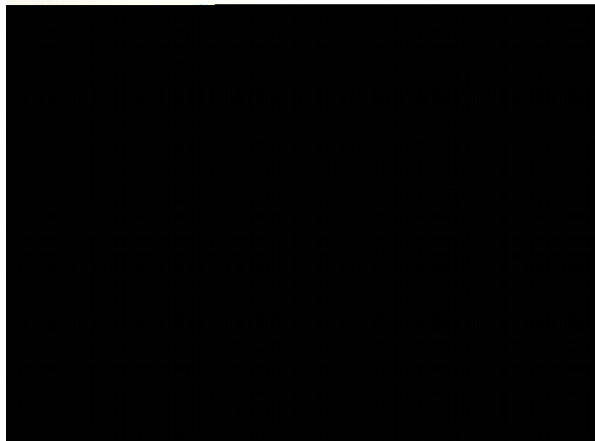


Abbildung 10: Foto eines Aufsteckboards für Luftdruckmessungen. Auf einer Lochrasterplatine wurden neben dem Luftdrucksensormodul von Adafruit Industries (blaues Modul links unten) auch Taster für das Beginnen und Beenden einer Messung sowie Leuchtdioden zur Statusanzeige verlötet (rechts). Das Aufsteckboard kann mit den schwarzen Stiftleisten auf die Pfostenstecker auf einem Arduino Datalogging Shield aufgesteckt werden.

Ultraschall-Abstandssensor

Für die vorliegende Arbeit wurde das Ultraschall-Abstandssensormodul HC-SR04 verwendet. Es wird baugleich von vielen verschiedenen Anbietern vertrieben. Mit diesem Modul können Gegenstände in Abständen zwischen etwa 3 cm und 4 m detektiert werden. Solche Abstandssensoren werden in der Automobilindustrie beispielsweise für Einparkhilfen genutzt und kommen den Schülern deshalb intuitiv bekannt vor. Zur Messgenauigkeit kann experimentell bestätigt werden, dass die Signale bei Stillstand um ± 3 mm schwanken, was den Angaben im Datenblatt entspricht.¹²

Die Messung von Abständen mit dem Ultraschall-Abstandssensor erfolgt nach einem sehr einfachen Prinzip, das in Abbildung 11 schematisch gezeigt ist. Der Sensor wird durch ein Triggersignal aktiviert und sendet daraufhin ein sehr kurzes sogenanntes Burst-Signal der Frequenz $f = 40$ kHz (Zeitspanne $t \approx 200 \mu\text{s}$); anschließend wartet er auf das Empfangen des an einem Objekt reflektierten Signals.¹³ Die Zeitdifferenz zwischen Senden und Empfangen des Signals ist dann ein Maß für den Abstand des Objektes vom Sensor.

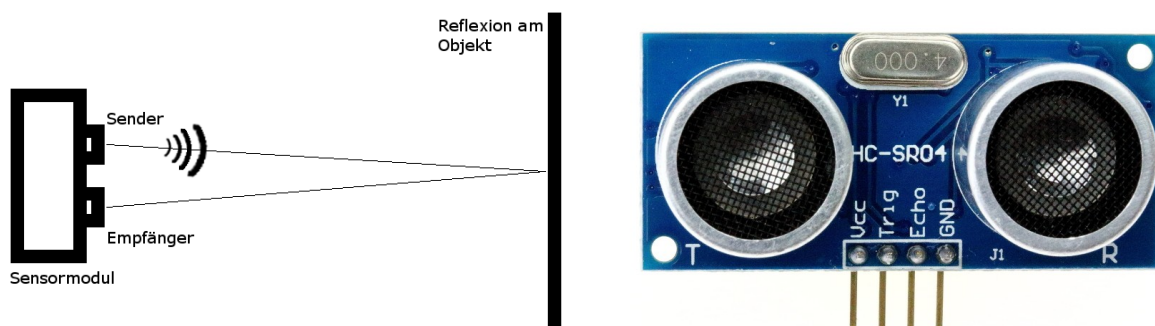


Abbildung 11: Links: Skizze des Messprinzips eines Ultraschall-Abstandssensors. Der Ultraschall-Sender sendet ein sehr kurzes 40 kHz-Signal, danach wird die Zeit bis zum Empfangen eines reflektierten Signals am Ultraschall-Empfänger gemessen. Rechts: Foto des Ultraschall-Abstandssensormoduls HC-SR04 mit Sender und Empfänger (links und rechts), 4 MHz-Schwingquarz (Mitte oben) zur Taktung der Integrierten Schaltkreise (ICs) des Moduls sowie den Pins, an denen die Verbindung zum Arduino-Board hergestellt wird (Mitte unten). Quelle: <https://www.aimagin.com/hc-sr04-ultrasonic-sensor.html>, Abruf 20.07.2015.

¹²http://www.mikrocontroller.net/attachment/218122/HC-SR04_ultraschallmodul_beschreibung_3.pdf, Abruf 20.07.2015

¹³ebd.

Aus der Zeitdifferenz t_{Echo} kann dann der Abstand zwischen Objekt und Sensor folgendermaßen berechnet werden, wobei die Zeit t_{Echo} in μs angegeben wird, d folglich die Einheit mm hat:

$$d = \frac{v_{\text{Schall}} \cdot t_{\text{Echo}}}{2000}$$

Der Faktor 2 ist nötig, da das Schallsignal den Abstand zum Objekt sowohl auf dem Hin- als auch auf dem Rückweg zurücklegen muss. Der Faktor 1000 resultiert aus der Umrechnung in Millimeter. Bei der Messung spielt die Temperatur der Luft eine Rolle, da das Schallsignal sich in der Luft mit einer Geschwindigkeit von

$$v_{\text{Schall}} = \left(331.6 + 0.6 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s} \cdot ^\circ\text{C}} \right) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

bewegt.¹⁴ Bei einem Abstand von 0.5 m zwischen Sensor und Objekt sind die Abweichungen des gemessenen Abstands vom tatsächlichen Abstand in einem Temperaturbereich von $\pm 5^\circ\text{C}$ um den standardmäßig eingestellten Wert von $T = 20^\circ\text{C}$ kleiner als 1 % (vgl. Tabelle 1). Für die meisten Messungen im Schulkontext ist diese Abweichung vernachlässigbar klein, insbesondere, wenn nur Veränderungen des Abstands eine Rolle spielen und nicht der Abstand selbst.

¹⁴<http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/schallgeschwindigkeit>, Abruf 21.07.2015

Tabelle 1: Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit und daraus resultierende Abweichungen des gemessenen Abstandes vom tatsächlichen Abstand eines Objektes für verschiedene Temperaturen im Bereich der Raumtemperatur. Für einen Abstand von $d = 0.5\text{ m}$ benötigt der Schall bei $T = 20^\circ\text{C}$ für Hin- und Rückweg eine Laufzeit von insgesamt $t = 2.91\text{ ms}$. Für andere Temperaturen verändert sich die Laufzeit des Ultraschallsignals und daher der gemessene Abstand, wenn die Temperaturänderung bei der Berechnung nicht berücksichtigt wird, obwohl der reale Abstand konstant bleibt. Die prozentualen Abweichungen der Messwerte vom realen Abstand, d/d , sind in einem Bereich von $\pm 5^\circ\text{C}$ um die Raumtemperatur kleiner als 1% und daher für die meisten Experimente vernachlässigbar klein.

T [°C]	v_{Schall} [m/s]	t_{Lauf} [ms]	d_{mess} [m]	d/d [%]
10	337.6	2.96	0.509	1.8
15	340.6	2.93	0.504	0.9
20	343.6	2.91	0.500	0.0
25	346.6	2.89	0.496	0.9
30	349.6	2.86	0.491	1.7
35	352.6	2.83	0.487	2.6

Hallsensor für Winkelauslese

Für die Messung der mechanischen Schwingung eines physikalischen Pendels wurden Winkelaufnehmermodule der Firma ELWE Didactic genutzt. Der Sensor, der hier zur Bestimmung des Winkels genutzt wird, ist ein einfacher Hallsensor, dessen Funktionsweise in Abbildung 12 gezeigt ist. Je nachdem, in welchem Winkel das Magnetfeld das Metallplättchen im Hallsensor durchströmt, werden unterschiedliche Hallspannungen gemessen. Maximal wird die Hallspannung, wenn das Magnetfeld das Plättchen senkrecht durchsetzt, minimal, wenn die Feldlinien parallel zum Plättchen verlaufen. Der Sensor ist in der Messapparatur so angebracht, dass er bei einem unausgelenkten Pendel nicht vom Magnetfeld der beiden Permanentmagnete durchsetzt wird, sodass die Hallspannung hier verschwindet. Wird das Pendel nun in eine Richtung ausgelenkt, ergibt sich eine positive Hallspannung, in der entgegengesetzten Richtung eine negative. Dadurch kommt es bei Schwingungen um die Ruheposition zur Erzeugung einer Wechselspannung, die zur Messung des Schwingungsverlaufes genutzt werden kann. Um den tatsächlichen Auslenkungswinkel bestimmen zu können, muss eine Eichkurve erstellt werden, indem die zu verschiedenen Auslenkungswinkeln gehörige Spannung gemessen und an die Messpunkte eine Fitfunktion angepasst wird, die der Kennlinie des Hallsensors entspricht.



Abbildung 12: Links: Skizze des Messprinzips eines Hallsensors. Eine sehr dünne Metallplatte wird von einem konstanten Strom I durchflossen. Durchsetzt ein Magnetfeld B diese Metallplatte, wirkt eine Lorentzkraft auf die Elektronen und diese werden senkrecht zur Fließrichtung abgelenkt. Dadurch entsteht eine Hallspannung, die gemessen werden kann. Diese Spannung ist maximal, wenn das Magnetfeld die Metallplatte wie in der Skizze gezeigt senkrecht durchsetzt und verschwindet, wenn Platte und Magnetfeld parallel zueinander liegen. Quelle: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/4622>, Abruf 23.07.2015. Rechts: Foto der Aufhängung eines physikalischen Pendels am ELWE-Winkelaufnehmermodul. Der Hallsensor befindet sich im rot markierten Bereich in der Metallaufhängung und ist zentriert zwischen zwei Permanentmagneten angeordnet. Die Magnete bewegen sich mit der Aufhängung, wenn das Pendel schwingt. Dadurch ändert sich die Richtung des Magnetfeldes relativ zum Hallsensor; beim ruhenden Pendel sind Metallplatte und Magnetfeld parallel zueinander, weswegen $U_H = 0\text{V}$ ist. Durch die Schwingung wird eine Wechselspannung erzeugt, die die Auslenkung des Pendels repräsentiert. Für quantitative genaue Messungen müsste zunächst eine Eichkurve erstellt werden, die jedem Auslenkungswinkel eine Spannung zuordnet. Für die meisten Messungen muss der exakte Winkel der Auslenkung jedoch nicht bekannt sein, sondern nur relative Änderungen. Quelle Hallsensor-Foto: www.reichelt.de, Abruf 24.07.2015.

3.5. In vier einfachen Schritten zur eigenen Sensorbox

Die vorliegende Arbeit soll zeigen, dass viele Experimente sehr einfach mit einer Arduino-Sensorbox durchgeführt werden können. Ein weiteres Ziel ist jedoch, dass Lehrer auch dazu motiviert werden, sich eine eigene Sensorbox (oder gleich mehrere) zu bauen und diese für Demonstrations- und vor allem Schülerexperimente zu nutzen. Daher soll in diesem Kapitel gezeigt werden, dass man in wenigen Schritten und auch ohne viel Erfahrung die gezeigten Sensorboxen nachbauen kann. Dies wird hier am Beispiel einer Arduino-Sensorbox zur mobilen Luftdruckmessung gezeigt. Für die anderen gezeigten Aufsteckboards und Deckel können analoge Anleitungen als PDF-Dokument von der Projektwebseite, <http://schulmaterial.physi.uni-heidelberg.de>, heruntergeladen werden. Zwei fertige Sensorboxen mit verschiedenen Aufsteckboards und Deckeln sind in Abbildung 13 dargestellt; der Nachbau der oberen Variante wird in diesem Kapitel vorgestellt. Hier ist auch die Beschriftung der Deckel und Module gezeigt, die ich für sinnvoll halte, um das Benutzen der Sensorboxen zu vereinfachen. Alle verwendeten Elektronikbauteile sind Standardbauteile und können im Elektronik-Fachhandel (z.B. Conrad, Reichelt, Mouser, etc.) erworben werden; ein Lotkolben und Lotzinn werden für die Sensorboards und die Montage des Arduino-Boards sowie des Datalogging Shields benötigt. Zusätzlich braucht man einige Standard-Werkzeuge, darunter Zange, Feilen, Seitenschneider, Schraubenzieher, Anrennadel (alternativ Teppichmesser oder Skalpell) sowie einen Akkuschauber oder eine Bohrmaschine mit verschiedenen Bohrern (3 mm, für einfacheres Einsetzen der M3-Schrauben 3.2 mm; 8 mm; 10 mm; 16 mm bzw. Schaalbohrer für 14-18 mm-Bohrer). Die Sensorbox kann nun in vier Schritten selbst nachgebaut werden. Zunächst wird eine allgemeine Arduino-Messbox gebaut, die mit einem Datalogging Shield versehen wird und daher auch für mobile Messungen geeignet ist; anschließend wird das Luftdrucksensor-Aufsteckboard hergestellt, das durch andere Aufsteckboards ersetzbar ist, wenn eine andere Messung durchgeführt werden soll; im dritten Schritt werden die Arduino-Software und die benötigten Arduino-Libraries installiert; im letzten Schritt wird dann ein vorgefertigtes Messprogramm auf das Board hochgeladen, mit dem Messungen durchgeführt werden können. Im Anschluss an die Bauanleitung werden noch zwei Möglichkeiten zur Auswertung der Messdaten gezeigt, die auch im Rahmen dieser Arbeit genutzt wurden, sowie eine Kurzanleitung zur allgemeinen Verwendung der auf der Projektwebseite bereitgestellten Pro Lab-Programme für Demonstrationsexperimente gegeben.

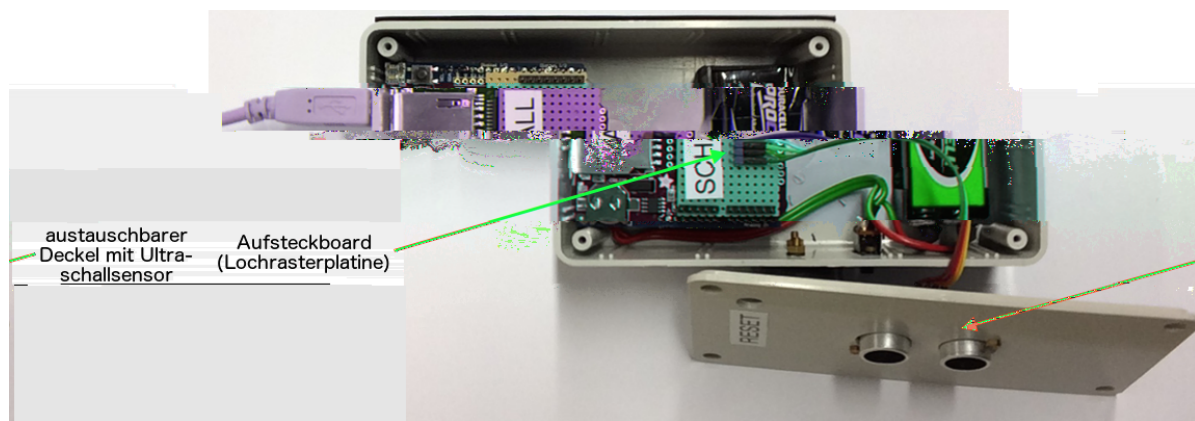
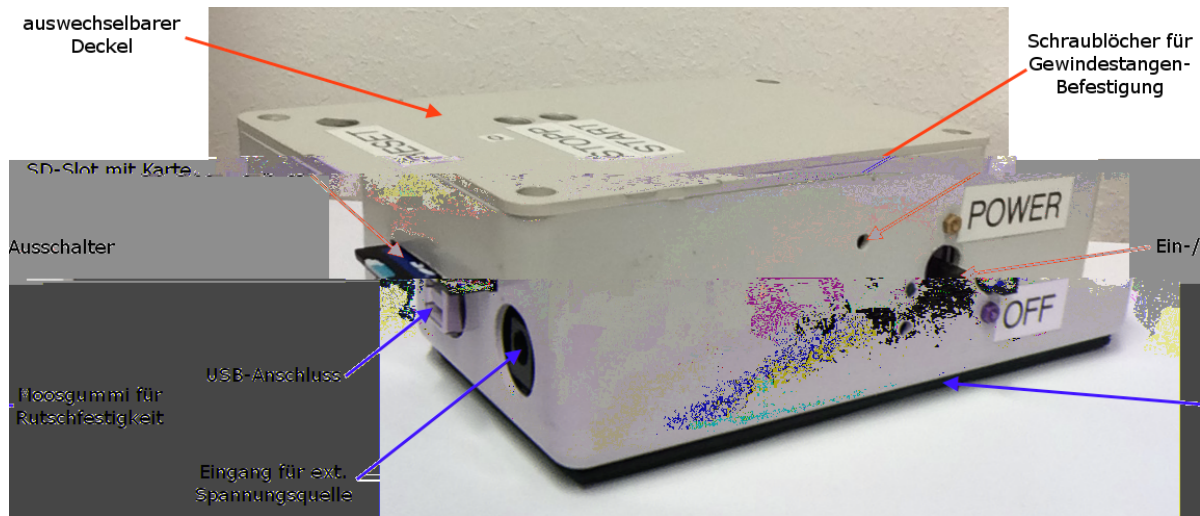


Abbildung 13: Oben: Eine fertige Sensorbox mit Deckel für mobile Messungen und seitlichen Bohrungen zum Anbringen eines PVC-Blocks mit Schraubgewinde zur Befestigung an Stativmaterial. An den Boden und eine Seite der Box wurden Moosgummi-Platten geklebt, um die Rutschfestigkeit der Box zu erhöhen. Unten: Geometrische Sensorbox mit Deckel für Abstandsmessungen mit dem Ultraschallsensor HC-SR 04. Das Aufsteckboard (gelbe Lochrasterplatine), das auf das Datalogging Shield gesteckt wird, ist durch Kabel fest mit dem Deckel verbunden, an dem der Sensor montiert ist.

Schritt 1: Bau der allgemeinen Sensorbox für mobile Messungen

Eine allgemeine Sensorbox besteht aus einem Gehäuse mit darin befestigtem Arduino-Board und einigen Bohrungen. Für mobile Messungen werden zusätzlich eine 9 V-Blockbatterie und ein Ein-/Ausschalter, die ebenfalls am Gehäuse festgeschraubt werden, sowie ein Datalogging Shield von Adafruit mit SD-Speicherkarte benötigt. Für den Bau der hier gezeigten Sensorbox für mobile Messungen müssen daher insgesamt folgende Materialien bereitliegen:

- Plastikgehäuse (z.B. Strapubox 1006; Außenmaße 149 x 74 x 48 mm)¹⁵
- Arduino UNO (verschiedene Bezugsquellen)
- Adafruit Datalogging Shield (z.B. bei mouser.de, Teilenummer 485-1141), zusätzlich eine Standard-SD-Karte
- Arduino-Sockelleisten¹⁶ (Shield stacking headers, z.B. mouser.de, Teilenummer 782-A000084 und 782-A000085, beide werden je 2 mal benötigt)
- Für Batteriefach und Arduino-Befestigung: 2 Schrauben M3 x 15, 2 Schrauben M3 x 8, 6 Muttern M3, 2 Plastik-Abstandshalter (5 mm hoch, bei einem anderen Gehäuse so wählen, dass das Arduino-Board in der Box eben au liegt)
- Schiebeschalter¹⁷; für das hier gezeigte Modell werden zur Befestigung 2 Schrauben M2x5, 2 Federringe M2 und 2 Muttern M2 benötigt
- 9 V-Blockbatterie mit Halterung (z.B. mouser.de, Teilenummer 534-1295)
- Schrumpfschläuche verschiedener Größen
- Lautsprecherkabel oder dicke Schalllitze für die Spannungsversorgung (ca. 20 cm)
- evtl. Moosgummi-Platte für Standfestigkeit, doppelseitiges Klebeband

¹⁵Eine von den Maßen her passende Alternative könnte das Euro-Gehäuse Nr. 1010 von WeroPlast sein, das jedoch nicht von mir getestet wurde. Dieses ist günstig z.B. bei Conrad erhältlich: <http://www.conrad.de/ce/de/product/520586/Euro-Gehaeuse-ABS-Grau-NA-WeroPlast-1010-1-St>, Abruf 29.07.2015.

¹⁶Auch andere Sockelleisten (auch Pfostenstecker, Buchsenleisten, etc. genannt) sind geeignet, wenn sie im 2.54 mm-Raster angeordnet sind und ihre Beine lang genug für einen stapelbaren Aufbau der Shields sind. In Abbildung 19 ist z.B. eine andere Art von Sockelleisten gezeigt.

¹⁷Der verwendete und daher hier gezeigte Schalter erwies sich im Test als unzufriedenstellend. Andere Modelle wurden zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit noch nicht getestet, weswegen keine Empfehlung gegeben werden kann. Sinnvoll wäre ein Schiebeschalter, der am Gehäuse festgeschraubt werden kann, aber nicht weit aus dem Bohrloch heraussteht.

Zunächst werden die benötigten Bohrschablonen von der Projektwebseite heruntergeladen. Für die mobile Sensorbox werden Schablonen für die Frontseite, das Arduino-Board UNO und den Deckel für mobile Messungen benötigt; diese Schablonen sind { verkleinert { in Abbildung 14 dargestellt. Die Positionen der Bohrlocher für den Batteriehalter werden durch die im Halter vorgebohrten Löcher hindurch angezeichnet. An einer Stirnseite des Gehäuses wird die Mitte ausgemessen und markiert; an diese Markierung werden die Bohrschablonen mit ihren Mittellinien angelegt (siehe Abbildung 15). Dann werden die Schablonen mit den darauf notierten Bohrern durchbohrt; die größeren Löcher werden nach einer Vorbohrung mit einem Schalbohrer bis zum benötigten Durchmesser erweitert. Für den SD-Kartenslot werden mehrere Löcher nebeneinander gebohrt und dann mit einer Feile der Schlitz hergestellt. Alternativ kann der Slot auch gefräst werden.

Nachdem die Bohrungen fertiggestellt sind, sieht das Gehäuse etwa aus wie in Abbildung 16. An die Unterseite der Box sowie eine Seitenwand wurde bereits jetzt mit doppelseitigem Klebeband Moosgummi aufgeklebt, um die Rutschfestigkeit zu erhöhen und etwaige Hohendielen durch herausstehende Schrauben auszugleichen. An den Bohrlochern muss die Moosgummiplatte ausgespart werden, da an der Unterseite der Box noch die Muttern angeschraubt werden.

Nun wird das Arduino-Board für mobile Messungen vorbereitet (siehe Abbildung 17). Dazu wird an den Batteriehalter ein Lautsprecherkabel (2-adriges, dickeres Kabel) angelötet. Um die Kontakte vor Kurzschluss zu schützen, wird vor dem Verlöten jeweils ein Stück Schrumpfschlauch auf die Kabel aufgeschoben, das nach dem Löten an den Halter herangeschoben und durch Erwärmen mit z.B. einem Feuerzeug geschrumpft wird. In das Kabel, das mit der Anode der Batterie verbunden ist, wird der Stromschalter (Unterbrecher) eingelötet. Auch hier wird Schrumpfschlauch verwendet, um einem Kurzschluss der Kontakte vorzubeugen. Zuletzt werden die beiden Kabel von unten an das Arduino-Board¹⁸ angelötet. Die bereits vorhandenen Lotstellen des Spannungseinganges, die hierfür genutzt werden, sind in Abbildung 17 verdeutlicht. Hier sieht man auch die übrige Konstruktion aus Batterie, Schalter und Arduino-Board. Damit das Board im Gehäuse sicher und gerade fixiert werden kann, wird an den hinteren beiden Bohrlochern des Arduinos (von USB-Stecker und Stromversorgung abgewandt) von oben jeweils eine M3x15-Flachkopfschraube durchgesteckt und von unten mit 5 mm-Abstandshaltern aus Plastik und einer M3-Mutter fixiert (siehe Abbildung 17, oben links). Das Arduino-

¹⁸In den hier gezeigten Abbildungen ist ein Arduino-Board von arduino.org gezeigt. Hierbei handelt es sich um eine neue Produktionslinie in der selben Fabrik, die von einem der Mitbegründer von Arduino, der sich von den anderen Mitbegründern getrennt hat, geführt wird.

Deckel für mobile Sensorbox

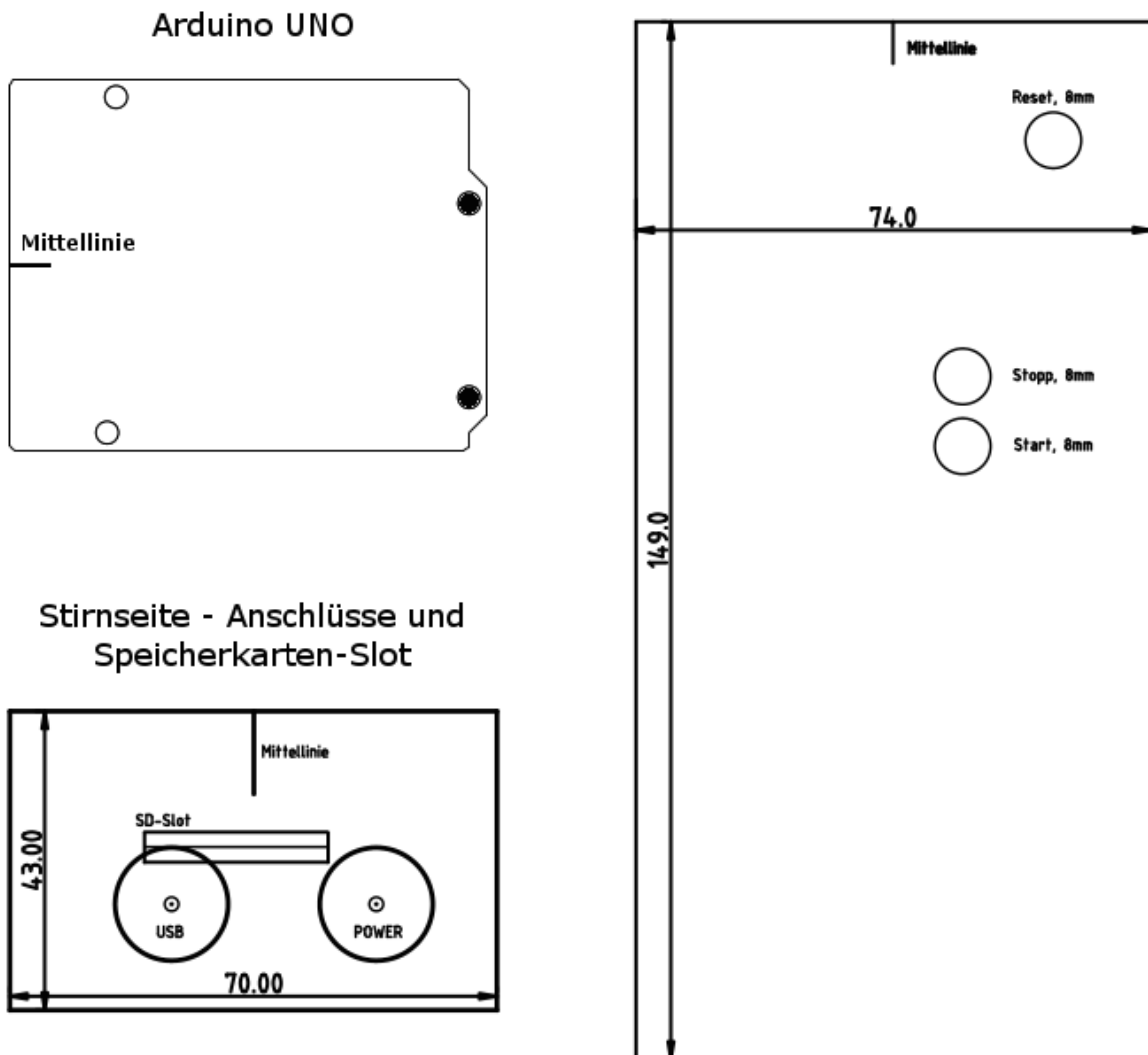


Abbildung 14: Beispiele für Bohrschablonen, die den Nachbau einer Arduino-Sensorbox erleichtern sollen. Durch die Schablonen muss die Box nicht erneut ausgemessen werden, wodurch viel Zeit gespart werden kann. Für den SD-Slot werden mehrere Löcher nebeneinander gebohrt und anschließend der Schlitz mit einer Feile hergestellt. Die Schablonen sind hier verkleinert dargestellt; nach dem Ausdrucken einer Vorlage sollte daher immer die Bemessung überprüft werden, bevor die Bohrschablonen verwendet werden.

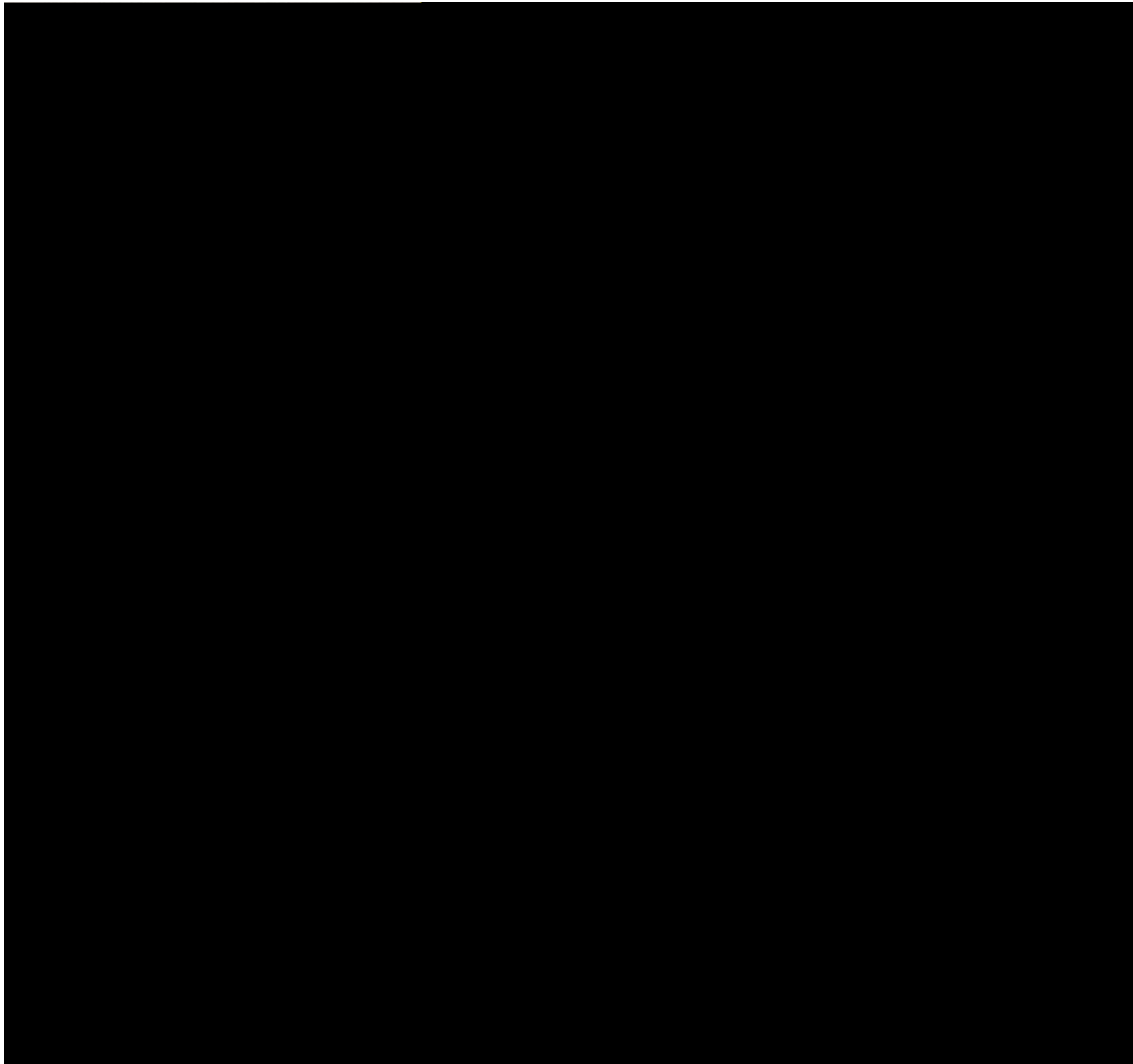


Abbildung 15: Oben: Sensorbox (links) und Deckel (rechts) mit aufgeklebten Bohrschablonen für Frontseite, Arduino-Board, Stromschalter und Deckel für mobile Messungen. Die meisten Schablonen haben eine eingezeichnete Mittellinie, mit der das Zentrieren der Bauteile in der Box vereinfacht wird. Auch breitere Boxen können so problemlos mit den selben Schablonen verwendet werden. { Unten: Verschiedene Bohrer, mit denen die Bohrschablonen durchbohrt werden. Größere Löcher (für den USB-Anschluss und die externe Stromversorgung) werden nach Vorbohren mit einem Schalbohrer erweitert. Der SD-Slot kann durch mehrere kleine Bohrungen nebeneinander, die dann ausgefeilt werden, realisiert werden.

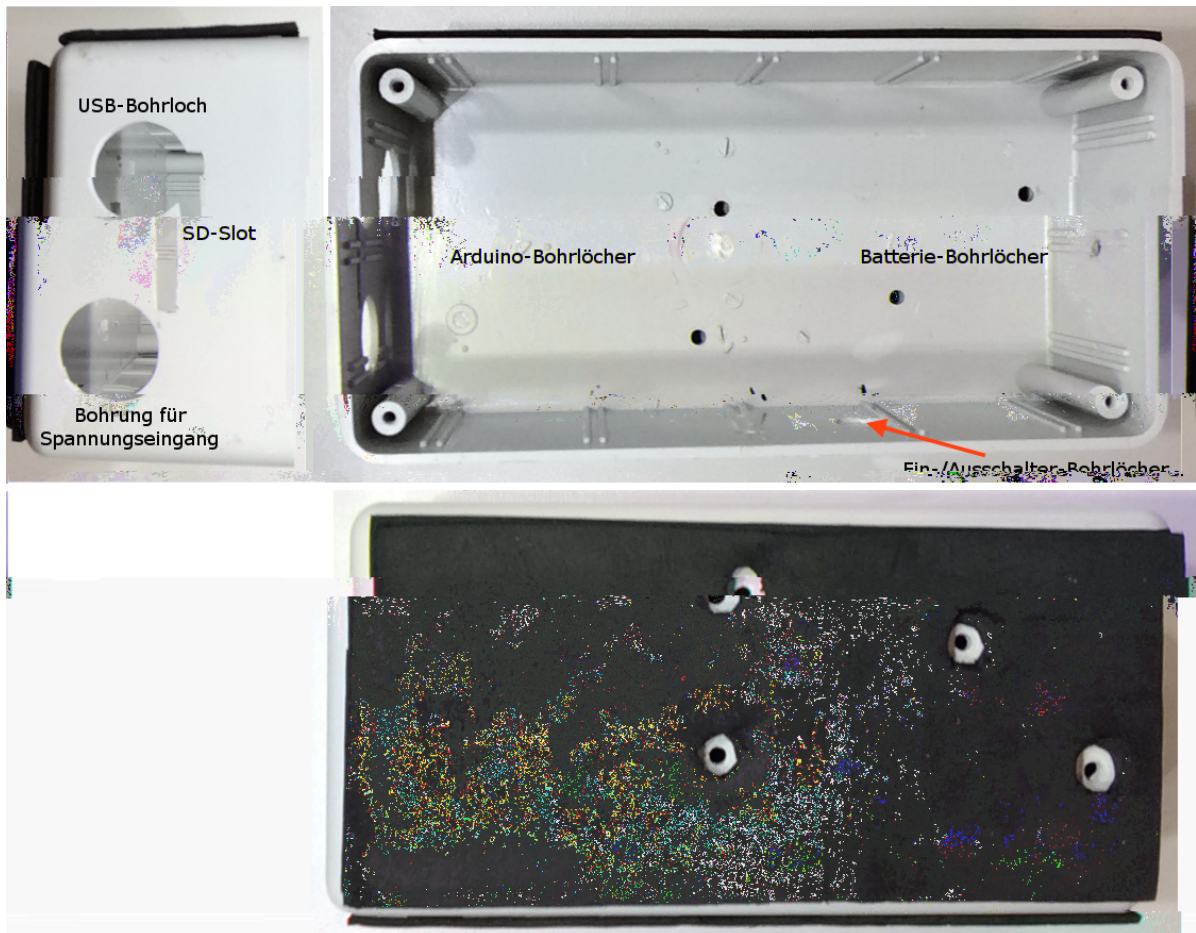


Abbildung 16: Gehäuse der Sensorbox nach Bohren und Aufbringen einer Moosgummi-Platte unter dem Boden und an einer SeitenpF11xosgummi-

Board kann nun in das Gehäuse eingesetzt werden, zunächst mit den Steckern durch die Frontseite des Gehäuses, dann mit den Schrauben durch die Bohrlocher im Boden. Von der Unterseite des Gehäuses wird die Anordnung mit zwei weiteren M3-Muttern fixiert. Auch der Batteriehalter und der Einschalter werden mit je zwei Schrauben und Muttern am Gehäuse fixiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 18 gezeigt.

Für die meisten Demonstrationsversuche wäre dieser Aufbau bereits ausreichend. Die Box soll aber auch für mobile Messungen genutzt werden können, weswegen im letzten Teilschritt noch das Adafruit Datalogging Shield vorbereitet und eingesetzt werden muss. Die meisten Komponenten des Shields sind bereits rückenseitig vormontiert, lediglich müssen die Batterie der Echtzeituhr eingesetzt und die Steckverbinder an das Shield angelötet werden. Das Datalogging Shield mit aufgelöteten Pfostensteckern ist in Abbildung 19 gezeigt. Um sowohl breitere Aufsteckboards (z.B. für Demoversuche) als auch schmalere (für die Schulerversuche) einsetzen zu können, ohne das Datalogging Shield immer ein- und ausbauen zu müssen, sind hier zwei Reihen Pfostenstecker nebeneinander aufgelötet; die äußere Reihe ist für Boards mit einer Lochraster-Breite von 20 Löchern geeignet, die innere Reihe für Boards mit einer Lochraster-Breite von 17 Löchern (die inneren Reihen können im Raster nur so angelötet werden, da die Löcher auf dem Datalogging Shield rückenseitig um jeweils 1.5 Reihen zur Mitte des Shields hin versetzt sind).

Sobald das Datalogging Shield mit Pfostensteckern und einer Batterie für die Echtzeituhr bestückt ist, kann es auf das Arduino-Board in der Sensorbox aufgesteckt werden. Die Umrisse der beiden Boards sollten dabei handlich liegen, da sonst die Steckverbindungen zwischen Arduino und Datalogging Shield nicht korrekt hergestellt werden. Das Endergebnis der nun fertigen Sensorbox für mobile Messungen ist in Abbildung 20 dargestellt. Wenn eine 9 V-Blockbatterie eingesetzt und der Einschalter betätigt wird, sollte das Board bereits jetzt funktionieren, da meist ein Testprogramm vorinstalliert ist, das eine Leuchtdiode auf dem Arduino-Board blinken lässt. Für richtige Messungen muss nun im zweiten der vier Schritte ein Sensor-Aufsteckboard hergestellt werden.

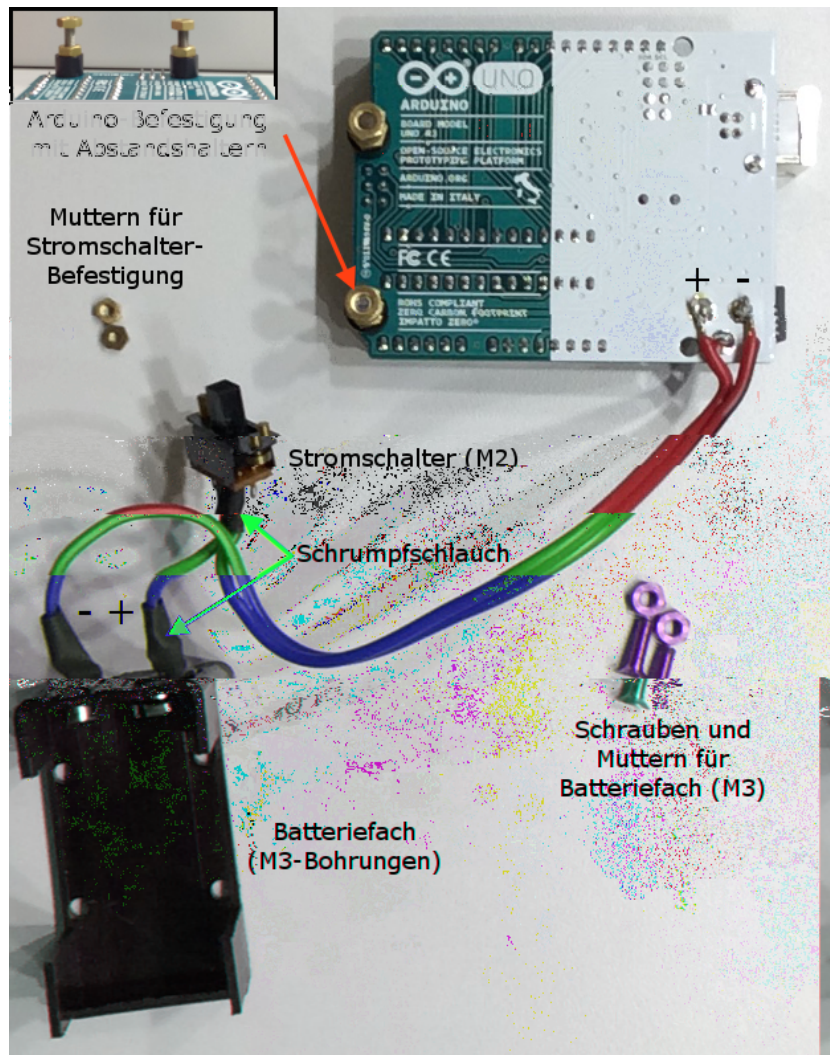


Abbildung 17: Anschluss des Batteriehalters mit Unterbrecher-Schalter an das Arduino-Board. Es ist auf die richtige Polung der Anschlüsse zu achten. Um das Arduino-Board gerade im Gehäuse zu fixieren, werden an der den Steckern abgewandten Seite von oben zwei M3-Flachkopfschrauben durchgesteckt, die jeweils von unten mit einem 5 mm-Plastikabstandshalter und einer M3-Mutter bestückt und so fest mit dem Board verschraubt werden (oben links). Diese Anordnung kann in das Gehäuse gesetzt und unterhalb der Box von außen mit zwei weiteren M3-Muttern fixiert werden.

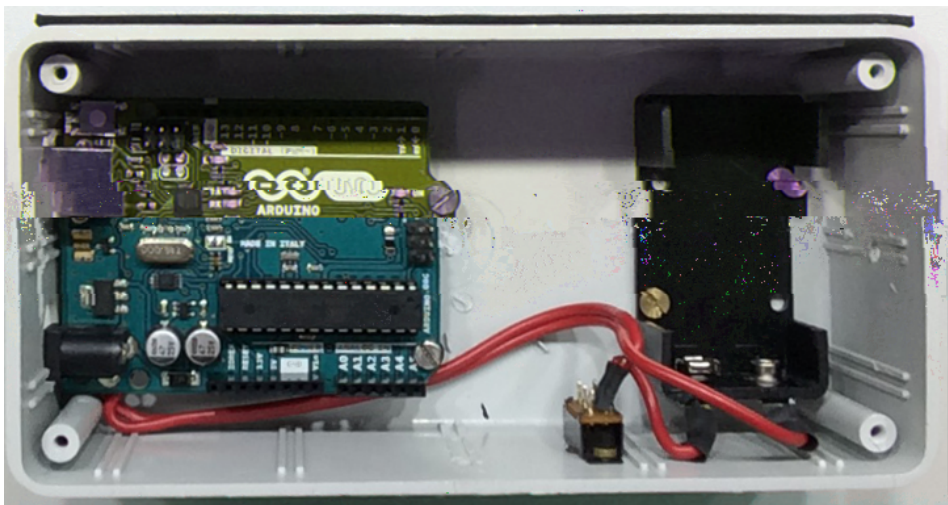


Abbildung 18: Sensorbox nach Einbau und Fixierung des Arduino-Boards, des Batteriehalters und des Einschalters. Das Arduino-Board liegt an seiner Vorderseite (links) mit dem USB-Stecker im Bohrloch auf, an seiner Rückseite (rechts) ist es mit dem Gehäuse verschraubt.

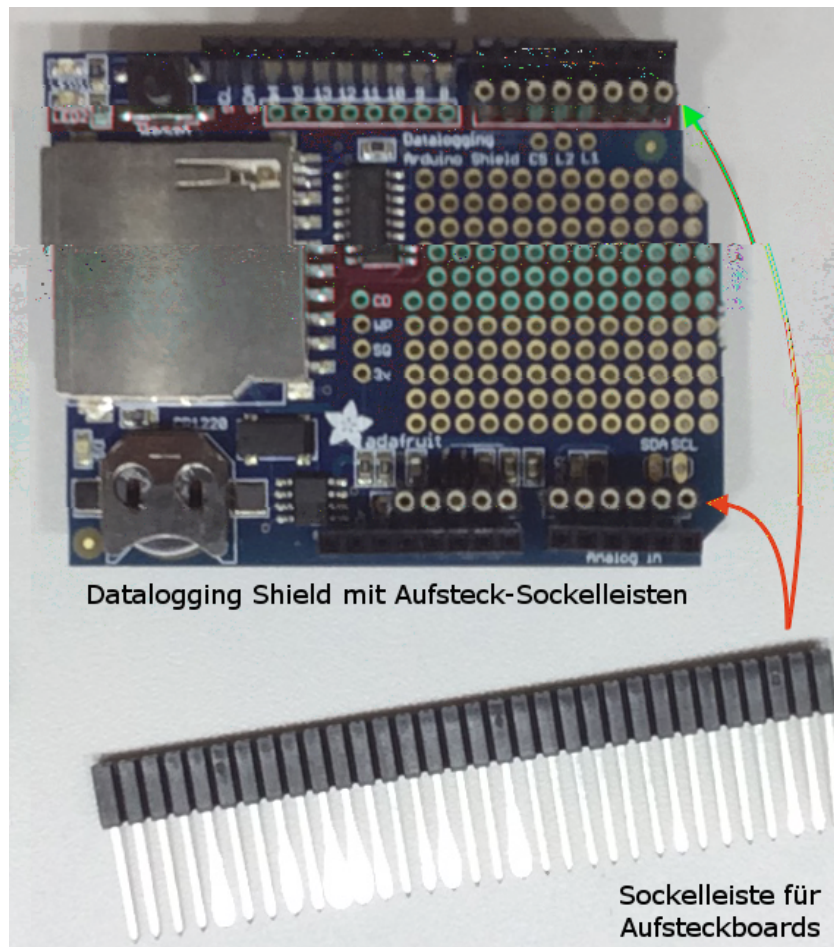


Abbildung 19: Datalogging Shield mit in zwei Reihen aufgelöteten Pfostensteckern. Die innere Reihe ist für Aufsteckboards mit einer Breite von 17 Löchern, die äußere Reihe für Aufsteckboards mit einer Breite von 20 Löchern geeignet. Durch das Anbringen zweier Reihen muss das Datalogging Shield für die zwei verschiedenen Aufsteckboardbreiten nicht ständig ein- und ausgebaut werden. Für den Nachbau empfehle ich, alle Aufsteckboards in der breiteren Variante zu bauen, sodass die innere Reihe Pfostenstecker nicht mehr benötigt wird. Die Batterie für die Echtzeituhr wird in die vorgesehene Halterung (unten links) geschoben.

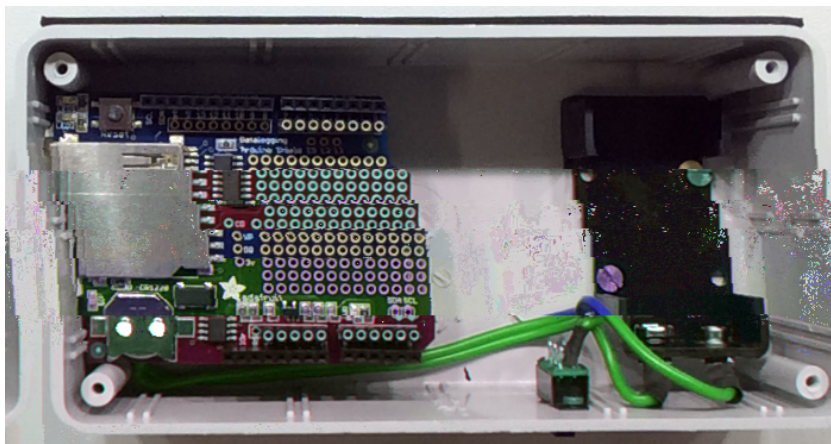


Abbildung 20: Die Sensorbox für mobile Messungen ist mit dem eingesetzten Datalogging Shield fertiggestellt. Für eine Messung muss im zweiten der vier Schritte zur eigenen Sensorbox ein Aufsteckboard mit Sensor hergestellt werden.

Schritt 2: Bau des Sensor-Aufsteckboards

Nachdem im ersten Schritt eine allgemein nutzbare Arduino-Messbox für mobile Messungen gebaut wurde, soll nun ein Sensor-Aufsteckboard hergestellt werden, mit dem die ersten tatsächlichen Messungen durchgeführt werden können. An dieser Stelle soll der Bau beispielhaft an einem Aufsteckboard zur Messung des Luftdrucks dargestellt werden. Analoge Bauanleitungen für die anderen verwendeten Sensor-Aufsteckboards sind auf der Projektwebseite verfügbar, wo sich auch die entsprechenden Bauteilelisten befinden.

Die Sensor-Aufsteckboards werden grundsätzlich auf Basis von Lochrasterplatinen hergestellt, die typischerweise im Format 100 x 160 mm verkauft werden. Für die in dieser Arbeit gezeigten Aufsteckboards wurden Platinausschnitte mit 17 x 13 Löchern und mit 17 x 15 Löchern verwendet; ich empfehle für den Nachbau jedoch allgemein Platinen, die statt 17 Löchern 20 Löcher breit und 15 Löcher hoch sind, da diese dann auch ohne Datalogging Shield direkt auf das Arduino-Board aufgesteckt werden könnten, falls nur Live-Messungen durchgeführt werden, und genug Platz auch für größere Sensormodule bieten. Die Stiftleisten, mit denen die Verbindung zwischen dem Aufsteckboard und dem darunter befindlichen Arduino bzw. Datalogging Shield hergestellt wird, müssen entsprechend bis an den Rand der Platinen verschoben und vorm Verlöten testweise auf das Arduino-Board aufgesetzt werden. Die anderen Komponenten sollten aber wegen der Löcher auf den Bohrschablonen die gleichen Positionen behalten wie in diesem Abschnitt dargestellt.

Die verwendeten Lochrasterplatinen bestehen aus Hartpapier mit Epoxidharz-Überzug und sind auf der Unterseite mit sogenannten Löttaugen aus Kupfer versehen, an denen die Komponenten verlötet werden können. Beim Löten muss immer darauf geachtet werden, dass die Löttaugen nicht zu lange oder mit zu hohen Temperaturen erhitzt werden, da sie sich sonst von der Lochrasterplatine ablösen und die Komponenten dadurch nicht mehr fest mit der Platine verbunden werden können.

Für das hier gezeigte Aufsteckboard für mobile Luftdruckmessungen werden neben dem schon verwendeten Lötzubehör folgende Materialien und Bauteile benötigt:

- Luftdrucksensormodul BMP180 (z.B. mouser.de, Teilenummer 485-1603)
- Lochrasterplatine (Epoxidharzbeschichtetes Hartpapier, Format 160 x 100 mm, z.B. reichelt.de, Artikelnummer HPR 160X100)
- Stiftleisten (z.B. bei mouser.de, Teilenummer 538-22-30-3364)

- 2 Micro-Taster (z.B. bei mouser.de, Teilenummer 506-2-1437565-8)
- 2 Leuchtdioden, Durchmesser 3 mm (1x gelb, 1x rot; verschiedene Bezugsquellen)
- 2 Widerstände (220 Ohm; verschiedene Bezugsquellen)
- Schaltaht (oder Schaltlitze, d.h. dünnes Kabel mit Kunststoffisolation)
- evtl. Schrumpfschlauch (ist bei unvermeidbaren Drahtkreuzungen hilfreich)

Zunächst muss die viel zu große Lochrasterplatine auf die gewünschte Größe von 17x13 (bzw. besser 20x15) Löchern verkleinert werden. Dazu wird mit einer Anreihnadel entlang einer Lochreihe die Plastikseite (d.h. die Seite ohne Kupfer-Lötlagen) mehrfach eingeritzt. Ist keine Anreihnadel verfügbar, sind auch ein scharfes Teppichmesser oder ein Skalpell als Alternative geeignet. Nach dem Anreihen kann die Platine sehr einfach durchgebrochen werden, z.B. an der Tischkante. Die Bruchstellen sollten danach mit einer Feile geglättet werden, um die Verletzungsgefahr zu minimieren (Abbildung 21).

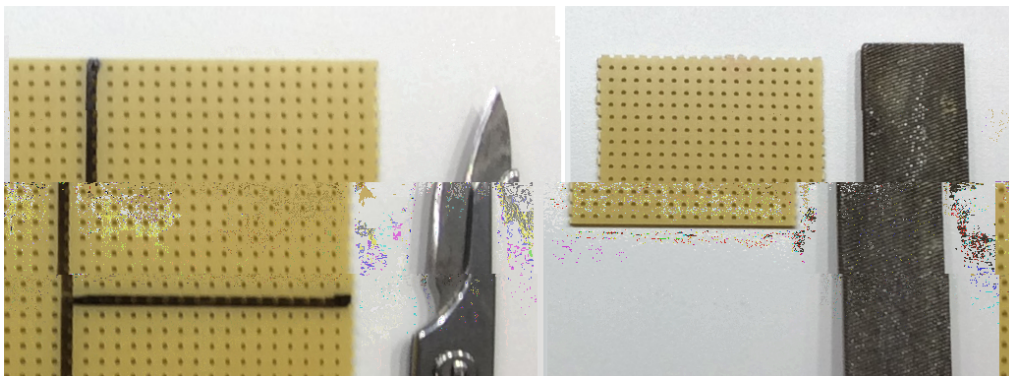


Abbildung 21: Links: Zum Abtrennen eines kleinen Abschnittes der großen Lochrasterplatine zeichnet man mit einem Marker die Schnittlinie entlang einer Lochreihe vor und zählt erneut nach, ob genug Löcher für das gewünschte Board übrig sind. Dann zieht man die Linie mit einer Anreihnadel, einem Skalpell oder einem Cutter mehrfach nach und bricht die Platine z.B. an der Tischkante ab. Rechts: Die Bruchstellen haben scharfe Kanten und sollten mit einer Feile geglättet werden, bevor weitergearbeitet wird.

Sobald die Lochrasterplatine die richtige Größe hat, kann sie mit den entsprechenden Komponenten bestückt werden. Abbildung 22 zeigt die Bauelemente, die nach und nach auf die Platine aufgebracht werden. Besonders zu beachten ist dabei einerseits die

Polung der Leuchtdioden, deren Kathode (erkennbar am kürzeren Bein oder der abgeachten Seite des Diodengehäuses) immer an den Minuspol (GND) des Arduino-Boards angeschlossen werden muss. Andererseits haben die Microtaster vier Beine, von denen jeweils zwei im Innern des Tasters miteinander verbunden sind. Eine Einkerbung auf der Rückseite der Taster zeigt an, wie die elektrische Trennung verläuft (siehe Abbildung 22, unten rechts). Im Zweifelsfall sollte mit einem Multimeter überprüft werden, welche Beine elektrisch miteinander verbunden sind, bevor die Taster eingebaut werden.

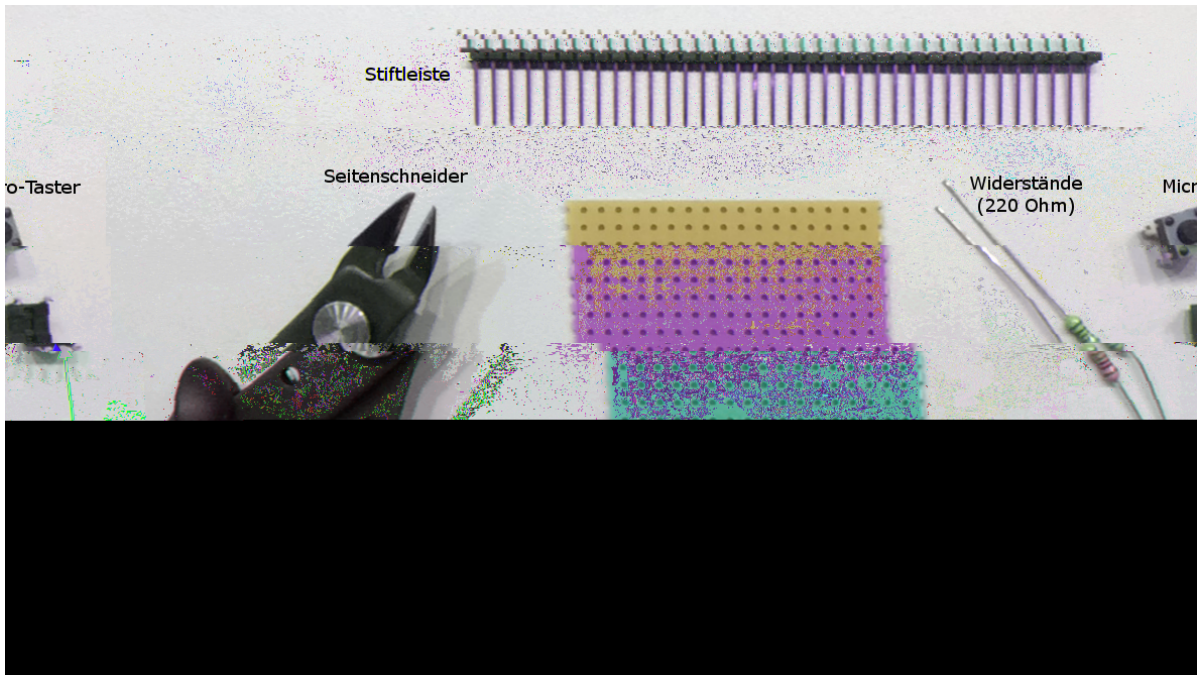


Abbildung 22: Lochrasterplatine und Komponenten für den Bau eines Aufsteckboards für mobile Luftdruckmessungen. Besonders zu beachten sind die korrekte Polung der Leuchtdioden (Kathode am Minuspol (GND) des Arduino-Boards, d.h. die kurzen Beine liegen einander zugewandt in der Mitte, vergleiche Abbildung 24) und der korrekte Einbau der Microtaster, da hier je zwei der vier Beine im Innern des Tasters miteinander verbunden sind. Wo sich die elektrische Trennung der Beine befindet bzw. welche Beine miteinander verbunden sind, ist auf der Rückseite der Taster anhand einer Einkerbung zu erkennen (unten rechts, zeigt die Trennstelle an); diese Linie muss parallel zu den zuvor angeboteten Steckverbindungen liegen.

Zuerst müssen die Stiftleisten, die die Verbindung zum Datalogging Shield bzw. dem Arduino-Board herstellen, an das Aufsteckboard gelötet werden. Es wird je eine Stiftleiste mit 5 Pins, 6 Pins und 8 Pins benötigt, die entsprechend Abbildung 23 (links) bzw.

der Skizze in Abbildung 24 auf der Lochrasterplatine angeordnet werden. Nutzt man eine breitere Lochrasterplatine (20 Löcher statt 17 Löcher), müssen diese Stiftleisten auf gleicher Höhe jeweils bis an den äußeren Rand der Platine verschoben werden. Die Leisten werden zunächst jeweils nur an einem einzigen Bein verlötet. Danach können sie noch ohne großen Aufwand begradigt und bis zum Anschlag eingeschoben werden, indem die Lötstelle erneut verflüssigt wird (nicht zu lange, da sich sonst das Löttauge lösen kann). Erst wenn die Position und die senkrechte Ausrichtung der Stiftleiste überprüft wurden, sollten die anderen Beine ebenfalls verlötet werden.

Nach dem Verlöten der Stiftleisten werden die Widerstände sowie die Leuchtdioden eingesetzt und durch leichtes Abwinkeln ihrer Beine fixiert. Die Micro-Taster werden ebenfalls in die Platine eingesteckt. Auf die Hinweise zum Einbau der Leuchtdioden und Taster in Abbildung 22 muss unbedingt geachtet werden, da das Aufsteckboard sonst nicht funktioniert und möglicherweise sogar die Sensoren oder der Arduino beschädigt werden könnten. Die bis auf den Sensor fertig bestückte Platine ist in Abbildung 23 rechts gezeigt; die Komponenten können nun an den Löttaugen an der Unterseite der Platine festgelötet werden. Für alle Sensorboards, die mobil genutzt werden sollen, ist der Bau der Platine bis hier identisch.

Als letzte Komponente muss nun noch der Sensor auf das Board gesteckt werden. Die Richtung, in der das schematische Bauteil BMP180 in Abbildung 24 eingesteckt ist, entspricht auch der Richtung, in der das tatsächliche Sensormodul aufgesteckt wird. Die Beine zeigen zu den Tastern, die Schraublöcher zu den Steckverbindungen am linken Rand der Platine. Der Pin mit der Beschriftung „VCC“ sollte sich nun am unteren Rand des Luftdrucksensor-Moduls befinden, der Pin „SDA“ am oberen Rand (siehe Abbildung 26, unten links). Nachdem das erste Bein angelötet und der feste und gerade Sitz des Moduls überprüft wurden, können auch hier wieder die restlichen vier Beine verlötet werden.

Damit das Aufsteckboard für Messungen benutzt werden kann, müssen nun noch die Verbindungen der Komponenten untereinander und mit den Anschlüssen des Arduino hergestellt werden. Hierfür kann die in Abbildung 25 dargestellte Löthilfe genutzt werden. Sie zeigt die Ober- und die Unterseite des Boards mit allen herzustellenden Verbindungen. Diese Verbindungen können entweder mit Schaltdraht oder mit isolierter Schalllitze hergestellt werden. Die noch vorhandenen langen Beinchen der festgelöteten Komponenten können auch als Drahtverbindung genutzt werden, indem sie mit einer Zange vorsichtig in die gewünschte Richtung umgebogen werden. Die Verwendung festen Schaltdrahtes hat den Vorteil, dass dieser recht stabil ist und an Eckpunkten oder auf

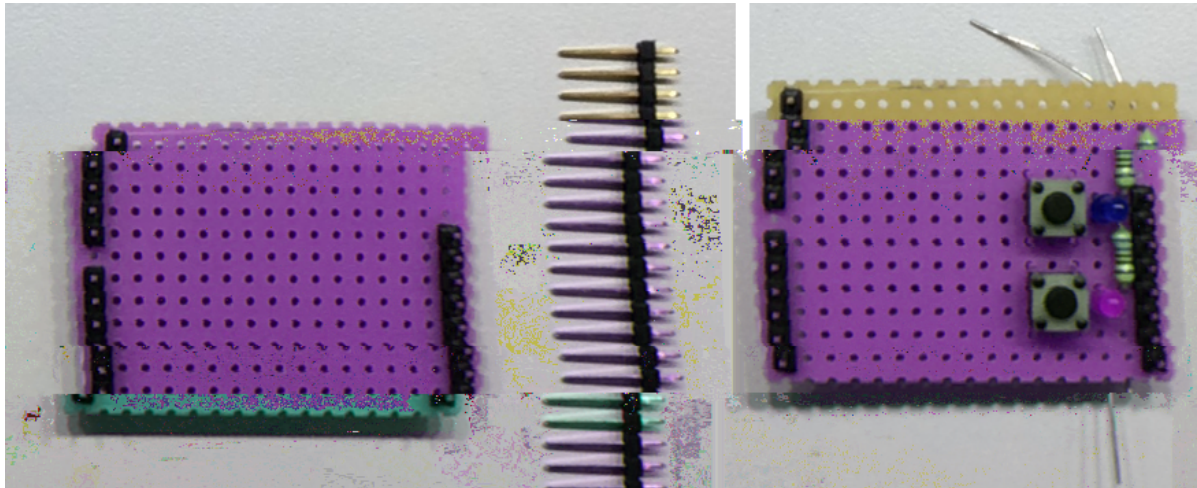


Abbildung 23: Links: Anordnung der Stiftleisten auf der Lochrasterplatine. Am linken Rand werden von der unteren Kante gesehen erst 6 Pins eingesteckt, dann mit einem Loch Abstand weitere 5 Pins. Am rechten Rand werden von der unteren Kante gesehen 8 Pins eingesteckt. Die Stiftleisten werden von der Oberseite der Platine eingesteckt und dann an der Unterseite mit den Löttaugen verbunden, wobei zunächst nur je ein Stift festgelötet werden sollte. Dadurch können die korrekte Positionierung und die senkrechte Ausrichtung der Stiftleiste noch einmal überprüft und gegebenenfalls verändert werden, bevor die anderen Stifte ebenfalls verlötet werden. Rechts: Mit den weiteren Komponenten bestückte Lochrasterplatine. Damit die Komponenten in ihrer Position bleiben, können ihre Beine unter der Platine abgewinkelt werden. Dies vereinfacht das Verlöten der Komponenten stark. Hier fehlt lediglich noch das Luftdrucksensormodul. Die Hinweise zum Einsetzen der Leuchtdioden und Taster in Abbildung 22 müssen beim Bestücken der Platine unbedingt beachtet werden.

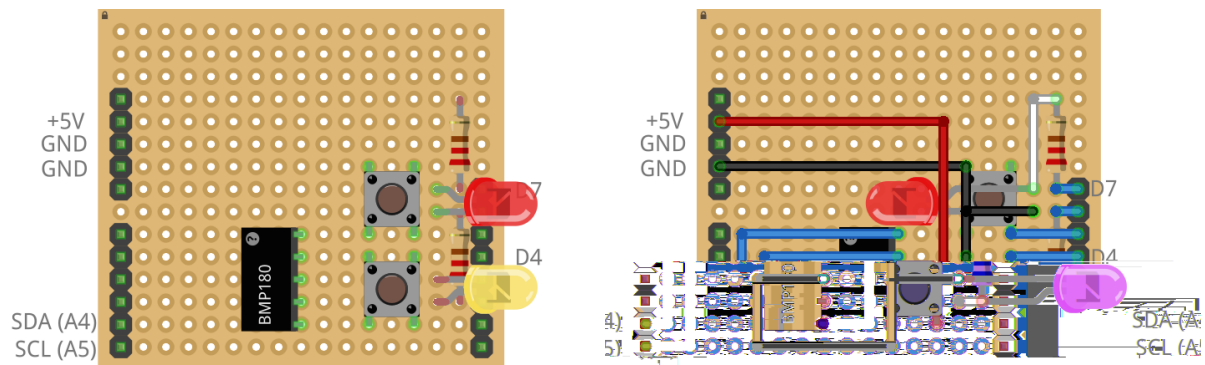


Abbildung 24: Schematische Skizze der Bestückung der Lochrasterplatte für ein Aufsteckboard für mobile Luftdruckmessungen. { Links: Positionen aller Komponenten auf der Lochrasterplatte. { Rechts: Zusätzlich sind hier die Verbindungen der Komponenten eingezeichnet, die unterhalb der Lochrasterplatte hergestellt werden müssen. Die Drahtfarben zeigen hier an, zu welchen Anschlüssen (Pins) die Verbindungen gehören. Rot entspricht +5V, schwarz GND, blau sind jeweils Anschlüsse an den digitalen (rechts) bzw. analogen (links unten) Datenpins des Arduino-Boards. Wei dargestellt sind Verbindungen der einzelnen Komponenten untereinander (hier existieren solche Verbindungen lediglich zwischen den zwei Widerständen und den Anoden der zugehörigen Leuchtdioden).

langen geraden Strecken zwischendurch an einzelnen Lötungen befestigt werden kann; Kreuzungen zweier Drähte sind hier jedoch sehr problematisch (roter Pfeil in Abbildung 25). Schaltlitze hat demgegenüber den Vorteil, dass die Kabel sich problemlos überkreuzen können; die Litze ist allerdings deutlich flexibler als der Schaltdraht und kann nicht an Eckpunkten oder Biegungen verlötet werden, weswegen sie sehr schnell zu unordentlichem „Kabelsalat“ unter der Platine führen kann. Für die Wahl des Verdrahtungsmaterials sind daher einzig die persönlichen Vorlieben des Anwenders ausschlaggebend; ich bevorzuge die Schaltdraht-Variante mit Schrumpfschlauch; für sehr kompliziert herzustellende Verbindungen verwende ich auch vereinzelt Schaltlitze.

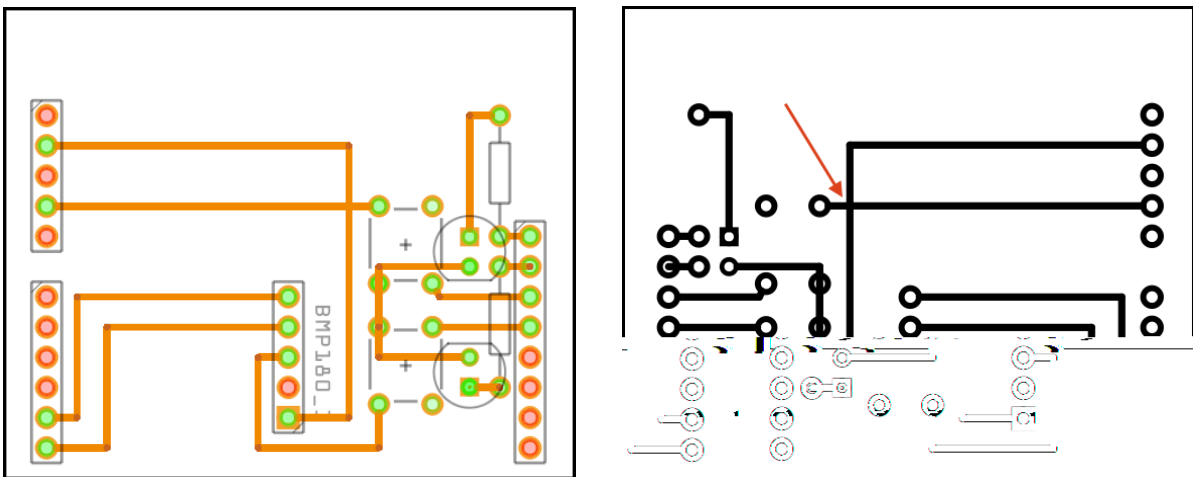


Abbildung 25: Løthilfe zum Herstellen eines Aufsteckboards für mobile Luftdruckmessungen. Die Komponenten sind bereits mit der Platine verlötet. Um nun die korrekten Verbindungen herzustellen, müssen die Beine noch miteinander verdrahtet werden. { Links: Bestückte Oberseite der Lochrasterplatine (schematisch). { Rechts: Unterseite der Lochrasterplatine. Wird die bestückte Platine umgedreht, befinden links acht Pins, rechts sechs plus fünf Pins. Die schwarzen Linien werden mit Draht (oder mit isolierter Schaltlitze) hergestellt. An der Kreuzung in der Mitte (Pfeil) müssen die Drähte voneinander isoliert werden, z.B. indem der +5V-Draht (vertikale Linie) an dieser Stelle mit Schrumpfschlauch ummantelt oder durch ein isoliertes Kabel (Schaltlitze) ersetzt wird.

Die verschiedenen Materialien für die Verdrahtung sowie ein Foto des fertig verdrahteten Sensor-Aufsteckboards sind in Abbildung 26 gezeigt. Hier sind auch die Drahtverbindungen entsprechend der in Abbildung 24 genutzten Farbcodierung hervorgehoben, um den Nachbau zu erleichtern. Aus dieser Abbildung wird deutlich, dass das Problem der sich kreuzenden Drähte in diesem Fall umgangen werden konnte, indem die

Masse-Leitung (GND, schwarz) über einen kleinen Umweg verlegt wurde. Da Kreuzungen der Drähte jedoch nicht immer vermieden werden können, wurden hier zwei mögliche Lösungsansätze, nämlich die Verwendung von Schrumpfschläuchen und das Ausweichen auf Schaltlitze, gezeigt.

Nachdem jetzt alle Verbindungen hergestellt sind, können zum Abschluss alle überflüssigen langen Beinchen der einzelnen Komponenten mit einer Kneifzange oder einem Seitenschneider entfernt werden. Dabei dürfen die Steckverbindungen (Stiftleisten) am Rand des Aufsteckboards natürlich nicht entfernt werden, da sie zur Verbindung mit den Sockelleisten auf dem Datalogging Shield benötigt werden. Das fertige Aufsteckboard kann dann auf das Datalogging Shield in der im ersten Schritt hergestellten Sensorbox aufgesteckt werden (siehe Abbildung 5, hier ist jedoch ein Beschleunigungssensor aufgesteckt). Damit mit der fertigen Sensorbox Messungen durchgeführt werden können, müssen nun im dritten der vier Schritte zur eigenen Sensorbox die Arduino-Software und die benötigten Arduino-Bibliotheken installiert werden.

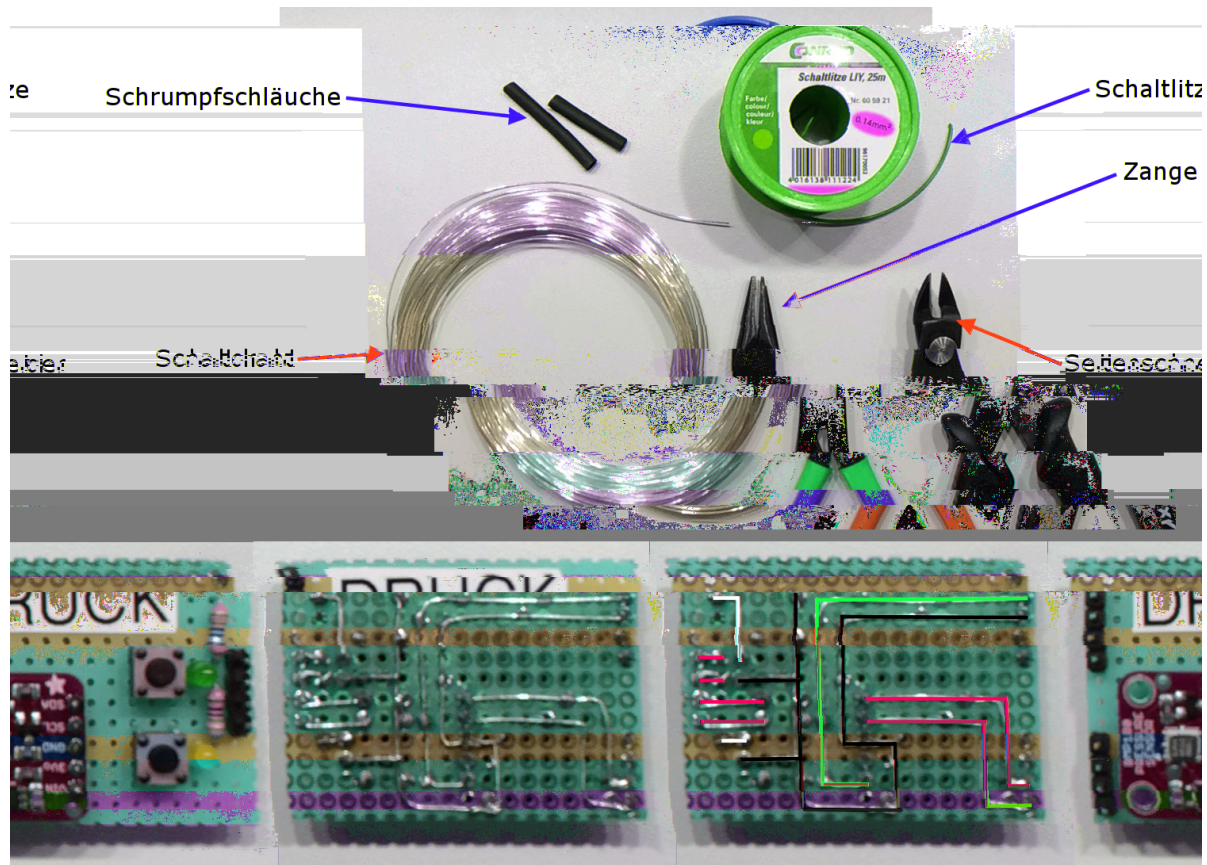


Abbildung 26: Oben: Verschiedene Materialien zur Verdrahtung der Komponenten auf der Lochrasterplatine. Hierzu gehören Schaltdraht, Schaltlitze, Schrumpfschläuche sowie eine Zange und ein Seitenschneider. { Unten links: Oberseite des fertig bestückten Luftdrucksensor-Aufsteckboards. In dieser Version wurden einige der nicht benötigten Stiftleisten weggelassen; für die Stabilität der Steckverbindung ist es jedoch sinnvoll, alle Stiftleisten wie oben gezeigt zu verwenden. { Unten Mitte: Unterseite der Platine mit Verdrahtung der Komponenten; in diesem Fall wurde Schaltdraht verwendet. Die Problematik sich überkreuzender Leitungen wurde hier gelöst, indem der GND-Draht auf einen Umweg verlegt wurde. { Unten rechts: Verdeutlichung der Verdrahtung mit der in Abbildung 24 verwendeten Farbcodierung. Hier ist der Umweg der GND-Leitung (schwarz) zur Vermeidung einer Kreuzung mit der +5V-Leitung (rot) gut erkennbar.

Schritt 3: Installation der Arduino-Software und der benötigten Bibliotheken

Zunächst muss die Arduino-Software installiert werden. Dazu wird die aktuelle Version von der Webseite der Entwickler, <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>, heruntergeladen.¹⁹ Je nach verwendetem Betriebssystem bietet Arduino eigene Installationsanleitungen, weswegen an dieser Stelle darauf verzichtet wird, eine genaue Beschreibung zu geben. Für Windows ist die Installationsanleitung unter <https://www.arduino.cc/en/Guide/Windows> zu finden, für Mac unter <https://www.arduino.cc/en/Guide/MacOSX> und für verschiedene Linux-Systeme unter <http://playground.arduino.cc/Learning/Linux>.

Wenn die Software ordnungsgemäß installiert ist, werden zur Nutzung der Sensoren und des Datalogging Shields noch einige Bibliotheken benötigt. Arduino-Bibliotheken enthalten sehr ausführliche und häufig kompliziertere Quelltexte, die der Anwender nutzen kann, um zusätzliche Sensoren, Displays oder Ähnliches zu verwenden, ohne die Kommunikation mit diesen selbst programmieren zu müssen. Die Bibliotheken werden einfach im Messprogramm „geladen“ und können dann ohne Detailkenntnisse über ihre Funktionsweise verwendet werden. Viele Boardhersteller bieten selbst solche Bibliotheken an, weitere werden von Privatpersonen erstellt und in der Arduino-Community mit anderen Nutzern geteilt. Für die vorliegende Arbeit wurden mehrere solche Arduino-Bibliotheken genutzt, die auch auf der Projektwebseite verlinkt sind oder zum Herunterladen angeboten werden:

- Die Bibliotheken zur Kommunikation mit den verschiedenen Sensoren via I2C-Bus (Wire) und SPI-Bus (SPI) sind standardmäßig in der Arduino-Software enthalten und müssen nicht neu installiert werden.
- Beschleunigungssensor BMA020 (Modul von ELV): Original-Bibliothek von Robin Gerhartz (<http://www.mikrocontroller.net/topic/268214>); diese Bibliothek wurde von mir leicht verändert, da eine Variablendefinition sich mit einer anderen Bibliothek überschneiden hat. Die veränderte Bibliothek kann von der Projektwebseite heruntergeladen werden.
- Drucksensor BMP180 (Modul von Adafruit): Bibliothek von Sparkfun Electronics/Mike Grusin (https://github.com/sparkfun/BMP180_Breakout).
- Luftfeuchtigkeitssensor HDC1008 (Modul von Watterott): Bibliothek von Adafruit (https://github.com/adafruit/Adafruit_HDC1000_Library). Der hier ge-

¹⁹Alle in diesem Abschnitt genannten Internetadressen wurden zuletzt am 19.07.2015 abgerufen.

nutzte Sensor HDC1008 hat die gleichen Funktionen wie das Vorgängermodell HDC1000, weswegen auch die gleiche Bibliothek verwendet werden kann.

- Soll die Echtzeituhr des Datalogging Shield genutzt werden: Bibliothek RTCLib von Adafruit (<https://learn.adafruit.com/adafruit-data-logger-shield/downloads>).

Die oben genannten Bibliotheken haben alle das *.zip-Format, sodass sie direkt in der Arduino-Programmiersoftware installiert werden können. Eine ausführliche Anleitung zur Installation solcher Bibliotheken ist auf der Arduino-Seite unter <https://www.arduino.cc/en/Guide/Libraries#toc4> zu finden. Bevor neu installierte Bibliotheken benutzt werden können, muss die Arduino-Umgebung zunächst neu gestartet werden.

Wird das Datalogging Shield zum ersten Mal eingesetzt, muss die Uhrzeit der Echtzeituhr gesetzt werden. Eine Anleitung hierzu findet sich auf der Webseite des Herstellers Adafruit.²⁰ Zuvor sollte man jedoch sicherstellen, dass die Uhrzeit des benutzten Computers korrekt ist, da diese auf die Echtzeituhr geschrieben wird.

Sobald die Software und die Bibliotheken installiert sind, können endlich Messprogramme auf das Arduino-Board geladen und Messungen durchgeführt werden. Dies wird im letzten der vier Schritte zum eigenen Messsystem beschrieben.

²⁰<https://learn.adafruit.com/adafruit-data-logger-shield/using-the-real-time-clock>,
Abruf 19.07.2015

Schritt 4: Hochladen eines Messprogrammes

Nachdem die Sensorbox mit einem zugehörigen Sensor-Aufsteckboard gebaut und die Arduino-Software mit den benötigten Bibliotheken erfolgreich installiert wurden, kann im letzten der vier Schritte ein Messprogramm auf das Arduino-Board hochgeladen und eine Messung durchgeführt werden. Alle im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Messprogramme können von der Projektwebseite im Arduino-Format (*.ino) heruntergeladen werden; sie können an einem beliebigen Ort auf dem PC gespeichert werden, wobei eine *.ino-Datei sich immer in einem eigenen Ordner befinden muss, der genauso heißt wie die Datei selbst (z.B. „Luftdruck.ino“ im Ordner „Luftdruck“). Bei der Standardinstallation von Arduino wird der *.ino-Dateityp mit der Arduino-Software verknüpft, sodass die Dateien durch einen Doppelklick in der Arduino-Programmierungsumgebung geöffnet werden können.

Abbildung 27 zeigt die Arduino-Benutzeroberfläche mit geöffneten Werkzeug-Menü. Dort können der Boardtyp (Arduino UNO) sowie der COM-Port des angeschlossenen Arduino-Boards eingestellt werden; jedem Board wird beim ersten Anschließen an den PC ein solcher Port zugewiesen. Die Portadresse ist insbesondere für die Demonstrationsversuche mit Pro Lab-Programmen wichtig, da dort ebenfalls der korrekte COM-Port des Messboards eingestellt werden muss. In der Abbildung ist darüber hinaus zu sehen, wie die Messeinstellungen innerhalb der bereitgestellten Arduino-Programme verändert werden können (roter Rahmen). Änderung dieser Messeinstellungen der Messprogramme können direkt unter deren Beschreibung, die sich zwischen den Zeichen /* ... */ befindet, vorgenommen werden. Sie werden dann im Arduino-Sketch²¹ gespeichert, bis sie erneut vom Anwender bearbeitet werden. Eine Übersicht über die veränderbaren Messeinstellungen der angebotenen Programme ist in Tabelle 2 gegeben; meist handelt es sich dabei um das Messintervall, also den zeitlichen Abstand, in dem das Board Messungen durchführt und über die serielle Schnittstelle sendet (Live-Messungen) bzw. auf der SD-Karte speichert (Standalone-Anwendungen). An dieser Stelle kann auch die Baudrate²² geändert werden, die für die Kommunikation über die Serielle Schnittstelle wichtig ist. Eine Veränderung dieser Einstellung ist in der Regel jedoch nicht nötig.

Wenn alle gewünschten Änderungen vorgenommen wurden, kann das Programm dann auf das angeschlossene Arduino-Board hochgeladen werden. Hierzu wird einfach der Bedienknopf mit dem Pfeilsymbol betätigt (siehe Abbildung 27). Sobald das Hochladen erfolgreich beendet ist, erscheint im unteren Bereich des Fensters der Hinweis „Hoch-

²¹Sketch ist die offizielle Bezeichnung der Arduino-Quelltexte.

²²Baudrate ist die Rate, mit der Symbole über die Schnittstelle übertragen werden.

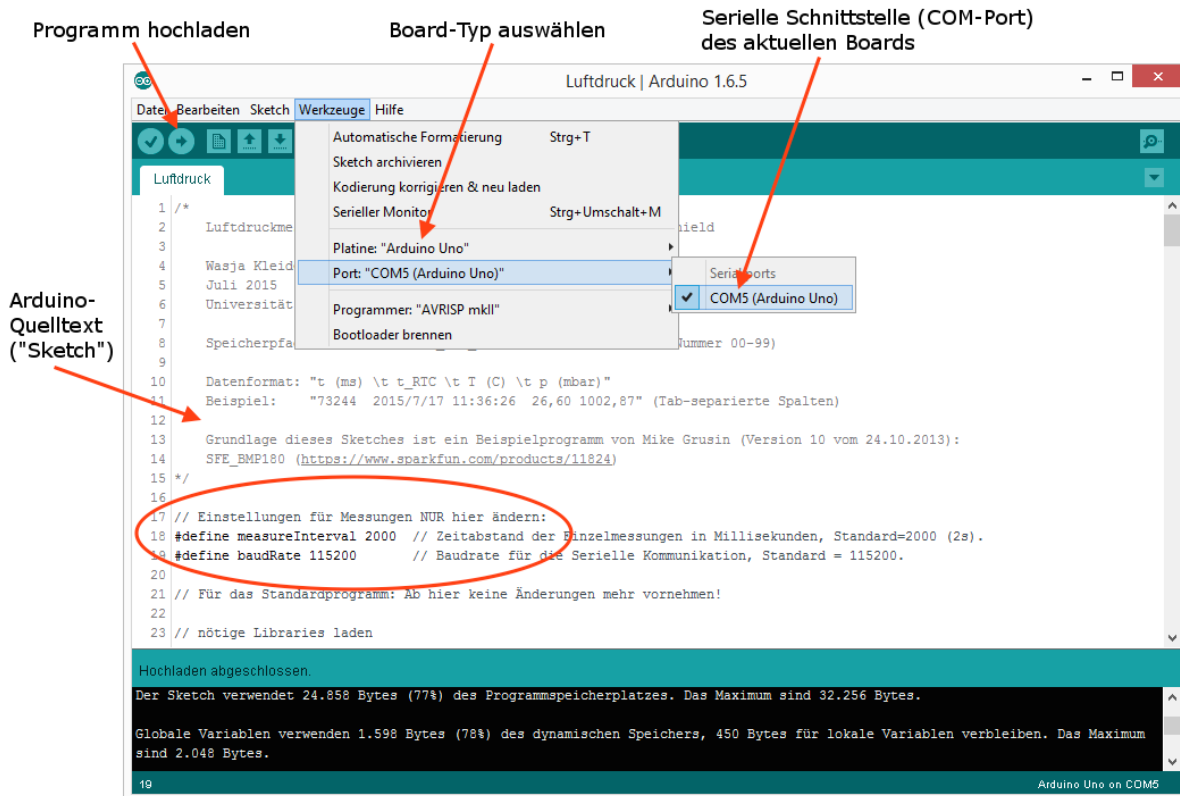


Abbildung 27: Screenshot der Arduino-Programmierungsumgebung mit Schaltflächen zum Hochladen eines Arduino-Programms auf ein angeschlossenes Board. Der COM-Port des Boards, der hier angezeigt wird, muss auch in den Pro Lab-Programmen als Serielle Schnittstelle eingestellt werden, damit diese auf die Daten des angeschlossenen Boards zugreifen können (siehe hierzu die Kurzanleitung zu den Einstellungen der Pro Lab-Programme im letzten Abschnitt dieses Kapitels). Sollen Messeinstellungen (z.B. Messbereich des Beschleunigungssensors) verändert werden, wird direkt in den Arduino-Programmen die entsprechende Zeile geändert (rot eingekreist).

Tabelle 2: Liste der Arduino-Messprogramme, die von der Projektwebseite heruntergeladen werden können, sowie der darin veränderbaren Messeinstellungen mit deren Standardeinstellung. Die *.ino-Dateien werden bei einer Standardinstallation der Arduino-Software mit Arduino verknüpft, sodass die Dateien durch Doppelklick geöffnet und nach eventuellem Anpassen der Messeinstellungen direkt auf das Board hochgeladen werden können.

Messung	Messprogramm	Messeinstellungen (Standard)
Ultraschall-Abstand	Ultraschall.ino	Messintervall (20 ms) Temperatur (20.0 °C)
Luftdruck (Standalone)	Luftdruck.ino	Messintervall (2000 ms)
Fahrrad-Geschwindigkeit (Standalone)	Fahrrad.ino	Messintervall (5000 ms) Reifenradius (35.56 cm/28 Zoll)
Beschleunigungen (Standalone)	Beschleunigung.ino	Messintervall (20 ms) Messbereich ($\pm 8g$)
Physikalisches Pendel	PhysPendel.ino	Messintervall (20 ms)

laden abgeschlossen. Dann kann das Arduino-Board vom PC getrennt und eine erste Testmessung durchgeführt werden.

Die `pendel.ino` (2015-01-07) wird als Beispiel verwendet.

- Wird eine Messung gestartet, blinkt die gelbe Leuchtdiode bei jedem aufgenommenen Messwert kurz auf. Bei Beschleunigungsmessungen bleibt die LED durchgehend eingeschaltet, da sonst gerade bei sehr kleinen Messintervallen zu viel Rechenzeit verloren geht.
- Wird die Messung beendet, blinken beide Leuchtdioden gemeinsam zweimal auf und bleiben dann dunkel. Nun können die Box ausgeschaltet und die aufgenommenen Messdaten von der Speicherkarte ausgelesen werden. Hierzu können Excel-Tabellen oder ein bereitgestelltes Pro Lab-Programm zur Datenauslese genutzt werden. Beide Möglichkeiten werden im nächsten Abschnitt kurz erklärt.

Messauswertung mit ProfiLab und Excel

Wurde eine Messung durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen, sind die Messdaten auf der SD-Karte gespeichert. Der allgemeine Name der Dateien, die die im Rahmen dieser Arbeit bereitgestellten Messprogramme für jede Messung anlegen, ist in der Beschreibung am Anfang des jeweiligen Messprogrammes genannt. Für Luftdruckmessungen lautet der Dateiname „P_LOG_XX.dat“, wobei XX eine fortlaufende Zahl von 00 bis 99 ist. Da das Programm keine längeren Dateinamen anlegen kann, sollte die Speicherkarte regelmäßig geleert werden. Die SD-Karte kann mit einem SD-Kartenleser an den PC angeschlossen, die Dateien dann ausgewertet werden.

Zur Auswertung sind grundsätzlich alle Programme geeignet, die Daten in Tabellenform einlesen und Diagramme erstellen können. In Schulen ist meistens Excel (oder eine Open Source-Alternative) verfügbar. Die Auswertung der Luftdruckmessung mit Excel ist sehr einfach, sofern der Anwender mit den Excel-Funktionen vertraut ist. Die Messdatei kann direkt in Excel geöffnet werden; zur Darstellung des Luftdruckverlaufes werden die Spalten „t (ms)“ und „p (mbar)“ ausgewählt und als Punktdiagramm (Punkte mit geraden Linien) gezeichnet. Das Ergebnis ist in Abbildung 28 gezeigt; es wurden zusätzlich noch Achsenbeschriftungen eingefügt. Anhand eines so erstellten Diagramms ist die Auswertung bereits möglich; auch eine weitere Datenverarbeitung ist möglich, da Berechnungen in einem Tabellenkalkulationsprogramm problemlos durchführbar sind.

Statt ein Tabellenkalkulationsprogramm zu nutzen, kann auch auf ein vorgefertigtes Pro Lab-Programm zur Datenauslese zurückgegriffen werden. Das Pro Lab-Programm „Datenauslese“, das bis zu vier verschiedene Messgrößen/Spalten (zusätzlich zur immer erstellten Zeitmarke des Arduino) einlesen und anzeigen kann, ist in Abbildung 29 gezeigt und wird auf der Projektwebseite zum Download angeboten. So wurden beispielsweise auch die in den Abbildungen 56 und 58 gezeigten Auswertungen einer Luftdruckmessung erstellt. Das Programm liest die Messwerte nacheinander ein, sodass als Resultat eine Art „Simulation“ der Messung dargestellt wird. Diese kann bei entsprechend angepasster Geschwindigkeit im Unterricht vom Lehrer „live“ kommentiert werden, während das Programm die Werte plottet.

Ein weiterer Vorteil, den die Pro Lab-Auswertung mit sich bringt, ist das einfache Zoomen des Diagramms im Kontextmenü (man beachte hierzu die Kurzanleitung zu den Einstellungen der Pro Lab-Programme im nächsten Abschnitt). Zudem können die Messwerte direkt im Programm umgerechnet werden, indem in der Konfiguration die Formeln der einzelnen Kanäle angepasst werden (siehe Abbildung 29). Um den Messwert selbst anzuzeigen, bleibt die Einstellung auf „E0“. Um jedoch beispielsweise eine

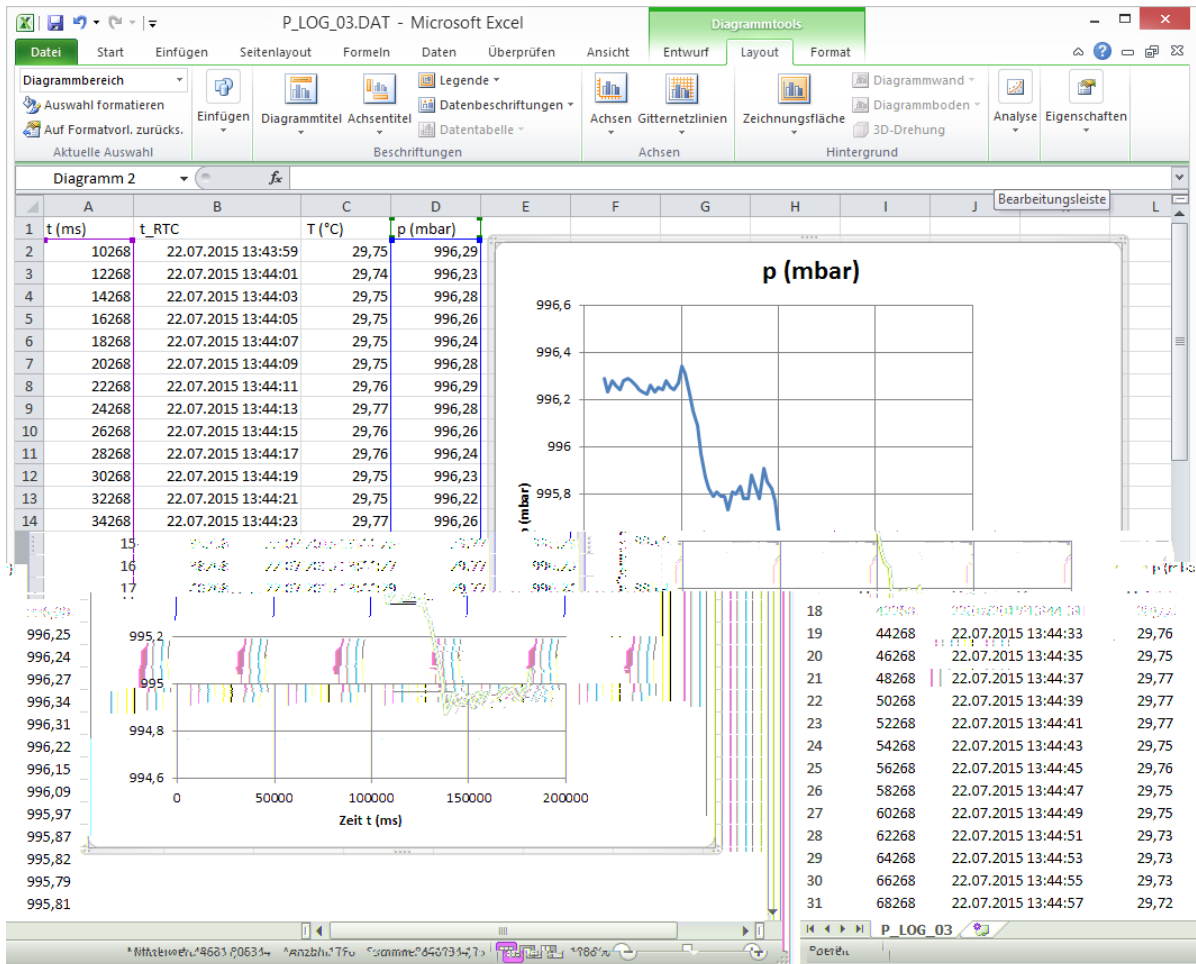


Abbildung 28: Screenshot des mit Excel erstellten Diagramms einer Luftdruckmessung. Hier wurde zur Bestimmung der Höhe eines Schulgebäudes der Luftdruckverlauf durch eine Gruppe von Schülern gemessen. Die Spalten „t (ms)“ und „p (mbar)“ der Messdaten wurden als Punktdiagramm mit geraden Linien aufgetragen.

Geschwindigkeit, die in m/s gespeichert wurde, in km/h anzeigen zu können, gibt man einfach „E0*3.6\ (mit Dezimalpunkt) ein. Beim Plotten wird nun die Geschwindigkeit direkt in der neuen Einheit angezeigt. Die Berechnung einer anderen Größe wurde beispielsweise beim Plotten des in Abbildung 58 gezeigten Diagramms genutzt, indem die barometrische Höhenformel nach der Höhenänderung aufgelöst und diese direkt angezeigt wurde. Für längere Messungen kann die Plotgeschwindigkeit angepasst werden. Hierzu wird im Eingabefeld „Geschwindigkeit Faktor\ der Faktor eingegeben, mit dem die eigentliche Plotgeschwindigkeit (Echtzeit) multipliziert werden soll. Wenn die daraus berechnete einzustellende Abtastrate nah genug an einem Wert ist, der im Y(t)-Diagramm ausgewählt werden kann (unten links, schwarzes Feld), kann dieser Wert ausgewählt und die Plotfunktion gestartet werden. Diese Funktion bietet sich auch an, um sehr schnelle Abläufe (beispielsweise bei einer Beschleunigungsmessung) in „Zeitlupe\ darzustellen.

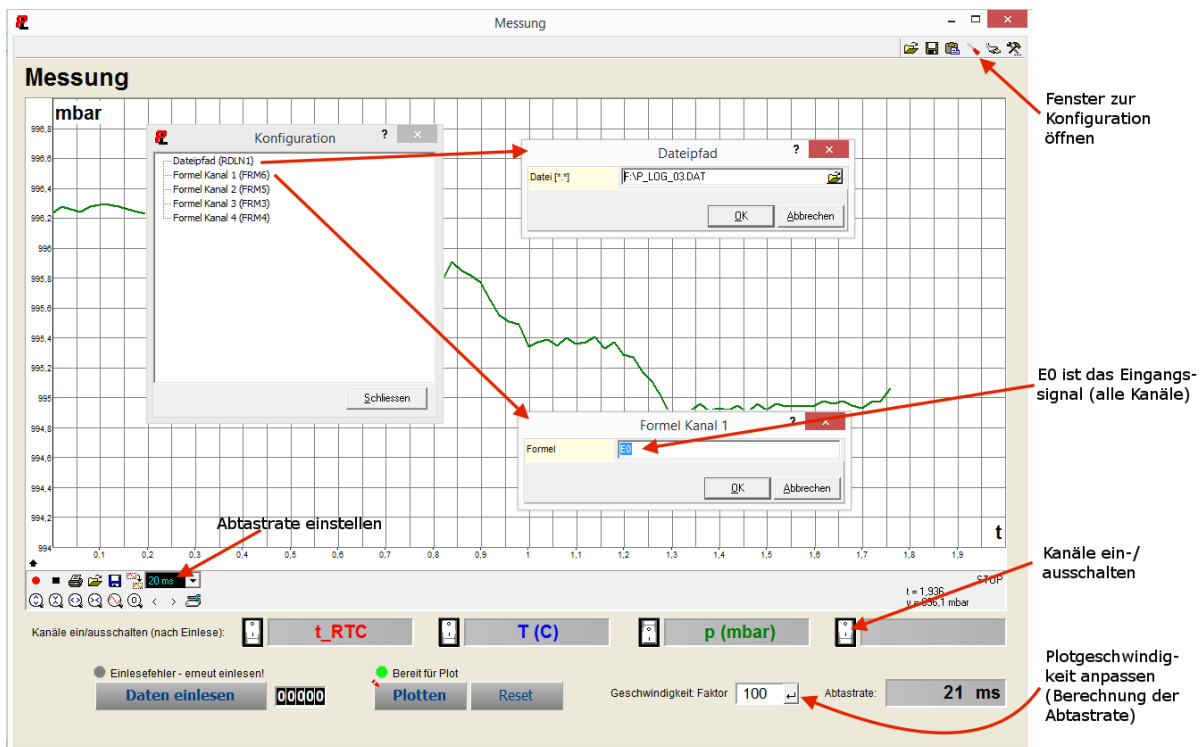


Abbildung 29: Zusammengefügte Screenshots der Benutzeroberfläche Pro Lab-Programmes „Datenauslese“. Zunächst wird im Konfigurationsmenü der Dateipfad der Messdatei ausgewählt. Die Datei wird dann mit dem entsprechenden Knopf eingelese; dadurch werden die Spaltenbeschriftungen und die Messintervalle (unten rechts) angezeigt. Die Anzeige der einzelnen Kanäle kann nun mit den weißen Schaltern ein- bzw. ausgeschaltet werden. Die Plotgeschwindigkeit kann erhöht werden, indem ein Geschwindigkeits-Faktor eingegeben und anschließend die Abtastrate des Y(t)-Diagramms auf den angezeigten Wert eingestellt wird, bevor der „Plotten“-Knopf betätigt wird. Falls gewünscht, können die Messwerte auch vor der Anzeige in einer Formel umgerechnet werden (z.B. um m/s in km/h umzurechnen, den Logarithmus des Werts anzuzeigen, ...; es sind nur Berechnungen mit dem Wert des Eingangssignals selbst möglich, nicht mit anderen Messwerten). Dazu wird im Konfigurationsmenü die Formel des Kanals von „E0“ (entspricht dem Messwert selbst) zu z.B. „E0*3.6“ (mit Dezimalpunkt) geändert. So kann auch bei Luftdruckmessungen direkt die berechnete Höhendifferenz angezeigt werden, wenn ein Referenzluftdruck angegeben wird (z.B. in vorheriger Darstellung der Messwerte notiert): Für das obige Diagramm musste die Formel von Kanal 3 zu „LN(E0/996.25)*8400*(-1)“ geändert werden, um direkt die Höhendifferenzen angezeigt zu bekommen (vergleiche hierzu Kapitel 5.1).

Kurzanleitung: Einstellungen der ProfiLab-Programme

Wird statt einer Standalone-Anwendung ein Messprogramm genutzt, das seine Daten über die Serielle Schnittstelle überträgt, müssen diese Daten am PC verarbeitet werden. Hierzu werden auf der Projektwebseite verschiedene kompilierte, d.h. ohne eine Installation der Pro Lab-Software ausführbare Pro Lab-Programme im Format *.exe zum Download angeboten; lediglich die Arduino-Treiber müssen installiert werden, da der PC andernfalls nicht mit den Arduino-Boards kommunizieren kann. Eine Übersicht über die angebotenen Programme ist in Tabelle 3 gegeben. Neben den kompilierten Programmen werden auch die Source-Programme („Quelltexte“ der grafischen Programmierung) bereitgestellt; möchte man die im Rahmen dieser Arbeit gezeigten kompilierten Programme ausgehend von diesen Source-Programmen dauerhaft verändern oder sogar neue, eigene Messprogramme entwickeln, muss man sich dafür die Software Pro Lab-Expert 4.0 kaufen. Eine Kurzanleitung zur Programmierung mit Pro Lab kann online gefunden werden.²³

Tabelle 3: Liste der kompilierten Pro Lab-Messprogramme, die von der Projektwebseite heruntergeladen werden können. Bei allen Messungen ist ein Nullsetzen der aktuellen Position möglich. Bei den Schwingungsmessungen mit Ultraschall ist die Ausleserate auf 20 ms festgelegt und kann nicht geändert werden. Auch der COM-Port ist in allen Programmen einstellbar; er muss auf das angeschlossene Arduino-Board abgestimmt sein.

Messung	Messprogramm	Einstellbare Größen (Standard)
Mechanische Schwingungen (Hall-Winkelauslese)	PhysPendel	Messintervall (20 ms) Mittelwertbildung für die Frequenzmessung (2 s, 5 Werte) Triggerschwelle Frequenzmessung
Mechanische Schwingungen (Ultraschallsensor)	US-MechSchwing	Schwingkörpermasse (100 g) Triggerschwelle der Frequenzmessung (10) Differentiationsintervall (100 ms)
Beschleunigung an der schiefen Ebene (US)	US-SchiefeEbene	Messintervall (20 ms) Differentiationsintervall (100 ms)

Damit die Ausleseprogramme mit dem angeschlossenen Arduino-Board kommunizieren können, muss im Pro Lab-Programm der korrekte COM-Port eingestellt werden.

²³<http://www.physi.uni-heidelberg.de/~eisele/KurzanleitungProfilabexperimente.pdf> (Abruf 06.07.2015)

Welcher COM-Port dem verwendeten Arduino zugewiesen ist, kann in der Arduino-Programmiersoftware nachgesehen werden (siehe Abbildung 27). Diese Einstellung kann dann im Pro Lab-Programm vorgenommen werden, indem das Konfigurationsfenster (Schraubenzieher-Symbol) geöffnet wird; dies ist in Abbildung 30 verdeutlicht. Wenn der korrekte COM-Port gewählt ist, sollte er mit allen anderen Einstellungen gespeichert und bei der nächsten Anwendung wieder geladen werden. Hierzu werden die entsprechenden Symbole im Programm oben rechts (siehe Abbildung 30) genutzt. Ist kein Arduino-Board angeschlossen, der falsche Port ausgewählt oder sind die Arduino-Treiber nicht korrekt installiert, leuchtet auf der Benutzeroberfläche eine rote Anzeige mit der Beschriftung „Fehler (Serieller Port)“ auf. Auch beim Start eines Programms leuchtet sie auf, bis das Board verbunden ist, verlischt dann aber. Bleibt die rote Anzeige an, muss die Verbindung zum Arduino überprüft werden.

Die genannten Einstellungen, die beim Speichern des COM-Ports ebenfalls gesichert werden, betreffen beispielsweise Schalterpositionen, Achsen und deren Skalen und Beschriftungen, Diagramm-Farben, Abtastraten, Triggerschwellen etc.; dies ist insofern sinnvoll, da mit optimierten Standardeinstellungen beispielsweise nach einer Messung der Zoom eines Diagrammes auf die voreingestellten Werte zurückgesetzt werden kann, indem der passende Eintrag im Kontextmenü gewählt wird: „Rechtsklick - Zoom reset“ (siehe Abbildung 31). Dies macht einen Vergleich mehrerer Diagramme für die Schüler leichter. Die Einstellungen eines Diagrammes können ebenfalls in seinem Kontextmenü angepasst werden: „Rechtsklick - Einstellungen...“. Weitere Einstellungen, wie zum Beispiel Abtastraten oder Triggerschwellen, werden im Fenster „Konfiguration“ (Abbildung 30) vorgenommen.

Bei der Planung von Demonstrationsexperimenten für den Unterricht sollte berücksichtigt werden, dass die Verarbeitung der von Arduino aufgenommenen Daten am PC eine gewisse Zeit benötigt, weswegen beispielsweise die tatsächliche Bewegung eines schwingenden Wagens und die im Messprogramm angezeigte Bewegung etwas zeitversetzt sind. Gerade, wenn Phasenverschiebungen o.Ä. untersucht werden sollen, kann dies problematisch werden, weswegen man es vor der Messung thematisieren sollte.

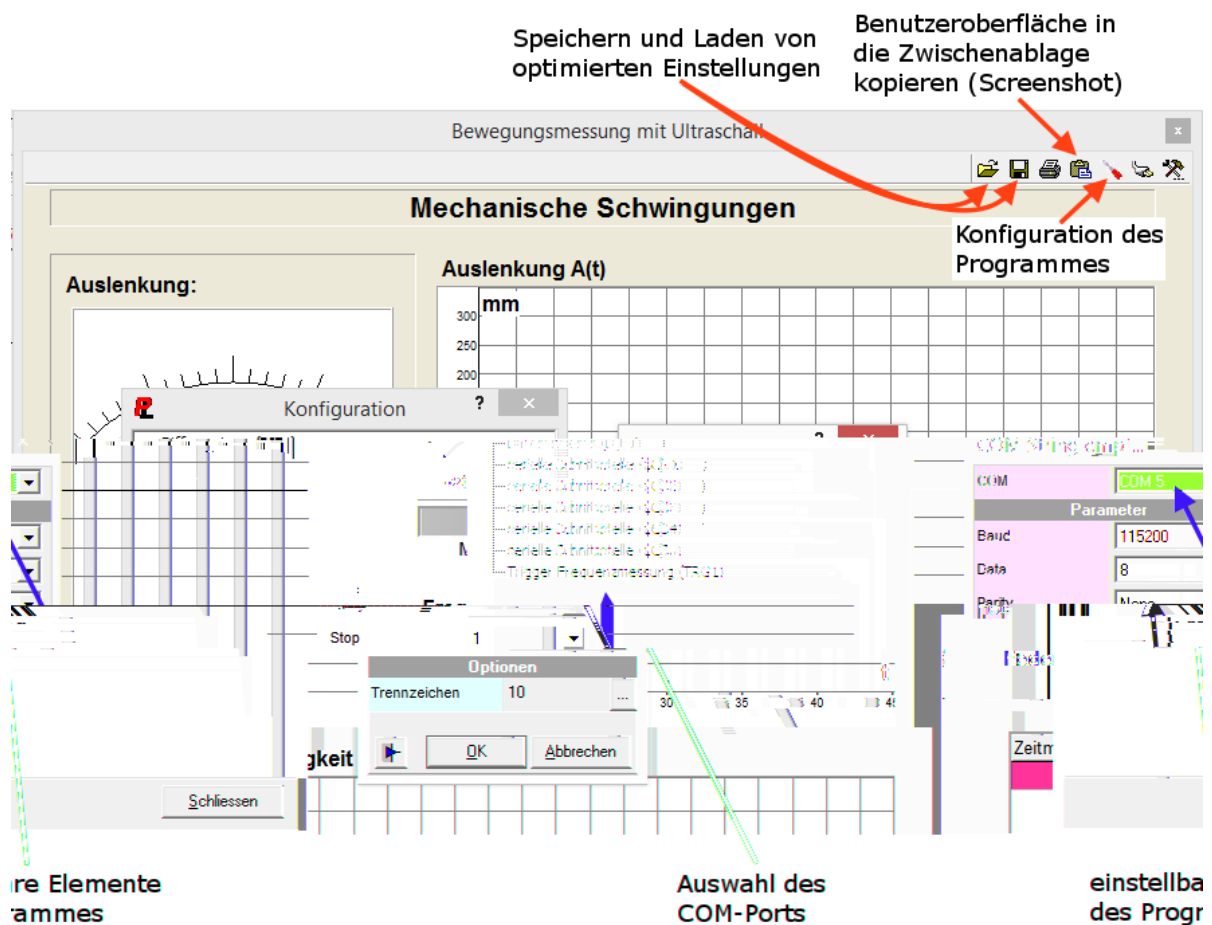


Abbildung 30: Screenshot zur Einstellung des zu verwendenden COM-Ports für ein Arduino-Board in der Pro Lab-Benutzeroberfläche. Der zugewiesene Port eines angeschlossenen Boards muss zunächst mit der Arduino-Benutzeroberfläche herausgefunden werden (siehe Abbildung 27). Mit den Schaltflächen zum Speichern und Laden der Einstellungen für ein Pro Lab-Programm kann der korrekte COM-Port nach einmaligem Einstellen immer wieder geladen werden. Im Konfigurationsfenster können beispielsweise auch Triggerschwellen oder Abtastraten für die Differenzierung von Messwerten geändert werden (links).

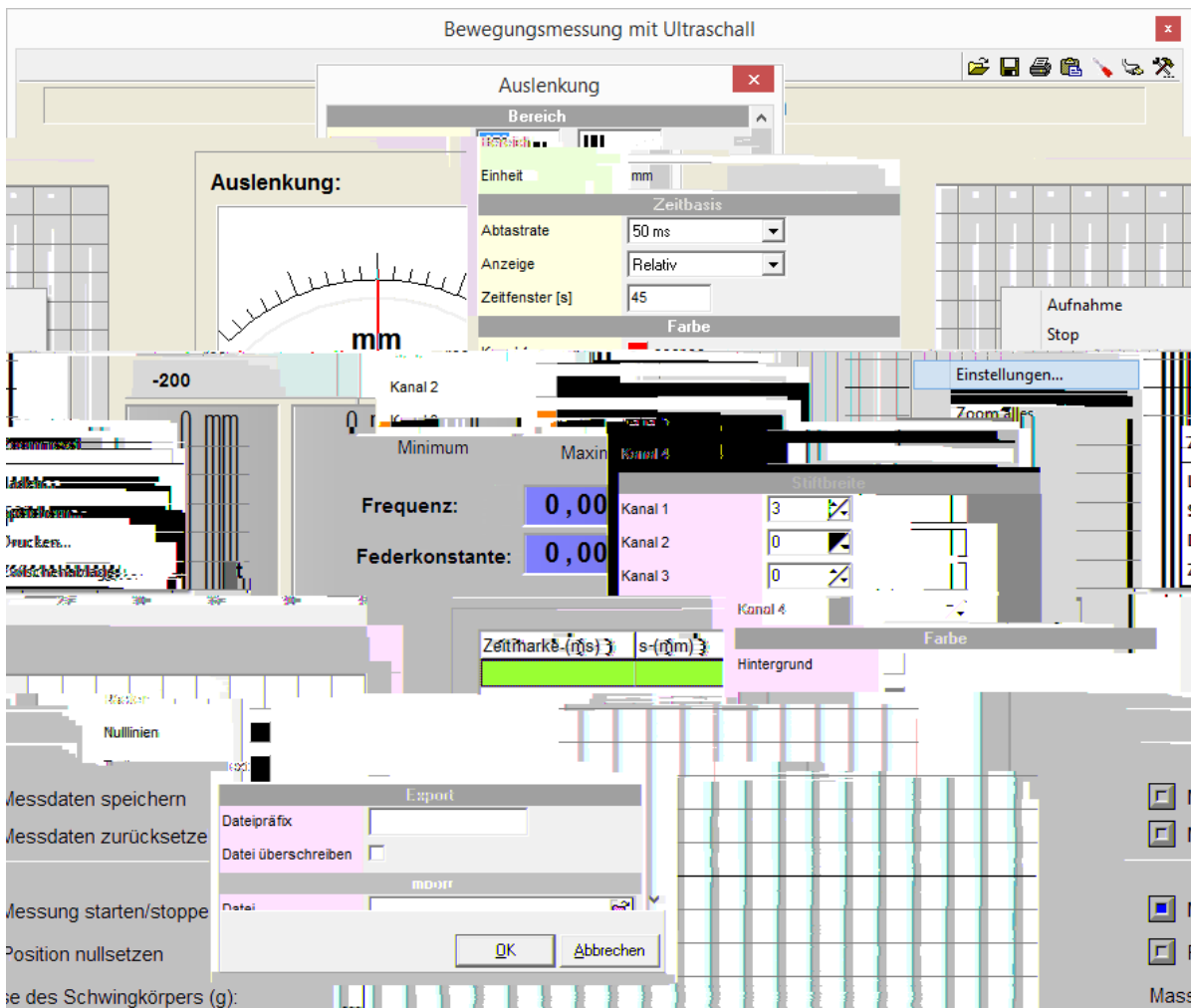


Abbildung 31: Die Einstellungen eines Diagrammes können in der Pro Lab-Benutzeroberfläche im Kontextmenü des ausgewählten Diagrammes (Rechtsklick auf das Diagramm) bearbeitet werden. Die gemachten Einstellungen können gespeichert und bei der nächsten Anwendung wieder geladen werden. Durch Klick auf „Zoom reset“ im Kontextmenü werden diese Einstellungen für das Diagramm übernommen, auch wenn sie durch eine Messung verändert wurden (bei aktiver Auto-Zoom-Funktion werden die Zeitskala und die Messwertskala automatisch angepasst). Hier können auch Diagramme als *.GRF-Datei gespeichert und in einem anderen Programm geladen werden, ohne dass die Messwerte in einer Simulation erneut eingelesen werden müssen.

4. Demonstrationsexperimente

Experimente sind für das Verständnis der Physik elementar. Kircher formuliert die zentrale Bedeutung folgendermaßen: „Experimente zeigen Phänomene, rücken fachliche Fragestellungen in den Betrachtungshorizont der Schülerinnen und Schüler und liefern Antworten der Natur.“^[9, S. 229] Mit Demonstrationsexperimenten können qualitative Fragestellungen untersucht und beantwortet werden, neue Fragestellungen aufgeworfen werden, aber auch quantitative Untersuchungen vorgenommen werden. Hierbei nehmen die Schüler vorrangig eine beobachtende Rolle ein. Daher ist es sehr wichtig, dass die experimentelle Anordnung so einfach wie möglich gestaltet ist, sodass die Schüler Messungen intuitiv verstehen können. Aus fachdidaktischer Sicht ist es dabei besonders wichtig, die Konzentration auf wesentliche Elemente der Experimente zu lenken, um die Beobachtungsaufgaben bei Demonstrationsversuchen zu erleichtern. Dazu gehören unter anderem, dass die Anzeigeskalen der Messinstrumente groß und gut lesbar sein sollten sowie Nebenelemente soweit möglich auszublenden sind.^[9, S. 237f.]

Die Pro Lab-Programme, die die Messdaten anzeigen, sind daher so gestaltet, dass Anzeigeelemente wie Zeiger oder Diagramme möglichst groß und farbig hervorgehoben sind, während die Bedienelemente, die nur für den Lehrer wichtig sind, eher klein und unauffällig am Rand der Benutzeroberfläche positioniert sind. Auch die Sensorboxen, die für die hier gezeigten Experimente genutzt werden, sind so einfach gehalten, um nicht vom Versuch selbst abzulenken. Um auch abgeleitete Größen sinnvoll einzubinden, die im Versuch nicht direkt gemessen, aber aus den Messdaten berechnet werden, werden diese ebenso groß und farbig hervorgehoben.

Die nachfolgend gezeigten Demonstrationsexperimente sind zwar typische Lehrereperimente, aber selbstverständlich auch als Schülerexperimente geeignet. In diesem Fall sollten die Schüler vor Messbeginn eine kurze Einführung in die Funktionen der Pro Lab-Programme erhalten, sodass die Messungen in einem sinnvollen Rahmen durchgeführt werden können. Es ist allerdings zu beachten, dass es „[j]e nach Absicht und organisatorischen Umsetzungsmöglichkeiten [...] effektiver sein [kann], ein Demonstrationsexperiment anstelle eines Schülerexperiments durchzuführen, denn auch Prozesse und Fertigkeiten müssen im Sinne Wagenscheins exemplarisch gelehrt werden.“^[16, S. 2] Dazu gehören insbesondere die Vorgehensweise bei Messreihen oder die Planung und Durchführung der Experimente, in die die Schüler bestenfalls mit einbezogen werden sollten, um physikalische Arbeitsweisen einüben zu können.^[9, S. 231]

Zentral für das physikalische Verständnis ist es darüber hinaus, dass das Ziel eines Versuches möglichst klar ist und der Versuch so durchgeführt werden kann, dass dieses Ziel effektiv erreicht wird: „The learning that is intended from a particular piece of practical work should be clear and it should be tailored in order that it can serve that purpose effectively.“^[6, S. 18] Die Experimente sollten daher so in den Unterricht eingebettet werden, dass die Schüler unmittelbare Erkenntnisse im Bezug auf die ihnen bereits bekannten theoretischen Konzepte gewinnen oder aus den Experimenten neue Konzepte erarbeiten können.

Die hier gezeigten Experimente sollen größtenteils den Zweck erfüllen, dass die Schüler durch das Experimentieren Abhängigkeiten und Zusammenhänge erfahren, theoretische Aussagen ableiten oder überprüfen und einen Bezug zwischen der Physik und Alltagsanwendungen herstellen können; all dies sind wichtige Funktionen eines Experiments (nach Kircher).^[9, S. 229] Der Fokus liegt hier allerdings nicht unbedingt darauf, quantitative Messungen durchzuführen, um Gesetzmäßigkeiten zeigen zu können. Vielmehr sollen komplizierte und unanschauliche Experimente so vereinfacht werden, dass die Schüler einen leichteren Zugang zur grundlegenden Physik erhalten und größere Zusammenhänge zu verstehen lernen.

Die Ausführungen sind in vier Themenbereiche unterteilt. Zunächst werden Messungen mechanischer Schwingungen und ihrer Eigenschaften anhand verschiedener Beispiele betrachtet; dieser Abschnitt wird aufgrund der vielen experimentellen Möglichkeiten am ausführlichsten beschrieben und besteht aus Untersuchungen zu drei verschiedenen Messansätzen. Anschließend werden Beispiele für die Untersuchung gleichförmiger oder gleichmäßig beschleunigter Bewegungen gegeben, die auch mit Alltagsgegenständen durchgeführt werden können, um möglichst eng an die Alltagserfahrungen der Schüler anzuknüpfen. Danach wird ein sehr kurzer Hinweis auf Messungen mit Digitalmultimetern gegeben, der jedoch nicht weiter vertieft wird, da es hierzu bereits viele gut dokumentierte Experimente gibt, von denen einige bereits in zwei Heidelberger Schülerlabors genutzt werden. Zum Abschluss wird noch eine rein qualitative Untersuchung gezeigt, die sich mit den Auswirkungen äußerer Einflüsse wie der Temperatur oder der Luftfeuchtigkeit auf Messungen beschäftigt und auf die damit zusammenhängenden Probleme physikalischer Experimentiermethodik aufmerksam machen soll.

4.1. Mechanische Schwingungen

Mechanische Schwingungen begleiten uns im täglichen Leben. Die alte Pendeluhr im Wohnzimmer läuft pünktlich, weil das Pendel in der richtigen Frequenz schwingt; der Stoßdämpfer im Auto ist so eingestellt, dass man im Innenraum möglichst wenig von den Schlaglöchern mitbekommt und das Schaukeln macht besonders viel Spaß, weil man sich mit guter Beinarbeit dabei selbst immer weiter antreiben kann.

Diese Beispiele für mechanische Schwingungen sind aus dem Schuleralltag geeignet. Reale Beispiele sind oft eher kompliziert, weswegen für das Kennenlernen der zugrundeliegenden Physik eher einfachere Systeme in Betracht kommen. Typische Messaufgaben im Zusammenhang mit mechanischen Schwingungen sind dabei die Bestimmung der Schwingungsfrequenz oder die Untersuchung des zeitlichen Verlaufs von Schwingungen, insbesondere gedämpfter und erzwungener Schwingungen. Ersteres kann für langsame Schwingungen problemlos manuell durchgeführt werden, indem die für eine bestimmte Anzahl von Schwingungsperioden benötigte Zeit gemessen wird. Für eine detaillierte Messung des zeitlichen Verlaufs ist hingegen ein Messsystem nötig, das in kurzen Abständen die momentane Auslenkung des Schwingkörpers ausliest und intuitiv verständlich darstellt.

In den Schulen werden zur Untersuchung solcher einfacher mechanischer Schwingungen vor allem Faden- und Federpendel verwendet, da diese einfach aufzubauen sind und die meisten Aspekte mechanischer Schwingungen gut verdeutlichen. Zur Datenaufnahme bieten gängige Lehrmittel zudem viele verschiedene Systeme an, die allerdings häufig nur wenige Variationsmöglichkeiten bieten und zudem recht teuer sind. Die meisten dieser Systeme ermöglichen auch nicht die direkte Bestimmung der Schwingungsfrequenz, obwohl sie eine der zentralen abgeleiteten Messgrößen der mechanischen Schwingungen ist.

In diesem Abschnitt sollen daher zwei Methoden zur Aufnahme mechanischer Schwingungen vorgestellt werden, die mit Hilfe einfacher und günstiger Sensoren funktionieren und mehr Raum für Variation bieten. Zunächst wird die Schwingung physikalischer Pendel mit Winkelauslese an einer Hallsonde betrachtet, anschließend soll die Auslese langsamer Schwingungen eines horizontalen und eines vertikalen Federpendels mit Hilfe eines Ultraschall-Abstandssensors gezeigt werden. Vor allem letztere Methode kann den Schülern näher gebracht werden, indem die Auto-Einparkhilfe als Beispiel aufgeführt wird, da diese sehr häufig mit exakt dem verwendeten Sensor ausgestattet ist.

4.1.1. Physikalische Pendel mit Winkelauslese

Ein typischer Aufbau zur Untersuchung mechanischer Schwingungen sind physikalische Pendel (Metallplatten), deren momentane Auslenkung durch Winkelauslese mit einem Hallsensor ermittelt wird. Die zugehörigen, reibungsreduzierten Aufbauten werden von Lehrmitteln angeboten und sind in vielen Schulen bereits vorhanden. Die ausgegebene Hallspannung kann mit Hilfe eines Arduino-Boards (Abbildung 32) ausgelesen und in einem Pro Lab-Programm angezeigt werden, mit dem nun die verschiedenen Schwingungsphänomene aufgenommen und im Unterricht behandelt werden können. Zur Verbesserung der Lesbarkeit der Diagramme wurden die Achsen sowie ihre Beschriftungen in allen Pro Lab-Bildschirmfotos nachträglich vergrößert. Bei der Projektion der Benutzeroberfläche per Beamer sind die Achsen im Unterricht jedoch ebenfalls gut lesbar.

In Abbildung 33 ist die Pro Lab-Benutzeroberfläche gezeigt, die in der vorliegenden Arbeit für Messungen an physikalischen Pendeln benutzt wird; beispielhaft wurde hier die Messung einer freien Schwingung eines physikalischen Pendels aufgenommen. Die momentane Auslenkung wird, für Schüler intuitiv verständlich, in Form eines Zeigerinstruments angezeigt. Der gesamte zeitliche Verlauf der Schwingung wird zusätzlich in einem $Y(t)$ -Diagramm aufgenommen, sodass das Abklingen der Schwingungsamplitude auch für sehr geringe Dämpfungen noch ersichtlich wird. Nach Ende einer Messung können die aufgezeichneten Messdaten und Diagramme auf Wunsch in einer Datei gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder geladen oder anderweitig verarbeitet werden.

Mit dem Pro Lab-Programm können neben Schwingungen eines einzelnen Pendels auch gekoppelte Schwingungen aufgezeichnet werden, da zwei Eingänge am selben Arduino-Board zur Verfügung stehen.²⁴ Mit dem in Abbildung 34 gezeigten Aufbau können solche gekoppelten Schwingungen untersucht werden. Dabei sind viele verschiedene Aspekte interessant, unter anderem die periodische Energieübertragung zwischen zwei gekoppelten Pendeln, die beispielhaft in Abbildung 35 gezeigt ist. Um schöne Messungen erhalten zu können, ist ein gut verschraubter Aufbau nötig. Die Stativstangen sollten daher nicht nur zur Seite, sondern auch nach hinten verschraubt, allerdings nicht untereinander verbunden werden, da sonst eine Energieübertragung über das Gestänge erfolgen kann.

²⁴Das hier verwendete Arduino-Board UNO verfügt sogar über sechs analoge Eingänge, sodass auch aufwändigere Messaufbauten, z.B. „Newton’s Cradle“, untersucht werden könnten. Da dies jedoch kein typischer Schulversuch ist, wurde auf eine Erweiterung des ProLab-Programms und der Messbox auf mehr als zwei Eingangskanäle verzichtet.

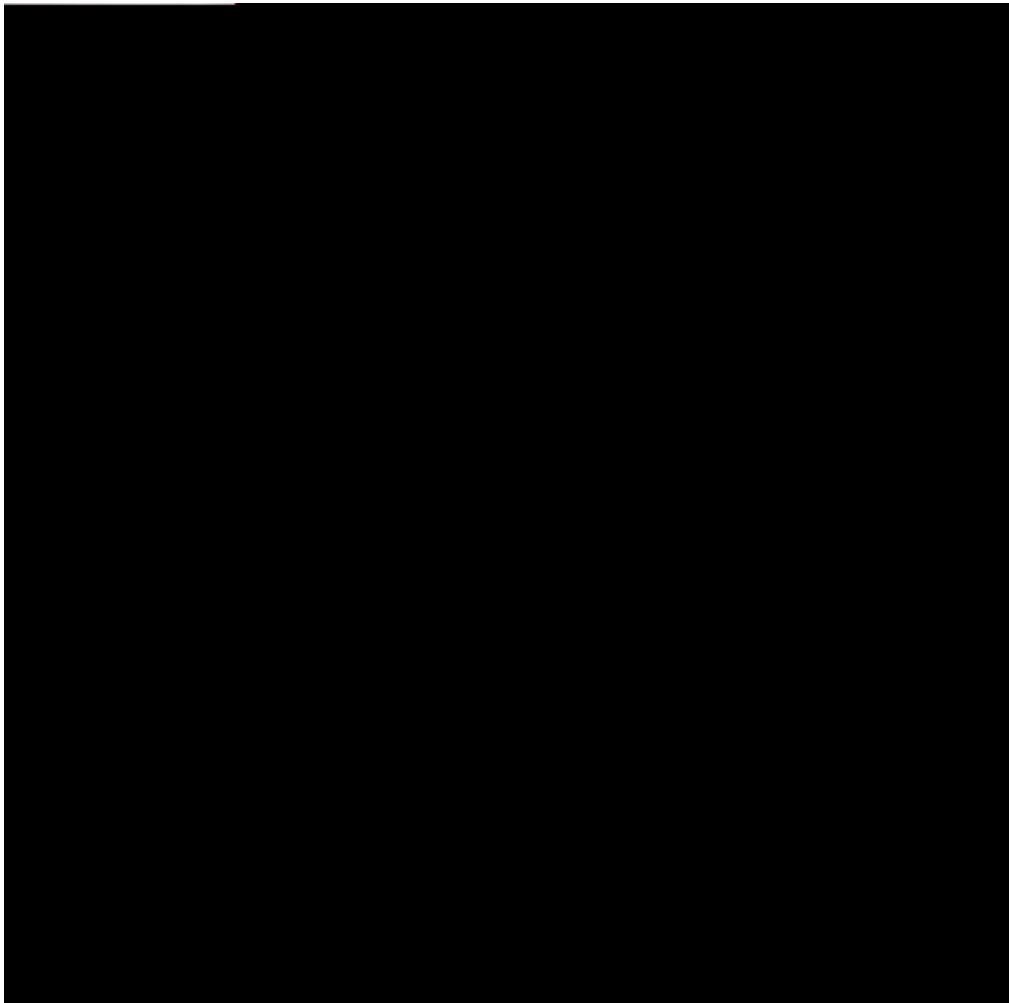


Abbildung 32: Messbox zur Auslese von Wechselfspannungen am Hallsensor. Links ist die geschlossene Box mit den Laborstecker-Anschlüssen gezeigt, an die die Hallsensoren angeschlossen werden können. Rechts sieht man die geöffnete Box mit dem Arduino-Ausleseboard (blau) und einer aufgesteckten Platine, die lediglich einen Spannungsteiler beinhaltet, mit dem der Wechselfspannung ein Offset auferlegt wird, sodass diese nur noch aus positiven Spannungswerten besteht und von den Gleichspannungseingängen des Arduino gemessen werden kann.

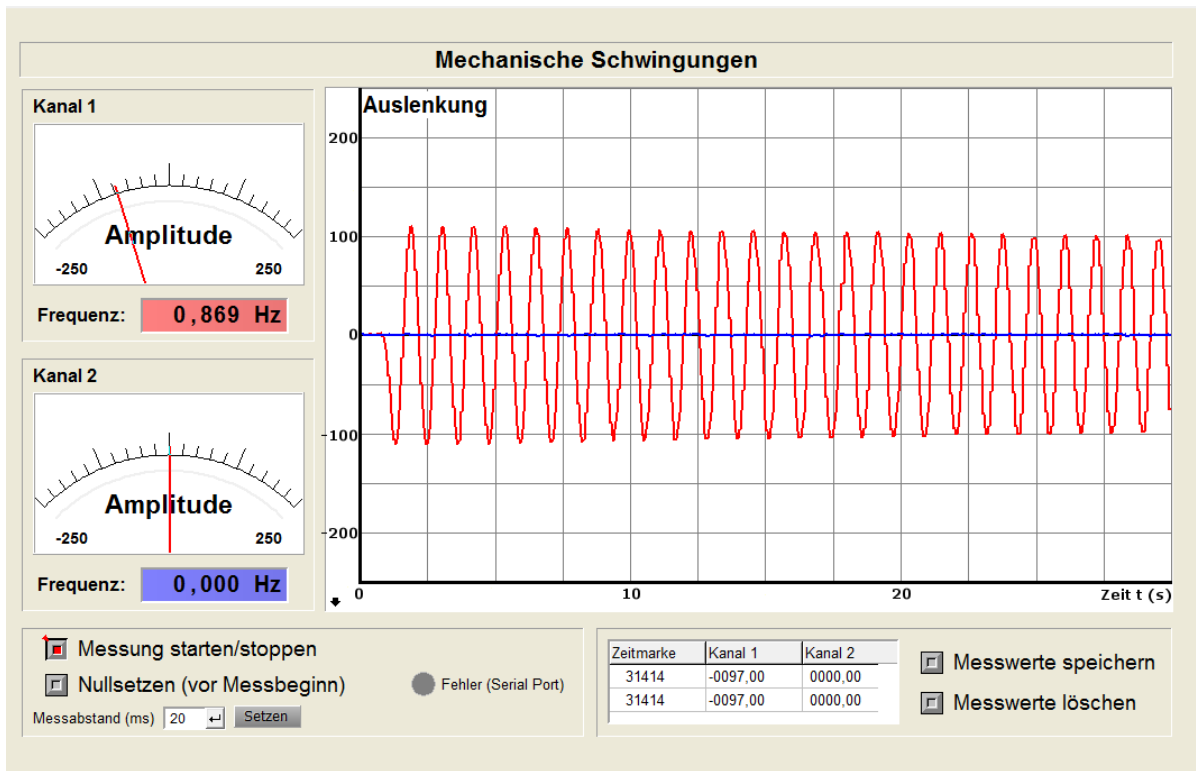


Abbildung 33: Benutzeroberfläche des Pro Lab-Programms für die Auslese der Spannung an den Hallsensoren am Physikalischen Pendel. Gezeigt ist die Messung einer freien Pendelschwingung. Das Programm ist für die gleichzeitige Anzeige der Schwingungen zweier Pendel ausgelegt, weswegen auch ein zweiter Kanal verfügbar ist. Links sind die momentanen Auslenkungen der Pendel in Form von Zeigerinstrumenten dargestellt, rechts der Verlauf der Schwingung in Form eines $Y(t)$ -Diagramms, in dem zur Verbesserung der Lesbarkeit die Achsen und ihre Beschriftungen nachträglich vergrößert wurden. Unter der momentanen Auslenkung wird die über mehrere Schwingungsperioden gemittelte Frequenz der Schwingung in einem farblich zum Diagramm passenden Feld angezeigt.

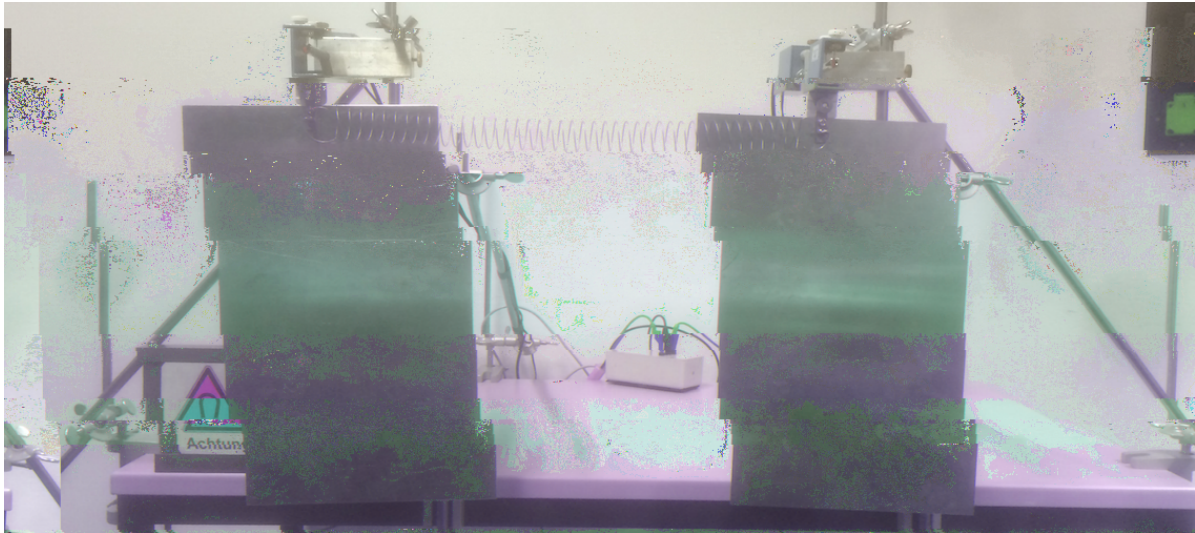


Abbildung 34: Versuchsanordnung für die Untersuchung einer gekoppelten mechanischen Schwingung zwei physikalischen Pendeln. Die Kopplung erfolgt mit einer Feder (zwischen den beiden Pendeln), deren Federkonstante die Kopplungsstärke bestimmt. Die Auslese der Hallspannungen beider Pendel erfolgt mit Hilfe eines Arduino-Boards (graue Box in der Mitte) über ein Pro Lab-Programm (Abbildung 33). Die Dämpfung kann durch einen starken Magneten, der Wirbelströme in den Metallplatten induziert, variiert werden (links unten, steht bei der Messung möglichst zentriert hinter der Metallplatte).

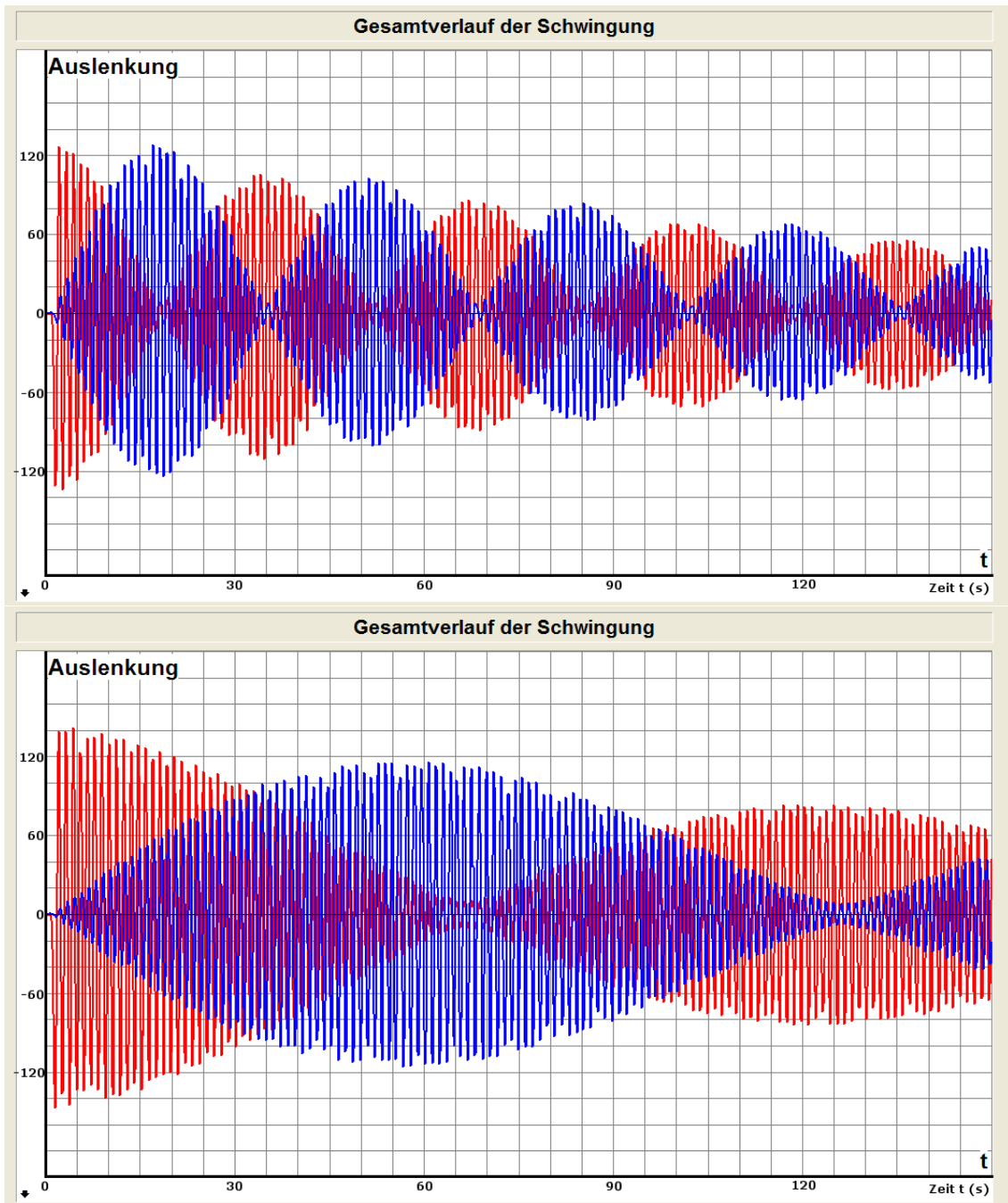


Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf der gedämpften Schwingungen von zwei gekoppelten physikalischen Pendeln mit starker (oben) und mittlerer Kopplung (unten) durch Federn unterschiedlicher Federstärken. Dargestellt ist der gesamte Schwingungsverlauf, der auf einer zweiten Benutzeroberfläche des Pro Lab-Programms angezeigt wird. Die Übertragung der Energie von einem Pendel auf das andere wird aus dem Verlauf klar deutlich, ebenso der Einfluss der Kopplungsstärke.

Aus der Messung der Auslenkung wird als abgeleitete Größe die Schwingungsfrequenz der Pendel bestimmt. So kann beispielsweise in einer Messung gezeigt werden, dass die in der Herleitung der Formel für die Schwingungsfrequenz eines Pendels gemachte Kleinwinkelnäherung bei größeren Winkeln tatsächlich nicht mehr gilt und ein Pendel großer Amplitude auch mit verringerter Frequenz schwingt; Abbildung 36 zeigt eine freie Schwingung bei kleiner und bei sehr großer Amplitude im direkten Vergleich, sodass der Unterschied der Schwingungsfrequenz deutlich wird. Dass die Schwingung mit kleiner Amplitude eine höhere Frequenz hat, wird neben der angezeigten gemessenen Frequenz gleichzeitig aus dem Auseinanderlaufen der Nulldurchgänge der Pendel deutlich. So wird der fachdidaktische Aspekt erfüllt, dass die Darstellung eines Effektes in verschiedenen Repräsentationsformen für das Verständnis hilfreich ist.^[9, S. 238] Auf die gleiche Weise kann auch der Unterschied der Eigenfrequenzen der beiden Eigenschwingungsmodi (Abbildung 37) gezeigt werden. Abbildung 39 zeigt einen Vergleich der Schwingungsfrequenzen für gleichphasige und gegenphasige Schwingungen zweier physikalischer Pendel. Aus der Messung wird deutlich, dass die gleichphasige Schwingung eine deutlich kleinere Eigenfrequenz hat als die gegenphasige Schwingung.

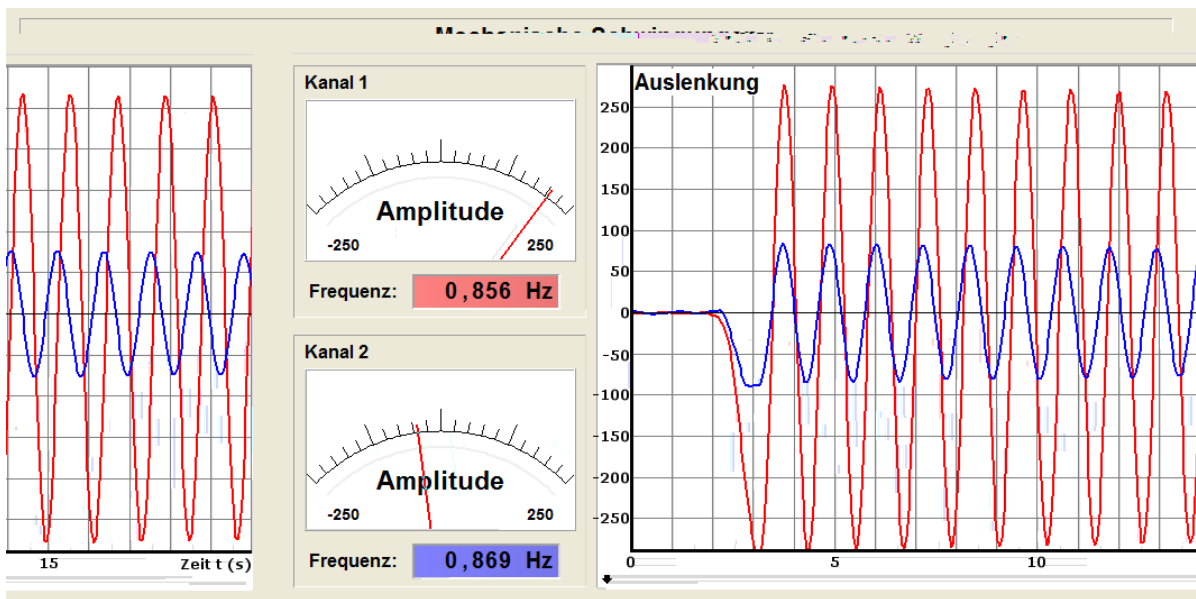


Abbildung 36: Vergleich der Eigenfrequenzen bei Schwingungen mit kleiner und sehr gro er Amplitude. Bei Schwingungen mit sehr gro er Amplitude verringert sich die Eigenfrequenz. Dies wird auch daraus deutlich, dass die Nulldurchgänge der beiden Pendel auseinanderlaufen, da ein Pendel schneller schwingt als das andere. Für gro e Auslenkungen gilt die Kleinwinkelna herung $\sin \alpha \approx \alpha$ nicht mehr, weswegen die theoretisch berechnete Schwingungsfrequenz nicht mehr mit der gemessenen übereinstimmt.

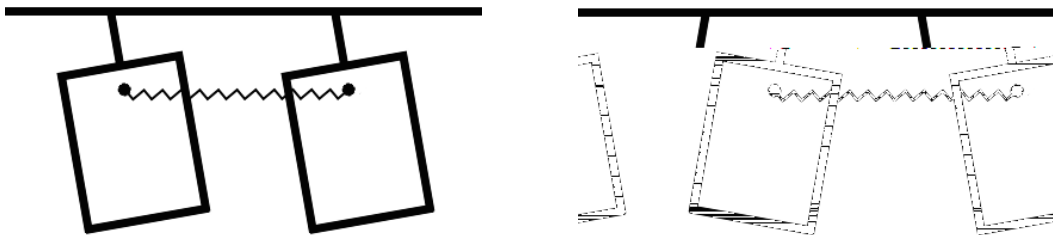


Abbildung 37: Skizzen des gleichphasigen (links) und des gegenphasigen (rechts) Eigenschwingungsmodus eines Doppelpendels. Die Kopplung der Pendel erfolgt über eine Feder, die an einer langen Schraube an der Aufhängung der Pendel eingehängt wird (siehe Abbildung 38).

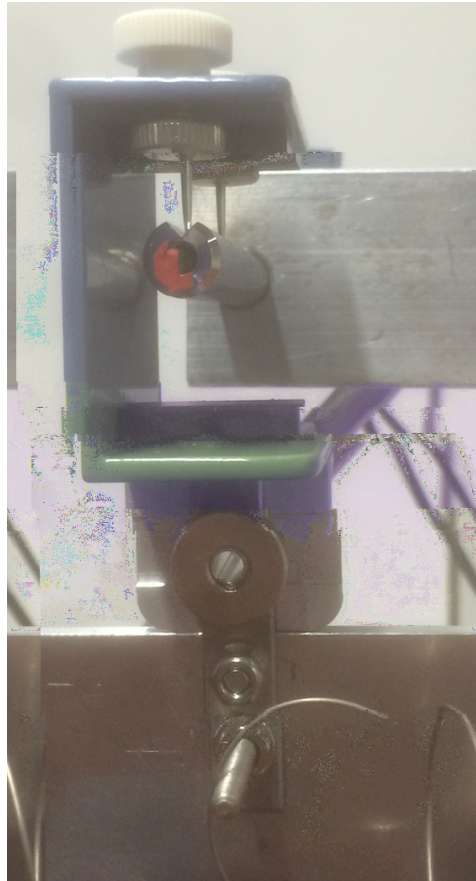


Abbildung 38: Reibungsreduzierte Aufhängung der physikalischen Pendel an zwei Nadeln, die zentriert über einem Hallsensor angeordnet sind (vergleiche Abbildung 12). Unten ist die Befestigung der Kopplungsfeder an einer langen Schraube gezeigt.

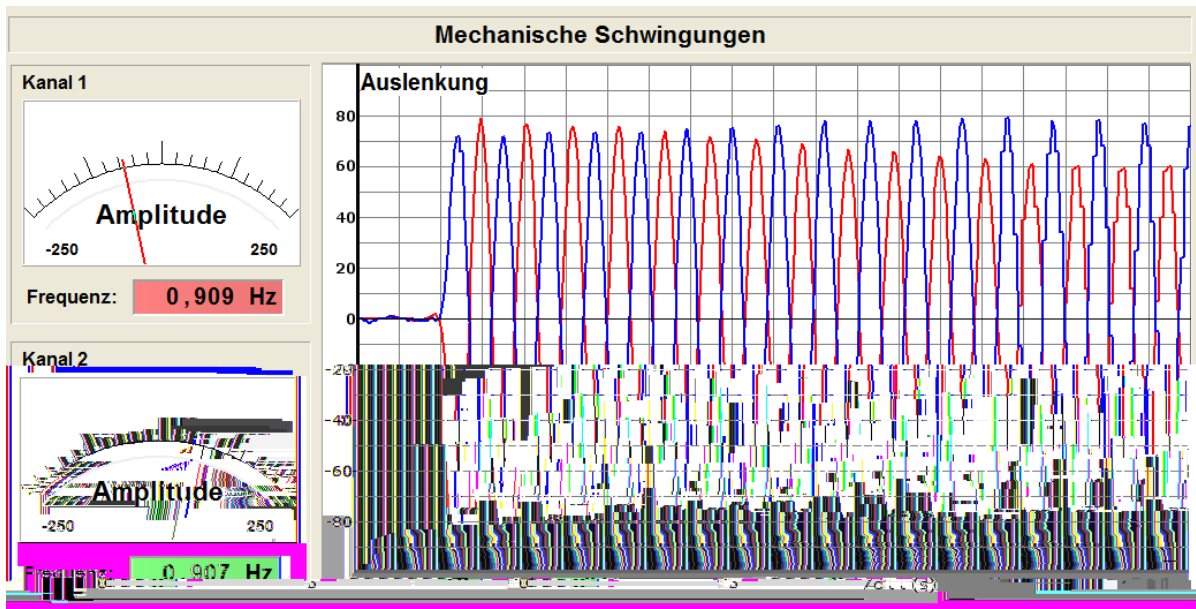
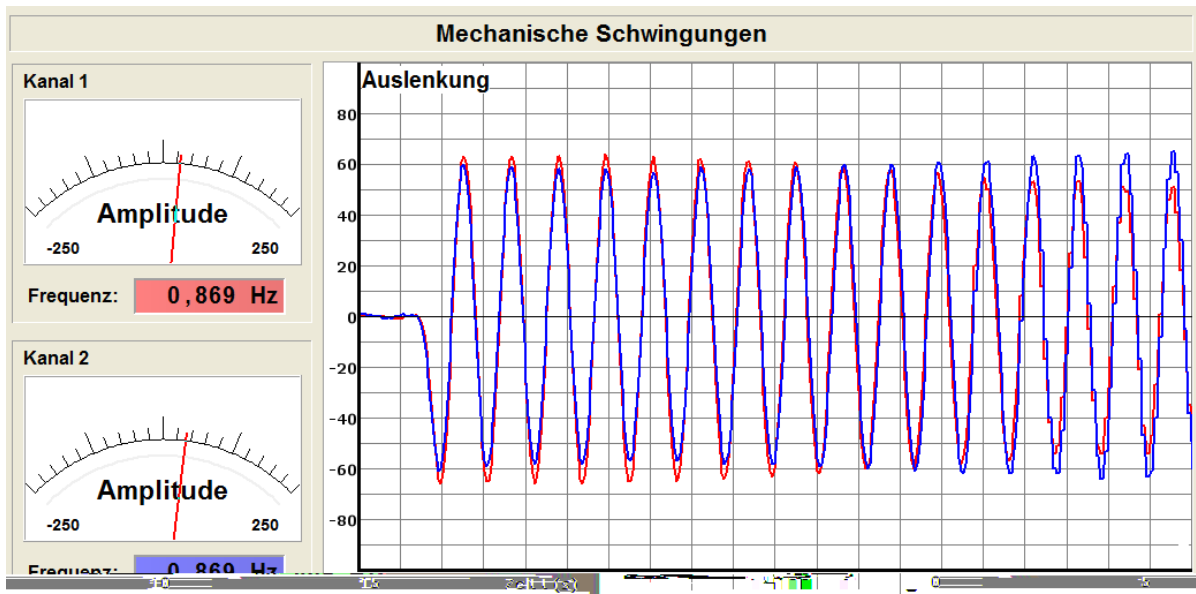


Abbildung 39: Vergleich der Schwingungsfrequenzen für gleichphasige (oben) und gegenphasige (unten) Schwingungen der beiden Pendel. Die gegenphasige Schwingung hat mit $f \approx 0.91$ Hz eine deutlich größere Eigenfrequenz als die gleichphasige Schwingung mit $f \approx 0.87$ Hz. Die Pendel wurden nicht exakt gleich weit ausgelenkt, sodass auch hier bereits die beginnende Energieübertragung von einem Pendel auf das andere sichtbar wird.

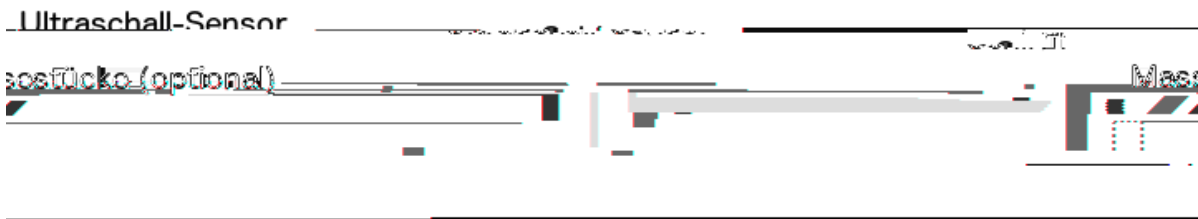
4.1.2. Messung horizontaler mechanischer Schwingungen mit Ultraschall

Mechanische Schwingungen, die nicht entlang einer gekrümmten Bahn verlaufen, können auch mit einfacheren Mitteln gemessen werden. Insbesondere langsame Schwingungen mit Periodendauern der Größenordnung 1 s, deren Auslenkung sich nur entlang einer Achse ändert, kommen für Messungen mit einem Ultraschall-Abstandssensor in Frage. Ein gutes Beispiel hierfür ist ein Experimentierwagen, der horizontal { zwischen zwei Federn eingespannt { auf einer Metallfahrbahn oszilliert. Mit einer solchen Versuchsanordnung können beispielsweise gedämpfte oder erzwungene Schwingungen untersucht und sogar der Einschwingvorgang betrachtet werden.

Eine Skizze sowie ein Foto des zugehörigen Versuchsaufbaus sind in Abbildung 40 gezeigt. Der Experimentierwagen schwingt auf einer reibungsarmen Bahn zwischen zwei Federn. Durch Auflegen verschiedener Gewichte auf den Wagen kann der Einfluss der Masse des Schwingkörpers auf seine Schwingungsfrequenz untersucht werden; dies ist beispielhaft in Abbildung 41 gezeigt. Unterhalb des Wagens kann an einer Schraube ein Magnet in unterschiedlichen Höhen angebracht werden, der in der Aluminiumschiene, auf der die Bahn befestigt ist, Wirbelströme induziert, wodurch auch die Dämpfung der Schwingung verändert werden kann. Der Ultraschall-Abstandssensor wird am Ende der Schiene aufgestellt und auf den Bierdeckel-Schirm ausgerichtet.

Bei allen Aufbauten, die mit dem Ultraschall-Abstandssensor arbeiten, ist unbedingt darauf zu achten, dass keine Sekundäreffekte die Messung stören. Der Reflexionschirm sollte folglich so groß sein, dass er auch bei größeren Abständen das Signal noch problemlos reflektieren kann. Als Ursache für Sekundäreffekte kommen beispielsweise auch bereits Lineale in Frage, die hinter der Anordnung aufgestellt werden, um die momentane Auslenkung beobachten zu können, oder die Kante des Experimentierwagens, auf dem der Schirm befestigt ist. Erhält man bei der Messung kein sinnvolles Diagramm, sollten solche Fehlerquellen daher überprüft und gegebenenfalls beseitigt werden. Die Anwendung offenbart hier Unzulänglichkeiten des Versuchsaufbaus, die aber mit einiger Erfahrung leicht umgangen werden können.

Messungen freier und gedämpfter mechanischer Schwingungen wurden bereits im Zusammenhang mit der Schwingung physikalischer Pendel gezeigt; ein Video mit Messungen des Schwingungsverlaufes bei drei verschiedenen Dämpfungen am Beispiel der horizontalen Experimentierwagenschwingung im direkten Vergleich ist auf der Projektwebseite, <http://schulmaterial.physi.uni-heidelberg.de>, verfügbar. Mit der hier genutzten Anordnung kann zusätzlich zu den bereits betrachteten Aspekten auch der Einfluss der Masse eines Schwingkörpers auf die Schwingungsfrequenz untersucht wer-



et-Befestigung Magn

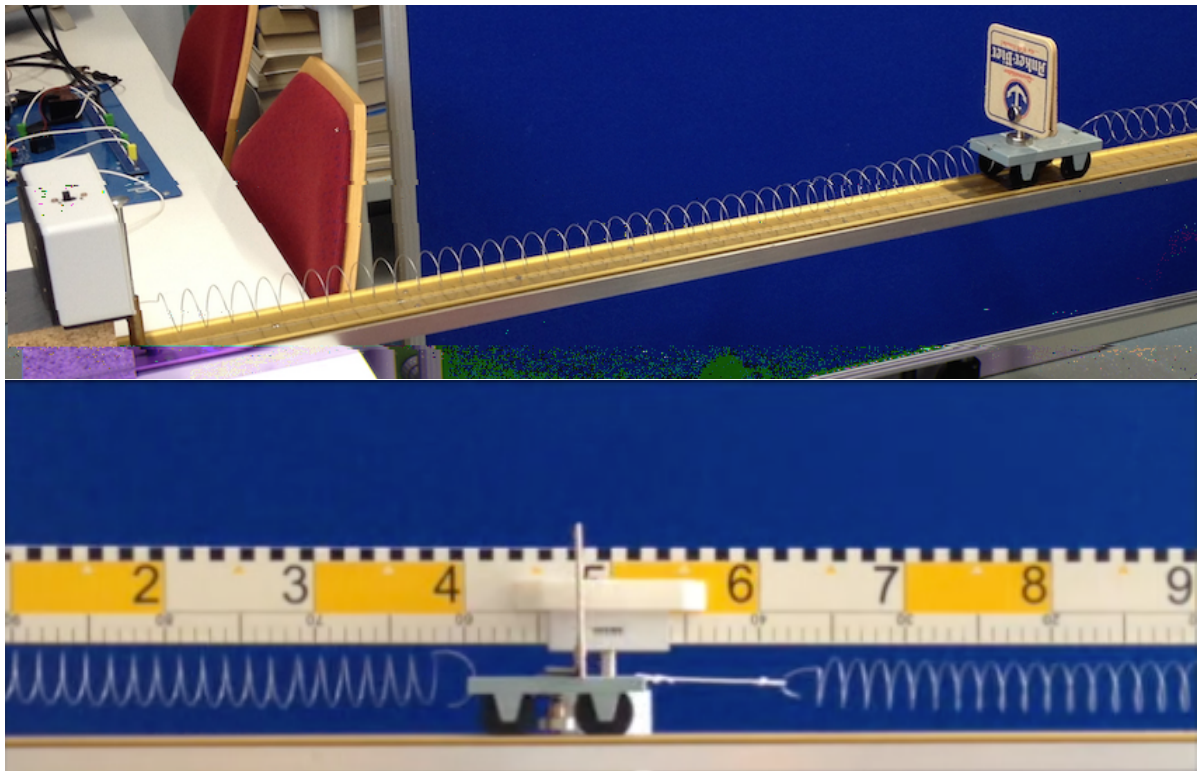


Abbildung 40: Skizze und Foto der Versuchsanordnung zur Untersuchung mechanischer Schwingungen mit einem Ultraschall-Abstandssensor (graue Sensorbox im Foto links). Der Wagen rollt auf einer 2 Meter langen Aluminiumschiene, auf der zwei abgerundete Teppichabschlusskanten befestigt sind. Unten: Seitenansicht des Wagens. Als Schirm zur Reflexion der Ultraschall-Wellen wurde ein Bierdeckel auf dem Wagen montiert. Mit zusätzlichen Massestücken kann der Einfluss der Masse des Schwingkörpers auf die Schwingungsfrequenz untersucht werden. Unter dem Wagen befindet sich eine Schraube, an der ein Magnet befestigt werden kann, der für Dämpfung in Form einer Wirbelstrombremse sorgt.

den. Hierzu werden verschiedene Massen auf den Experimentierwagen aufgelegt und jeweils die Schwingung aufgezeichnet. Dabei werden die Frequenz und die Masse des Schwingkörpers notiert. Ein Beispiel für eine solche Messreihe ist in Abbildung 41 verdeutlicht. Die zugehörigen Messwerte sowie die daraus bestimmte Proportionalitätskonstante zeigt Tabelle 4. Aus der Messung kann der funktionelle Zusammenhang

$$f = k \cdot \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (1)$$

bestätigt werden, wobei k im weiteren Unterrichtsverlauf als die Wurzel der Federkonstante D herausgestellt werden kann.

Tabelle 4: Messreihe zur Untersuchung der Masseabhängigkeit der Schwingungsfrequenz eines Experimentierwagens in der Versuchsanordnung nach Abbildung 40. Aus den Messdaten kann der Zusammenhang $f = k/\sqrt{m}$ mit der Proportionalitätskonstante k gezeigt werden. Da hier nur der funktionelle Zusammenhang untersucht werden soll, wurde auf eine Fehlerbetrachtung verzichtet.

Masse m [kg]	\sqrt{m} [$\sqrt{\text{kg}}$]	Frequenz f [Hz]	$k = f \cdot \sqrt{m}$ [$\frac{\sqrt{\text{kg}}}{\text{s}}$]
0.16	0.40	1.01	0.40
0.36	0.60	0.67	0.40
0.56	0.75	0.53	0.40

Ein weiterer Aspekt der Mechanik, der mit einem leicht veränderten Aufbau untersucht werden kann, sind erzwungene Schwingungen. Die Erregerfrequenz wird hierbei durch einen Motor mit Exzenter erzeugt, der am Ende der Schiene befestigt wird und über eine Feder mit dem Wagen verbunden wird (Skizze und Foto des erweiterten Aufbaus in Abbildung 42). Zur Kompensation der Rückstellkraft, die auf den Motor wirkt, wird eine zweite Feder in der vom Wagen abgewandten Richtung eingebaut. Die Rotationsfrequenz des Exzenters entspricht nun der Erregerfrequenz des Schwingungssystems. Möchte man zeigen, dass die Frequenz des Schwingkörpers im eingeschwungenen Zustand der Erregerfrequenz entspricht, kann letztere beispielsweise mit einer Lichtschranke an einer Rolle oder über ähnliche Methoden bestimmt werden. Für die nachfolgenden Experimente wird die Annahme $f_{\text{Schwingkörper}} = f_{\text{Erreger}}$ vorausgesetzt; die Erregerfrequenz wird daher aus der Frequenz des Schwingkörpers ermittelt.

Mit diesem Aufbau kann noch eine weitere Messreihe zur Aufnahme von Resonanzkurven durchgeführt werden, in der verschiedene Erregerfrequenzen vorgegeben und diese gegen die Amplitude des Wagens im eingeschwungenen Zustand aufgetragen werden.

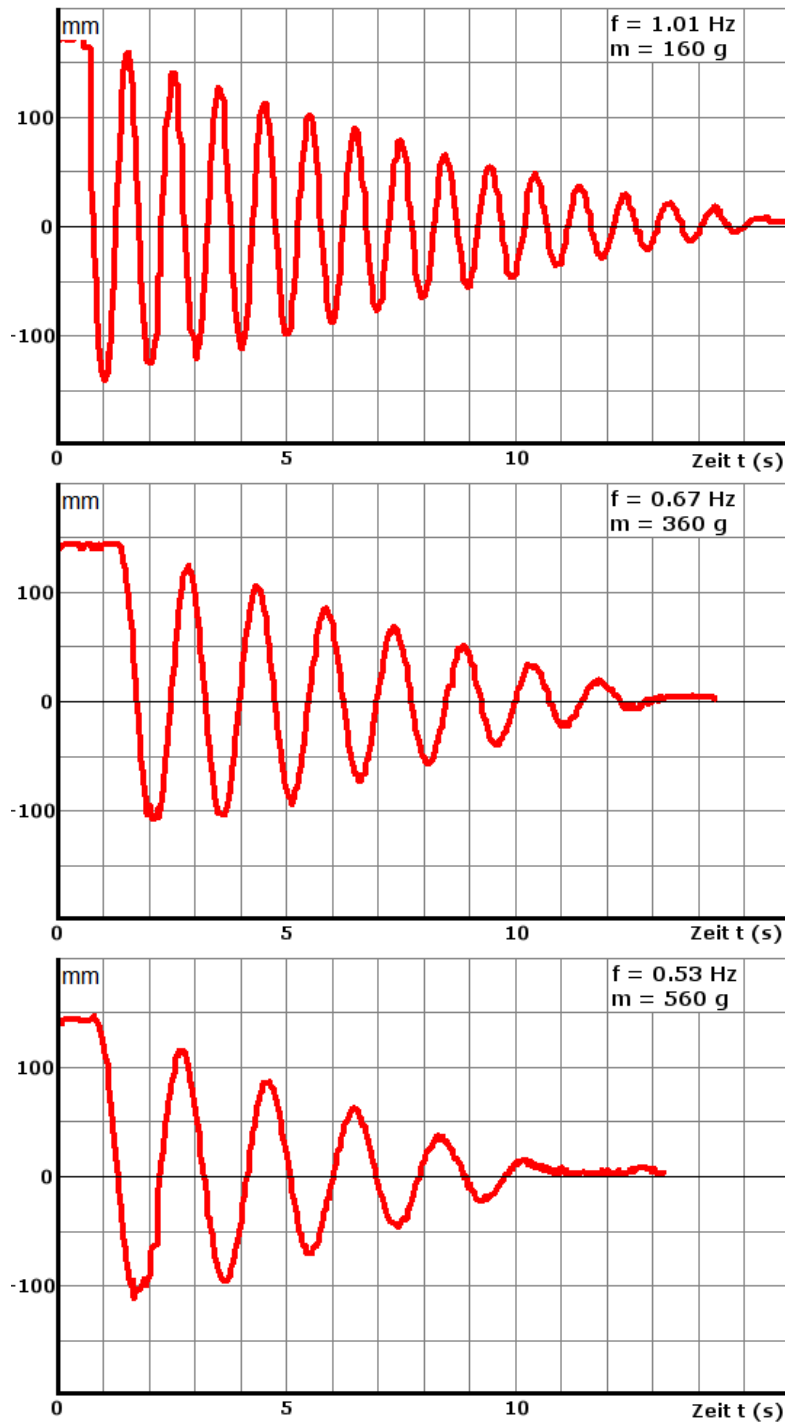


Abbildung 41: Zeitlicher Verlauf der Auslenkung des Experimentierwagens aus der Ruhelage für drei verschiedene Massen. Die für steigende Massen sinkende Frequenz wird bereits beim Vergleich der Diagramme deutlich. Anhand einer solchen Messung kann die Proportionalität $f \propto \frac{1}{\sqrt{m}}$ gezeigt werden.

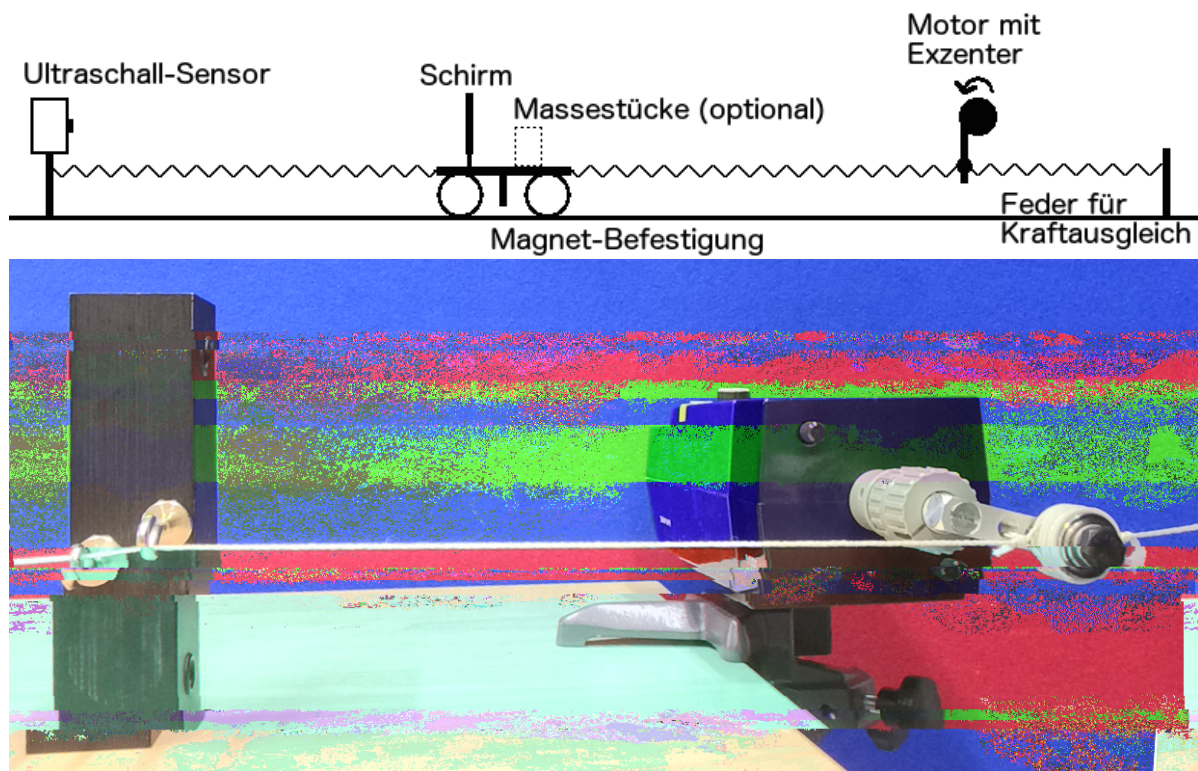


Abbildung 42: Oben: Skizze der erweiterten Versuchsanordnung zur Messung erzwungener Schwingungen mit einem Ultraschallsensor. Der vorherige Aufbau wurde durch einen Motor mit Exzenter erweitert, über den die Erregerfrequenz eingestellt wird. Unten: Erregermotor mit Exzenter. Zur Beschränkung auf eine longitudinale Federschwingung wird der Faden zwischen Exzenter und Feder mit zwei kleinen Haken umgelenkt. Mit dieser Anordnung ist die Aufnahme von Resonanzkurven sehr einfach, auch können Einschwingvorgänge untersucht werden, wobei durch Wahl der Erregerfrequenz und der Dämpfung am Wagen (Wirbelstrombremse) der Einfluss dieser Größen auf die Bewegung ermittelt werden kann. Zur Bestimmung der Erregerfrequenz wäre eine Anordnung mit Umlenkrollen, die pro Umdrehung des Motors beispielsweise einmal eine Lichtschranke unterbrechen und dadurch als einfacher Frequenzzähler einsetzbar sind, denkbar.

Die Messwerte für zwei Messreihen mit unterschiedlichen Dämpfungen D_1 und D_2 listet Tabelle 5, die zugehörigen Resonanzkurven sind im Diagramm in Abbildung 43 gezeigt. An die Messwerte wurde mit Origin jeweils eine Lorentzverteilung gefittet, die auch die Resonanzfrequenz als die Frequenz im Maximum der Verteilung bestimmt. Für D_1 ergab sich eine Resonanzfrequenz von $f_R = 0.975$ Hz, für D_2 wurde sie zu $f_R = 0.964$ Hz berechnet. Die Form und Anordnung der beiden Kurven entspricht nicht ganz der Theorie, was hauptsächlich an den wenigen Messpunkten liegt, die aufgenommen und für die Fits benutzt wurden. Durch automatisiertes Durchfahren der Anregungsfrequenzen beispielsweise mit einem programmierbaren Schrittmotor ließe sich die Resonanzkurve noch deutlich besser aufnehmen, insbesondere, da der hier verwendete Motor eine nicht ganz konstante Rotationsfrequenz aufwies. Die Verwendung eines gleichmäßig laufenden Schrittmotors und eine weiter automatisierte Messwertaufnahme wäre eine interessante Erweiterung der bisherigen Funktionsweise des Messprogramms. Ein weiteres Problem des Aufbaus – neben dem nicht konstant laufenden Motor – ist, dass der Faden zwischen Exzenter und Feder oft sehr kurz ist, da die Anordnung insgesamt sehr viel Platz benötigt. Je kürzer allerdings dieser Faden ist, desto weniger harmonisch verläuft die Anregung. Die experimentellen Möglichkeiten sind daher etwas eingeschränkt, doch für den Gebrauch im Unterricht durchaus ausreichend.

Interessant ist hier neben der Messung selbst auch die (rein mathematische) Analogie zwischen erzwungenen mechanischen Schwingungen und erzwungenen elektromagnetischen Schwingungen. Für mechanische Schwingungen gilt

$$m\ddot{s} = -Ds - k\dot{s} + \hat{F}_1 \sin(\omega t), \quad (2)$$

wobei m die Masse des Schwingkörpers, s seine Auslenkung aus der Ruhelage, D die Federkonstante, k die Bremskonstante der Wirbelstrombremse und \hat{F}_1 die maximale Kraft durch den Exzenter auf die Feder ist.^[1, S. 105] Für die Schwingung eines elektromagnetischen Schwingkreises gilt

$$L\ddot{Q} = -(1/C)Q - R\dot{Q} + \hat{U}_1 \sin(\omega t) \quad (3)$$

mit der Spuleninduktivität L , der Ladung Q , der Kapazität C , dem Widerstand R und der maximalen Kondensatorspannung \hat{U}_1 . Ein Vergleich der beiden Differentialgleichungen zeigt, dass elektromagnetische und mechanische Schwingungen analoge Lösungsfunktionen haben müssen.^[1, S. 105] Die Dämpfung der mechanischen Schwingung durch eine Wirbelstrombremse ist dementsprechend eine Analogie zur Dämpfung durch einen Wi-

Tabelle 5: Messreihen zur Untersuchung erzwungener Schwingungen. Aufgenommen wurde jeweils die Amplitude im eingeschwungenen Zustand in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz für zwei verschiedene Dämpfungen D_1 und D_2 . Die Dämpfung bei der zweiten Kurve wurde so gewählt, dass bei der Resonanzfrequenz eine halb so große Amplitude erreicht wurde wie bei der ersten Kurve.

Dämpfung D_1

Erregerfrequenz f_E [Hz]	Amplitude \hat{A} [mm]
0.63	22
0.68	23
0.84	64
0.88	77
0.94	155
0.97	300
0.99	262
1.03	98
1.11	60
1.12	55
1.16	30
1.23	26

Dämpfung $D_2 > D_1$

Erregerfrequenz f_E [Hz]	Amplitude \hat{A} [mm]
0.60	20
0.74	31
0.81	50
0.88	78
0.93	126
0.98	150
1.00	127
1.07	59
1.18	29
1.22	23
1.31	17
1.40	12

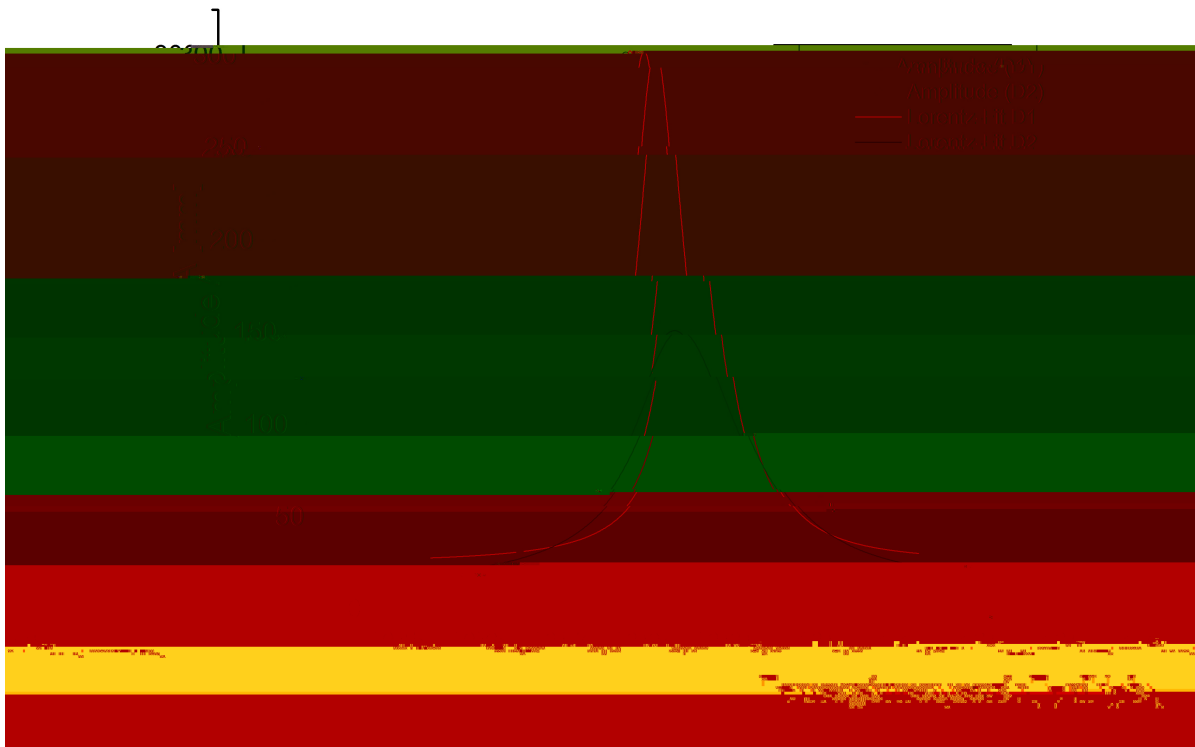


Abbildung 43: Auftragung der Amplitude im eingeschwungenen Zustand gegen die Erregerfrequenz bei erzwungenen Schwingungen (Resonanzkurve) für zwei verschiedene Dämpfungen D_1 (rot) und $D_2 > D_1$ (blau). Liegt die Erregerfrequenz sehr nah an der Resonanzfrequenz, so schwingt der Wagen mit einer sehr großen Amplitude, während bei weiter entfernten Erregerfrequenzen die Amplitude sehr klein wird. An die Messdaten wurde hier mit Origin jeweils eine Lorentzverteilung gefittet. Aus den Fitparametern für D_1 ergab sich eine Resonanzfrequenz von $f_R = 0.975$ Hz, für D_2 wurde $f_R = 0.964$ Hz berechnet.

derstand im EM-Schwingkreis, die Federkonstante des mechanischen Systems ist analog dem Reziproken der Kapazität und die maximale Kraft durch den Exzenter ist analog zur maximalen Spannung über den Kondensator.

Nicht betrachtet wurden hier im Zusammenhang mit erzwungenen Schwingungen die Phasenbeziehungen zwischen Motor und Experimentierwagen für verschiedene Erregerfrequenzbereiche. Dies kann jedoch im Unterricht qualitativ gezeigt werden, da die Schüler sowohl den Motor als auch den Wagen sehen. Für sehr kleine Erregerfrequenzen kann so beobachtet werden, dass Exzenter und Wagen sich phasengleich bewegen; nahe der Resonanzfrequenz eilt die Exzenterbewegung der Wagenschwingung um 90 Grad voraus; deutlich über der Resonanzfrequenz beträgt die Phasenverschiebung dann sogar 180 Grad. Aus den Messdaten selbst kann die Phasenverschiebung nicht gut bestimmt werden, da die Daten etwas zeitverzögert dargestellt werden; für rein qualitative Betrachtungen reicht es allerdings aus, die momentane Position des Exzenter und des Wagens mit bloßem Auge zu betrachten.

Zuletzt soll hier noch ein dritter Aspekt gezeigt werden, der mit dieser Versuchsanordnung leicht untersucht werden kann. Durch Variation der Motorfrequenz und der Dämpfung kann der Einschwingvorgang der erzwungenen mechanischen Schwingung bei verschiedenen Bedingungen qualitativ betrachtet werden. In Abbildung 44 sind Messungen der Einschwingvorgänge bei zwei Frequenzen und jeweils drei Dämpfungen gezeigt. Bei einer Erregerfrequenz nahe der Resonanzfrequenz kann der Einfluss der Dämpfung auf die Zeit bis zum Erreichen des eingeschwungenen Zustandes untersucht werden. Es zeigt sich, dass eine größer werdende Dämpfung für kürzere Zeiten bis zum Erreichen dieses stationären Zustandes sorgt; gleichzeitig wird jedoch auch die erreichte Amplitude deutlich geringer. Nahe der Resonanzfrequenz gibt es kein Überspringen und anschließendes Reduzieren der Amplitude. Bei einer Erregerfrequenz, die deutlich über der Resonanzfrequenz liegt, werden solche Überspringer deutlich. Die Anzahl der Überspringer sinkt mit zunehmender Dämpfung. Auch in diesem Fall ist die Amplitude für stärkere Dämpfungen kleiner.

$$f_E = 0.92 \text{ Hz} \approx f_R$$

$$f_E = 1.1 \text{ Hz} \gg f_R$$

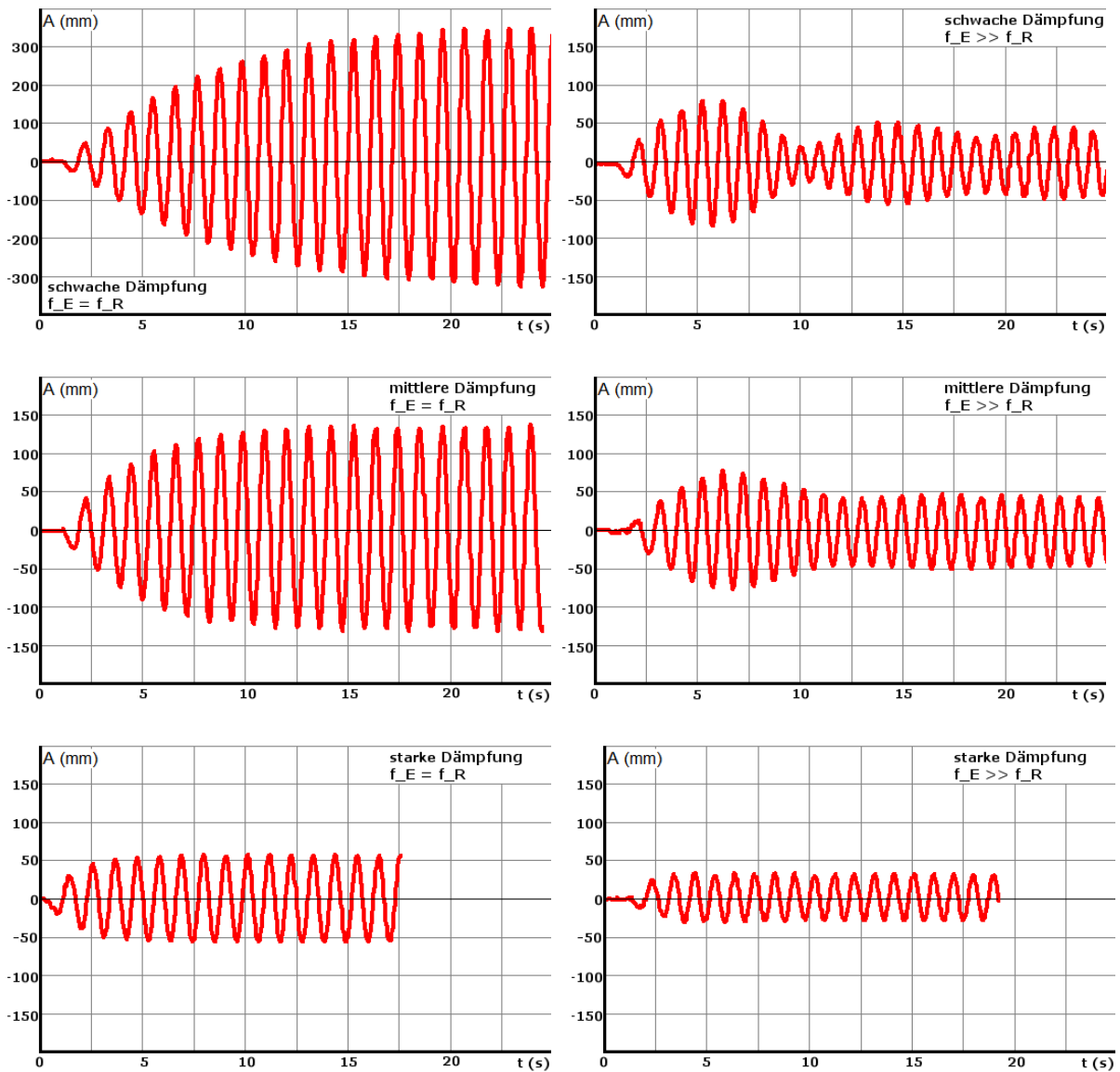


Abbildung 44: Auslenkungs-Zeit-Diagramme verschiedener Einschwingvorgänge. Für die Einschwingvorgänge bei einer Erregerfrequenz nahe der Resonanzfrequenz wird deutlich, dass eine zunehmende Dämpfung für ein schnelleres Erreichen des stationären Zustandes sorgt, jedoch auch für eine geringere Amplitude; man beachte hierzu die doppelt so große Amplitudenskala im ersten Diagramm. Für eine über der Resonanzfrequenz liegende Erregerfrequenz wird deutlich, dass das System bei kleineren Dämpfungen zu viel höherem Überschwingen neigt als bei größerer Dämpfung; auch hier ist die Zeit bis zum Erreichen des stationären Zustandes für starke Dämpfungen kleiner.

4.1.3. Messung einer vertikalen Federpendelschwingung mit Ultraschall

Nicht nur die horizontale Schwingung eines Wagens zwischen zwei Federn, sondern auch vertikale Schwingungen wie beispielsweise die Schwingung eines Federpendels können mit einem Ultraschall-Abstandssensor aufgezeichnet werden. Der Versuchsaufbau zur Untersuchung einer vertikalen Federpendelschwingung sowie ein Foto der Anordnung sind in Abbildung 45 gezeigt. Wie bei der horizontalen Schwingung ist auch hier darauf zu achten, dass der Reflexionsschirm bei größeren Abständen vom Sensor noch groß genug ist, um Sekundärreflexionen, wie z.B. an der Raumdecke, zu vermeiden.

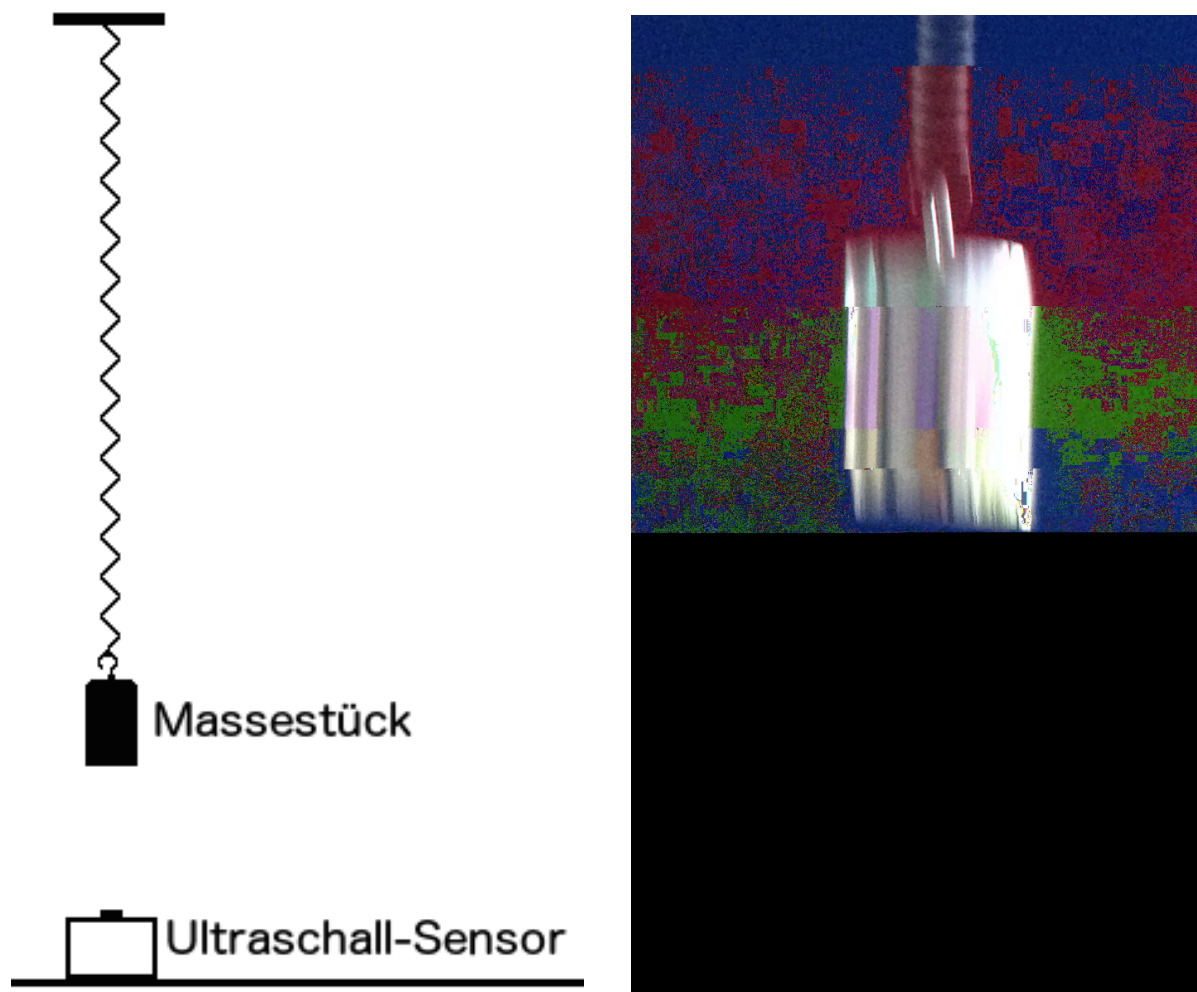


Abbildung 45: Skizze und Foto der Versuchsanordnung zur Aufnahme einer vertikalen Federpendelschwingung mit Hilfe des Ultraschall-Abstandssensors. Die Unterseite des verwendeten 2 kg-Massestückes reicht als Schirm aus, wenn keine großen Abstände zwischen dem Pendel und dem Sensor liegen.

Mit dieser Anordnung bietet es sich unter anderem an, die Federkonstante einer Feder auf zwei verschiedenen Wegen zu bestimmen und die beiden Werte miteinander zu vergleichen. Einerseits kann die Federkonstante aus der statischen Messung der Auslenkung der Feder unter Belastung mit einem Massestück bestimmt werden. Dies ist ein typischer Schülerversuch im Physikanfangsunterricht, der meist zur Untersuchung des Hookeschen Gesetzes durchgeführt wird. Für das in Abbildung 46 gezeigte Federpendel erzeugte eine Masse von $m = 2.066 \text{ kg}$ eine Auslenkung von $l = 0.531 \text{ m}$, sodass für die Federkonstante gilt:

$$D = \frac{m \cdot g}{l} = 38.2 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (4)$$

Auf der anderen Seite hingegen kann die Federkonstante auch aus der Schwingungsfrequenz des Federpendels bestimmt werden, die analog zu den vorangegangenen Messungen während der Messung der Schwingung mit einem Ultraschall-Abstandssensor berechnet wird. Die Messung der hier betrachteten Federpendelschwingung ist in Abbildung 47 gezeigt. Aus der Schwingung wurde die Federkonstante zu

$$D = m \cdot f^2 = 36.9 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (5)$$

berechnet. Der Vergleich der beiden Werte zeigt, dass die Bestimmung der Federkonstante auf beiden Wegen näherungsweise zum selben Ergebnis führt. Eine Fehlerbetrachtung wurde hier nicht vorgenommen, da nur die prinzipielle Vorgehensweise gezeigt werden soll. Die Präzision der Auslenkungsmessung könnte durch Verwendung von Linealen mit Zeigern deutlich erhöht werden und diente in diesem Zusammenhang nur einer groben Abschätzung.

Ein weiterer physikalischer Aspekt, der mit diesem Aufbau schon untersucht werden kann, sind Reibungseffekte wie Luftreibung und Gleitreibung. Die Luftreibung kann beispielsweise durch Ankleben einer Pappscheibe unter dem Massestück untersucht werden; die Gleitreibung wird durch ein flaches Stück Holz erzeugt, das von der Seite an das Massestück gedrückt wird (siehe hierzu die Fotos des Versuchsaufbaus in Abbildung 48). Beispielmessungen hierzu sind in Abbildung 49 gezeigt. Aus den Messungen wird qualitativ deutlich, dass die Luftreibung sich nicht-linear auf die Amplitude des Pendels auswirkt, während die Gleitreibung die Amplitude mit linearem Zusammenhang verringert. Der Grund hierfür ist, dass die Luftreibung von der Geschwindigkeit des Pendels abhängt und daher bei kleineren Geschwindigkeiten schwächer abfällt als bei größeren. Die Gleitreibung durch das Stück Holz ist hingegen konstant, weswegen die Amplitude linear mit der Zeit abnimmt.

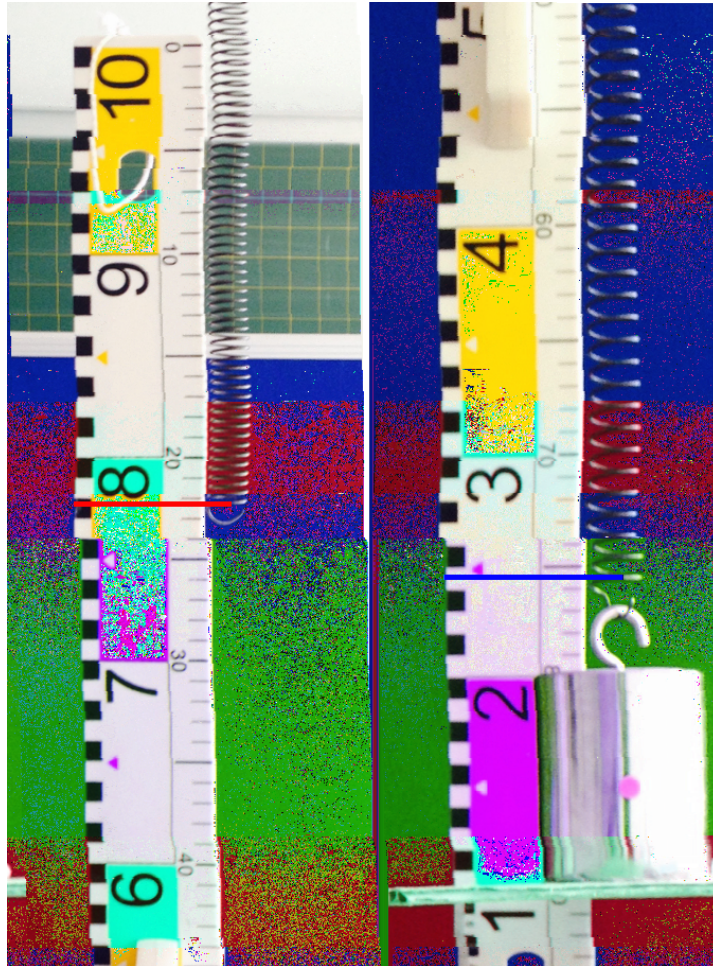


Abbildung 46: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Federkonstante des Federpendels durch Messung der Auslenkung bei der gegebenen Masse $m = 2.066 \text{ kg}$. Aus der Masse und der Auslenkung $l = 0.531 \text{ m}$ kann die Federkonstante nach Formel 4 berechnet werden.

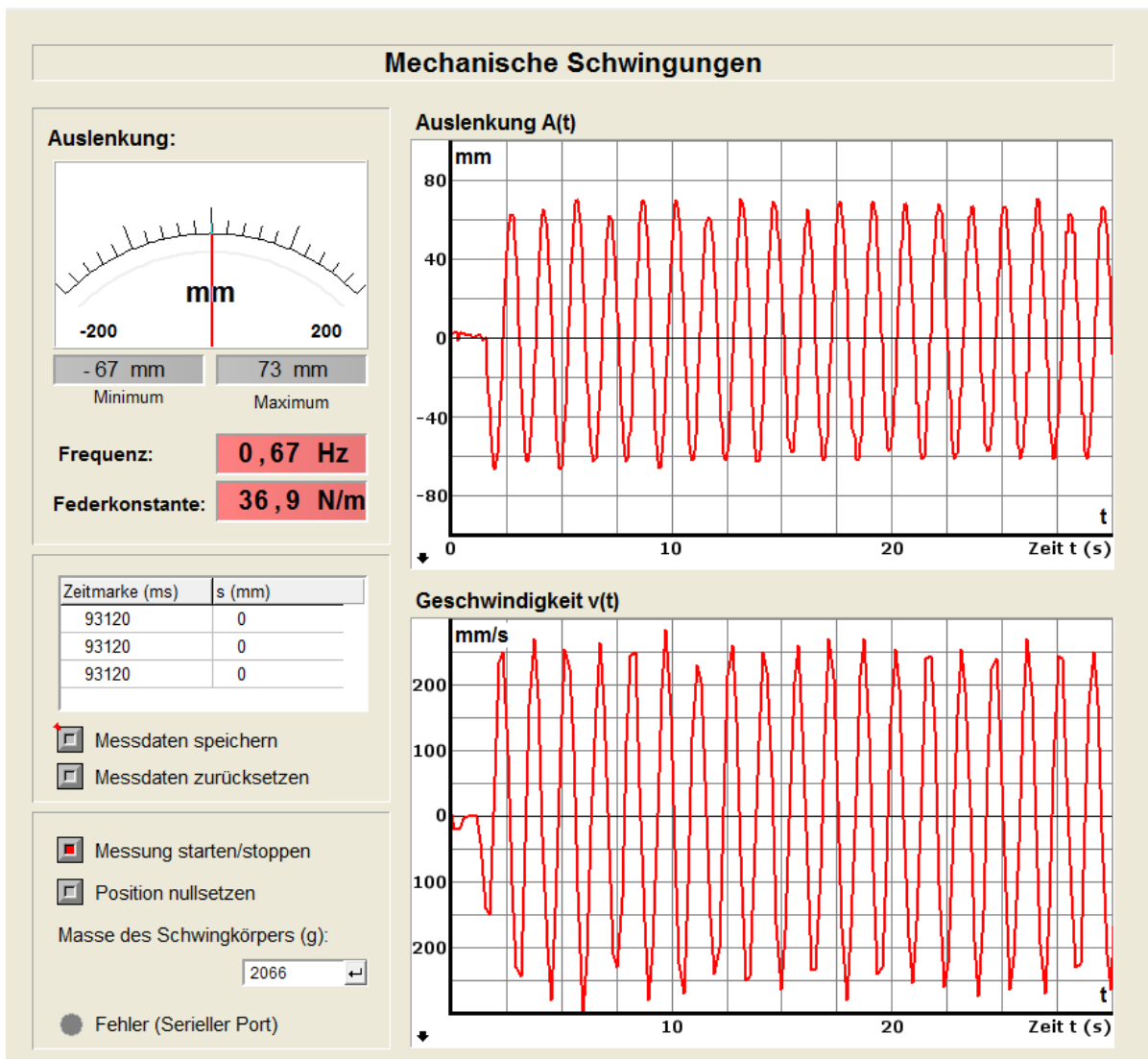


Abbildung 47: Benutzeroberfläche des Pro Lab-Programms zur Messung mechanischer Schwingungen mit Ultraschall. Gezeigt ist die freie Schwingung eines vertikalen Federpendels mit den zeitlichen Verläufen der Auslenkung (oben) und der Geschwindigkeit (unten). Hier werden die Möglichkeiten von Pro Lab Expert genutzt, um abgeleitete Größen wie die minimale und maximale Auslenkung, die momentane Geschwindigkeit oder die Schwingungsfrequenz zu bestimmen und anzuzeigen. Wird die Masse des Schwingkörpers angegeben, kann sogar die Federkonstante direkt aus der Schwingungsfrequenz berechnet werden.

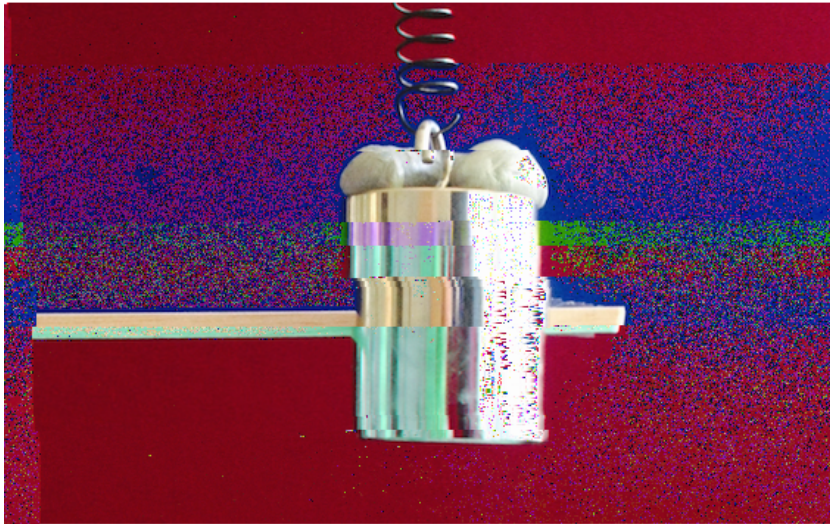
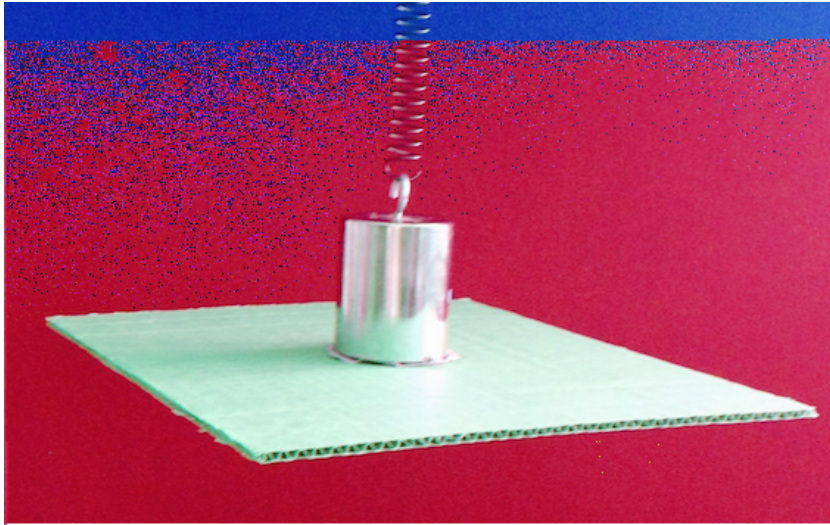


Abbildung 48: Versuchsaufbauten zur Untersuchung von Reibungsphänomenen am Beispiel eines Federpendels. { Oben: Luftreibung durch ein Stück Pappe, das mit Terostat (eine Art stark haftende Knetmasse) von unten an das Massestück angebracht wurde. { Unten: Gleitreibung durch ein von der Rückseite angedrücktes, langes Stück Holz. Auf dem Massestück wurde Terostat-Masse aufgebracht, um in beiden Fällen die gleiche Gesamtmasse zu erhalten.

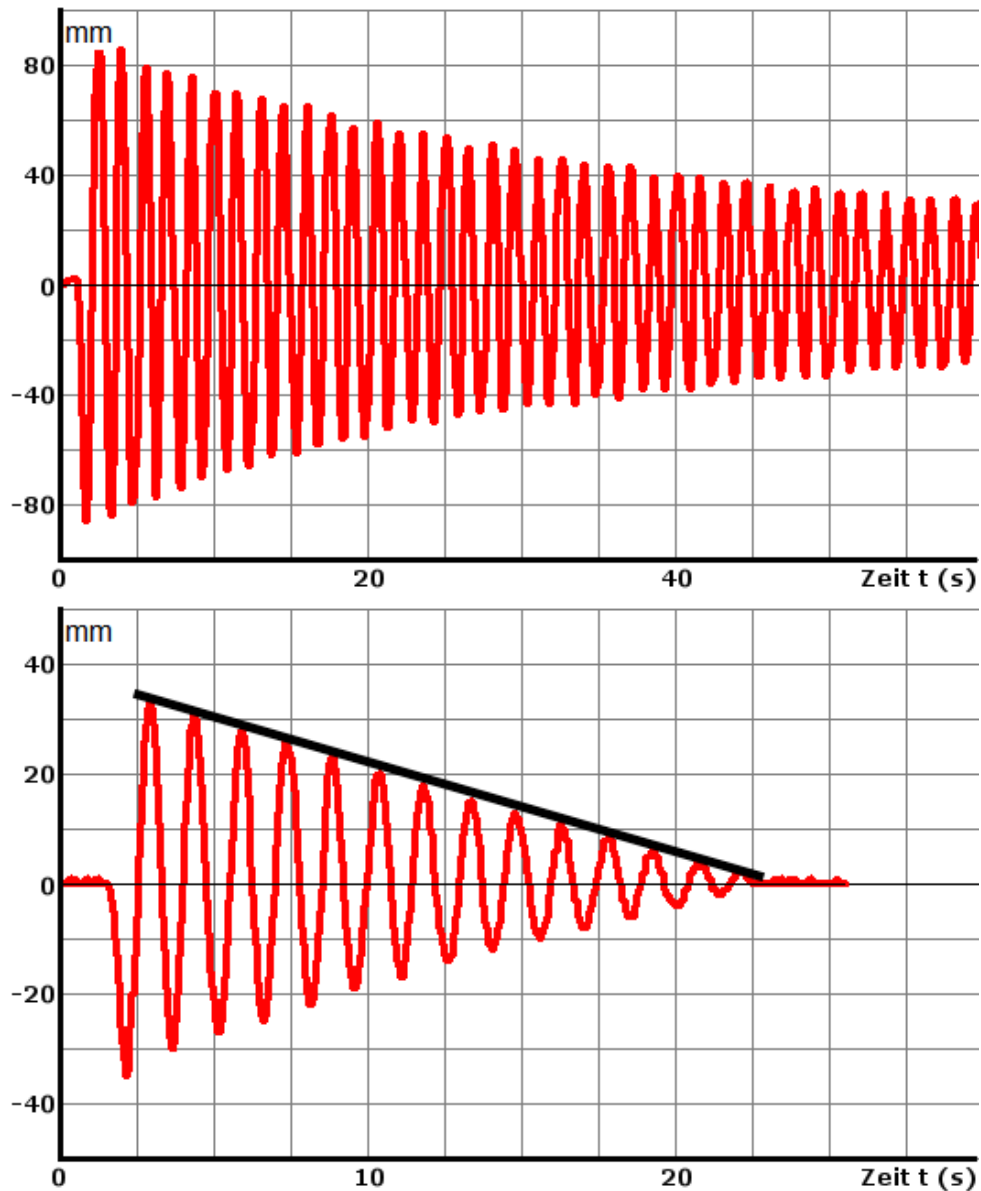


Abbildung 49: Auslenkungs-Zeit-Diagramme der Messungen zur Untersuchung von Reibung mit einem Federpendel. { Oben: Luftreibung durch eine Pappscheibe; bei gro ßen Geschwindigkeiten ist die Reibung gro ßer als bei kleineren Geschwindigkeiten, weswegen die Amplitude hier langsamer abfällt. { Unten: Gleitreibung durch ein seitlich angedrücktes Stück Holz; die Amplitude des Federpendels fällt konstant ab, also geschwindigkeitsunabhängig (zur Verdeutlichung ist eine Gerade als einhüllende Funktion eingezeichnet). Die Reibungskraft ist bei der Luftreibung deutlich geringer, was aus der Zeit bis zum vollständigen Abklingen der Schwingung deutlich wird.

4.2. Messung gleichmäßig beschleunigter Bewegungen mit Ultraschall

Die Untersuchung von Bewegungen ist einer der zentralen Aspekte der Physik und bereits im Anfangsunterricht ein wichtiges Thema. Einfache Bewegungen dienen häufig der Annäherung an physikalische Vorgehensweisen und Experimentiermethodik. So wird beispielsweise die gleichmäßig beschleunigte Bewegung an einer schiefen Ebene häufig als Standardexperiment verwendet, um die Bewegungsgesetze experimentell zu ermitteln. Hierbei wird die zu bestimmten Zeiten zurückgelegte Strecke oder die für eine bestimmte Strecke benötigte Zeit (meist von Hand) gemessen. Die Erfassung der Messdaten mit einem PC-gestützten System spart jedoch sehr viel Zeit gegenüber der Aufnahme großer Messtabellen; die Standard-Messaufbauten mit Lichtschranken sind zudem sehr aufwändig zu verkabeln, weswegen der Aufbau viel Vorbereitungszeit in Anspruch nimmt. Eine Alternative hierzu bietet erneut die Bewegungsmessung mit einem Ultraschall-Abstandssensor, deren Messprinzip genutzt werden kann, um die kompliziert zu verkabelnden Lichtschranken-Aufbauten zu ersetzen und die Erfassung vieler Messdaten zu vereinfachen. Ein möglicher Aufbau zur Untersuchung einer einfachen beschleunigten Bewegung an einer schiefen Ebene ist in Abbildung 50 gezeigt.

Mit einem einfachen Pro Lab-Programm kann nun der Abstand des Objektes in Abhängigkeit von der Zeit in einem $Y(t)$ -Diagramm dargestellt werden (siehe Abbildung 51). Vor Beginn der Messung wird die Position des Wagens auf Null gesetzt, sodass das mühsame exakte Positionieren des Wagens an einer Startmarkierung entfällt, sofern keine quantitativ genauen Messungen vorgenommen werden sollen, um beispielsweise die Unabhängigkeit der Endgeschwindigkeit von Masse des Wagens zu zeigen, sondern nur die allgemeinen Abhängigkeiten betrachtet werden. In Abbildung 52 ist die Messung einer beschleunigten Bewegung bei zwei verschiedenen Neigungswinkeln $\alpha_1 = 3.1^\circ$ und $\alpha_2 = 6.2^\circ$. Es wird deutlich, dass die maximal erreichte Strecke für beide Fälle gleich ist, die Zeit bis zum Erreichen dieser Strecke jedoch für α_2 kleiner ist als für α_1 . Durch die größere Höhe h und daraus folgende größere potentielle Energie folgt hier auch eine größere Endgeschwindigkeit entsprechend

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (6)$$

Der Versuch ist in deutlich vereinfachter Form auch als einfaches Schulerexperiment nutzbar. Für die Versuchsanordnung werden nur ein schräg gestellter Tisch, ein Fahrzeug, z.B. ein Spielzeugauto mit gut laufenden Rädern, und ein Stück Pappe mit etwas

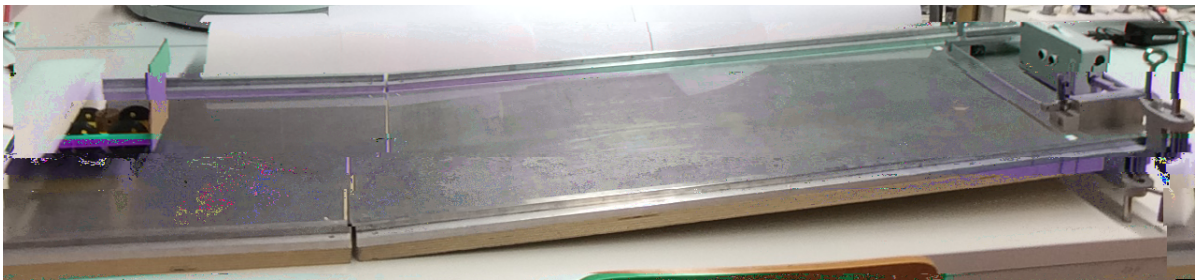
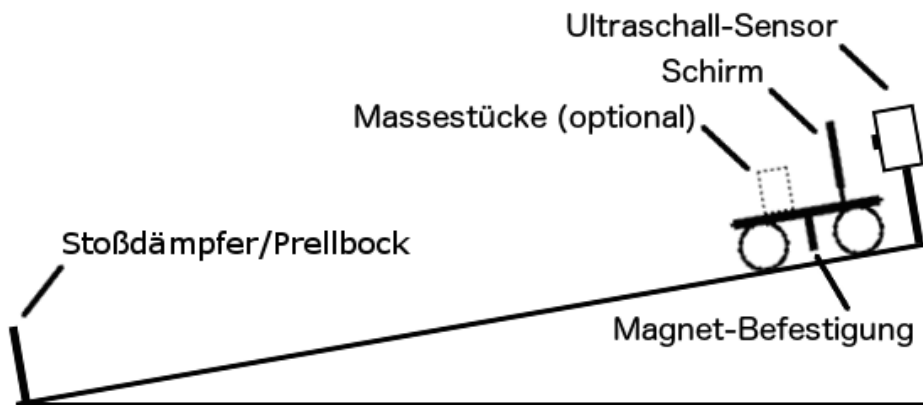


Abbildung 50: Vereinfachte Skizze und Foto der Versuchsanordnung für die Messung einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung mit einem Ultraschall-Abstandssensor (im grauen Kasten rechts auf der Fahrbahn). Die Beschleunigung wird durch Wahl des Neigungswinkels der schiefen Ebene verändert, der mit den Stativstäben an den Tischklemmen eingestellt wird (rechts). Durch Anbringen eines Magnetes als Wirbelstrombremse an der Unterseite des Wagens kann außerdem die Bremskraft variiert werden. An das Ende der schiefen Ebene schließt sich hier eine flache Ebene an, auf der der Wagen ohne weitere Beschleunigung bis zum Prellbock (links) rollt.

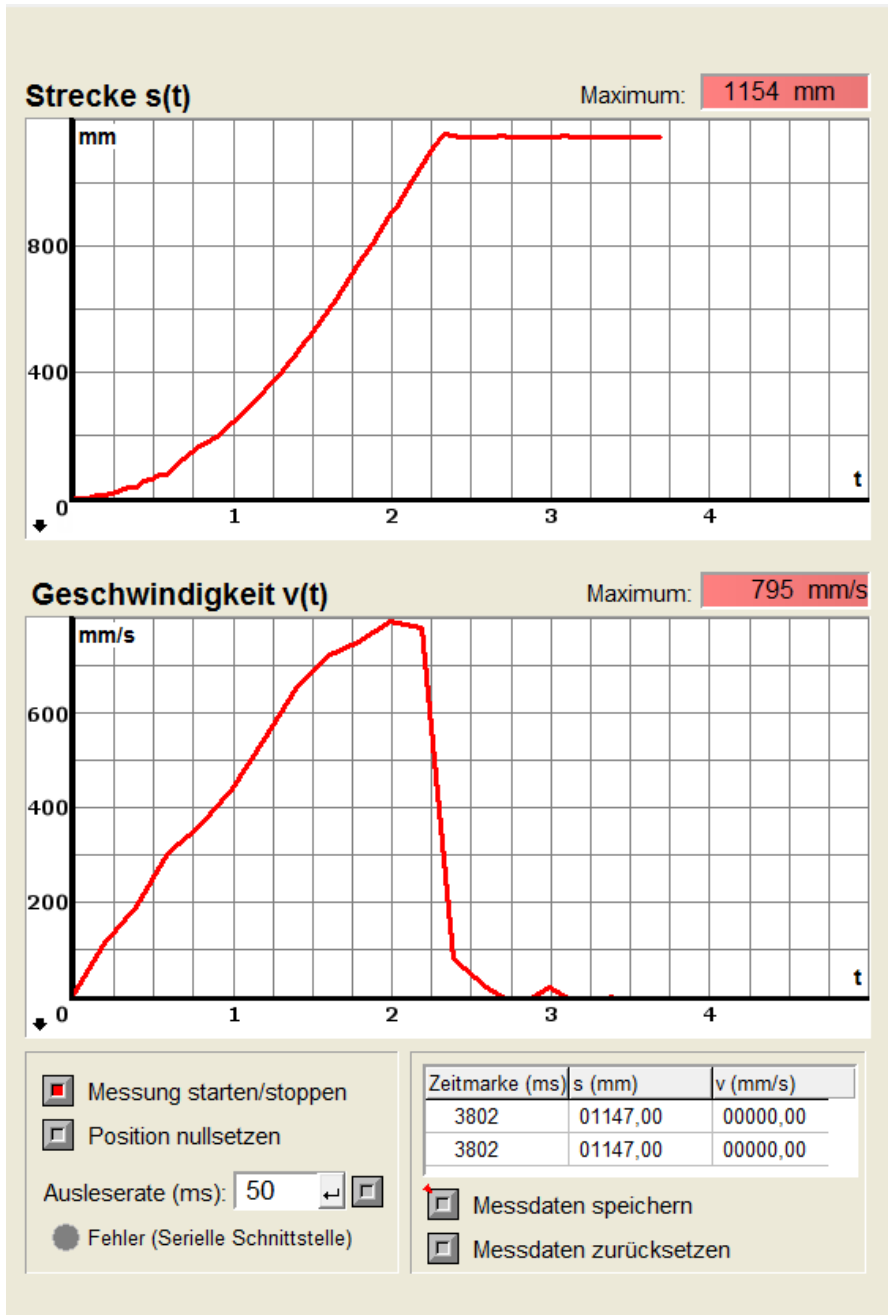


Abbildung 51: Benutzeroberfläche des Pro Lab-Programms zur Messung einer Bewegung mit Ultraschall. Gezeigt ist die Messung einer beschleunigten Bewegung am Aufbau in Abbildung 50. Die Möglichkeiten von Pro Lab-Expert werden hier unter anderem genutzt, um die maximal erreichte Strecke und Geschwindigkeit sowie abgeleitete Größen wie die momentane Geschwindigkeit zu bestimmen.

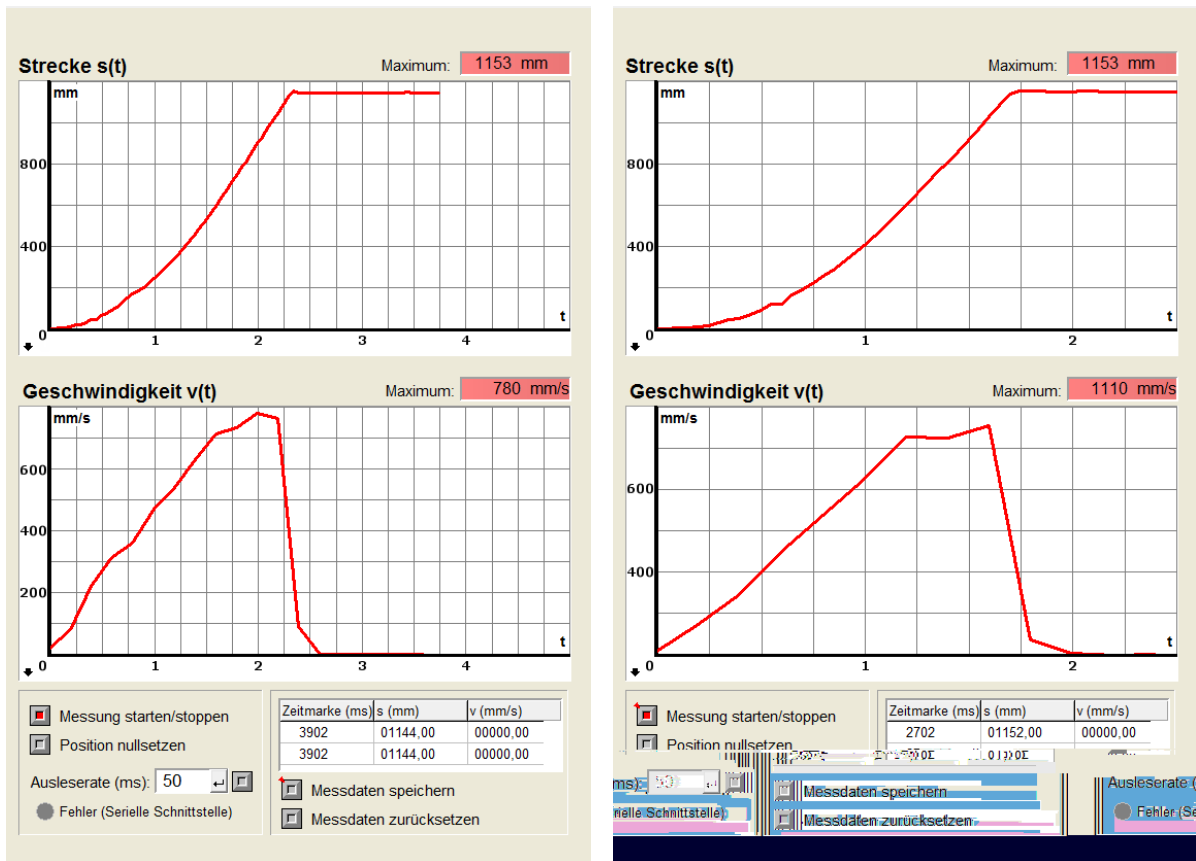


Abbildung 52: Vergleich von zwei Messungen der beschleunigten Bewegung eines Experimentierwagens gleicher Masse bei Neigungswinkeln von $\alpha_1 = 3.1^\circ$ (links) und $\alpha_2 = 6.2^\circ$ (rechts). Die maximal zurückgelegte Strecke ist bei beiden Messungen gleich, die Zeit bis zum Erreichen dieser Strecke ist für den größeren Neigungswinkel jedoch kleiner. Da die Anfangshöhe des Wagens bei größerem Neigungswinkel ebenfalls größer ist, vergrößert sich für den zweiten Neigungswinkel auch die Geschwindigkeit. Die Differentiation wird vom Programm durch Differenzbildung und Division durch die verstrichene Zeit zwischen zwei Messpunkten vorgenommen; die Zeitdifferenz kann eingestellt werden. Kleine Messfehler zu Beginn oder Ende dieser Bereiche verursachen einen nicht der Realität entsprechenden, nicht-linearen Verlauf der Geschwindigkeitskurve. Dies tritt insbesondere auch dann zu, wenn der Übergang von der beschleunigten zur gleichförmigen Bewegung mitten in einem solchen Zeitfenster liegt (linke Messung); die gleichförmige Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit ist hier nicht klar zu erkennen. Kleinere Zeitfenster sorgen jedoch für die Berechnung eines noch weniger linearen Verlaufes. Dies zeigt, dass bei der Versuchsvorbereitung sehr darauf geachtet werden muss, was das Experiment veranschaulichen soll. Eine schiefe Ebene mit anschließender ebener Fläche sollte im Unterricht mit diesem System also nicht genutzt werden.

Klebeband benötigt. Ein Foto des so vereinfachten Aufbaus ist in Abbildung 53 gezeigt. Aus der zugehörigen Messung in Abbildung 54 wird deutlich, dass für Experimente nicht immer ein hochprofessioneller, reibungsloser Aufbau wie beispielsweise eine Luftkissenfahrbahn benötigt wird: Die Parabelform des Streckenverlaufs sowie die lineare Zunahme der Geschwindigkeit deuten sich auch bei diesem sehr einfachen Aufbau bereits an. Die Schüler können nun ihre zuvor erworbenen theoretischen Kenntnisse praktisch überprüfen, wodurch eine weitere Funktion des Experiments im Physikunterricht nach Kircher erfüllt ist.^[9, S.230f.] Auch Tesch und Duit stellen in ihren Ausführungen zur Rolle des Experiments im Physikanfangsunterricht fest, dass „durch das eigene Experimentieren [...] eine aktive Auseinandersetzung mit den physikalischen Problemstellungen ermöglicht werden [kann.]“^[16, S. 1]

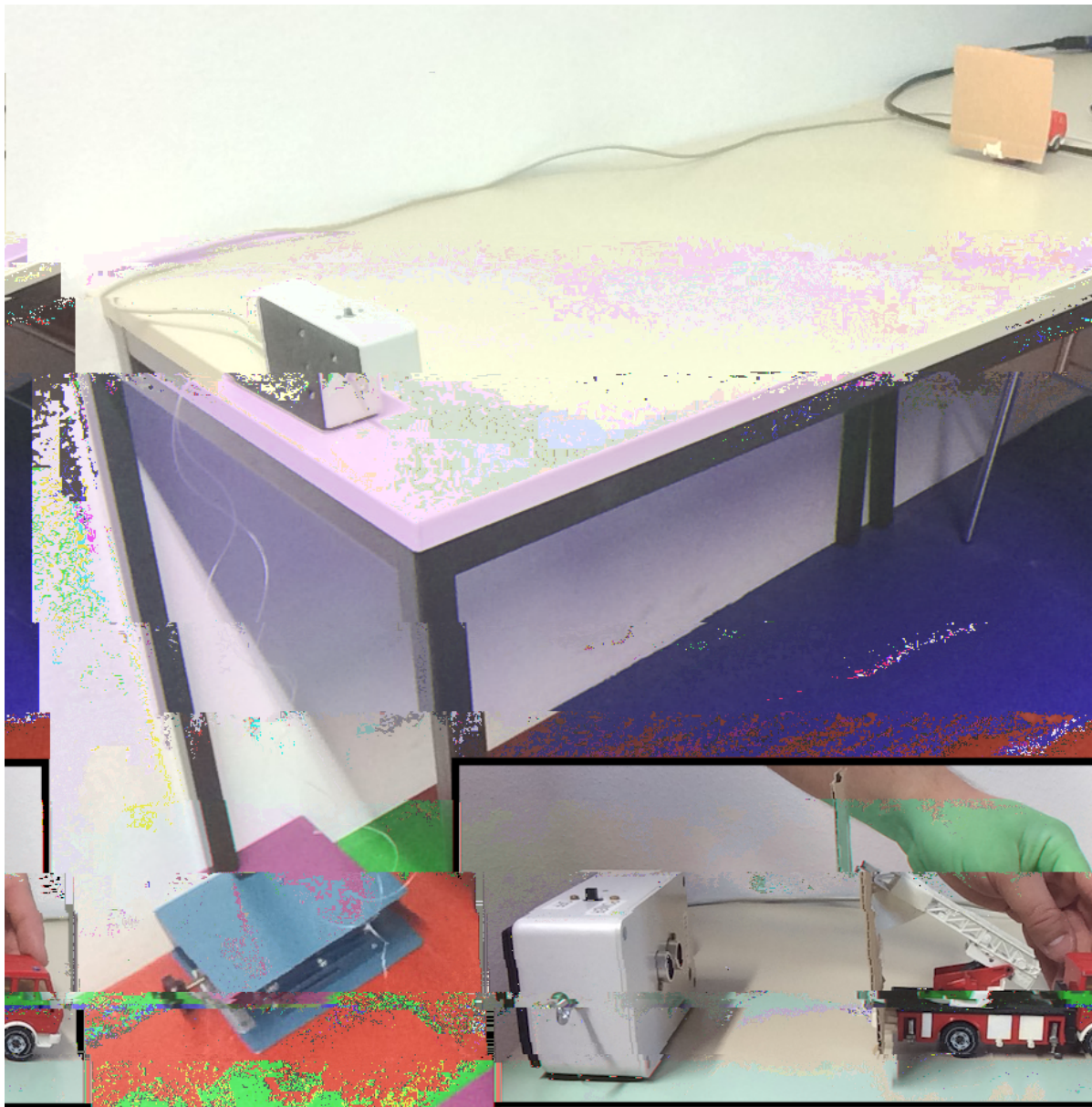


Abbildung 53: Vereinfachte Versuchsanordnung zur Messung einer Bewegung auf der schiefen Ebene. Der Tisch wurde auf einer Seite mit zwei Hebebahnen schräg gestellt. Als Schirm wurde eine Pappscheibe an die Rückseite eines Spielzeugautos geklebt. Zum Abbremsen des Wagens wurde ein dickeres PC-Kabel an das Ende der Fahrbahn gelegt.

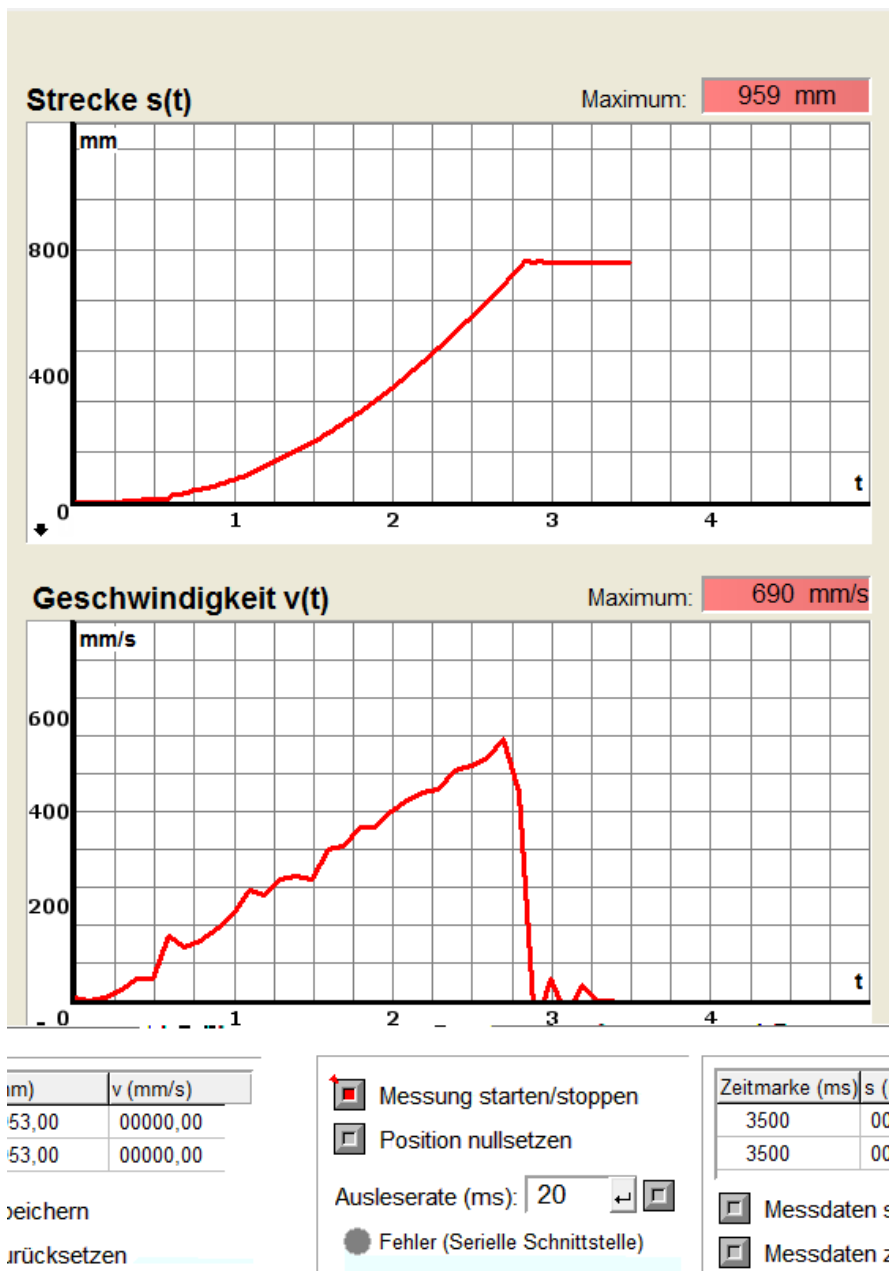


Abbildung 54: Messung der Bewegung eines Spielzeugautos auf einem schräg gestellten Tisch. Dies ist ein Beispiel für eine reale Messung im Gegensatz zu den in Schulen häufig nur idealisiert besprochenen gleichmäßig beschleunigten Bewegungen. Die parabelartige Streckenzunahme und die lineare Geschwindigkeitszunahme sind als Tendenz eindeutig erkennbar.

4.3. Messungen mit Digitalmultimetern

Mit Digitalmultimetern (DMM) können sehr viele verschiedene Messgrößen untersucht werden. Über Standardgrößen wie die Stromstärke oder die Spannung hinaus können sie auch Größen wie den elektrischen Widerstand oder Frequenzen messen. Durch analoge Sensoren erweitert lassen sich auch Größen wie Lichtstärken, Durchbiegungen, Strahlung etc. messen. So können bereits mit zwei Digitalmultimetern viele Messungen durchgeführt werden. Als Beispiel seien hier nur zwei Experimente zu Wärmestrahlung und Absorption genannt, die in einem Schülerlabor der Internationalen Gesamtschule Heidelberg (IGH) genutzt werden. Hierbei werden das Stefan-Boltzmann-Gesetz (T^4 -Gesetz) mit Hilfe einer Mollsäule (Thermopile) sowie die Absorption von Wärmestrahlung durch Kohlenstoffdioxid mit einem analogen Temperatursensor an zwei Digitalmultimetern gemessen. Die Versuchsanleitungen mit vielen erklärenden Bildern sind online verfügbar²⁵ und werden nach und nach ebenfalls auf die Projektwebseite, <http://schulmaterial.physi.uni-heidelberg.de>, übertragen.

²⁵<http://www.physi.uni-heidelberg.de/~eisele/schuelerlabor/ExperimenteWaermestrahlungneu.pdf>, Abruf 02.07.2015

4.4. Messung äußerer Einflüsse

Mit Hilfe einer Messung äußerer Einflüsse wie Luftdruck, Temperatur und Luftfeuchtigkeit über den Zeitraum einer Schulstunde kann qualitativ gezeigt werden, welche Rolle

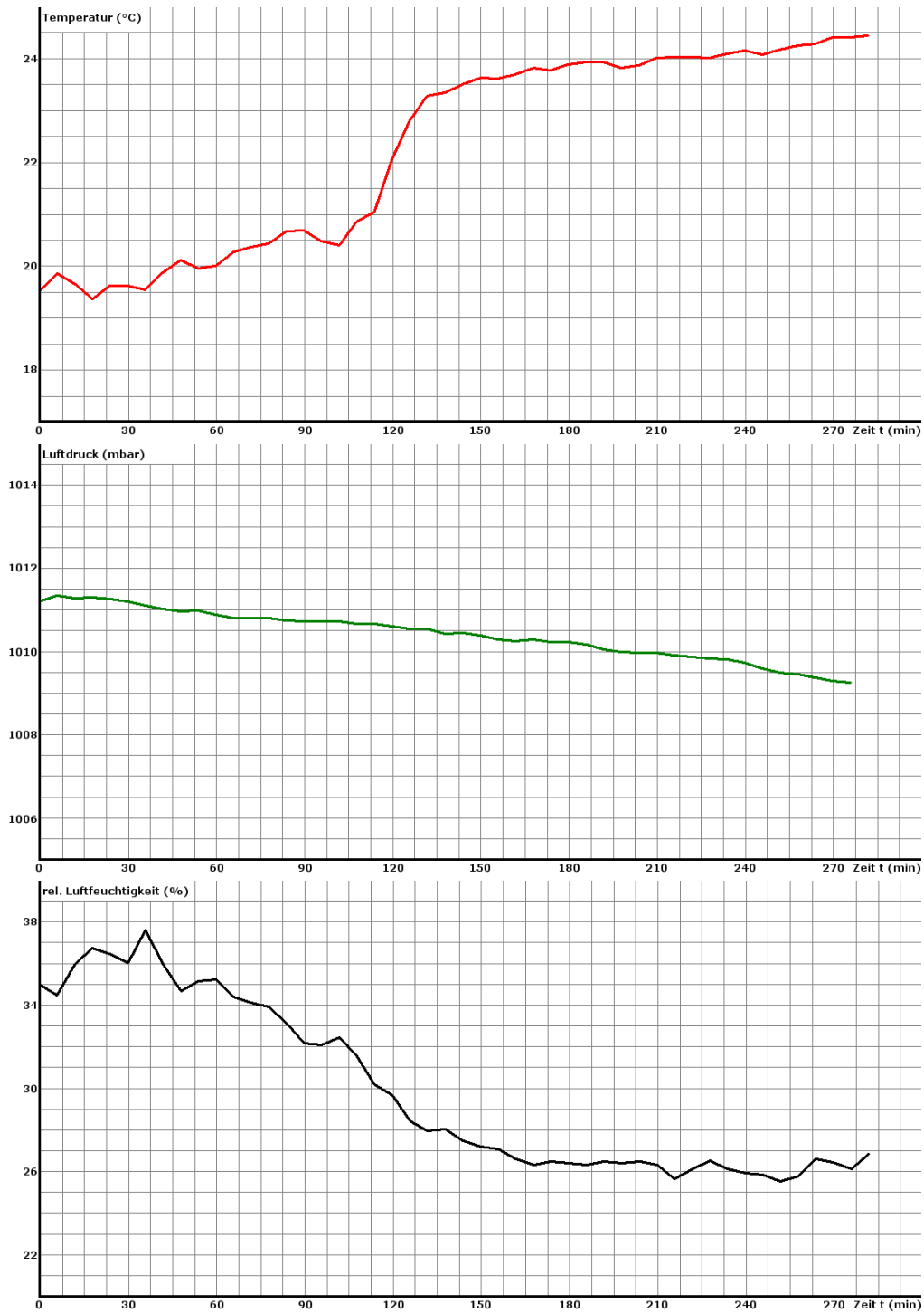


Abbildung 55: Verlauf der Temperatur, des Luftdrucks und der Luftfeuchtigkeit in einem Laborraum mit geöffneten Fenstern an einem warmen Sommertag, aufgezeichnet über einen Zeitraum von etwa viereinhalb Stunden. Die Auswirkungen dieser Messgrößen auf physikalische Experimente oder empfindliche Messapparaturen kann anhand solcher Daten besprochen werden.

5. Schülerexperimente

Neue physikalische Sachverhalte können den Schülern natürlich nicht nur in Form von Demonstrationsexperimenten näher gebracht werden, sondern auch durch Experimente, die die Schüler selbst durchführen. Winkelmann und Erb haben in einer Studie gezeigt, dass sich für Schülerexperimente { sowohl mit sogenannter Kochbuch-Anleitung als auch mit bloßen Hilfestellungen zum ansonsten komplett eigenständigen Lösen des physikalischen Problems { „ein leichter bis hoher signifikanter Vorteil gegenüber Demonstrationsexperimenten ergibt. Sie merken jedoch gleichzeitig an, dass dieser Vorteil für den Lernzuwachs der Schüler praktisch unerheblich sei.^[20, S. 3]

Dennoch bieten Schülerexperimente sich an, um beispielsweise „experimentelle Fertigkeiten und fachspezifische Arbeitsweisen“ zu erwerben,^[9, S. 240] was insbesondere deshalb wichtig ist, weil Schüler das naturwissenschaftliche Experimentierverfahren nicht als reines Befolgen von Versuchsanweisungen kennen lernen sollen, sondern realitätsnah als Planen, Durchführen und Auswerten von Experimenten, die auf bloßen Denkansetzungen beruhen und die häufig Ergebnisse sind. Dies bestätigen auch Engel und Euler, die kritisieren, dass durch „stark geführte Experimente [...] ein unzulängliches induktives Wissenschaftsbild vermittelt werde und dabei „allenfalls die manuellen Fertigkeiten { nicht aber systematisches Denken“ geschult werden.^[5, S. 45] In ihrem Aufsatz, der sich vor allem mit Schülerlaboren beschäftigt, stellen sie zudem fest, dass „[p]roblemorientierte Situationen und Projekte, in denen die Schüler ihr Wissen erarbeiten, [...] [im Unterricht] eher selten [sind]“.^[5, S. 46] Doch nicht nur in Schülerlaboren können solche Situationen und Projekte stärker in den Fokus rücken. Auch durch Vergabe von physikalischen Fragestellungen für Referate, Projektarbeiten oder GFS²⁸ kann den Schülern eine Möglichkeit geboten werden, sich einer realistischeren physikalischen Vorgehensweise zu widmen, was dementsprechend auch eine stärkere Orientierung an der tatsächlichen Methodik naturwissenschaftlicher Forschung bedeutet. Durch die alltagsnahen Experimente kann dabei ein „Bezug zur Lebenswelt“ hergestellt werden, der bei Demonstrationsexperimenten häufig fehlt.^[5, S. 45]

Was bei den bisherigen Betrachtungen und in vielen Studien außer Acht gelassen wurde ist die Intention, dass die Schüler durch Schülerexperimente vor allem Freude an der Physik entwickeln sollen. Studien, die sich mit dem messbaren Lernerfolg der Schüler durch Schülerexperimente beschäftigen, sind insofern nur teilweise aussagekräftig für die Relevanz dieser Experimente. Durch Gespräche mit vielen verschiedenen Lehrern

²⁸Gleichwertige Feststellung von Schülerleistungen, siehe Fußnote 1.

naturwissenschaftlicher Fächer und aus eigener Erfahrung bin ich davon überzeugt, dass Experimente, die die Schüler selbst durchgeführt und ausgewertet, im besten Falle sogar vorher selbst geplant und entwickelt haben, den größten „Lerneffekt“ haben: Die Schüler lernen, dass Physik ihnen Freude bereitet und dass sie viele alltägliche Phänomene hinterfragen und durch Experimentieren erforschen können. Denn wer würde sich nicht noch nach Jahren daran erinnern, wie er mit einem Beschleunigungssensor am Bauch einen Salto vom 10 m-Brett gemacht hat? Die Hoffnung besteht darin, dass Schülerexperimente genau dieses Ziel eines tiefergehenden Interesses und langwährenden Forschungsdranges erreichen. Studien, die sich näher mit dieser Fragestellung beschäftigen, waren sehr interessant.

Die in diesem Kapitel beispielhaft beschriebenen Experimente können teilweise auch im Rahmen des Unterrichts durchgeführt werden, bieten sich aber insbesondere auch für außerunterrichtliche Projekte an { die Liste möglicher Projekte ist unbegrenzt, oft kann der Einsatz von Sensoren sinnvoll sein; es lohnt sich daher immer, in Artikeln, Büchern oder dem Internet nach neuen Anregungen zu stöbern. Die nachfolgenden Beispiele nutzen die in Kapitel 3.3 beschriebene mobile Erfassung und Speicherung von Messdaten, die nach Ende der Messung zu Hause am PC ausgewertet werden können. Die einfache Möglichkeit, Daten mit Arduino auf einer Speicherkarte zu sichern, und die Mobilität der Module zeigen hierbei, dass kleine und mobile Messsysteme für viele Anwendungen in Frage kommen und nützlich sind. Die Auswertung der aufgenommenen Daten kann sehr variabel gestaltet werden: Standardprogramme wie Excel oder Origin können ebenso genutzt werden wie ein ebenfalls in diesem Kapitel gezeigtes Pro Lab-Programm zur Auslese von gespeicherten Messdaten.

Bei der Behandlung der Experimente muss stets im Hinterkopf behalten werden, dass es sich bei Schülerexperimenten um Experimente unter realen Bedingungen handelt. Daher beschreiben die Messungen gegenüber vielen Schulversuchen, deren Gelingen oftmals künstliche Bedingungen voraussetzt, die Theorie nicht immer perfekt. Doch gerade solche Versuche bieten die Chance, etwas für den Alltag zu lernen, denn die Gesetzmäßigkeiten und Zusammenhänge sind in realen Experimenten noch immer deutlich erkennbar. Dadurch können die Schüler { so die Hoffnung { ihre Fähigkeit schulen, abstrakter zu denken und ein tiefergehendes Verständnis und Interesse für die Physik zu entwickeln. Die gezeigten Experimente sind also keine Experimente, die ausschließlich nach Kochrezept durchgeführt werden sollen; kreative (Mess-)Ideen der Schüler sollten jederzeit offen aufgenommen und unterstützt werden.

5.1. Barometrische Höhenmessung

Im baden-württembergischen Bildungsplan ist bereits am Ende der achten Jahrgangsstufe der Umgang mit „grundlegenden physikalischen Größen“ eine Kompetenz, über die die Schüler verfügen sollten.^[11, S. 182] Eine dieser physikalischen Größen ist der Druck, der anhand dieses Experiments näher untersucht werden kann. Eine bekannte Anwendung von Druckmessungen ist die barometrische Bestimmung von Höhenunterschieden, beispielsweise in Uhren für Bergsteiger, die ständig neu kalibriert werden müssen, um die korrekten Höhenunterschiede anzeigen zu können.

Der Luftdruck kann neben analogen Barometern auch mit einem einfachen digitalen Sensormodul mit einem Arduino-Board ausgelesen werden. Inzwischen bieten zwar auch einige Smartphone-Modelle die Möglichkeit einer Luftdruckmessung, jedoch ist der zugehörige Sensor noch nicht flächendeckend verbaut, sodass ein zusätzliches Messmodul für Arduino noch immer sinnvoll ist. Mit der Sensorbox können Schüler so beispielsweise die Höhe ihres Schulgebäudes oder eines Turmes messen. Noch interessanter werden die Messungen, wenn die Höhenunterschiede größer werden, sodass der Luftdruck sich deutlich verändert, zum Beispiel bei einer Fahrt mit der Heidelberger Bergbahn auf den Königstuhl { die Schüler können währenddessen den Verlauf des Luftdrucks aufzeichnen und ihre Messung später zu Hause auswerten.

Eine Messung des Druckverlaufs kann sowohl zur qualitativen Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Höhe und Luftdruck genutzt werden^[2, S. 164] als auch zur quantitativen Bestimmung von Höhenunterschieden. Hierbei wird die barometrische Höhenformel,

$$p_1 = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{h}{h_S}\right), \quad (7)$$

genutzt.^[1, S. 459] Die Bedeutung der Skalenhöhe h_S ist, dass „[i]nnerhalb einer Skalenhöhe [...] der Luftdruck auf $e^{-1} = 36.7\%$ seines Ausgangswertes abnimmt.“^[13, S. 184] Der Wert von h_S ist temperaturabhängig, denn es gilt:

$$h_S = \frac{R \cdot T}{M \cdot g} \quad (8)$$

mit der universellen Gaskonstante R , der absoluten Temperatur T , der mittleren Molmasse der Atmosphärgase M und der Schwerkraftbeschleunigung g . Bei einer Temperatur von $T = 15^\circ\text{C}$ beträgt die Skalenhöhe $h_S = 8.4 \cdot 10^3$ m. Da sich g in den hier betrachteten Höhen nur sehr geringfügig ändert, kann es bei der Integration der zugrunde liegenden Differentialgleichung als konstant betrachtet werden. Für einfache Berechnungen auf

Unter- und Mittelstufenniveau kann auch eine isotherme Atmosphäre angenommen werden, sodass auch T als konstant betrachtet wird. Für exaktere Berechnungen muss auch der Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Höhe bekannt sein. Auf eine solche Berechnung soll hier jedoch verzichtet werden, da für Höhenabschätzungen die vereinfachte Formel ausreichend genau ist.

Eine Beispielmessung einer Fahrt auf den Königstuhl und zurück ist in Abbildung 56 gezeigt. Die aus der Messung bestimmten Werte für den Luftdruck an den einzelnen Stationen der Bergbahn sowie die daraus berechneten Höhen sind in Tabelle 6 gezeigt. Zum Vergleich dient die Angabe des Fahrtverlaufs auf der Website des Bergbahn-Betreibers (Abbildung 57). Aus den Messwerten wird deutlich, dass die Höhen durch Messung des Luftdrucks bis auf wenige Meter genau angegeben werden können. Aufgrund der zuvor genannten Näherungen und da die Stationen sich über mehrere Höhenmeter erstrecken und nicht genau bekannt ist, an welcher Position die vom Bergbahn-Betreiber angegebenen Höhen gemessen wurden, erlauben die Messwerte bereits eine zufriedenstellend genaue Angabe der Höhen.

Anstelle einer manuellen Berechnung der Höhen bei verschiedenen Luftdruckwerten kann auch eine Pro Lab-Funktion benutzt werden, die einen Eingangswert (hier den Luftdruck) in eine Formel einsetzt und als Ausgangswert das Ergebnis der Berechnung ausgibt. Als Formel kann so beispielsweise die barometrische Höhenformel nach der Höhenwert aufgelöst genutzt werden, sodass das Pro Lab-Programm direkt die aus den Luftdruckwerten berechnete Höhenwert anzeigt. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 58 gezeigt. Als Luftdruckreferenz p_0 wurde hier der Luftdruck an der Talstation Kornmarkt verwendet.

Verfügt die Schule über ein Programm wie Origin, mit dem an Messwerte Fitfunktionen angepasst werden können, kann die barometrische Höhenformel auch aus der Messung abgeleitet werden. Hierzu werden die Luftdruckmesswerte gegen die aus den Betreiberangaben entnommenen Höhen aufgetragen und mit verschiedenen Funktionen gettet (z.B. linear, quadratisch, exponentiell, ...). Die Schüler können so anhand der Fitwahrscheinlichkeiten den funktionalen Zusammenhang als exponentiell ermitteln und die zugehörige Formel mitsamt Parametern selbst bestimmen.

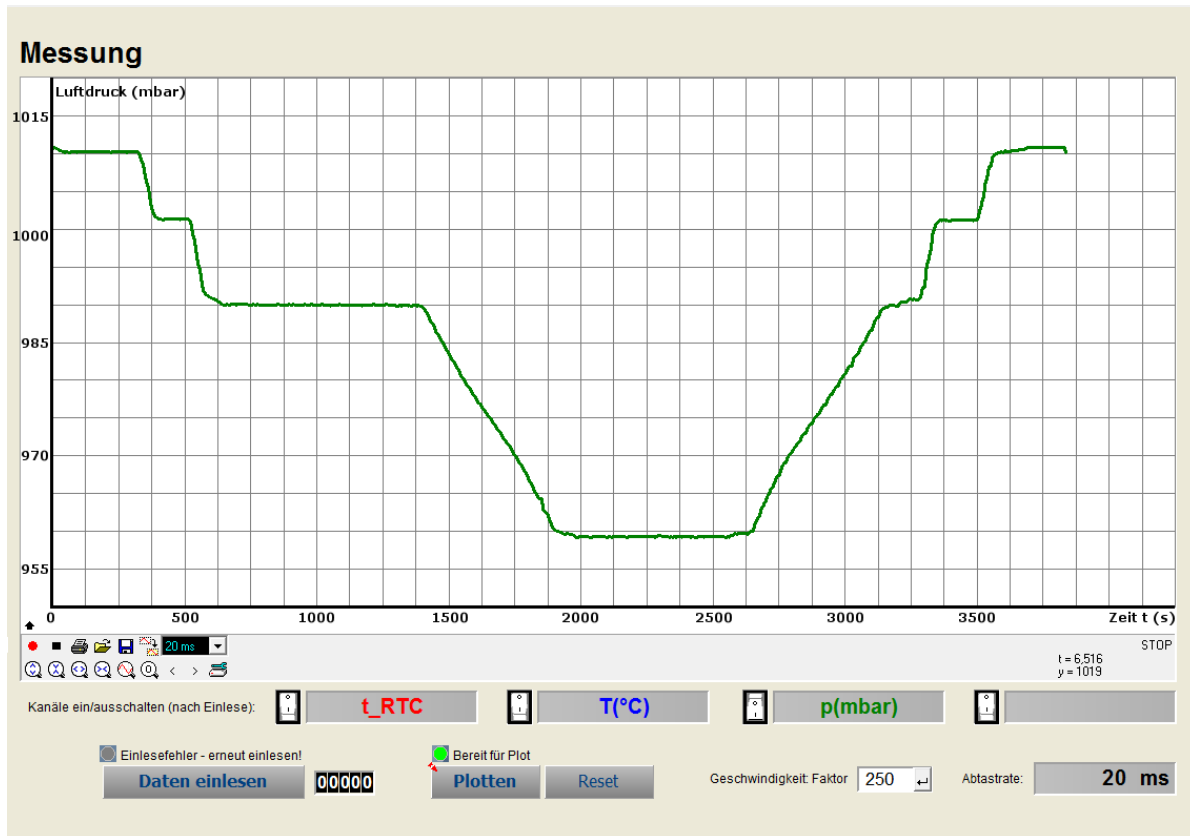


Abbildung 56: Benutzeroberfläche zur Einlese und Darstellung von gespeicherten Messungen am Beispiel des Luftdruckverlaufs bei einer Fahrt auf den Königstuhl und zurück mit der Heidelberger Bergbahn. Die Plateaus entsprechen jeweils einer Wartezeit an den einzelnen Stationen der Bergbahn (Talstation Kornmarkt { Schloss { Molkenkur { Königstuhl und zurück). Aus den dort herrschenden Luftdrücken wurden die in Tabelle 6 gezeigten Höhenberechnungen mit Hilfe der barometrischen Höhenformel bestimmt. Interessante Punkte können durch Doppelklick markiert werden, sodass die X- und Y-Werte im Diagramm angezeigt werden. Dies ist für die Auswertung hilfreich.

Längenprofil der Heidelberger Bergbahnen

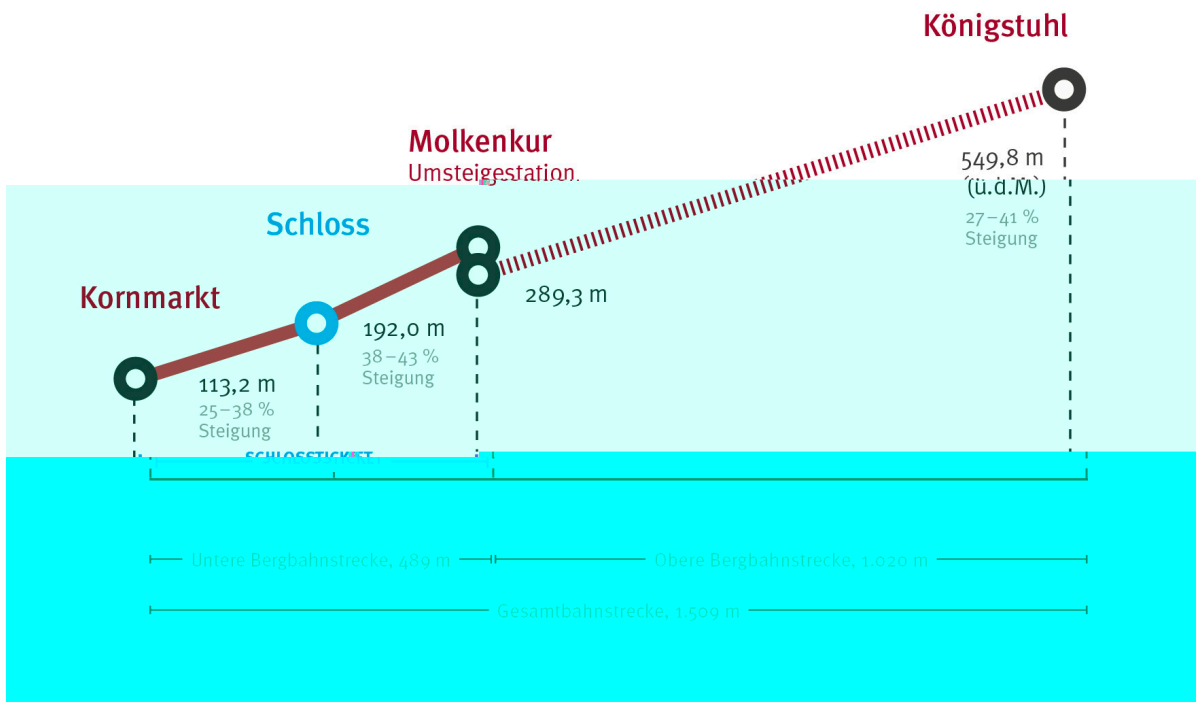


Abbildung 57: Längenprofil der Heidelberger Bergbahnen mit Angaben zu den Höhen der einzelnen Stationen. Die hieraus entnommenen Höhendifferenzen werden in Tabelle 6 mit den aus der Messung bestimmten Höhendifferenzen verglichen. Quelle: Heidelberger Straßen- und Bergbahn GmbH (http://www.bergbahn-heidelberg.de/de/Technik_Geschichte/Bergbahn-Streckenprofil-de.jpg, Abruf 22.06.2015)

Tabelle 6: Luftdruck-Messwerte an den einzelnen Stationen der Heidelberger Bergbahn und die daraus mit Hilfe der barometrischen Höhenformel berechneten Höhendifferenzen relativ zur Talstation Kornmarkt. Zum Vergleich sind die von den Bergbahn-Betreibern angegebenen Höhendifferenzen (vgl. Abbildung 57) gezeigt. Da die Stationen sich über mehrere Höhenmeter erstrecken und die Warteposition nicht genau der Position in der Station entspricht, zu der die Höhenangabe gemacht wurde, deuten die bestimmten Höhendifferenzen auf eine sehr gute Messung hin.

Station	p [mbar]	h (Messung) [m]	h (Betreiber) [m]
Kornmarkt	1010	0	0
Schloss	1001	75.1	78.8
Molkenkur	990	168.0	176.1
Königstuhl	959	435.2	436.6

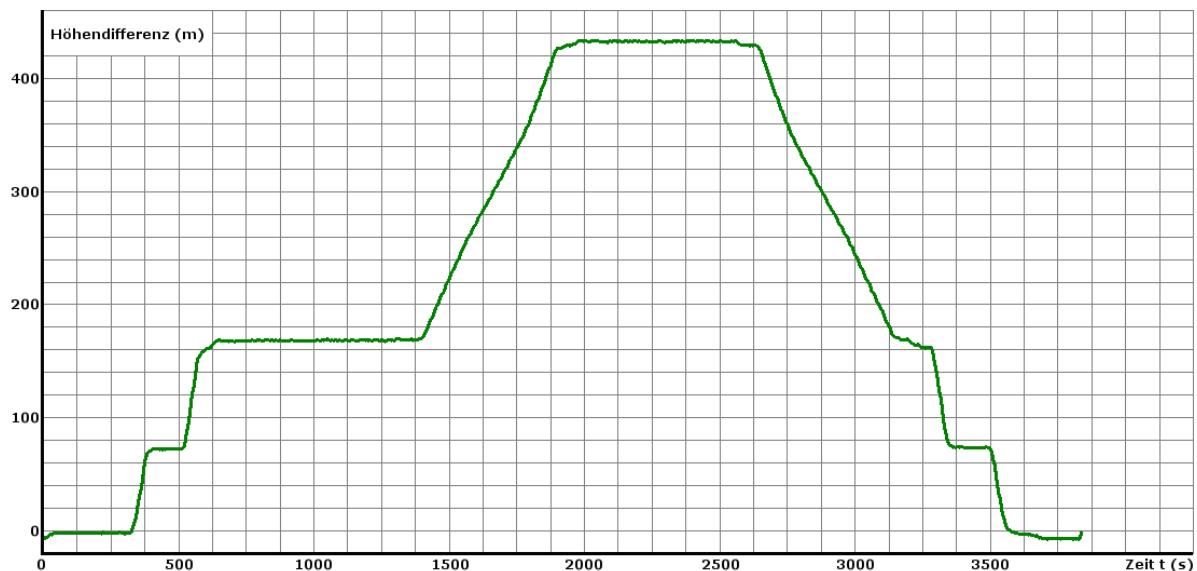


Abbildung 58: Höhendifferenzen bei der Fahrt mit der Heidelberger Bergbahn. Das in Abbildung 56 gezeigte Einleseprogramm ermöglicht auch eine Berechnung abgeleiteter Größen aus den Messwerten durch Eingabe einer Formel, in der der Messwert in eine andere Größe überführt wird. Löst man die Barometrische Höhenformel (Gleichung 7) nach der Höhendifferenz auf, kann das Programm so aus den Messwerten auch direkt die Höhendifferenz berechnen und anzeigen.

5.2. Beschleunigungsmessungen

Eine besonders gro ße Alltagsrelevanz haben Messungen von Beschleunigungen, da die Schüler jeden Tag den unterschiedlichsten Beschleunigungen ausgesetzt sind { beginnend bei der Erdbeschleunigung, die dafür sorgt, dass sie nicht vom Boden abheben, über Beschleunigungen beim Radfahren, in Auto, Bus und Bahn oder beim Fliegen, bis hin zu Freizeitbeschäftigungen wie einer Fahrt mit dem Kettenkarussell oder der Achterbahn. Viele der auftretenden Beschleunigungen können inzwischen schnell und einfach mit Smartphones aufgezeichnet werden und so im Unterricht untersucht werden. Es existieren zahlreiche Publikationen mit Beispielen, Auswertungen und zusätzlichen Hinweisen (siehe beispielsweise Vogt (2014)^[19]). Der typische Messbereich von Beschleunigungssensoren in Smartphones ist $\pm 2g$, da der Zweck der Sensoren hauptsächlich die Bestimmung der Neigung des Geräts ist, deren Wert unter anderem zur Steuerung von Spielen oder zur automatischen Ausrichtung des Bildschirms benötigt wird.

Es gibt jedoch auch Messaufgaben, für die das Smartphone nicht geeignet oder als Messinstrument unerwünscht ist, weil die zu messenden Beschleunigungen größer sind als der zulässige Messbereich von $\pm 2g$ (beispielsweise in der Achterbahn) oder weil das teure Smartphone wegen der Bruchgefahr nicht durch die Luft geworfen werden soll. Insbesondere für diese Aufgaben bietet sich eine Sensorbox an, die sowohl robust und günstig ist als auch größere Beschleunigungen messen kann. Mit der in Kapitel 3.4 beschriebenen Sensorbox für Beschleunigungsmessungen sind diese Anforderungen erfüllt; der Messbereich ist standardmäßig auf den maximal möglichen Bereich von $\pm 8g$ eingestellt und kann im Arduino-Programm angepasst werden, falls nur kleine Beschleunigungen gemessen werden und daher eine größere Auflösung gewünscht wird.

In diesem Kapitel werden nachfolgend drei Beispiele gezeigt, bei denen die Sensorbox für Beschleunigungsmessungen genutzt wird, die mit dem Smartphone nicht möglich oder (für die Schule) zu gefährlich sind. Die Auswertung der Messdaten kann erneut mit Standardprogrammen wie beispielsweise Excel erfolgen.

5.2.1. Beispielmessung: Parabelwurf

In diesem ersten Beispiel wird ein Parabelwurf mit Aufschwung und Fangbewegung untersucht. In Luftpolsterfolie gewickelt ist die Sensorbox ausreichend gegen eventuelle Stöße beim Aufprall gepolstert, weswegen sie durch ihre Robustheit einen großen Vorteil gegenüber Smartphones bietet. Durch ihre Ausdehnung ist es zudem leichter, sie ohne Rotation zu werfen, was auf Smartphones nicht immer zutrifft.

Ein Foto der Versuchsdurchführung ist in Abbildung 59, das zugehörige Diagramm der Gesamtbeschleunigung und der Beschleunigung in Z-Richtung ist in Abbildung 60 gezeigt. Die Z-Achse des Sensors zeigt nach oben; der Wurf sollte derart ablaufen, dass die Sensorbox nicht in Rotation gerät, sodass die Richtung der Achse sich relativ zur Richtung der Erdbeschleunigung nicht oder nur sehr wenig verändert. Aus dem Diagramm wird deutlich, dass dies beim gezeigten Wurf tatsächlich der Fall war.



Abbildung 59: Foto der Versuchsdurchführung zum Parabelwurf.

Eine korrekte Interpretation des Verlaufs der Beschleunigungsmessung gelingt nur dann, wenn den Schülern klar ist, dass der Sensor sich in einem beschleunigten Bezugssystem befindet. Hier ist die Analogie zu einem Passagier im Flugzeug hilfreich, der während des Starts und der Landung Scheinkräfte wahrnimmt. Weitere Ausführungen hierzu finden sich beispielsweise in Vogt (2014).^[19]

Die Sensorbox befindet sich zunächst in Ruhe, weshalb der Sensor nur die Erdbeschleunigung mit dem Wert $1g$ in negativer Z-Richtung misst. Durch eine kurze Ausholbewegung wird der Betrag der Beschleunigung verringert, da die Box eine Beschleunigung entlang der Richtung der Erdbeschleunigung erfährt. Der Wurf beginnt dann in entgegengesetzter Richtung (+Z), wodurch der Betrag der gemessenen Beschleunigung

deutlich größer wird { im gezeigten Beispiel wächst er auf etwa $4g$. In dem Moment, in dem die Sensorbox die Hand des Werfers verlässt, wird diese kraftfrei. Als „Passagier“ in der frei liegenden Box erfährt der Sensor keine weitere Beschleunigung, weswegen der gemessene Wert auf $a = 0 \text{ m/s}^2$ zurückgeht und bis zum Aufprall (bestenfalls in der Hand des Fangers) dort verbleibt. Durch den Aufprall und eine federnde Bewegung des Fangers erfährt der Sensor erneut eine Beschleunigung von etwa $2g$. Sobald die Box sich wieder in Ruhe befindet, bleibt die gemessene Beschleunigung beim Wert von $1g$ nahezu konstant; die gemessenen Schwankungen resultieren lediglich aus unruhigen Händen.

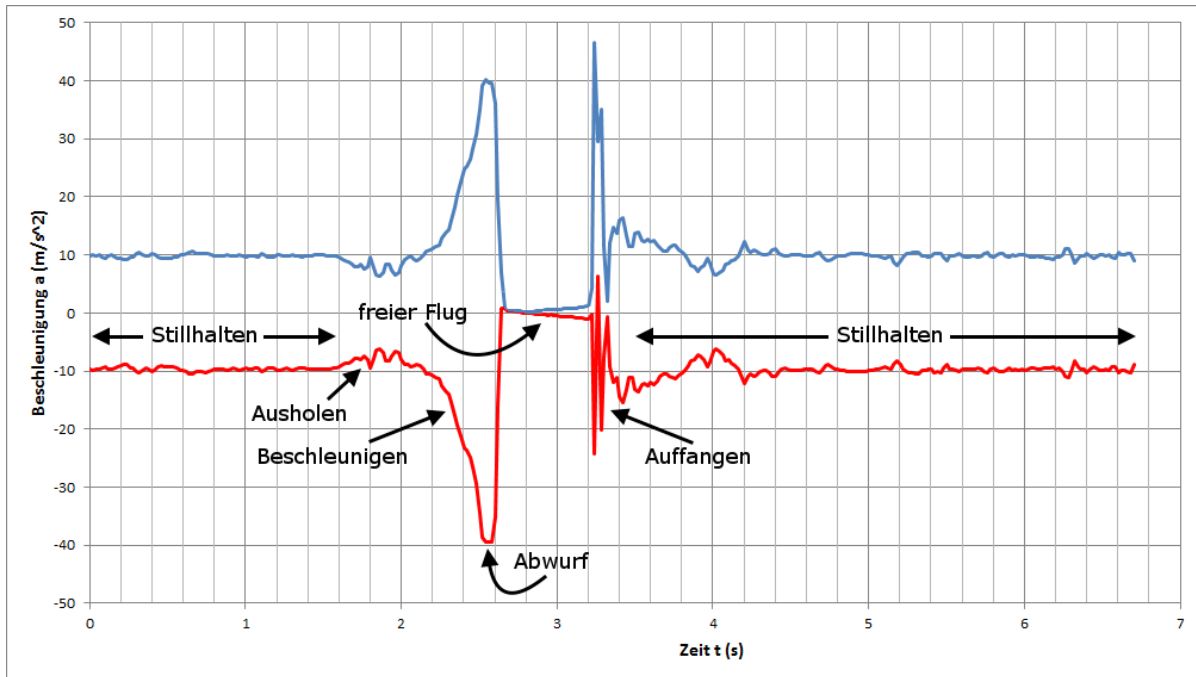


Abbildung 60: Beschleunigungsdiagramm eines Parabelwurfes. Aufgetragen sind die Gesamtbeschleunigung $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$ (blau) und die Beschleunigung in der Z-Richtung a_z (rot). Die Sensorbox wurde so geworfen, dass die Richtung der Z-Achse, die senkrecht zur Erdoberfläche steht, sich möglichst nicht verändert. Nach ruhigem Halten der Sensorbox folgt eine kurze Ausholbewegung nach unten, bevor die Sensorbox nach oben und vorne beschleunigt wird. Ab dem Moment, in dem die Box die Hand des Werfers verlässt (Abwurf), ist die Sensorbox kraftfrei und die gemessene Beschleunigung beträgt $a = 0 \text{ m/s}^2$; die Sensorbox bewegt sich nun kraftfrei auf einer Parabelbahn. Nach Aufprall in der Hand des Fangers und kurzer federnder Bewegung wird die Sensorbox wieder ruhig und waagrecht gehalten.

5.2.2. Beispielmessung: Achterbahnfahrt

Fahrten mit der Achterbahn sind ein strittiges Thema und spalten die Freizeitparkbesucher in zwei Gruppen: Die einen können gar nicht genug davon bekommen und fahren gleich mehrere Runden hintereinander, den anderen verdreht sich schon beim Gedanken an das Schleudergefühl der Magen. Aus physikalischer Sicht ist die Achterbahn jedoch zweifelsohne ein sehr interessantes Thema, wie die vielen Beiträge in Fachzeitschriften belegen. Lesenswert ist in diesem Zusammenhang beispielsweise ein Artikel von Heintz et al.^[7], in dem die Physik der Achterbahn detailliert behandelt wird.

Die Fahrt mit der Achterbahn ist ein Beispiel für eine Messung, die mit dem Smartphone gar nicht richtig durchgeführt werden kann, da die zu messenden Beschleunigungen typischerweise mit Beträgen von bis zu $6g$ ^[4] den Messbereich der in den gängigen Smartphones verbauten Sensoren überschreiten. Schüttler behandelte in einem Beitrag bei einer DPG-Frühjahrstagung verschiedene Möglichkeiten, Beschleunigungen im Freizeitpark { unter anderem bei Achterbahnen { zu untersuchen. Dabei betrachtete er unter anderem Vorteile und Probleme von Videoanalyse, GPS-Auswertung und der Messung mit einem Beschleunigungssensor.^[14] Mit der hier gezeigten Sensorbox lassen sich ähnliche Messungen sehr einfach durchführen. Die Box muss fest am Körper getragen werden, da lose Gegenstände in Achterbahnen verboten sind. Bereits in einer Bauchtasche, die seitlich fest am Körper befestigt ist, kann die Sensorbox ohne Weiteres mit in die Achterbahn genommen werden.

In Abbildung 61 sind die gemessene Gesamtbeschleunigung und ein geglättetes Diagramm der Gesamtbeschleunigung während einer Fahrt mit der Achterbahn im Erlebnispark Tripsdrill gezeigt. Bei dieser Fahrt wurden maximale Gesamtbeschleunigungen von 30 bis 35 m/s^2 gemessen, also grob das 3- bis 3.5-fache der Erdbeschleunigung g . Zur Interpretation kann ein Video der Achterbahnfahrt sehr hilfreich sein. Zu vielen Achterbahnen finden sich im Internet sogenannte POV-Videos (engl. *point of view*),

bei denen am vordersten Wagen der Achterbahn eine Kamera fest montiert ist und den Fahrtverlauf aufzeichnet. Für die hier betrachtete Achterbahn ist ein Video der französischen Achterbahn-Fans von *E-C* empfehlenswert, das auf der Videoplattform YouTube gefunden werden kann²⁹ und das zur Auswertung benutzt wurde.

²⁹<https://www.youtube.com/watch?v=8L58W9ikRpE>, Abruf 12.07.2015

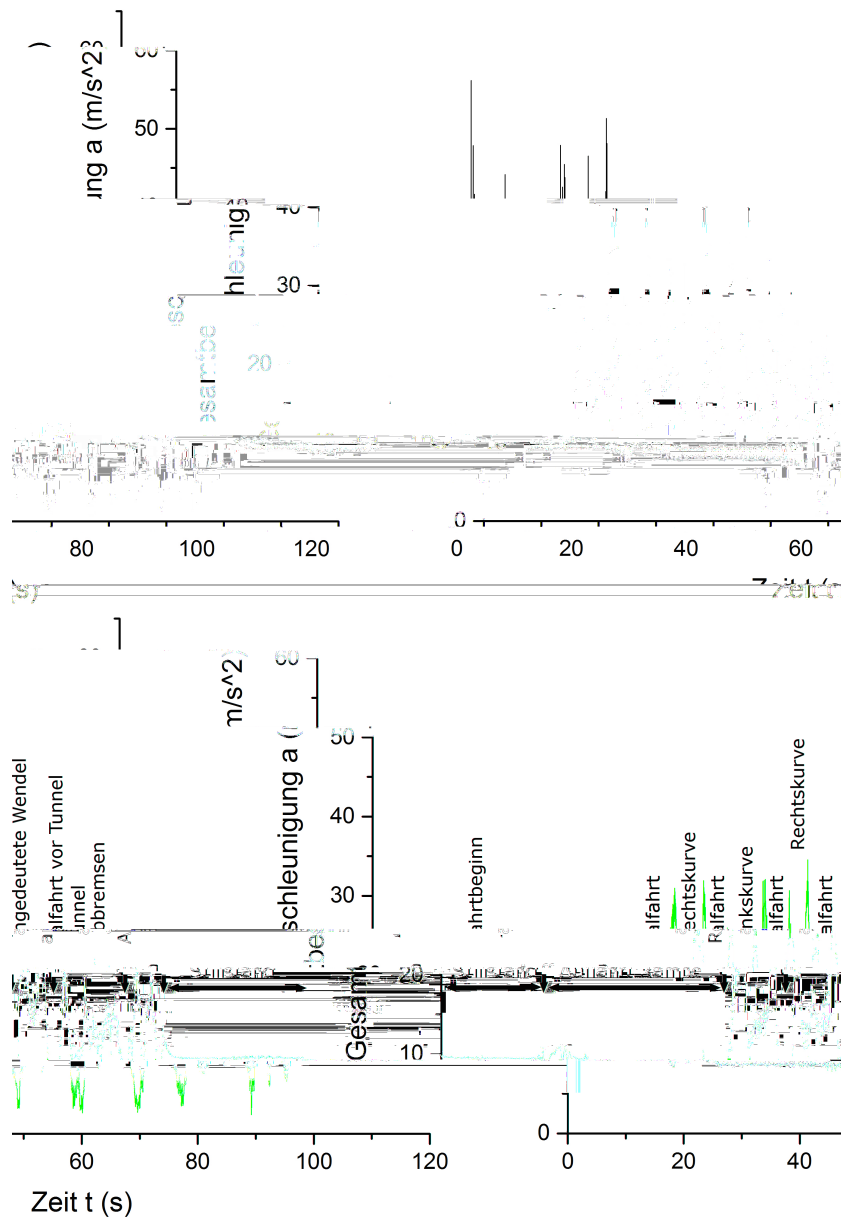


Abbildung 61: Oben: Auftragung der gemessenen Gesamtbeschleunigung gegen die Zeit während einer Fahrt mit der Achterbahn im Erlebnispark Trips-drill. Durch ruckartige Bewegungen des Wagens auf den Schienen sind die Messwerte stark verrauscht. Um die tatsächlichen Beschleunigungen zu erhalten, müssen die Messdaten geglättet werden. Unten: Die Messdaten wurden in Origin über jeweils 7 Messpunkte mit gleitendem Durchschnitt geglättet. Das Diagramm zeigt nun die tatsächlichen Beschleunigungen und kann zur Auswertung mit Hilfe eines Videos der Achterbahnfahrt genutzt werden. Eingetragen sind die Phasen der Fahrt. Die Beschleunigungsspitzen betragen 30 bis 35 m/s^2 , also grob 3 bis 3.5 g .

5.2.3. Beispielmessung: Rotationsbewegungen

Rotationsbewegungen haben einen großen Alltagsbezug, da sie im täglichen Leben häufig vorkommen. Die Untersuchung von Bewegungen auf einer Kreisbahn ist besonders interessant, da sich daraus ein wichtiges Grundkonzept der (Schul-)Physik ergibt, nämlich die Zentripetalbeschleunigung und -kraft; sie soll daher als drittes und letztes Beispiel für Beschleunigungsmessungen betrachtet werden. Bei nicht allzu großen Rotationsgeschwindigkeiten sind Messungen mit dem Smartphone noch möglich, beispielsweise zur Rotation eines Karussells auf einem Kinderspielplatz.^[18] Die Verwendung einer Sensorbox mit Beschleunigungssensor macht für vorrangig qualitative Messungen die typischerweise sehr komplizierten und nicht besonders schulernahen Aufbauten der Lehrmittel rmen hinfallig, beispielsweise den Versuch „Zentrifugalkraft auf einen umlaufenden Körper“ von Leybold³⁰. Für quantitative Messreihen zur Untersuchung des Einflusses insbesondere der Kreisfrequenz sind solche Aufbauten natürlich dennoch sinnvoll; die Masse und den Radius der Kreisbahn kann man auch im vereinfachten Versuchs ohne Weiteres variieren.

Bei den Messungen sollte darauf geachtet werden, dass die Sensorbox stets gut gepolstert ist, beispielsweise mit Luftpolsterfolie oder Schaumstoffplatten. Die in der Messung gezeigten Beschleunigungen sorgen bei einer Sensorbox der Masse $m = 0.25 \text{ kg}$ für Zentripetalkräfte in Größenordnungen von 20-50 N, die gemäß dem dritten Newtonschen Axiom, $\vec{F} = -m \cdot \vec{a}$ entlang des Seils wirken. Ein entsprechend stabiles Seil, beispielsweise Angelschnur, ist daher Voraussetzung für einen erfolgreichen Versuch, denn falls das Seil reißt und die Polsterung nicht ausreichend gut ist, kann die Sensorbox Schaden nehmen. Abbildung 62 zeigt die Befestigung der Angelschnur an der Sensorbox mit einer Schrauböse.

Für recht einfach auszuwertende Messungen kommen insbesondere vertikale und horizontale Rotationsbewegungen in Frage. In Abbildung 63 sind diese Kreisbewegungen in einem Foto dargestellt. Besonders die Messung horizontaler Bewegungen ermöglicht den direkten Zugang zur Zentripetalbeschleunigung, da diese dann nahezu senkrecht zur Richtung der Erdbeschleunigung steht. Eine Beispielmessung hierzu ist in Abbildung 64 gezeigt. An die Messdaten wurde im Bereich konstanter Rotationsgeschwindigkeit ein linearer Fit mit festgelegter Steigung 0 angepasst. Der Schnittpunkt dieser Fitgerade mit der Beschleunigungsachse zeigt eine zum Kreismittelpunkt gerichtete Zentripetalbeschleunigung von $a_z \approx 30 \text{ m/s}^2$. Mit Hilfe einer solchen Messung kann in Kombination

³⁰http://www.ld-didactic.de/literatur/hb/d/p1/p1432_d.pdf, Zugriff 15.07.2015



Abbildung 62: Für die Beschleunigungsmessungen bei Rotationsbewegungen wird an der Stirnseite der Sensorbox eine Schrauböse befestigt, an die eine Angelschnur gebunden wird. Für eine Markierung am Seil, um den Radius der Kreisbahn beim Rotieren vorgeben zu können, muss die genaue Position des Sensors in der Box berücksichtigt werden, die durch Angabe des Koordinatensystems des Sensors angedeutet ist. Die SD-Karte (am oberen Rand der Box, verdeckt) ist durch ein Schaumstoffpolster zusätzlich vor Beschädigung durch einen möglichen Aufprall geschützt.

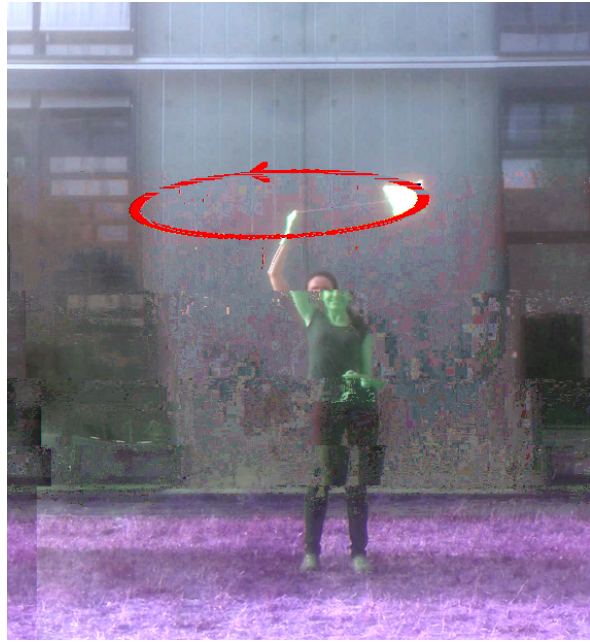
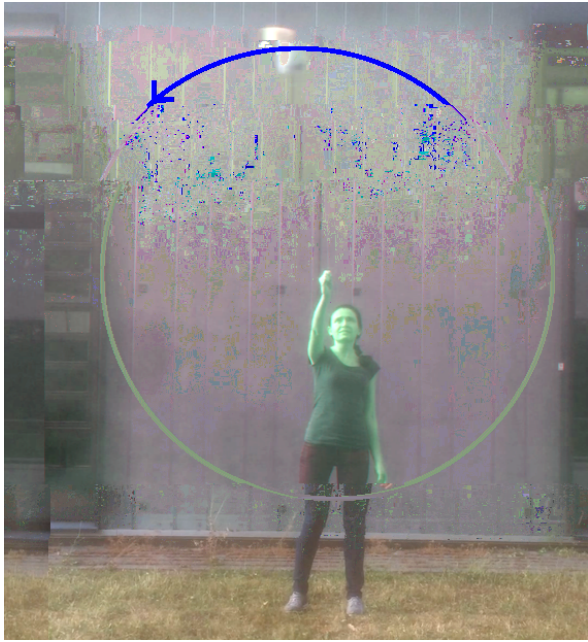


Abbildung 63:

mit einer Videoanalyse oder gestoppter Umlaufzeit die für Kreisbewegungen geltende Formel

$$a_Z = \omega^2 \cdot r \quad (9)$$

für Rotationen mit Radius r und Kreisfrequenz ω überprüft werden. Umgekehrt können die Schüler den mathematischen Zusammenhang auch aus einer Messreihe mit verschiedenen Radien und Rotationsgeschwindigkeiten ableiten.

Mindestens genauso interessant sind vertikale Rotationsbewegungen. Hierbei hat die Erdbeschleunigung im Gegensatz zu den horizontalen Kreisbewegungen einen deutlichen Einfluss auf die Messung, da sie nur bei den zwei horizontal liegenden Positionen der Kreisbewegung senkrecht zur Zentripetalbeschleunigung ist (im linken Foto in Abbildung 63 am linken und rechten Rand der Kreisbahn). In allen Positionen oberhalb der Horizontale vergrößert die Erdbeschleunigung den Betrag der radialen Beschleunigung, da sie nach unten wirkt; in den Positionen unterhalb der Horizontale verringert sie dementsprechend den Betrag der radialen Beschleunigung. So kommt es zu Oszillationen um den Wert von a_Z mit Amplituden, die für perfekte vertikale Kreisbewegungen gerade der Erdbeschleunigung g entsprechen. Die hier gemessene Kreisbewegung kommt allerdings nur dadurch zustande, dass die Bewegung mit der Hand angetrieben und aufrecht erhalten wird. Dadurch treten zusätzliche Beschleunigungen auf, die die Amplitude der Oszillation der Radialbeschleunigung vergrößern. Aus dem in Abbildung 65 gezeigten Diagramm wird deutlich, dass die Sensorbox im markierten Bereich schneller Rotation mit einer Kreisfrequenz von $\omega \approx 5.65 \text{ s}^{-1}$ rotiert, woraus bei einem Radius von $r = 1 \text{ m}$ eine Zentripetalbeschleunigung von $a_Z \approx 32 \text{ m/s}^2$ in Richtung des Kreismittelpunktes resultiert. Die Oszillationen haben hier eine Amplitude von etwa $2.5g$.

Anstelle einer Rotation an einem Seil kann die Sensorbox beispielsweise auch an einer ausgebauten Fahrradfelge montiert werden (siehe Abbildung 67). So können deutlich genauere Kreisbewegungen erreicht werden, wie das Diagramm in Abbildung 68 zeigt. Die Amplitude der Oszillationen entspricht jetzt gerade $1g$. Da die Felge durch Reibung gedämpft ist, nimmt die Rotationsgeschwindigkeit mit der Zeit ab, was sich sowohl in der vergrößerten Zeit pro Umlauf abzeichnet als auch an der exponentiell sinkenden Radialbeschleunigung. Zur Ermittlung der Dämpfung der Felge könnte hier eine exponentielle Funktion an die Messdaten gettet werden. Eine konstante Zentripetalbeschleunigung könnte erreicht werden, indem die Felge mit einem Motor konstanter Drehzahl angetrieben wird. Dies sind nur zwei Anregungen zur Erweiterung des Experiments, der Fantasie der Anwender sollen aber selbstverständlich keine Grenzen gesetzt sein.

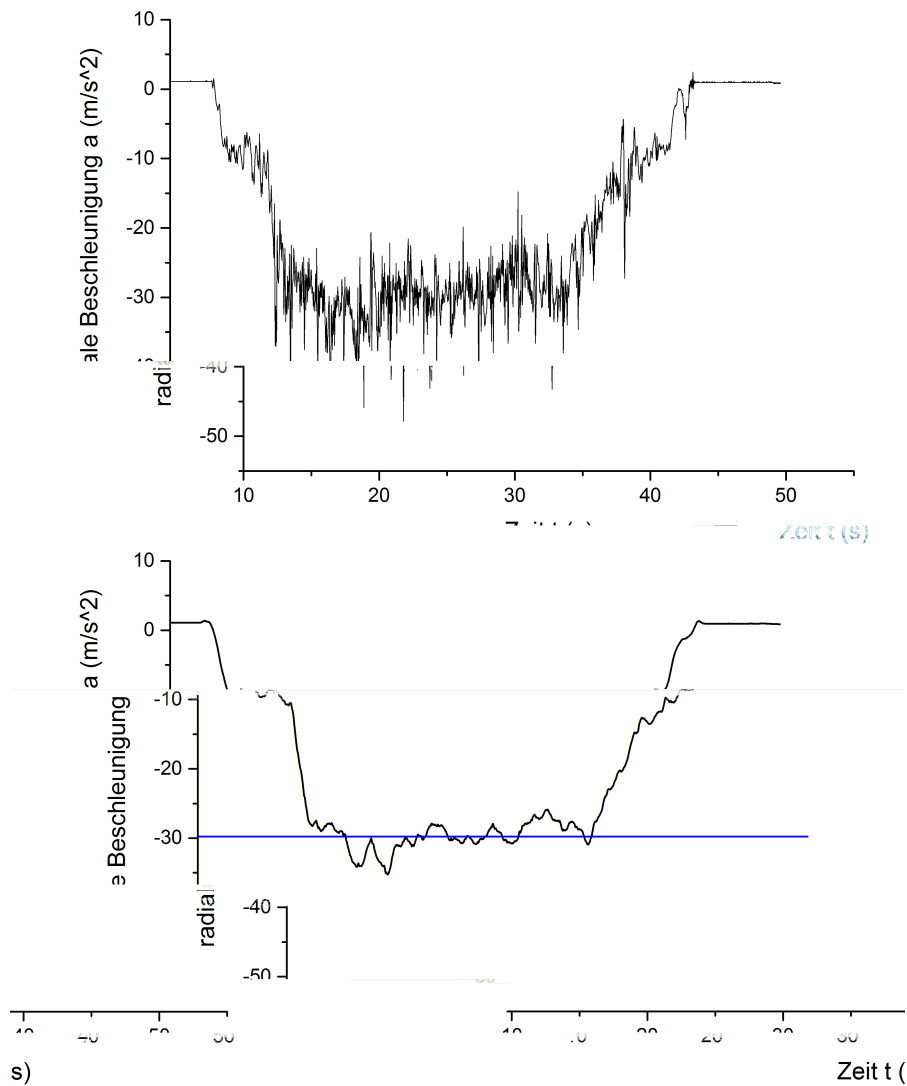


Abbildung 64: Oben: Messung der Beschleunigung in der radialen Richtung (positive X-Achse zeigt stets vom Kreismittelpunkt weg) bei einer horizontalen Kreisbewegung mit $r = 1$ m. ω wurde nach einem hohen Startwert immer weiter verringert, bis die Box nicht mehr auf der Kreisbahn gehalten wurde. Vor und nach der Messung lag die Box ach auf dem Boden (X-Achse fast parallel zur Erdoberäche). { Unten: Die Messdaten wurden geglättet, dann wurde im Bereich der Rotation mit relativ konstanter Geschwindigkeit eine Gerade gefittet, deren Steigung auf 0 fixiert wurde. a_Z ist während der horizontalen Rotation nahezu senkrecht zur Erdbeschleunigung und kann daher direkt am Schnittpunkt der Fitgerade mit der Beschleunigungsachse abgelesen werden. Hier ergab sich die Zentripetalbeschleunigung $a_Z \approx -30 \text{ m/s}^2$, woraus die Kreisfrequenz zu $\omega \approx 5.5 \text{ s}^{-1}$ berechnet werden kann.

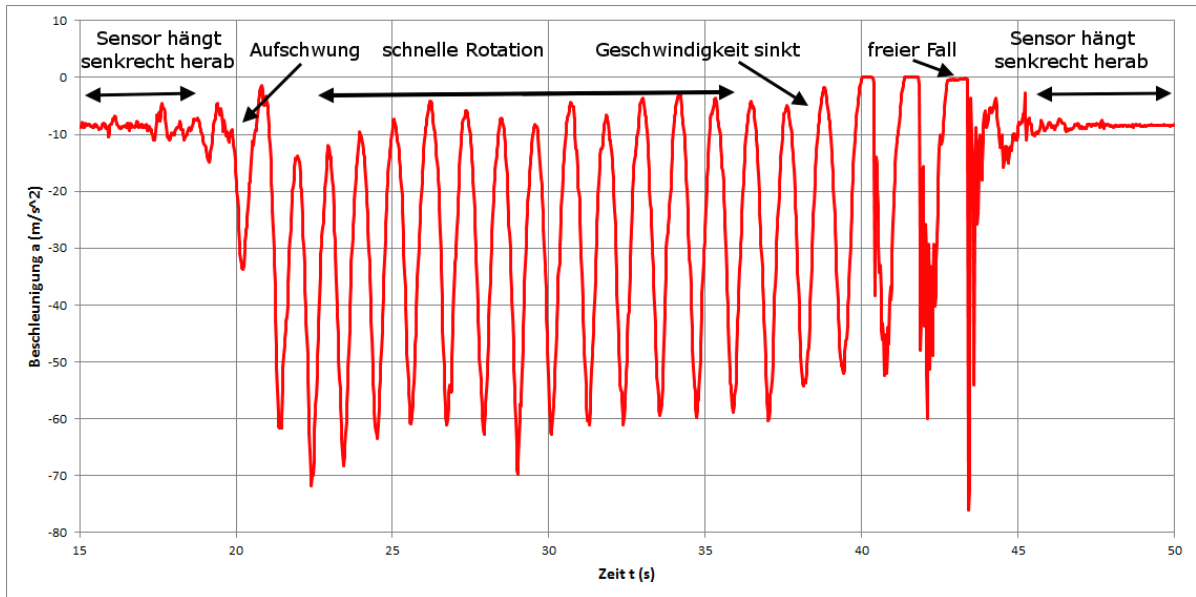


Abbildung 65: Messung der Beschleunigung in der radialen Richtung (positive X-Achse zeigt stets vom Kreismittelpunkt weg) bei einer vertikalen Kreisbewegung mit $r = 1$ m. Die zunächst konstant hohe Rotationsgeschwindigkeit wurde langsam verringert, bis die Kraft im höchsten Punkt der Kreisbahn nicht mehr ausreichte, um die Box auf der Kreisbahn zu halten. Für einen kurzen Moment befindet sich die Box dann im freien Fall, weswegen der Sensor im Bezugssystem der Box eine Beschleunigung von $a = 0 \text{ m/s}^2$ registriert. Zur Vereinfachung wird die Winkelgeschwindigkeit der Kreisbewegung während der Rotation als konstant betrachtet. Da die Erdbeschleunigung hier nur in zwei Punkten senkrecht zur Zentripetalbeschleunigung steht, oszilliert die gemessene Beschleunigung um den eigentlichen Wert $a_Z \approx 32 \text{ m/s}^2$, wobei als Amplitude der Wert $1g$ erwartet wurde. Durch die Zugbewegung der Hand, die die Kreisbewegung aufrecht erhält, werden allerdings zusätzliche Beschleunigungen hervorgerufen, die hier anhand der größeren Amplitude der Oszillation sichtbar werden.

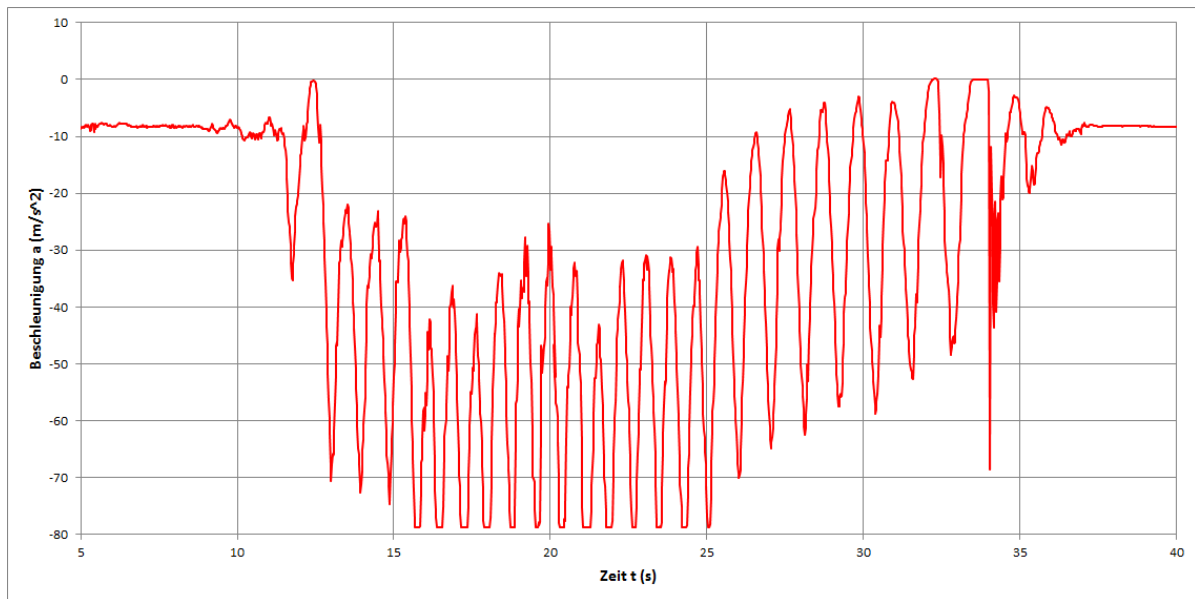


Abbildung 66: Messung der Beschleunigung in der radialen Richtung (positive X-Achse zeigt stets vom Kreismittelpunkt weg) bei einer vertikalen Kreisbewegung mit $r = 1$ m mit sehr großer Rotationsgeschwindigkeit. Da die Zentripetalbeschleunigung mit steigender Rotationsgeschwindigkeit ebenfalls steigt, überschreitet die radiale Gesamtbeschleunigung in ihren Extremwerten den maximalen Messbereich des Sensors, der $\pm 8g$ umfasst.



Abbildung 67: Versuchsanordnung zur Messung der Zentripetalbeschleunigung bei vertikaler Rotation mit einer ausgebauten Fahrradfelge. Die Sensorbox wird möglichst weit außen so fixiert, dass eine der Achsen des Sensors in radialer Richtung liegt. Durch Antreiben der Felge mit einem Motor konnte eine konstante Zentripetalbeschleunigung erreicht werden. Diese Messung kann jedoch auch sehr gut genutzt werden, um Formel 9 quantitativ zu überprüfen.

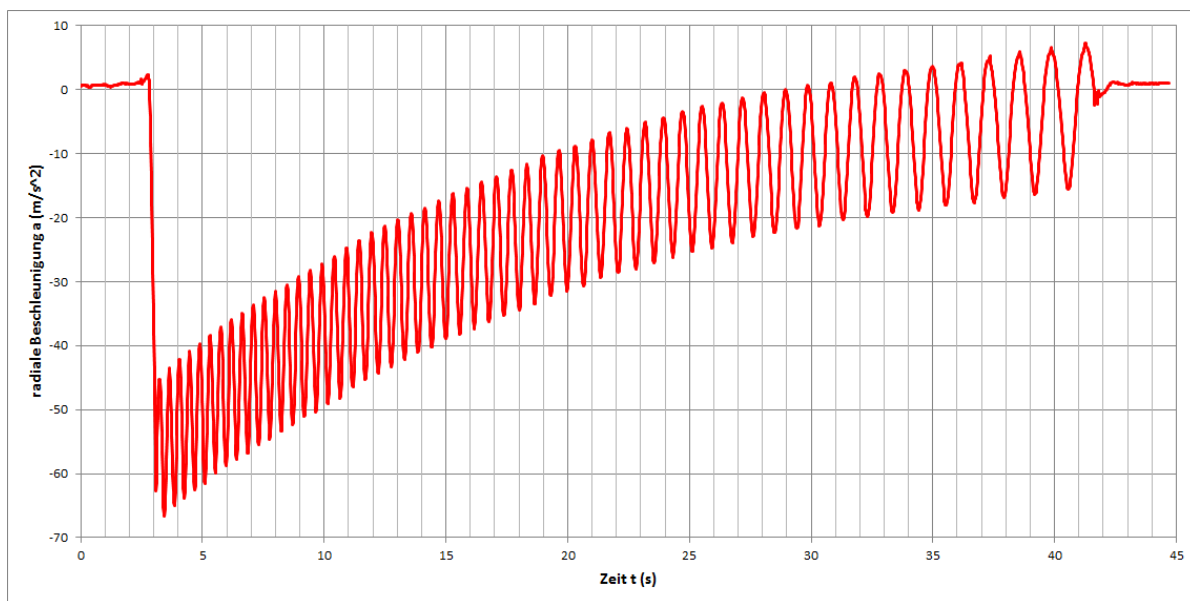


Abbildung 68: Messung der Radialbeschleunigung bei einer vertikalen Kreisbewegung einer Fahrradfelge mit $r = 0.25$ m. Die Bewegung ist gedämpft, sodass die Zentripetalbeschleunigung exponentiell abnimmt. Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Messungen oszilliert die Beschleunigung hier mit einer Amplitude von etwa $1g$, da im untersten bzw. obersten Punkt der Rotation der Betrag der Radialkomponente um die Erdbeschleunigung verringert bzw. vergrößert wird. Eine Oszillation um einen konstanten Wert könnte durch Antreiben der Fahrradfelge mit einem Motor erreicht werden.

Die vertikale Rotation an einer Fahrradfelge liefert sehr saubere Messergebnisse (Abbildung 68). Die sonst oft unerwünschte Reibung kann hier genutzt werden, um die Formel für die Zentripetalbeschleunigung quantitativ zu überprüfen, da sich aus der Messung verschiedene Rotationsfrequenzen und damit auch verschiedene Zentripetalbeschleunigungen ergeben. Zur Auswertung werden an vier Punkten die Umlaufzeit T und die zugehörige Zentripetalbeschleunigung a_Z abgelesen. Aus T wird ω berechnet und in Formel 9 eingesetzt. Die so berechnete Zentripetalbeschleunigung wird mit dem Messwert verglichen. Das Ergebnis für eine beispielhafte Auswertung ist in Tabelle 7 gezeigt. Alternativ könnten die Frequenzen beispielsweise auch in Origin durch Kurzzeit-Fouriertransformation (STFT) ermittelt werden. Um physikalische Vorgehensweisen einzüben, bietet es sich an dieser Stelle an, dass die Schüler anhand der in Tabelle 7 dargestellten Werte den funktionellen Zusammenhang überprüfen. Sie tragen dazu die Zentripetalbeschleunigung einmal gegen die Kreisfrequenz und einmal gegen das Quadrat der Kreisfrequenz auf. Aus den sich ergebenden Kurven, die in Abbildung 69 gezeigt sind, wird klar, dass der Zusammenhang die Form $a_Z \propto \omega^2$ haben muss.

Aus der Messung einer horizontalen Rotation mit der Fahrradfelge (Abbildung 71) ist die momentane Zentripetalbeschleunigung deutlich einfacher abzulesen als aus der Messung der vertikalen Rotation. Die Kreisfrequenz kann jedoch nicht aus der Messung abgelesen werden, weswegen sie anderweitig bestimmt oder durch einen Antrieb mit einem Motor konstant gehalten werden muss, um weitere Berechnungen vornehmen zu können. Die Messung könnte jedoch beispielsweise genutzt werden, um die an der Felge auftretende Reibung zu bestimmen, indem mit Origin eine exponentielle Funktion an die Kurve gefittet wird. Aus den Fitparametern ergibt sich dann die Dämpfungskonstante.

Tabelle 7: Werte zur Überprüfung von Formel 9. Der Abstand des Sensors vom Radmittelpunkt betrug $r = 0.25$ m. Die Werte für a_Z und T wurden aus Diagramm 67 abgelesen. Der Vergleich zeigt, dass der Betrag der gemessenen Werte systematisch kleiner ist als die berechneten Werte, wobei die Abweichung bei großen Rotationsgeschwindigkeiten größer ist als bei kleinen. Ein Grund könnte die Unwucht sein, die durch ein fehlendes Gegengewicht zur Sensorbox entsteht.

t [s]	T [s]	$\omega = 2\pi/T$ [s^{-1}]	$a_Z = \omega^2 r$ [m/s^2]	$ a_Z $ (Messung) [m/s^2]
4	0.41	15.3	61.1	54.3
14	0.56	11.2	32.7	28.8
24	0.80	7.9	16.0	15.0
34	1.10	5.7	8.5	7.8

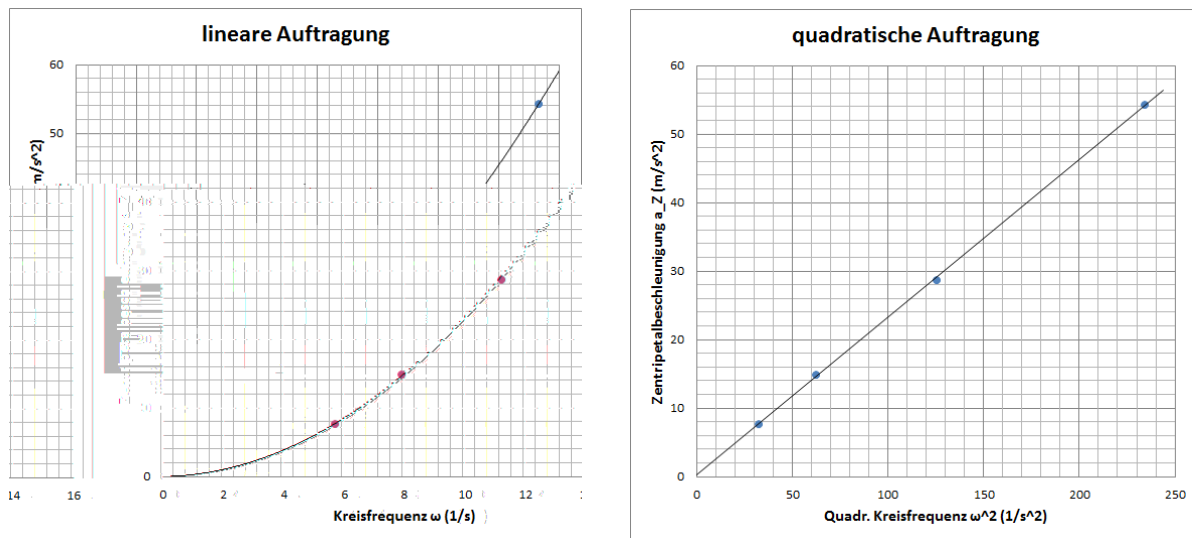


Abbildung 69: Auftragung der Zentripetalbeschleunigung gegen die Kreisfrequenz ω (links) und gegen das Quadrat der Kreisfrequenz ω^2 (rechts) mit den Messwerten nach Tabelle 7. Aus den beiden Diagrammen wird der quadratische Zusammenhang deutlich, da sich bei der quadratischen Auftragung eine Gerade ergibt, während bei der linearen Auftragung ein nichtlinearer Zusammenhang deutlich wird. Anhand solcher Vergleiche können physikalische Vorgehensweisen gewählt werden.

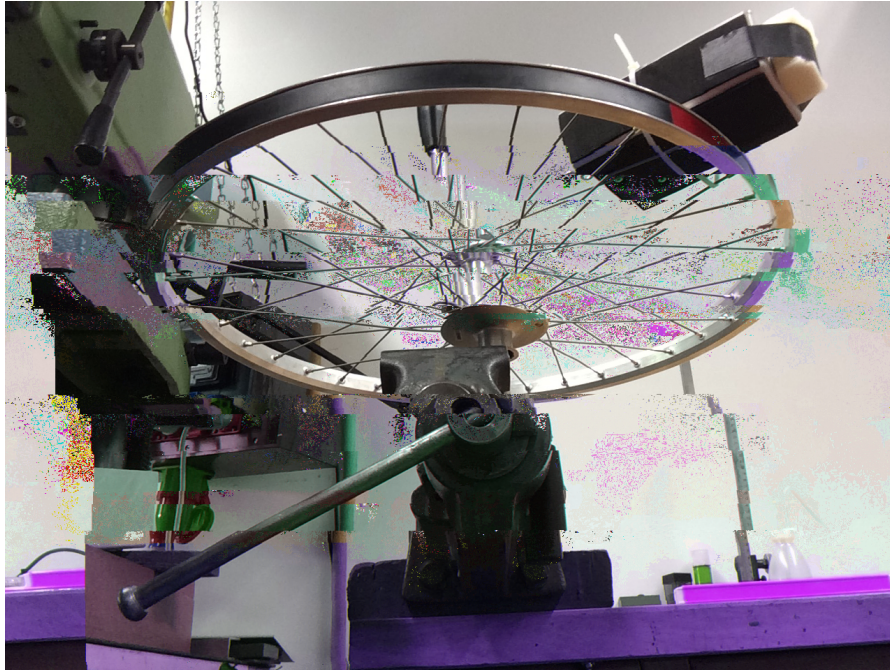


Abbildung 70: Versuchsanordnung zur Messung der Zentripetalbeschleunigung bei horizontaler Rotation mit einer ausgebauten Fahrradfelge. Die Felge sollte mit einer Wasserwaage austariert werden, bevor die Messung begonnen wird, da andernfalls auch Oszillationen um den momentanen Wert der Zentripetalbeschleunigung zu sehen sind.

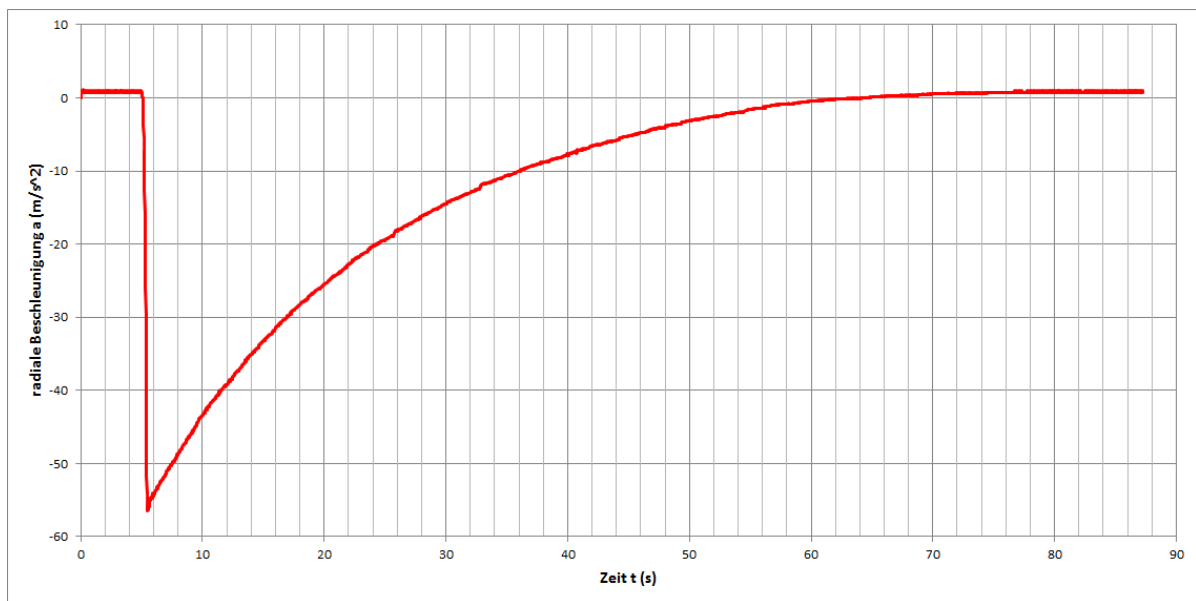


Abbildung 71: Messung der Radialbeschleunigung bei einer horizontalen Kreisbewegung einer Fahrradfelge mit $r = 0.25 \text{ m}$. Die Bewegung ist gedämpft, sodass die Zentripetalbeschleunigung exponentiell abnimmt.

5.3. Geschwindigkeitsmessung am Fahrrad

An vielen Fahrrädern findet man heutzutage kleine Fahrradcomputer, die Informationen zur momentanen Geschwindigkeit, zur zurückgelegten Strecke, der Maximalgeschwindigkeit etc. aufzeichnen und dem Fahrer auf einem Display anzeigen. Die Messtechnik, die der Datenerfassung zugrunde liegt, ist sehr einfach und kann auch von den Schülern ohne Weiteres verstanden werden; nicht nur aus diesem Grund bietet es sich an, einen Datenlogger zu nutzen, um den Geschwindigkeitsverlauf bei einer Fahrradfahrt aufzunehmen.

Sowohl ein Dynamo als auch die Verkabelung eines Tachometers mit Reedkontakt sind geeignet, um die Messung durchzuführen. Im hier gezeigten Beispiel wurde der Reedkontakt eines Tachometers als Grundlage für einen Frequenzzähler genutzt, um die Geschwindigkeit zu bestimmen { dies ist auch die Technik, die viele Fahrradcomputer nutzen. In Abbildung 72 ist das grundlegende Messprinzip gezeigt. Ein Reedkontakt ist ein Schalter, der durch einen Magneten ausgelöst wird, wenn dieser sich am Kontakt vorbei bewegt. Um aus den Signalen dieses Schalters die Geschwindigkeit des Fahrrads zu bestimmen, wird lediglich noch eine Angabe zur Reifengröße benötigt, da der Schalter pro Umdrehung des Reifens genau einmal ein Signal liefert. Die Signale des Reedkontaktes können an den meisten Tachometer-Befestigungen direkt abgegriffen werden, indem Krokodilklemmen an die Metallkontakte geklemmt werden. Ist dies nicht möglich oder zu instabil, können die beiden Kabel des Reedkontaktes auch direkt mit einer Schraubklemme an die Sensorbox angeschlossen werden. Eines der Kabel wird am Arduino an die Masse (GND) angeschlossen, das andere an den digitalen Eingang am Pin D2 (Achtung: Die Pins werden von 0 an gezählt, D2 ist also der dritte Pin!). Hierfür bietet sich erneut ein kleines Aufsteckboard mit Tastern für Messstart und -stop an; eine entsprechende Bauanleitung ist auf der Projektwebseite zu finden.

Standardmäßig ist ein Messintervall von fünf Sekunden eingestellt. Die Sensorbox zählt, wie oft innerhalb dieses Messintervalles der Kontakt geschlossen wurde, weil der Magnet sich am Reedkontakt vorbeibewegt hat (n_{Signal}); der Reedkontakt ist dabei wie ein Taster an das Arduino-Board angeschlossen, der bei jeder Umdrehung einmal gedrückt wird. Sowohl dieser Wert (n_{Signal}) als auch die mit der Angabe des Reifenradius r daraus direkt berechnete Strecke s (in m) und Geschwindigkeit v (in m/s) innerhalb dieses Zeitintervalls werden in der Messdatei gespeichert und können anschließend ausgewertet werden.

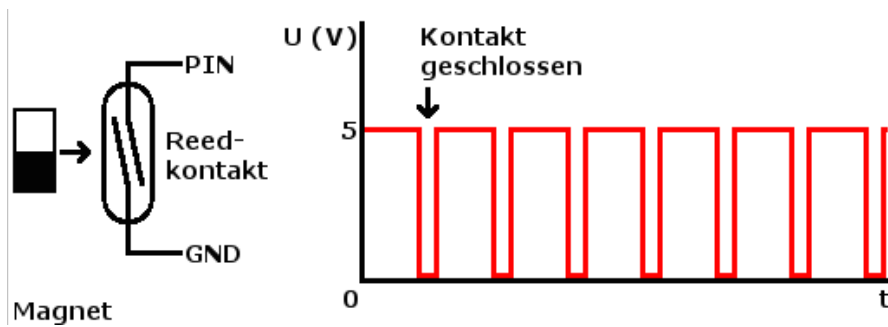


Abbildung 72: Oben links: Befestigung eines Reedkontakts und des zugehörigen Magneten am Vorderrad eines Fahrrads. { Oben rechts: Abgreifen der Signale des Reedkontaktes an der Befestigung des Tachometers mit Krokodilklemmen. Alternativ können die Signale auch direkt am Kabel des Reedkontaktes mit Hilfe von Schraubklemmen abgegriffen werden. { Unten: Skizze des Verlaufs des zugehörigen Messsignals bei einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit. Wird der Kontakt durch den sich vorbeibewegenden Magneten geschlossen, fällt die Spannung am digitalen Eingang (PIN) von 5 V auf 0 V (GND). Diese Änderung kann auf dem Arduino-board als einfacher Frequenzzähler genutzt werden.

Die zurückgelegte Strecke innerhalb des Zeitintervalls wird dabei berechnet, indem der Umfang des Rads mit der Anzahl der Umdrehungen multipliziert wird:

$$s = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n_{\text{Signal}}. \quad (10)$$

Die durchschnittliche Geschwindigkeit ergibt sich dann, indem diese Strecke durch die dafür benötigte Zeit t_{Mess} geteilt wird, die gerade der Länge eines Messintervalls, also 5 s entspricht:

$$v = \frac{s}{t_{\text{Mess}}} \quad (11)$$

Aus diesen Formeln wird deutlich, dass ein zu kurzes Messintervall dafür sorgt, dass nur sehr wenige Umdrehungen gemessen werden können, die Messung wird also starke Schwankungen zeigen. Ein zu langes Zeitintervall hingegen sorgt dafür, dass den tatsächlichen Geschwindigkeiten keine Bedeutung zukommt, da jeweils nur die Durchschnittsgeschwindigkeit innerhalb des Messintervalls berechnet werden kann. Ein Messintervall von fünf Sekunden hat sich daher als guter Mittelwert erwiesen.

Das Diagramm in Abbildung 73 zeigt beispielhaft die Messung der Geschwindigkeit während einer Radfahrt in der Stadt. Insbesondere im Zusammenhang mit Bewegungsdiagrammen bietet sich eine detaillierte Auswertung an, die anhand von Leitfragen vorgenommen werden kann. Beispiele für solche Leitfragen sind:^[2, S. 363]

- In welchen Zeitintervallen wurde beschleunigt?
- Zu welchem Zeitpunkt wurde eine Kreuzung erreicht? Wie lange dauerte die Rotphase der Ampel?
- Wie groß war die Höchstgeschwindigkeit?
- Welche Strecke wurde insgesamt zurückgelegt?

Wenn die Schüler die Messung selbst aufnehmen, können sie den Streckenverlauf anhand der Messdaten beschreiben und präsentieren, was beispielsweise ein Thema für eine GFS³¹ sein könnte. Hier sind auch Videoaufnahmen der Messung zum Vergleich sinnvoll.

³¹Gleichwertige Feststellung von Schülerleistungen, siehe Fußnote 1.

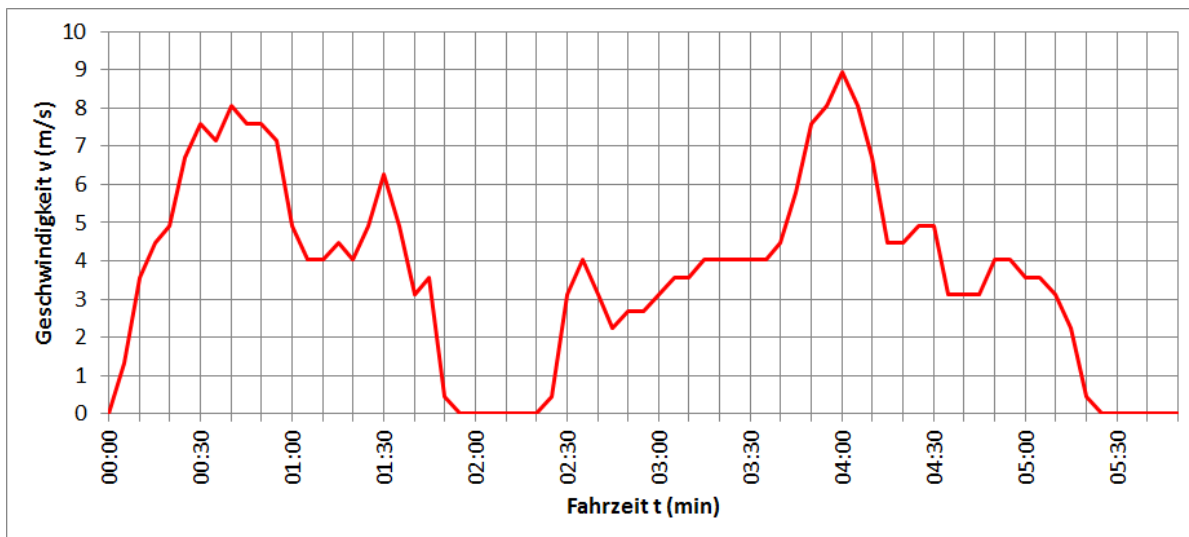


Abbildung 73: Diagramm des Geschwindigkeitsverlaufs während einer Fahrradfahrt durch die Stadt. Die Phasen der Fahrt (Anfahren, Bremsen, Stehen z.B. an einer Ampel) können anhand des Geschwindigkeitsverlaufes leicht interpretiert werden. Das Diagramm wurde mit Excel erstellt.

6. Ausblick

Die Möglichkeiten, die Arduino-Sensorboxen bieten, sind mit den in den vorangegangenen Kapiteln gezeigten Experimentieranschlägen bei Weitem nicht ausgeschöpft. Einerseits gibt es sehr viele Sensoren, die zwar hier nicht genutzt wurden, ohne großen Aufwand jedoch für weitere Experimente verwendet werden könnten. Dazu gehören beispielsweise Dehnungsmessstreifen, Strahlungssensoren oder Farbsensoren. Auch Messungen von Magnetfeldern sind mit Hallsensoren einfach umsetzbar { die Hallsensoren, die in Smartphones verbaut sind, sind auf das Erdmagnetfeld spezialisiert und haben daher keinen großen Messbereich, im Elektronik-Fachhandel sind jedoch auch Hallsensoren mit deutlich größeren Messbereichen erhältlich.

Andererseits gibt es noch ein vollkommen neues Anwendungsfeld, das in dieser Arbeit nicht behandelt wurde, mit Arduino aber einfach umgesetzt werden kann: Digitale Steuerungen. Arduino-Boards sind nicht nur zur Auslese von Sensormesswerten geeignet, sondern können beispielsweise auch zur Steuerung von Motoren, Spannungen bis 5 V, etc. genutzt werden. Damit öffnet sich ein großes Spektrum weiterer Anwendungen. Auch zur Realisation digitaler Schaltungen kann Arduino genutzt werden.

In den nächsten Jahren wird die bereits jetzt sehr große Arduino-Community voraussichtlich ebenfalls weiter wachsen, wodurch noch mehr Bibliotheken zur Verfügung gestellt werden, mit denen eine einfache Benutzung von Sensoren und Steuerungen möglich ist. Da es sich bei den Arduino-Boards um Open Hardware handelt, wird es in den nächsten Jahren vermutlich sogar zu noch günstigeren Konditionen kommen, als es bereits jetzt der Fall ist, wodurch Experimentiermöglichkeiten im Klassensatz begünstigt werden.

Neben Arduino hat auch die Pro Lab-Software für die nächsten Jahre Bestand. Insbesondere wenn man bereits über eine Installation von Pro Lab-Expert verfügt, kann diese noch sehr lange weiter verwendet werden, auch wenn die Hersteller keine Änderungen mehr an der Software vornehmen sollten. Da die kompilierten Programme zudem vollständig ohne Pro Lab-Installation lauffähig sind, spielt der Fortbestand von Pro Lab eine eher untergeordnete Rolle. Auch die Verwendung alternativer Systeme zur Messdatenverarbeitung wäre denkbar und sorgt für eine größere Unabhängigkeit vom Hersteller der Pro Lab-Software; solche Software müsste dann jedoch wieder selbst programmiert werden, beispielsweise in Python, wodurch die bestechende Einfachheit der Programmierung deutlich eingeschränkt wurde.

Es besteht die Hoffnung, dass es nicht bei den hier gezeigten Messprogrammen und Sensoren bleibt, sondern sich weitere bastelbegeisterte und interessierte Lehrern, die ihre Experimentierideen teilen. Wenn hieraus auch Pro Lab-Programme (oder auch andere, noch bessere Auswertungsprogramme) entstehen, die von anderen Lehrern genutzt werden können, ist ein weiteres Ziel dieser Arbeit erfüllt.

7. Zusammenfassung und Fazit

In den vergangenen Kapiteln wurden viele verschiedene Experimente gezeigt, die zur Demonstration vor Schülern oder auch zur Durchführung durch die Schüler selbst geeignet sind. Dabei wurde deutlich, dass die Arduino-Sensorboxen sich für viele Messaufgaben sehr gut eignen und jeder, der über handwerkliche und elektronische Grundkenntnisse verfügt, sie günstig und mit wenig Aufwand selbst bauen kann. Unter Zuhilfenahme der auf der Projektwebseite bereitgestellten Mess- und Darstellungsprogramme ist auch das Messen und Auswerten sehr einfach umzusetzen. Dies bietet sich insbesondere für Lehrer an, die die Experimente für ihren Unterricht mit einer Sensorbox einfacher von zu Hause aus vorbereiten können, da ihnen große Aufbauten mit viel Stativmaterial und komplizierteren Messgeräten erspart bleiben; gleichzeitig werden insofern fachdidaktische Ansprüche erfüllt, als die Schüler nicht vom Wesentlichen der Versuche abgelenkt werden und sich darauf konzentrieren können, neue physikalische Erkenntnisse zu gewinnen. Die Sensorboxen sind, sobald sie einmal zusammengebaut wurden, schnell einsatzbereit und einfach zu handhaben, was gerade in Zeiten zunehmender Arbeitsbelastung für Lehrer ein großer Vorteil ist.

Aus Gesprächen mit verschiedenen erfahrenen Lehrern kann ich die Schlussfolgerung ziehen, dass die Einfachheit der Messaufbauten und der Messsysteme besticht und großes Potential besitzt; auch die Vielfalt möglicher Anwendungen ist ein großer Vorteil, der im Rahmen dieser Arbeit nur zu einem kleinen Teil ausgenutzt werden konnte. Insbesondere der Nachbau der Sensorboxen durch den Lehrer selbst nutzt auch der eigenen Weiterbildung im Bereich der Elektronik, die im Lehramtsstudium kaum eine Rolle spielt. Die Schwingungsmessungen mit dem Ultraschall-Abstandssensor wurden an einem Aufbau vorgenommen, der von Herrn Dr. Erwin-Klaus Haberkant für die Physikdidaktik-Seminare der Universität Heidelberg entwickelt und zur Verfügung gestellt wurde. Sowohl Herr Haberkant als auch ich hatten bei der Kombination aus der Sensorbox und diesem fest montierten Aufbau der Schiene für den schwingenden Experimentierwagen (Abbildung 40) den Eindruck einer sehr sinnvollen Anordnung für den Unterricht. Solche vorgefertigten Aufbauten, die in einem Stück vom Schrank genommen werden können und daher bei der Unterrichtsvorbereitung nicht mehr viel Zeit in Anspruch nehmen, bieten sich im Zusammenhang mit den von mir entwickelten Sensorboxen sehr an.

Über den Test mit Lehrern hinaus wurden die Sensorboxen mit einem Luftdrucksensor und einem Beschleunigungssensor im Juli 2015 auch mit einer Kleingruppe von sieben Schülern eines vierstündigen Physikkurses der Jahrgangsstufe 11 des Hohenstaufen-

Gymnasiums in Eberbach getestet. Die Schüler erhielten dabei eine detaillierte Anleitung zur Bedienung der Sensorboxen und einige Leitfragen, anhand derer Experimente durchgeführt und anschließend mit Microsoft Excel ausgewertet werden sollten (siehe Anhang A). Neben zwei vorgegebenen Experimenten { der barometrischen Höhenmessung des Schulgebäudes und der Beschleunigungsmessung bei horizontaler bzw. vertikaler Rotation der Sensorbox { durften die Schüler dabei auch eigene Messideen umsetzen. Nachdem das Pflichtprogramm erfüllt war, wollten sie beispielsweise noch einen freien Fall der Sensorbox aus dem Fenster im zweiten Stockwerk messen. Das zugehörige Diagramm ist in Abbildung 74 gezeigt; diese Messung nutzten die Schüler dann ohne tiefere Hilfestellungen, um die Höhe des Fensters über dem Schulhof zu berechnen, indem sie die für den freien Fall benötigte Zeit aus dem Diagramm ablasen ($t = 1.18\text{ s}$) und in die Formel $s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$ einsetzten. Als Fallstrecke ergab sich $s = 6.83\text{ m}$; mit dem Metermaß wurde die Höhe des Fensters über dem Schulhof zu 7.3 m bestimmt, wobei die Schüler die Höhe, in der die Box aufgefangen wurde, nicht berücksichtigten. Das Diagramm der Luftdruckmessung wurde bereits in Abbildung 28 in einem anderen Zusammenhang gezeigt. Hier ergab sich eine Höhendifferenz von $h = 10.9\text{ m}$, mit dem Maßband stellten die Schüler fest, dass die tatsächliche Höhe $h = 10.3\text{ m}$ beträgt. Auch hier wurde die Haltehöhe der Sensorbox nicht berücksichtigt.

Nach Ende der Experimentiereinheit wurden die Schüler in einer Evaluation unter anderem zum Schwierigkeitsgrad der Experimente, dem Umgang mit den Sensoren und der Auswertung mit Excel befragt (siehe Anhang B). Darüber hinaus sollten sie beispielsweise angeben, ob das Durchführen der Experimente ihnen Spaß gemacht hat, die Versuche einen Alltagsbezug besitzen, Eigeninitiative und die Umsetzung eigener Ideen ermöglichen und ihnen experimentelle Freiheiten lassen. Die Auswertung der Evaluationsbögen ergab, dass die Schüler durchweg Freude am Experimentieren hatten und begeistert davon waren, dass sie selbst Dinge ausprobieren und ihre eigenen Messideen umsetzen konnten. Die größte Schwierigkeit machte die Auswertung mit Excel, da die Schüler mit dem Programm bisher nur selten oder gar nicht gearbeitet hatten, was mich sehr überraschte, da ich Excel zuvor für ein Standard-Programm zur Datenanalyse in Schulen gehalten hatte. Ein weiterer Test mit einem Pro Lab-Auswertungsprogramm konnte aus Zeitgründen leider nicht mehr durchgeführt werden; ich erwarte jedoch eine deutliche Verbesserung gegenüber Excel, da in einem Pro Lab-Programm die Messdaten automatisch in ein Diagramm gezeichnet werden können, in dem dann auch direkt gezoomt werden kann, wodurch die Auswertung der Messungen den Schülern leichter

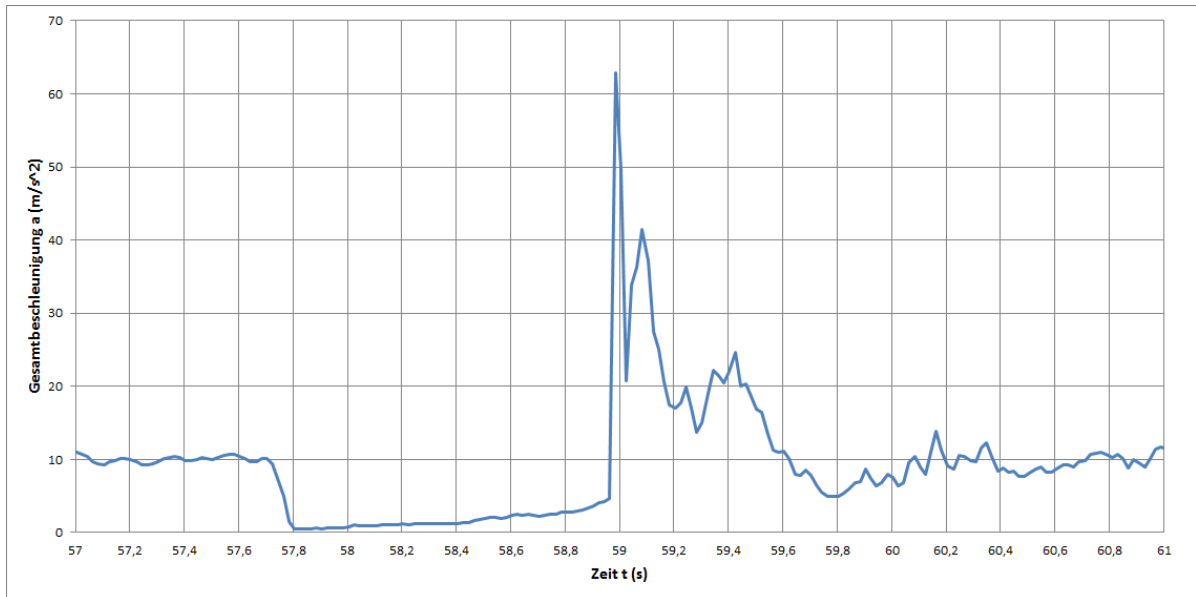


Abbildung 74: Beschleunigungsdiagramm eines freien Falls, das von den Schülern der HSG im Rahmen eines Tests der Sensorbox aufgenommen wurde. Aus der Fallzeit berechneten die Schüler die Höhe des Fensters im zweiten Stockwerk über dem Schulhof; die berechnete Fallstrecke ($s = 6.83 \text{ m}$) wurde mit einem Maßband überprüft. Die tatsächliche Höhe betrug $h = 7.3 \text{ m}$, wobei die Aufhängöhe der Sensorbox nicht berücksichtigt wurde.

fallen sollte; ebenso kann die Höhenferenz bei der Luftdruckmessung durch Eingabe einer Formel unmittelbar angezeigt werden (siehe Kapitel 3.5).

Für die im Anhang gezeigten Anleitungen konnte ich aus dem Feedback der Schüler und durch Beobachtung ihres Verhaltens beim Auswerten schlussfolgern, dass einige praktische Hinweise zu den Experimenten fehlten. Dazu gehört einerseits, dass eine maximale Rotationsgeschwindigkeit bei Messungen der Zentripetalbeschleunigung vorgegeben werden sollte, da die Schüler in ihrem Eifer die Sensorbox so schnell rotieren ließen, dass der Messbereich des Beschleunigungssensors überschritten wurde (vergleiche Abbildung 66). Für die Luftdruckmessung sollte darauf hingewiesen werden, dass der Sensor stets in der gleichen Höhe am Körper gehalten werden sollte, um ein genaueres Ergebnis zu erhalten. Auch beim freien Fall wurden die Abwurfhöhe und die Aufanghöhe nicht klar markiert, sodass ein Vergleich der Messwerte mit den tatsächlichen Werten erschwert wurde.

Die Ergebnisse, die sich aus dem Test mit dieser Kleingruppe ergeben haben, können zwar nicht als repräsentativ betrachtet werden; sie zeigen aber, dass das eigenständige Experimentieren ohne zusätzliches Einwirken durch den Lehrer den Schülern viel Freude macht, dass die Experimente einen hohen Alltagsbezug aufweisen und den Schülern insofern experimentelle Freiheiten bieten, da nicht vorgeschrieben ist, welche Messungen gemacht werden müssen. Ihre eigenen Ideen konnten die Schüler daher ohne Weiteres umsetzen. Die Kritik umfasste insbesondere die erwähnte Auswertung mit Excel und einige wenige Aspekte der Sensorboxen, die noch verbesserungswürdig sind. Dazu gehören zum einen herausstehende Teile wie beispielsweise der Schalter zum Ein- und Ausschalten der Spannungsquelle, da diese den Schülern insbesondere bei den Wurfbewegungen als störend auftraten. An diesem Problem sollte daher in künftigen Aufbauten gearbeitet werden. Zum anderen fiel auch die schlechte Sichtbarkeit der Statusleuchten bei dickerer Polsterung im Test negativ auf. Durch größere Leuchtdioden und Bohrlocher mit etwas größerem Durchmesser ließe sich dieses Problem wohl leicht lösen. Insgesamt wünschten die Schüler sich, dass weitere Sensorboards entwickelt werden, mit denen sie noch mehr { auch unterrichtsbezogene { Messungen durchführen können. Das Schülerinteresse wurde offensichtlich geweckt bzw. gesteigert, womit eines der zentralen Ziele dieser Arbeit erfüllt zu sein scheint.

Die in dieser Arbeit sehr ausführlich diskutierten Demonstrationsexperimente mit Pro Lab-Programmen konnten leider in der praktischen Anwendung mit Schülern nicht getestet werden. Hier zeigte sich aber insbesondere bereits während der Entwicklung und bei Testmessungen, dass die Experimente oft zwar zum Zeigen physikalischer Ab-

hängigkeiten geeignet sind, jedoch keine Präzisionsmessungen erlauben. Für viele der typischen Schulexperimente kann das jedoch bereits in ausreichendem Maße den experimentellen Anspruch erfüllen, denn gerade Messungen der „realen“ Welt bieten auch die Möglichkeit, mit den Schülern über idealisierte, künstlich geschaffene Experimentierumgebungen zu sprechen und gemeinsam zu erarbeiten, woher Messfehler kommen und ob bzw. wie sie reduziert werden können.

Zusammenfassend zeigt sich, dass Physik keineswegs das sein muss, was nie gelingt, vor allem dann, wenn hinreichend einfache Messsysteme verwendet werden, die auch den Schülern die Möglichkeit bieten, ihre eigenen Ideen umzusetzen, und die den positiven Nebeneffekt haben, dass die nötige Vorbereitungszeit für die Lehrer deutlich reduziert wird. Mit folgendem Kommentar eines Schülers aus der Evaluation möchte ich die vorliegende Arbeit abschließen:

„Machen Sie weiter so { das Konzept ist super!“

Literatur

- [1] BADER, F. und F. DORN: $\frac{1}{2}$ (11/12). Schroedel, Braunschweig, 2010.
- [2] BADER, F. und F. DORN: $\frac{1}{2}$ (11/12). Schroedel, Braunschweig, 2013.
- [3] DEMTRÖDER, W.: *Energie und Impuls*. Springer, Berlin { Heidelberg, 5., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage, 2008.
- [4] DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT E.V.: *Physik*. <http://www.weltderphysik.de/thema/hinter-den-dingen/mit-isaac-newton-in-der-achterbahn/>, Abruf 03.07.2015.
- [5] ENGELN, K. und M. EULER: *Physik Journal*, 3(11):45{48, 2004.
- [6] HARLEN, W.: *Effektivität der Physik*. Scottish Council for Research in Education, Edinburgh, 1999.
- [7] HEINTZ, V., A.-M. MARTENSSON PENDRILL, A. SCHMITT und K. WENDT: *The Physics Teacher*, 40(2):90{95, 2009.
- [8] KARVINEN, K., T. KARVINEN und V. VALTOKARI: *Physik*. dpunkt-Verlag, Heidelberg, 1. Auflage, 2015.
- [9] KIRCHER, E., R. GIRWIDZ und P. HÄUSSLER: *Physik*. Springer Spektrum, Berlin { Heidelberg, 3. Auflage, 2015.
- [10] KORVINK, J. G. und O. PAUL (Herausgeber): *Energie und Impuls*. Norwich, NY, U. S. A., 2006. William Andrew Publishing.
- [11] KULTUSMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG: *Bildungsstandards*. http://www.bildung-staerkt-menschen.de/service/downloads/Bildungsstandards/Gym/Gym_Ph_bs.pdf, Abruf 22.06.2015.
- [12] LAERMER, F.: *Physik*. In: KORVINK, J. G. und O. PAUL [10], Seite 523.
- [13] MÜLLER, R.: *Physik*. Walter de Gruyter GmbH, Berlin { Boston, 1. Auflage, 2014.

- [14] SCHÜTTLER, M. und T. WILHELM: *F*. PhyDid B { Didaktik der Physik { Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der Physik, 2011.
- [15] SUFFI, R.: *B*. Sensors, 17(1):62{65, 2000.
- [16] TESCH, M. und R. DUIT: *E*. PhyDid B { Didaktik der Physik { Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der Physik, 2002.
- [17] TESCH, M. und R. DUIT: *E*. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften (ZfDN), 10:51{69, 2004.
- [18] VOGT, P. und J. KUHN: *A*. The Physics Teacher, 51(3):182{183, 2013.
- [19] VOGT, P. und J. KUHN: *A*. *E*. *E*. *A*. Frontiers in Sensors, 2, 2014.
- [20] WINKELMANN, J. und R. ERB: *D*. PhyDid B { Didaktik der Physik { Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der Physik, 2013.

Anhang

A. Aufgabenstellung für den Test der Sensorboxen

1 Barometrische Messung der Höhe des Schulgebäudes

Der Luftdruck ist abhängig von der Höhe, in der er gemessen wird. Druckmessungen können daher einfach genutzt werden, um Höhenunterschiede zu bestimmen.

Aufgabe: Benutzt die Sensorbox, um die Höhe eures Schulgebäudes zu bestimmen!

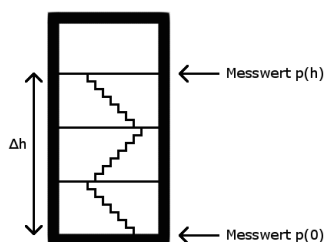


Abbildung 1: Skizze eines Gebäudes mit drei Stockwerken. Der Luftdruck am ersten Messpunkt (tiefstes Stockwerk) ist $p(0)$, der Luftdruck im höchsten Stockwerk ist $p(h)$. Dazwischen liegt die Höhendifferenz Δh .

Arbeitsschritte:

1. Nehmt die Sensorbox in Betrieb. Prüft zunächst, ob eine SD-Karte eingesteckt ist. Schaltet dann den Einschalter auf „POWER“. Die gelbe und rote Statusleuchte sollten nach kurzer Zeit aufleuchten. Sobald beide Leuchten ausgehen, ist die Box bereit für die Messung. Sollte die rote Leuchte an bleiben, müsst ihr die SD-Karte noch einmal überprüfen und die Box neustarten (Einschalter auf „OFF“, dann wieder auf „POWER“).
2. Begeht euch im Treppenhaus in das tiefstmögliche Stockwerk und startet die Messwertaufnahme. Drückt dazu mit einem dünnen Stift auf den Knopf „START“. Die gelbe Leuchte sollte nun in regelmäßigen Abständen aufleuchten – ein Aufleuchten bedeutet, dass ein Messpunkt erfasst wurde. Nehmt etwa 20 Messpunkte auf, bevor ihr euch nach oben bewegt.
3. Lauft jetzt die Treppe nach oben. Ihr könnt auch die Höhe der Zwischengeschosse bestimmen, wenn ihr dort erneut stehen bleibt und etwa zehn Messpunkte aufnehmt.
4. Wenn ihr oben angekommen seid, nehmt wieder etwa 20 Messpunkte auf. Dann könnt ihr die Messwertaufnahme beenden, indem ihr den Knopf „STOPP“ drückt. Beide Statusleuchten blinken zweimal in kurzen Abständen und bleiben dann aus. Schaltet jetzt die Sensorbox auf (Einschalter auf „OFF“ schieben).

5. Wertet eure Messung am PC aus. Kopiert dazu die letzte Datei auf der SD-Karte, die „P_LOG_XX.DAT“ heißt, auf den PC und öffnet sie mit Excel (XX sind fortlaufende Zahlen). Die SD-Karte und die Sensorbox bitte jetzt zurückgeben, damit die zweite Gruppe eine andere Messung ausprobieren kann.
6. Wählt die Spalten „t (ms)“ und „p (mbar)“ aus. Eine zweite Spalte kann man auswählen, wenn man beim Klicken auf der Tastatur „Strg“ gedrückt hält. Fügt ein Punktdiagramm ein (Punktdiagramm (XY) mit geraden Linien).
7. Lest jeweils den Druck in den Bereichen ab in denen er etwa konstant ist (siehe Beispielabbildung). Benutzt jetzt die barometrische Höhenformel, um die Höhendifferenz Δh zu bestimmen.

Für den Luftdruck gilt vereinfachend die barometrische Höhenformel:

$$p(h) = p(0) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta h}{h_S}\right)$$

mit $h_S = 8400$ m. Euer erster konstanter Luftdruckbereich liefert euch den Wert von $p(0)$. Eure weiteren Messwerte sind dann die Werte für $p(h)$.

Verständnisfragen:

- Wieso nimmt der Druck bei größeren Höhen ab und nicht zu?
- Kann man aus den Messwerten die durchschnittliche Geschwindigkeit in der Z-Richtung (nach oben) auf eurem Weg durch das Treppenhaus bestimmen? Wie?
- Wie sollte das Diagramm verlaufen, wenn ihr vom obersten Stockwerk aus nach unten laufen würdet?

Bitte füllt für jeden Versuch, den ihr durchgeführt habt, einen kurzen Evaluationsbogen aus. Das hilft mir dabei herauszufinden, ob die Messsysteme sinnvoll und verständlich sind, ob ihr gut damit zurecht gekommen seid, und ob die Messungen euch Spaß gemacht haben.

Vielen Dank für eure Zeit!

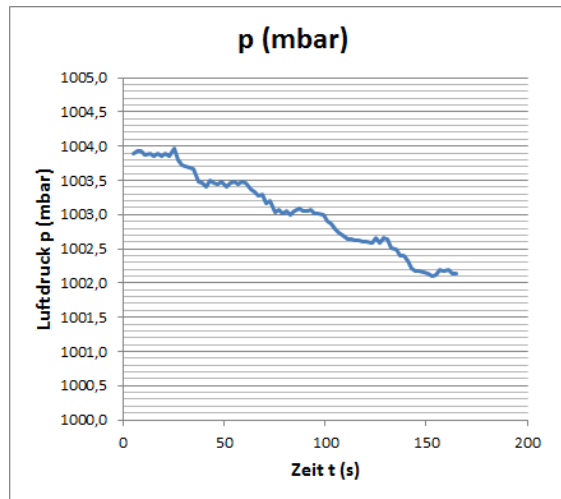


Abbildung 2: Beispielhafte Messung des Luftdruckverlaufs beim Treppensteigen in einem Gebäude mit fünf Stockwerken. In Bereichen etwa konstanten Luftdruckes wird der durchschnittliche Messwert abgelesen und notiert. Der erste konstante Bereich entspricht dem Luftdruck $p(0)$.

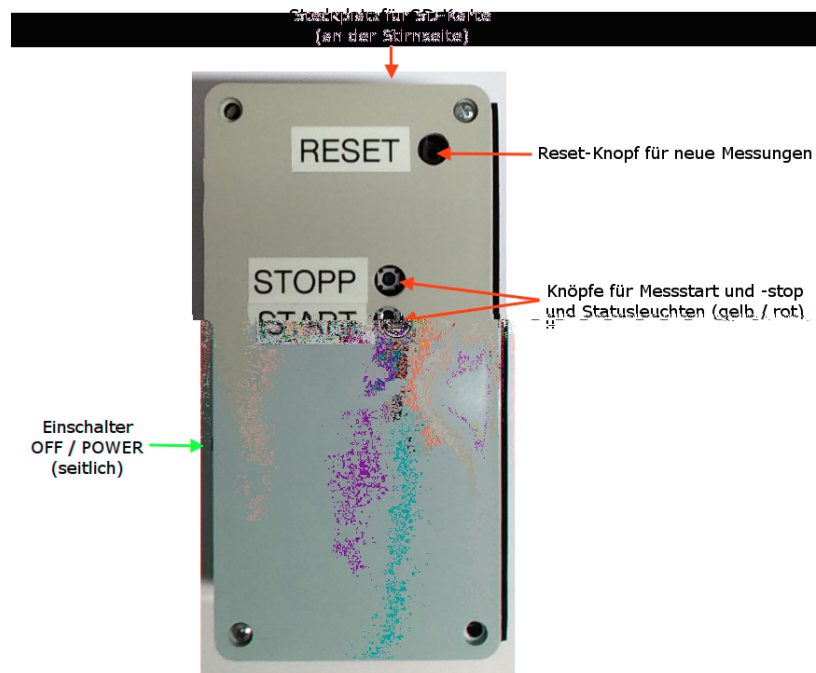


Abbildung 3: Sensorbox für die Messung des Luftdrucks. Die Box wird seitlich ein- und ausgeschaltet. Die SD-Karte zur Datenspeicherung wird an der oberen Stirnseite eingeschoben. Zum Beginnen und Beenden der Messung wird mit einem Stift der zugehörige Knopf betätigt. In den Löchern befinden sich auch die Statusleuchten.

2 Messung der Zentripetalbeschleunigung bei vertikalen und horizontalen Kreisbewegungen

Bei schnelleren Bewegungen auf einer Kreisbahn, z.B. im Karussell, spürt man als Mitfahrer eine Kraft, die vom Kreismittelpunkt nach außen drückt – die Zentrifugalkraft. Diese ist eine sogenannte Scheinkraft, die nach dem dritten Newtonschen Axiom – *actio = reactio* – auf den Passagier wirkt. Um auf der Kreisbahn zu bleiben, muss der Körper eine Beschleunigung, und deswegen auch eine Kraft erfahren, die zum Kreismittelpunkt hin wirkt – die Zentripetalkraft.

Aufgabe: Benutzt die Sensorbox, um die Zentripetalbeschleunigung bei einer horizontalen und einer vertikalen Kreisbewegung zu messen.

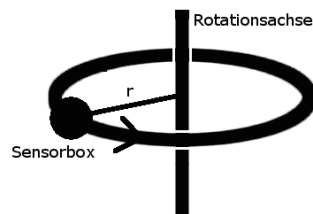


Abbildung 4: Skizze einer horizontalen Rotationsbewegung um eine feste Achse. Die Sensorbox wird mit Radius r um die Achse gedreht

Arbeitsschritte:

1. Nehmt die Sensorbox in Betrieb. Prüft zunächst, ob eine SD-Karte eingesteckt ist, polstert sie dann mit einem Stück Schaumstoff. Schaltet dann den Einschalter auf „POWER“. Die gelbe und rote Statusleuchte sollten nach kurzer Zeit aufleuchten. Sobald beide Leuchten ausgehen, ist die Box bereit für die Messung. Sollte die rote Leuchte an bleiben, müsst ihr die SD-Karte noch einmal überprüfen und die Box neustarten (Einschalter auf „OFF“, dann wieder auf „POWER“).
2. Wickelt die Sensorbox in Luftpolsterfolie, sodass die Öse mit der Angelschnur noch aus der Polsterung heraussteht. Klebt die Luftpolsterfolie mit Klebeband fest.
3. Stellt euch so auf, dass genug Platz um euch herum ist. Startet dann die Messwertaufnahme, indem ihr mit einem dünnen Stift ein Loch durch die Folie drückt und dann den Knopf „START“ betätigt. Die gelbe Leuchte sollte nun aufleuchten, das bedeutet, dass Messwerte erfasst werden.

4. Beginnt jetzt, die Sensorbox horizontal im markierten Radius zu schleudern. Achtet dabei darauf, dass die antreibende Hand sich möglichst wenig bewegt. Bestimmt die Rotationsfrequenz bei der anfangs schnellen Rotation, indem ihr die Zeit messt, die für 5 Umdrehungen vergeht (Stoppuhr). Notiert den Wert!
5. Reduziert eure anfangs hohe Rotationsgeschwindigkeit langsam, bis die Box nicht mehr auf der Kreisbahn bleibt. Dann könnt ihr die Messwertaufnahme beenden, indem ihr den Knopf „STOPP“ durch ein Loch in der Luftpolsterfolie drückt. Beide Statusleuchten blinken zweimal in kurzen Abständen und bleiben dann aus.
6. Drückt durch ein kleines Loch auf den Knopf „RESET“, um eine zweite Messung aufnehmen zu können. Die Statusleuchten sollten nach kurzer Zeit beide aufleuchten und dann wieder ausgehen. Beginnt die Messwertaufnahme durch Drücken des „START“-Knopfes.
7. Beginnt nun eine vertikale Rotationsbewegung. Achtet wieder darauf, eure Hand möglichst wenig zu bewegen. Reduziert nach einer hohen Anfangsgeschwindigkeit die Rotationsgeschwindigkeit langsam, bis die Sensorbox keine Kreisbahn mehr fliegt (sie fällt im höchsten Punkt herab). Beendet dann die Messwertaufnahme mit dem „STOPP“-Knopf.
8. Packt die Sensorbox aus der Luftpolsterfolie aus und schaltet sie aus (Einschalter auf „OFF“ schieben).
9. Wertet eure Messung am PC aus. Kopiert dazu die Dateien von der SD-Karte, die „A.LOG.XX.DAT“ heißen, auf den PC (XX sind fortlaufende Zahlen). Öffnet zunächst nur die Messung der horizontalen Rotationsbewegung mit Excel. Die SD-Karte und die Sensorbox bitte jetzt zurückgeben.
10. Wählt die Spalten „t (ms)“ und „ACC_X (m/s²)“ aus. Eine zweite Spalte kann man auswählen, wenn man beim Klicken auf der Tastatur „Strg“ gedrückt hält. Fügt ein Punktdiagramm ein (Punktdiagramm (XY) mit geraden Linien).
11. Interpretiert die Messung. Beachtet dabei, in welche Richtung die X-Achse vor, während und nach der horizontalen Rotation gezeigt hat – das Bezugssystem des Sensors ist in der Abbildung der Sensorbox gezeigt.
12. Wertet jetzt auf die gleiche Weise die Messung der vertikalen Rotation aus.

Bewegt sich ein Körper entlang einer Kreisbahn, so wirkt auf ihn die Zentripetalkraft

$$a_z = \omega^2 \cdot r,$$

wobei r der Radius des Kreises und $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz ist. Für perfekte Kreisbewegungen mit konstanter Geschwindigkeit ist die Umlaufzeit bei n Umläufen in der Zeit t gerade $T = t/n$, die Frequenz ist dann $f = 1/T$.

Verständnisfragen:

- Wie groß ist die Frequenz bei der horizontalen Kreisbewegung? (Hierzu wird die Stoppuhr-Zeitmessung benötigt.) Wie groß sollte dementsprechend die Zentripetalbeschleunigung sein?
- In welche Richtung zeigt die Zentripetalbeschleunigung laut der Messung und welchen Wert hat sie? Entspricht dies dem theoretisch erwarteten Wert?
- Wie groß ist die Frequenz bei der vertikalen Kreisbewegung? (Aus der Messung ablesen!) Welche Zentripetalbeschleunigung folgt daraus?
- Überlegt euch, weswegen bei der vertikalen Rotation der Messwert oszilliert. Um welchen Wert findet die Oszillation statt, welche Amplitude hat sie ungefähr?

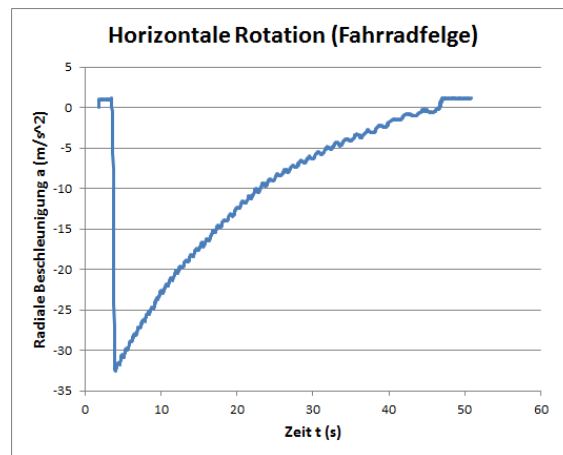


Abbildung 5: Beispielhafte Messung der radialen Beschleunigung bei einer horizontalen Kreisbewegung. Der Sensor wurde hier auf einer Fahrradfelge montiert, damit es keine großen Schwankungen der Messwerte gibt.

Bitte füllt für jeden Versuch, den ihr durchgeführt habt, einen kurzen Evaluationsbogen aus. Das hilft mir dabei herauszufinden, ob die Messsysteme sinnvoll und verständlich sind, ob ihr gut damit zurecht gekommen seid, und ob die Messungen euch Spaß gemacht haben.

Vielen Dank für eure Zeit!

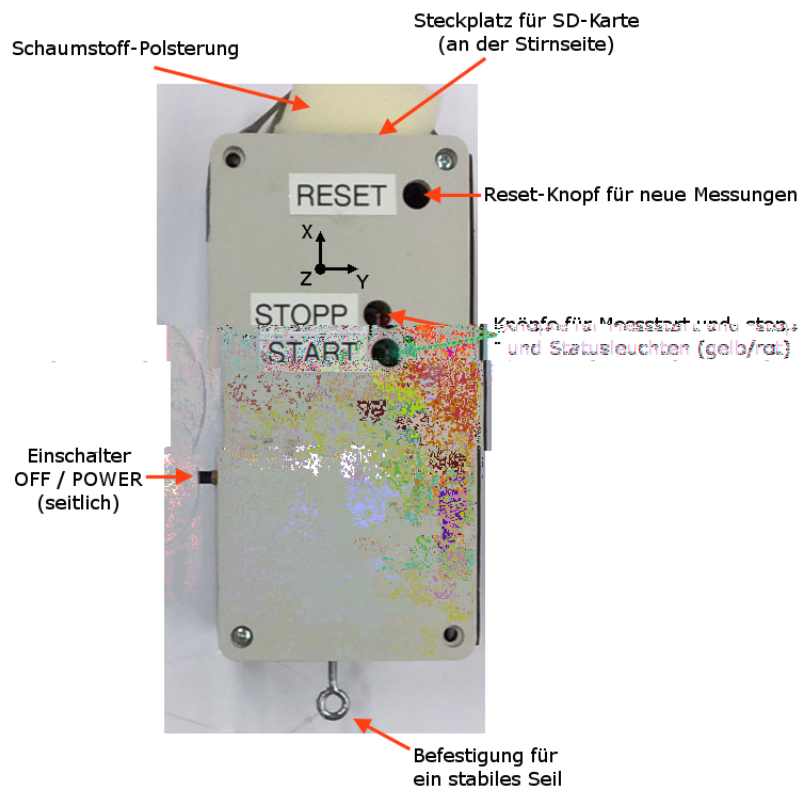


Abbildung 6: Sensorbox für die Messung von Beschleunigungen. Die Box wird seitlich ein- und ausgeschaltet. Die SD-Karte zur Datenspeicherung wird an der oberen Stirnseite eingeschoben und mit einem Stück Schaumstoff gepolstert. Zum Beginnen und Beenden der Messung wird mit einem Stift der zugehörige Knopf betätigt. In den Löchern befinden sich auch die Statusleuchten. Wird eine neue Messung angefangen, muss zunächst der Reset-Knopf betätigt werden. Die Position des Beschleunigungssensors in der Box ist auf dem Decke mit einem kleinen Kreis markiert; die Achsenrichtungen werden aus dieser Abbildung deutlich.

Das hat mir an diesem Versuch besonders gut gefallen...

Das hat mir an diesem Versuch nicht so gut gefallen...

Am schwierigsten an diesem Versuch ist...

Das würde ich an diesem Versuch verbessern...

Allgemeine Anmerkungen / Zusätzliche Kommentare (optional):

Vielen Dank!

Danksagung

Zunächst möchte mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. Ulrich Uwer für seine Bereitschaft bedanken, die Betreuung meiner Arbeit zu übernehmen. Aus unseren Gesprächen habe ich sowohl für die Arbeit als auch für mich persönlich viel gewinnen können.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Franz Eisele, durch den diese Arbeit überhaupt erst zustande gekommen ist und der sich unglaublich viel Zeit dafür genommen hat, mich in Tiefphasen wieder aufzubauen und mir das Ziel immer wieder vor Augen zu führen; er war mit seinen Ideen und Anmerkungen maßgeblich daran beteiligt, die Form und den Inhalt dieser Arbeit mit zu gestalten. Besonders in den letzten Wochen vor der Abgabefrist hat er mich durch seine kritischen und konstruktiven Hinweise noch sehr unterstützt.

Für seine Ideen in allen technischen und handwerklichen Belangen und seine Hilfe bei jeglichen Problemen möchte ich mich herzlich bei Dr. Jens Wagner bedanken, der stets zur Verfügung stand, wenn ich seinen Rat brauchte.

Herrn Dr. Erwin-Klaus Haberkant danke ich nicht nur für die viele investierte Zeit und die mit mir geteilte experimentelle Erfahrung, sondern auch für die Bereitstellung seiner professionellen und gleichzeitig einfachen Experimentieraufbauten, die ich für viele der gezeigten Messungen benutzen konnte. Darüber hinaus möchte ich mich für die Videoaufnahmen der Experimente und die bei unseren Treffen und Telefonaten gegebenen Dankstöße herzlich bedanken.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei all denjenigen bedanken, die mich in den Tiefphasen voller Frust und Stress ebenso unterstützt haben wie in Hochphasen voller Euphorie und Begeisterung. Besonders hervorheben möchte ich dabei: Oana, die stets für spontane Foto- und Videoaufnahmen der Messungen bereit war und die beim Mittagessen und Kaffee geduldig meinen Problemen zuhörte und mir Rat gab (du hast es jetzt endlich hinter dir); Waldemar, der mit seinem Wurf Talent mein Fangtalent gleichzeitig fordern und fördern konnte (dein Wurf war sogar so gut, dass man kaum einen Unterschied zwischen der Beschleunigung in z-Richtung und der Gesamtbeschleunigung sehen kann); Stephanie und Patrick, die so viele mutige Achterbahnfahrten für mich auf sich genommen haben (wir wurden wider Erwarten nicht verhaftet { danke übrigens auch für das unglaublich schöne Achterbahn-Foto, das nur euretwegen existiert); Anno, Mitja, Anne und Stephanie, die durch ihr Korrekturlesen und viele, viele Verbesserungsvorschläge die Arbeit noch ein bisschen schöner gemacht haben.

Für seine Unterstützung beim Test der Sensorboxen mit seinen Schülern möchte ich mich bei Herrn Dr. Matthias Hauck bedanken, der meine Ideen mit Begeisterung aufgenommen und unterstützt hat. Den sieben Schülern der HSG Eberbach, die meine Sensorboxen ausprobiert haben, möchte ich für die geopferte Freizeit und ihr ehrliches und tolles Feedback danken.

Last but not least { wie man so schön zu sagen pflegt { danke ich noch meiner Familie für die Unterstützung auf meinem Weg, nicht nur was diese Arbeit betrifft. Ihr wart und seid immer für mich da und dafür bin ich euch sehr dankbar!

Antiplagiatserklärung

Die vorliegende Wissenschaftliche Arbeit mit dem Titel „Entwicklung einfacher Mess- und Datenerfassungssysteme für Demonstrations- und Schülerexperimente“ wurde im Zeitraum vom 01. April 2015 bis zum 03. August 2015 am Physikalischen Institut der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg unter der Aufsicht von Prof. Dr. Ulrich Uwer und nach den Bedingungen der Gymnasiallehrerprüfungsordnung I von 2009 angefertigt.

Im Rahmen der Anfertigung dieser Arbeit wurden verschiedene Programme genutzt: Die Arduino-Messprogramme wurden mit Arduino (Versionen 1.6.2 bis 1.6.5) programmiert; die Pro Lab-Programme wurden mit Pro Lab-Expert 4.0 erstellt; für Schaltskizzen und Lotvorlagen wurde die Fritzing-Software (Fritzing 0.9.2b) verwendet; Diagramme wurden teils mit Pro Lab-Programmen, teils mit Excel geplottet; Bilder wurden mit GIMP bearbeitet; alle Bohrschablonen wurden mit LibreCAD angefertigt.

Ich erkläre, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken, gegebenenfalls auch elektronischen Medien, entnommen sind, sind von mir durch Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Entlehnungen aus dem Internet sind durch Angabe der Quelle und des Zugriffsdatums sowie dem Ausdruck der ersten Seite belegt; sie liegen zudem für den Zeitraum von 2 Jahren entweder auf einem elektronischen Speichermedium im PDF-Format oder in gedruckter Form vor.

Ort, Datum

Unterschrift

