

Beleg

ZUR LEHRVERANSTALTUNG  
PHYSIKALISCHE  
SCHÜLEREXPERIMENTE III FÜR DIE  
OBERSCHULE

Falk Beuchel, BQL Physik 2018

Betreut durch:  
Manuela Lipinsky Nunes  
Eingereicht am 24. August 2020

# INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Didaktische Rekonstruktion zum Themengebiet Mechanische Schwingungen und Wellen	2
2.1	Mechanische (ungedämpfte) Schwingung	2
2.1.1	gedämpfte Schwingungen	3
2.2	Mechanische Wellen	7
2.3	Phänomene bei Schwingungen und Wellen	7
2.4	Schülervorstellungen zu Schwingungen und Wellen	8
3	Darlegung zu den Experimenten	10
3.1	Ermittlung der Schallgeschwindigkeit	10
3.1.1	Einbettung in den Unterricht	10
3.1.2	Darlegung des Experiments	11
3.1.3	Reflexion des Experiments	12
3.2	Experimente in der Wellenwanne	14
3.2.1	Einbettung in den Unterricht	14
3.2.2	Darlegung des Experiments	15
3.2.3	Reflexion des Experimentes	15
3.3	Weg-Zeit-Diagramm eines gedämpften Federschwingers	19
3.3.1	Einbettung in den Unterricht	19
3.3.2	Darlegung des Experiments	20
3.3.3	Reflexion des Experimentes	21
4	elektronisches Tafelbild	28

5	Selbständigkeitserklärung	30
A	Anhang	32
A.1	KMK-Kompetenzbereiche für das Fach Physik . . . . .	33

# 1 EINLEITUNG

Diese Seminararbeit vertieft einen Versuchskomplex der Lehrveranstaltung Physikalische Schülerexperimente III. Schwerpunkt dieser Arbeit sind die Experimente zum Thema mechanische Schwingungen und Wellen. Im Sinne der Didaktischen Rekonstruktion nach Kattmann [KG96] (siehe Abb. 1.1), wird das Triplet aus Fachlicher Klärung, Erfassen von Lernerperspektiven (insb. der Beachtung von Schülervorstellungen) und darauf aufbauend die Didaktische Strukturierung, hier für die Experimente, durchgeführt.

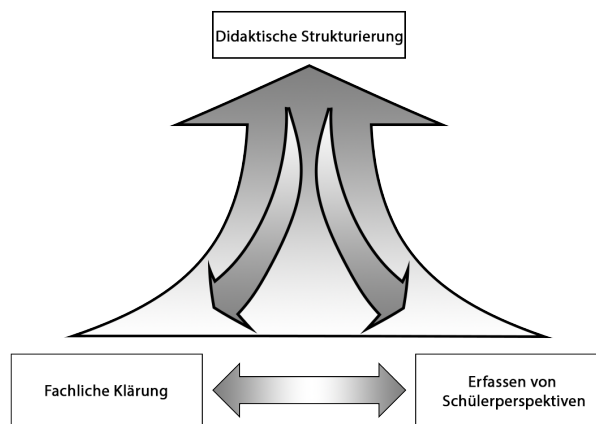


Abbildung 1.1: Didaktischen Rekonstruktion nach Kattmann (Thomas.plotz77, wikipedia 2020, Lizenz: CC BY-SA 4.0)

# 2 DIDAKTISCHE REKONSTRUKTION ZUM THEMENGEBIET MECHANISCHE SCHWINGUNGEN UND WELLEN

## 2.1 MECHANISCHE (UNGEDÄMPFTE) SCHWINGUNG

Schwingungen sind gekennzeichnet durch eine sich periodisch ändernde physikalische Größe, d.h. der Körper befindet sich nach gleichen Zeitabschnitten im selben Bewegungszustand. In der Mechanik sind dies Körper die ihren Aufenthaltsort, häufig um ihre Ruhelage, verändern. Die sich verändernde physikalische Größe kann also der Ort sein. Es ist aber auch möglich, wie z.B. beim klassischen Pendel, den Winkel als sich ändernde Größe zu betrachten. Zum Auftreten einer Schwingung wird stets eine Rückstellkraft  $\vec{F}_{\text{Rück}}$ , die immer zur Ruhelage gerichtet ist benötigt. Die Änderungen der physikalischen Größe bei einer mechanischen Schwingung werden durch die folgenden Größen genauer beschrieben:

- Auslenkung, auch Elongation (lat. elongare: entfernen)<sup>1</sup>: örtliche Entfernung von der Ruhelage
- Schwingungsdauer  $T$ : Länge des Zeitabschnittes bis zur Wiederholung des Bewegungszustandes
- Frequenz  $f$  (lat. frequentia: Häufigkeit)<sup>2</sup>: Kehrwert der Schwingungsdauer,  $f = \frac{1}{T}$

Die Schwingung kann mathematisch mit Hilfe einer Cosinus- oder Sinusfunktion ausgedrückt werden. Die in der Grundgleichung 2.1 verwendeten Variablen stehen für die Auslenkung aus der

---

<sup>1</sup>Apple-Lexikon, 2007-2019

<sup>2</sup>Apple-Lexikon, 2007-2019

Gleichgewichtslage ( $x_0$ ), der Kreisfrequenz  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  und der Zeit  $t$ .  $x_0$  ist hier gleichzeitig die Amplitude, wenn das Massestück aus der ausgelenkten Lage mit der Geschwindigkeit  $v = 0$  startet.

$$x(t) = x_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \tag{2.1}$$

mit  $v_0 = 0$

Bleibt eine Schwingung in Periodendauer bzw. ihrer Frequenz konstant, so spricht man auch von einer harmonischen Schwingung.

### 2.1.1 gedämpfte Schwingungen

Reale schwingungsfähige Systeme ohne dauerhafte Zuführung von Energie verlieren an ihre Umgebung ständig Energie durch Reibung. Diese für das System nicht mehr verfügbare, abgegebene Energie führt dazu, dass die periodische Bewegung in ihrer Amplitude abnimmt und theoretisch in unendlicher Zeit ganz zum Erliegen kommt. Die Amplitude nähert sich exponentiell der Null an.

#### Betrachtungen an einem Federmasseschwinger

In dem Versuch zur gedämpften Schwingung wird ein Feder-Masse-Schwinger verwendet, so dass an dieser Stelle für die theoretische Betrachtung dieser verwendet wird. Der Aufbau des Schwingers ist in der Abbildung 2.1 dargestellt. Er besteht aus einem Massestück, das an einer befestigten Schraubenfeder hängt.

Wird das Massestück aus seiner Ruhelage herausgebracht, so wirkt neben der Gewichtskraft  $F_G$  zusätzlich (immer in Richtung des Schwerpunktes) die Rückstellkraft  $F_R$  der Feder. Die Gewichtskraft wirkt in gleicher Größe an allen Bewegungszuständen und wird deshalb hier nicht weiter betrachtet. Vernachlässigt wird außerdem die Masse der Feder. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die Feder eine proportionale Kraftentwicklung in Abhängigkeit ihrer Ausdehnung oder -stauchung (HOOKsches Gesetz) aufweist. Wird das Massestück mit der Masse  $m$  aus der Gleichgewichtslage heraus bewegt und losgelassen, dann bewirkt  $F_R$  eine Beschleunigung  $a$  des Massestücks in Richtung der Gleichgewichtslage auf der hier gewählten senkrechten  $x$ -Achse. Mit zunehmender Geschwindigkeit  $v$  führt diese Bewegung allerdings zu einer Zunahme einer Reibungskraft  $F_{\text{Reib}}$ , z.B. durch das Anstoßen an Luftteilchen. Wie jede Reibungskraft ist diese der Bewegung entgegengesetzt und verringert damit die Rückstellkraft  $F_R$  der Feder. Es gelten folgende Gleichungen:

$$a = \ddot{x}(t) \tag{2.2}$$

$$v = \dot{x}(t) \tag{2.3}$$

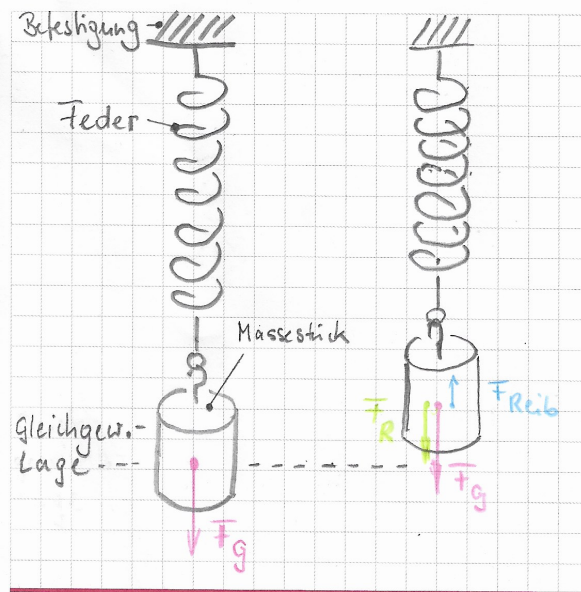


Abbildung 2.1: Feder-Masse-Schwinger mit wirkenden Kräften

$$\text{Bewegungsgesetz : } \ddot{x}(t) \cdot m = F_R + F_{\text{Rück}} \quad (2.4)$$

$$F_R = -D \cdot x(t) \quad (2.5)$$

$$F_{\text{Rück}} = -k \cdot v \rightarrow F_{\text{Rück}} = -k \cdot \dot{x}(t) \quad (2.6)$$

Zur Berechnung der Bewegung werden zuerst die Gleichungen (2.5) und (2.6) in das Bewegungsgesetz (2.4) eingesetzt.

$$\ddot{x}(t) \cdot m = -D \cdot x(t) - k \cdot \dot{x}(t) \quad \left| \frac{1}{m}, \text{sortieren} \right. \quad (2.7)$$

$$\ddot{x}(t) + k \cdot \dot{x}(t) + D \cdot x(t) = 0 \quad (2.8)$$

Für die Lösung der Differentialgleichung 2.8 ergeben sich mit zwei Substitutionen ( $\sigma, \omega$ ) und den beiden Anfangsbedingungen für die Auslenkung  $x_0$  und die Geschwindigkeit  $v_0(t) = \dot{x}_0(t)$  drei Lösungen.

### 1. Lösung (schwache Dämpfung)

$$x(t) = x_0 \cdot e^{-\sigma \cdot t} \cdot \left( \cos(\omega \cdot t) + \frac{\sigma}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) \right) \quad (2.9)$$

$$\text{mit } \sigma = \frac{k}{2 \cdot m} \text{ und der Kreisfrequenz } \omega = \sqrt{\frac{D}{m} - \sigma^2}$$

Der Term  $\sigma$  ist sehr klein gegenüber der Kreisfrequenz  $\omega$ . Der Summand  $\frac{\sigma}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t)$  kann damit vernachlässigt werden, so dass sich die Gleichung (2.10) ergibt.

$$x(t) = x_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot e^{-\sigma \cdot t} \quad (2.10)$$

In einem  $x(t)$ -Diagramm (siehe Abbildung 2.2) erkennt man die Abnahme der Amplitude durch die Verringerung des  $x$ -Betrages um die Gleichgewichtslage bei  $x_0 = 0$ . Die rote Funktionskurve wird durch die beiden blau, gestrichelten Hüllfunktionen  $x_0 \cdot e^{-\sigma \cdot t}$  und  $-x_0 \cdot e^{-\sigma \cdot t}$  verringert.

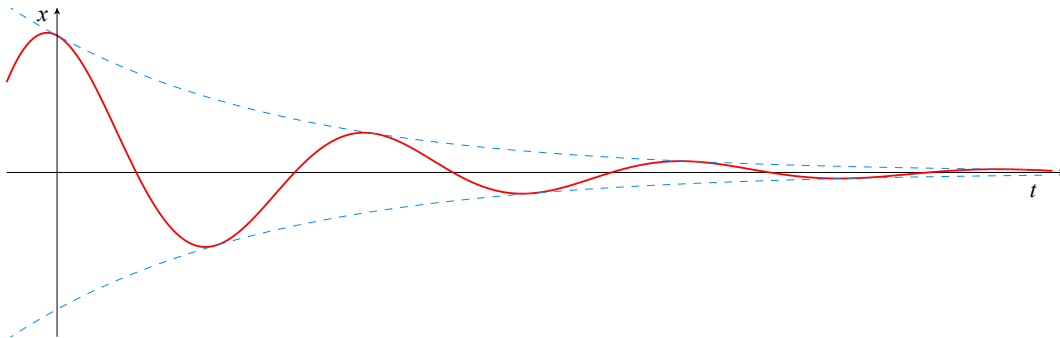


Abbildung 2.2: Amplitudenverlauf einer schwach gedämpften Schwingung

### 2. Lösung (starke Dämpfung, aperiodischer Grenzfall)

Für den Fall  $\frac{D}{m} = \sigma^2$  und der Anfangsbedingungen  $v_0 = 0$  bei einer Auslenkung  $x = x_0$  gilt:

$$x(t) = (x_0 + \sigma \cdot x_0 \cdot t) \cdot e^{-\sigma \cdot t} \quad (2.11)$$

$$\text{mit } \sigma = \frac{k}{2 \cdot m}$$

Wenn diese Funktion wiederum in einem  $x(t)$ -Diagramm (siehe Abbildung 2.3) dargestellt wird, erkennt man die Abnahme der Amplitude ohne mehrmaliges Überschwingen. Auch hier kennzeichnet die blau, gestrichelte Funktion  $x_0 \cdot e^{-\sigma \cdot t}$  die Exponentialfunktion der sich die Amplitudenfunktion (rote Linie) mit fortschreitender Zeit annähert. Merkmal dieser Lösung, des sogenannten aperiodischen Grenzfalles, ist die schnellste Annäherung der Schwingung an die Gleichgewichtslage.

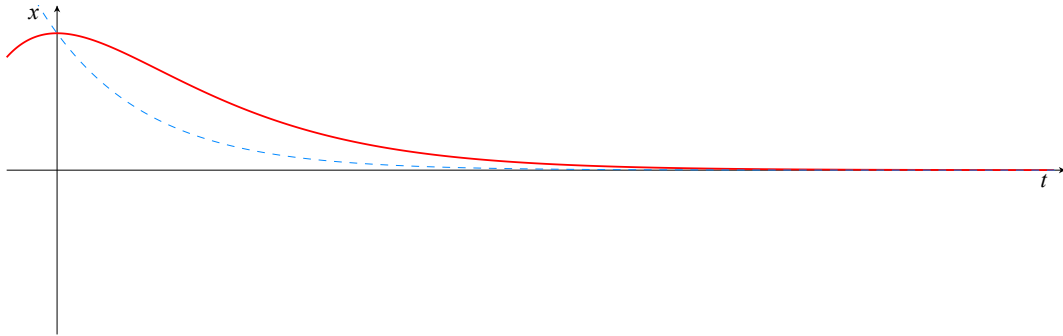


Abbildung 2.3: Amplitudenverlauf im aperiodischen Grenzfall

### 3. Lösung (starke Dämpfung, Kriechfall)

Der Kriechfall stellt die letzte Lösung der Differentialgleichung 2.8 dar. In diesem Fall gilt  $\frac{D}{m} < \sigma^2$  bei der bisherigen Ausgangsbedingung  $v_0 = 0$  und der Auslenkung  $x = x_0$ . Damit ergibt sich die folgende Lösung:

$$x(t) = x_0 \cdot \frac{1}{2 \cdot \lambda} \left( (\lambda + \sigma) \cdot e^{\lambda \cdot t} + (\lambda - \sigma) \cdot e^{-\lambda \cdot t} \right) \cdot e^{-\sigma \cdot t} \quad (2.12)$$

$$\text{mit } \sigma = \frac{k}{2 \cdot m} \text{ und } \lambda = \sqrt{\sigma^2 - \frac{D}{m}}$$

Die Dämpfung ist so stark, dass der Federschwinger nur sehr langsam in die Gleichgewichtslage zurückkehrt, sozusagen hinkriecht. In der folgenden Abbildung 2.4 sind die beiden die Schwingungsfunktion leitenden Exponentialfunktionen für den Kriechfall und dem aperiodischen Grenzfall im Vergleich dargestellt.

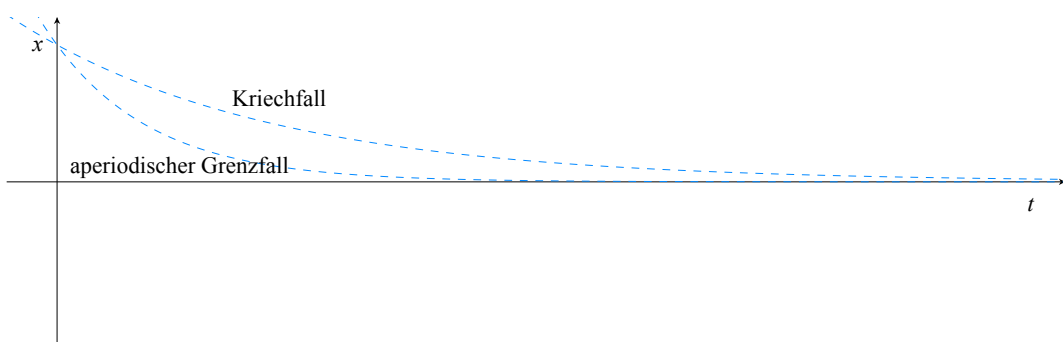


Abbildung 2.4: Amplitudenverlauf im aperiodischen Grenzfall und einem Kriechfall

## 2.2 MECHANISCHE WELLEN

Wellen sind gegenüber den mechanischen Schwingungen neben der zeitlichen Veränderung zusätzlich auch örtlich periodisch veränderliche Größen. Wellen übertragen keinen Stoff sondern nur Energie. Die Wellen werden unterschieden nach:

- der Art der Ausbreitung
  - in Transversalwellen (mittellateinisch transversalis: quer liegend)<sup>3</sup>, meint hier eine Welle die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingt)
  - Longitudinalwellen (lat. longus: lang, meint hier eine Welle die in Längsrichtung der Ausbreitung schwingt)
- der Verteilung im Raum
  - in Kreis- bzw. Kugelwellen und
  - ebene Wellen

Physikalisch wird eine Kugelwelle durch die Amplitude  $\hat{y}$ , die Schwingungsdauer  $T$ , die Frequenz  $f$  bzw. die Kreisfrequenz  $\omega$ , Ausbreitungsgeschwindigkeit  $\vec{c}$  und die Wellenlänge  $\lambda$  beschrieben. Die folgende Abbildung 2.5 zeigt die Welle zu dem Zeitpunkt  $t_0$  (rote, durchgehende Kurve),  $t_1$  (blaue, kurz gestrichelte Kurve) und  $t_2$  (blaue, lang gestrichelte Kurve) mit den genannten Größen. Die Schwingungsdauer  $T$  ist die Zeit die vergeht bis ein Teilchen am gleichen Ort wieder den gleichen Bewegungszustand erreicht. Hier dargestellt am positiven maximalen Ausschlag zum Zeitpunkt  $t_0$  und  $t_2$ . Zwischendurch passiert das Teilchen zum Zeitpunkt  $t_1$  (kurz gestrichelte Kurve) das Minimum. Mit dem Vektor  $\vec{r}$  wurde die Ausbreitungsrichtung der Welle gekennzeichnet. Die rote Kurve stellt damit die Welle zu einem bestimmten Zeitpunkt ( $t_0$ ) dar.

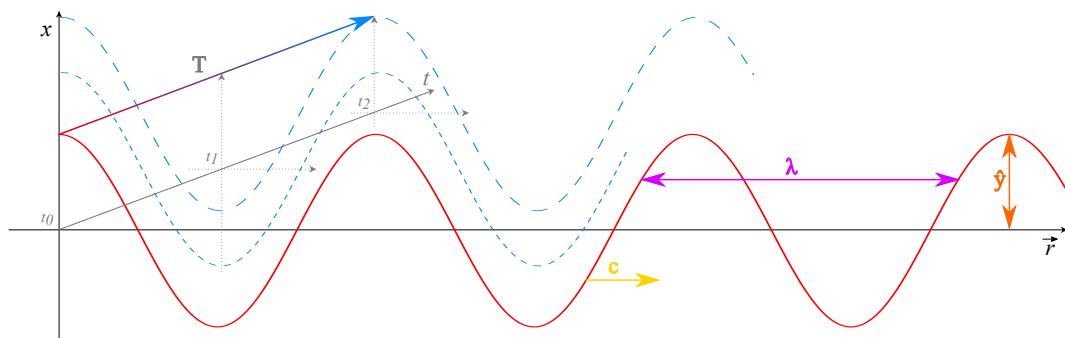


Abbildung 2.5: Beschreibung einer Welle, die Zeit wurde als zusätzliche Achse hinzugefügt

## 2.3 PHÄNOMENE BEI SCHWINGUNGEN UND WELLEN

Resonanz ...ist ein Vorgang, bei dem eine Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz des angeregten Systems übereinstimmt. Es kommt dabei zu einem starken Anstieg der Amplitude des angeregten Systems. In der Praxis kann diese Erhöhung bis zur Zerstörung des Systems führen.

<sup>3</sup>Apple-Lexikon, 2007-2019

Schwebung ...ist eine Überlagerung zweier sich nur minimal in ihrer Frequenz unterscheidenden Schwingungen. Hierbei kommt es zu zeitlicher Verstärkung und Abschwächung der sich periodisch veränderlichen physikalischen Größe.

## 2.4 SCHÜLERVORSTELLUNGEN ZU SCHWINGUNGEN UND WELLEN

Schülervorstellungen zu Schwingungen als Ergebnis einer Schülerbefragung im Rahmen einer Diplomarbeit von Peter Donabaum [Don18].

Die häufigsten Nennungen beim Fadenpendel (Auswahl):

- Die Schwingungsdauer ist von der Masse des Massestücks abhängig. (81%)
- Die Geschwindigkeit ist am Rand (Umkehrpunkt) am geringsten. (81%)
- Die Schwingungsdauer ist abhängig von der Pendellänge. (69%)
- Die Geschwindigkeit des Fadenpendels ist abhängig von der Masse des Massestücks. (63%)
- Die Geschwindigkeit des Fadenpendels ist abhängig davon, wie weit das Pendel aus seiner Ruhelage ausgelenkt wird. (44%)

Die Gleichung 2.13 zur Berechnung der Periodendauer eines Fadenpendels [Aut12] zeigt, dass diese nur abhängig von der Länge  $l$  und der örtlichen Fallbeschleunigung  $g$  ist. Allerdings gilt diese Formel nur für kleine Auslenkungen. Die Auslenkung besitzt damit zusätzlich ebenfalls einen Einfluss auf die Schwingungsdauer.

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (2.13)$$

Die häufigste Nennungen beim Federpendel (Auswahl):

- Die Gravitationsbeschleunigung wirkt sich auf die Schwingungsdauer des Federpendels aus. (53%)
- Die Geschwindigkeit des Federpendels ist abhängig von der Bauart der Feder (Federkonstante). (47%)
- Je größer die Gravitationsbeschleunigung ist, desto größer ist die Geschwindigkeit des Federpendels. (47%)
- Das Tempo des Federpendels hängt davon ab, wie groß die Pendelmasse ist. (40%)
- Das Federpendel ist bei der Abwärtsbewegung schneller als aufwärts. (33%)

- Die Geschwindigkeit des Federpendels hängt davon ab, wie weit das Pendel aus seiner Ruhelage ausgelenkt wird. (27%)

Schlussfolgernd aus diesen Untersuchungen, sieht man dass es beim Fadenpendel die meisten falschen Vorstellungen gibt. In dem nachfolgend vorgestellten Experiment wird ein Federpendel untersucht. In der Vorbereitung des Experimentes mit den Lernenden ist es deshalb wichtig, die Unabhängigkeit des Pendels von der Gravitation zu besprechen. Besonders bei der senkrechten Montage könnten die Schüler einen Einfluss vermuten. Es ist zwar nicht die Aufgabe die Periodendauer  $T$  oder die Frequenz bereits vorher zu berechnen, aber aus der Formel 2.14 zur Berechnung des Federschwingers [Aut12] ist klar erkennbar, dass die abhängigen Größen nur die Federkonstante  $D$  und die Masse  $m$  sind.

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{D}} \quad (2.14)$$

#### Schülervorstellungen zu Wellen

- Es ist den Lernenden unbekannt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit vom Medium abhängt. Es wird eher vermutet, dass diese Geschwindigkeit von der zugeführten Energie abhängt (nach [MHB13]).
- Wellen werden Eigenschaften von Impuls und Masse (nach [MHB13]) statt Impuls und Energie zugeschrieben, wie als würde die Welle einen Stoff transportierten.
- Es gibt kaum eine richtige Vorstellungen von Wellenüberlagerungen. Es ist für Lernende unverständlich, dass Wellen sich ungestört durchdringen können und eine Auslöschung oder Verstärkung nach dem Aufeinandertreffen von Wellen nicht überdauert (nach [SWHD18]).

Wichtig ist es den Lernenden besonders den Modellcharakter der Wasserwellen nahe zu bringen. Denn auch bei den Demonstrationsexperimenten in der Wellenwanne sollen Erkenntnisse auch für dreidimensionale Wellen, wie z.B. den elektromagnetischen Wellen, gewonnen werden. Auch auf die örtliche Veränderung sollte noch einmal hingewiesen werden, da in der Wellenwanne durch die Beleuchtung mit einem Stroboskop die Wellen scheinbar still stehen.

# 3 DARLEGUNG ZU DEN EXPERIMENTEN

## 3.1 ERMITTLUNG DER SCHALLGESCHWINDIGKEIT

### 3.1.1 Einbettung in den Unterricht

Lehrplaneinordnung:

- Berechnung der Schallgeschwindigkeit (Kl. 10 RS-LB 2)
- Empfehlung: Schallgeschwindigkeit (Kl. 9 HS-LB5)

Voraussetzungen:

Die Lernenden haben bereits in der 6. Klassenstufen die Bewegungen von Körpern sowie die physikalischen Größen Weg, Zeit und Geschwindigkeit erarbeitet. Aus dem Alltag wissen die Lernenden bereits, dass sich Licht und Schall unterschiedlich schnell ausbreiten, so dass z.B ein Hammerschlag in weiter Entfernung eher zu sehen als zu hören ist oder dass das Grollen eines Blitzes verzögert den Beobachter erreicht.

Charakterisieren des Experiments:

Kategorie des Experiments: quantitativ

Ziel(e) des Experiments: Ermitteln der Schallgeschwindigkeit

Art: Schülerexperiment

Lernziel:

(HS/RS) Mit bekannten Geräte und Messmittel und durch Anwendung ihre Kenntnisse und Erfahrungen erschließen sich die Lernenden, die Schallgeschwindigkeit mit einer vorgegebenen Versuchsanleitung. Sie gewinnen dadurch Einblick über die Größenordnung der Schallgeschwindigkeit in Luft.

Einordnung in die KMK-Kompetenzbereiche für das Fach Physik:

Da es sich bei dem Lernziel hauptsächlich um eine Erkenntnisgewinn handelt wurde das Experiment diesem Kompetenzbereich zugeordnet. (siehe A.1 auf Seite 33).

	I	II	III
F			
E	✓	✓	
K			
B			

Tabelle 3.1: Einordnung in die KMK-Kompetenzbereiche für das Fach Physik

### 3.1.2 Darlegung des Experiments

Aufgabenstellung an die Lernenden

Ermittle die Schallgeschwindigkeit mit Hilfe zweier smarterer Geräte und dem Programm Phyphox. Im Programm Phyphox wird der Programmteil „akustische Stoppuhr“ genutzt.

Vorbetrachtung

Die akustische Stoppuhr löst bei einem ersten akustischen Signal, z.B. einem lauten Schlag, aus und stoppt beim Nachfolgenden. Die Abbildungen 3.1 und 3.2 stellen den Aufbau der Messungen in den ersten beiden Schritten dar.

1. Schritt

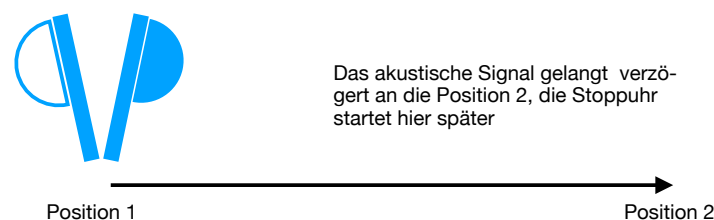


Abbildung 3.1: 1. Schritt d. Schallgeschwindigkeitsmessung mit Hilfe der akustischen Stoppuhr

## 2. Schritt

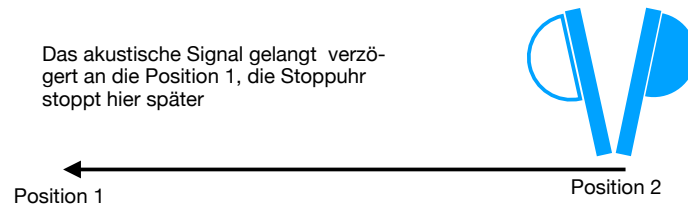


Abbildung 3.2: 2. Schritt d. Schallgeschwindigkeitsmessung mit Hilfe der akustischen Stoppuhr

Anschließend wird in einem dritten Schritt die Zeitdifferenz ermittelt. Die Differenz zwischen den beiden Stoppuhren ist die Zeit des Schallweges für die doppelte Strecke. Im Startzustand beginnt die Stoppuhr an der Position 2 verzögert. Die Zeitdifferenz ist zu diesem Zeitpunkt die Schallgeschwindigkeit der Strecke von Position 1 bis zur Position 2. Beim Stoppen hält die Uhr an Position 1 verzögert an. Die Differenz der Uhren beträgt jetzt die Zeit für den doppelten Weg (2 s). Die Zeitdifferenz berechnet sich nach folgender Gleichung ??.

Im vierten und letzten Schritt wird die Schallgeschwindigkeit berechnet. Die Geschwindigkeit für den Schall ergibt sich aus dem Weg und der Zeit, siehe Gleichung 3.1.

$$v_{\text{Schall}} = \frac{2s}{\Delta T} \quad (3.1)$$

### 3.1.3 Reflexion des Experiments

Der Aufbau erfolgte wie in der Vorbetrachtung. An jeder Position im Abstand von 10 m bezog je eine Person Stellung. iPad und iPhone (als die beiden verwendeten smarten Geräte) lagen auf dem Boden. Die Schallempfindlichkeit im Programm phyphox wurde entsprechend der Umgebungsgeräusche eingestellt. Im erprobten Versuch lag diese bei dem Wert 0,05. Als Auslösergeräusch wurden nach mehreren Fehlversuchen auf jeder Seite ein Schlag auf einem Plasteeimer verwendet. Durch die Nebeneinanderstellung von Eimer und Smartgerät, verringert sich auch die Entfernung zu den akustischen Stoppuhren an den beiden Stationen.

Messwerte für drei Versuche, jeweils Position 1 (l) und Position2 (r): Umgebungsbedingungen: Temperatur - 11°C, rel. Luftfeuchte - 56 %

Versuch 1 (Position 1 / Position 2)

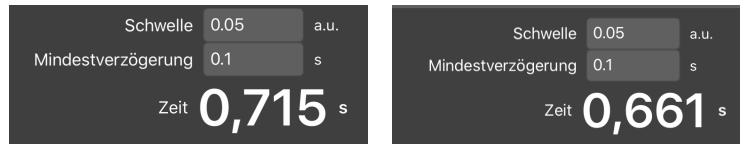


Abbildung 3.3: Messergebnisse - Versuch 1

Versuch 2 (Position 1 / Position 2)

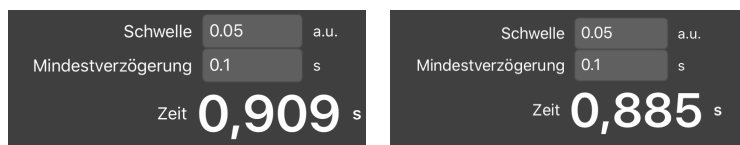


Abbildung 3.4: Messergebnisse - Versuch 2

Versuch 3 (Position 1 / Position 2)

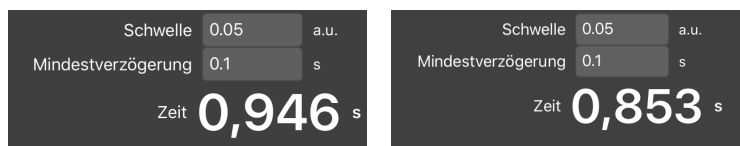


Abbildung 3.5: Messergebnisse - Versuch 3

Auswertung

Die Schallgeschwindigkeit wurde nach den beiden Gleichungen ?? und 3.1 berechnet. Es ergaben sich für die Zeitdifferenz folgende Ergebnisse:

$$\Delta T_{v1} = 0,054s$$

$$\Delta T_{v2} = 0,024s$$

$$\Delta T_{v3} = 0,093s$$

Anschließend wurde die Schallgeschwindigkeit aus der Durchschnittszeit von  $\Delta T = 0,057s$  berechnet.

$$v_{\text{Schall}} = \frac{2s}{\Delta T} = \frac{20m}{0,057s} = 351 \frac{m}{s}$$

Im Durchschnitt liegt der mit diesem einfachen Messmitteln ermittelte Wert schon sehr nahe an

in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlichten Wert. Z.B.: Schallgeschwindigkeit in trockener Luft von 20°C beträgt 343,2 m/s ([Gia10], S. 561).

Einsatz im Unterricht

Der Einsatz im Unterricht ist für mich durchaus vorstellbar. Voraussetzung ist allerdings, dass die Lernenden auf ihren privaten Geräten phyphox installieren können, es muss also vorher angekündigt werden. Es ist sinnvoll mehrere Messwertpaare zu erstellen. Zum einen dient dies dem Erlernen der wissenschaftlichen Arbeit, zum anderen nähert man sich der wahren Schallgeschwindigkeit an und liegt möglicherweise bei nur einer Messung sehr weit von dieser Geschwindigkeit entfernt. Das Experiment ist stabil und relativ schnell durchführbar und steht damit in einem guten Aufwand-Nutzen-Verhältnis.

## 3.2 EXPERIMENTE IN DER WELLENWANNE

### 3.2.1 Einbettung in den Unterricht

Lehrplaneinordnung:

- Schallwellen, Hertz'sche Wellen (Kl. 10 -LB 2)

Voraussetzungen:

Dieses Demonstrationsexperiment dient zur Aneignung von Welleneigenschaften, es sind deshalb wenig Voraussetzungen zu benennen. Die Lernenden sollten allerdings einen Bezug zu ihren Erfahrungen mit Wasserwellen herstellen können und verstehen welche Effekte zum Einfrieren einer Bewegung unter Stroboskoplicht wirken. Zum Verständnis sollte im Rahmen der Demonstration kurz der Aufbau und die Darstellung an der Mattscheibe erläutert werden.

Charakterisieren des Experiments:

Kategorie des Experiments: quantitativ

Ziel(e) des Experiments: Ermitteln der Schallgeschwindigkeit

Art: Demonstrationsexperiment

Lernziel:

(HS/RS) Die Schüler und Schülerinnen gewinnen Einblick über die Ausbreitung einer Kreiswelle und einer linearen Wellenfront. Sie kennen die Phänomene Reflexion, Brechung, Beugung und Interferenz am Beispiel der Wasserwellen und können diese mit Bildern der Wellenwanne erklären.

Einordnung in die KMK-Kompetenzbereiche für das Fach Physik:

Als klassisches Demonstrationsexperiment liegt der Nutzen im Erwerben von Fachwissen. Es ist aber auch notwendig das neue physikalische Fachwissen mit analogen Sachverhalten zu vergleichen. Die gezeigten Arbeitsweisen Modell und Stroboskoplicht sind nachzuvollziehen.

	I	II	III
F	✓	✓	
E	✓		
K			
B			

Tabelle 3.2: Einordnung in die KMK-Kompetenzbereiche für das Fach Physik

### 3.2.2 Darlegung des Experiments

Aufgabenstellung an die Lernenden

Beobachtet die Ausbreitung der Wasserwellen. Was hättest Du so nicht erwartet oder welche Bewegung scheint dir unlogisch?

Vorbetrachtung

Die Ausbreitung von flächigen Wasserwellen ist vergleichbar mit den sich in alle Raumrichtung ausbreitenden Schallwellen und den elektromagnetischen Wellen. Die Vereinfachung auf die Fläche schafft eine optische Vorstellung von der Ausbreitung der Wellen, aber auch den Phänomene Reflexion, Brechung, Beugung und Interferenz. Hinweis: Die flächige Ausbreitung besitzt Modellcharakter für die kugelförmige Ausbreitung von Wellen.

Geräte und Hilfsmittel

Wellenwanne, Kamera oder Lichtprojektor, Wellenerzeuger. Die Abbildung 3.6 zeigt den Aufbau dieses Experimentes. Für die verschiedenen zu zeigenden Phänomene sind unterschiedliche Aufbauten notwendig.

### 3.2.3 Reflexion des Experimentes

Auswertung

Die Auswertung erfolgte durch Fotos, in denen jeweils die Ausbreitungsrichtung als schwarze Pfeile dargestellt, bzw. eine Verstärkung oder Auslöschung markiert wurden. Die den Fotos beigelegten Aufbausketzen sind dem Buch Physikalische Schulexperimente von Hans-Joachim-Wilke [Wil97] entnommen.

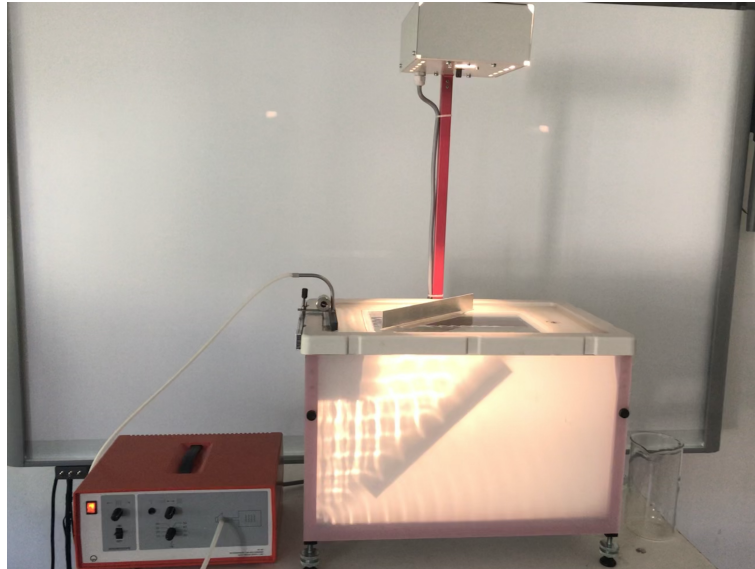


Abbildung 3.6: Versuchsaufbau der Wellenwanne, mit Stroboskop, gekoppelten Luftdruckerzeuger und notwendigen Zubehör

a) Kreiswellen

Aufbau: Punktförmiger Erreger

Beobachtung: Die Wellenfront breitet sich ausgehend vom Ursprung allseitig aus.

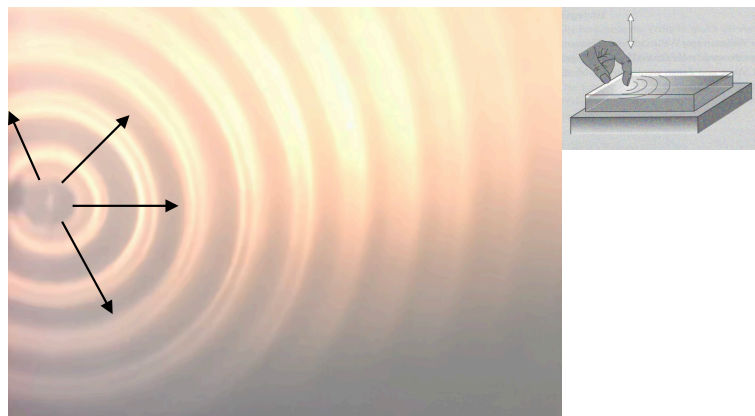


Abbildung 3.7: Wellen bei punktförmiger Erregung

b) lineare Wellenfront

Aufbau: linearer Erreger

Beobachtung: Es gibt eine Ausbreitungsrichtung der Wellenfronten.

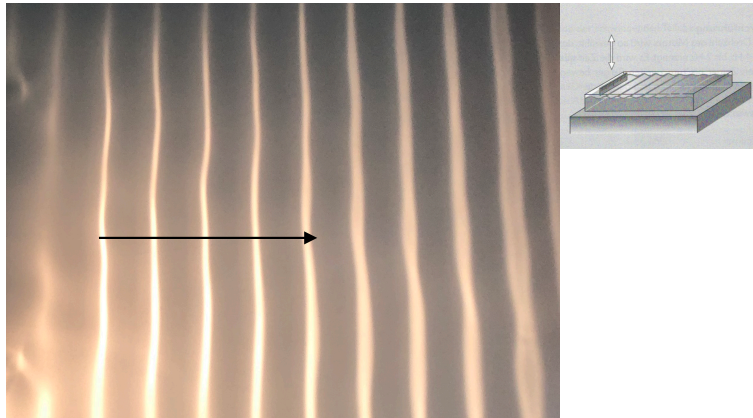


Abbildung 3.8: Wellen bei linearer Erregung

c) Reflexion

Aufbau: Lineare Wellenfront auf ein gerades Hinderniss

Beobachtung: Wellenfront wird Reflektiert. Für die Ausbreitungsrichtung gilt: Einfallswinkel  $\alpha$  ist gleich dem Ausfallswinkel  $\alpha'$ .

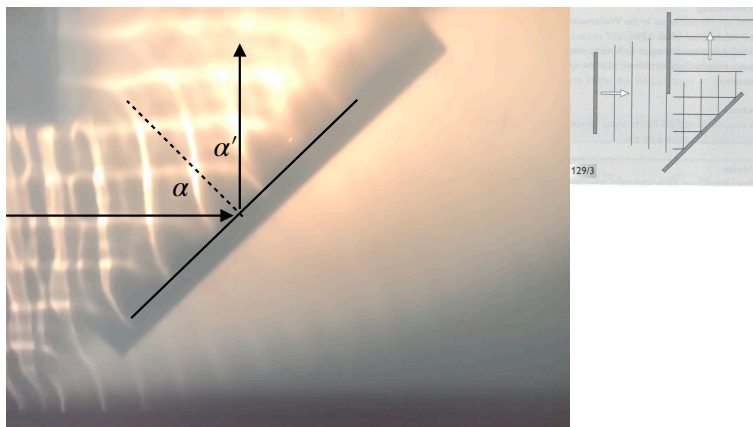


Abbildung 3.9: reflektierte Wellen

d) Brechung

Aufbau: Lineare Wellenfront mit schrägen Einfall auf eine Glasplatte zur Verringerung der Tiefe auf ca. 2 cm

Beobachtung: Wellenfront ändert ihre Richtung, Im flachen Wasser wird die Wellenfront vom Lot weggebrochen. Einfallswinkel  $\alpha$  ist kleiner als der Ausfallswinkel  $\beta$ .

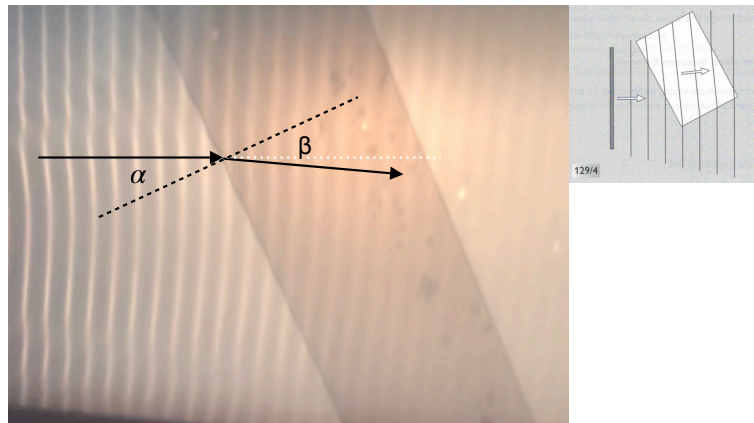


Abbildung 3.10: gebrochene Wellen

e) Beugung

Aufbau: ein Hindernis, das die halbe Breite der Welle nicht hindurchläuft

Beobachtung: Es entsteht eine Welle im Schattenbereich. An der Kante bildet sich nach dem HUYGENSchen Prinzip eine Kugelwelle aus, die sich auch im abgeschotteten Bereich ausbreitet.

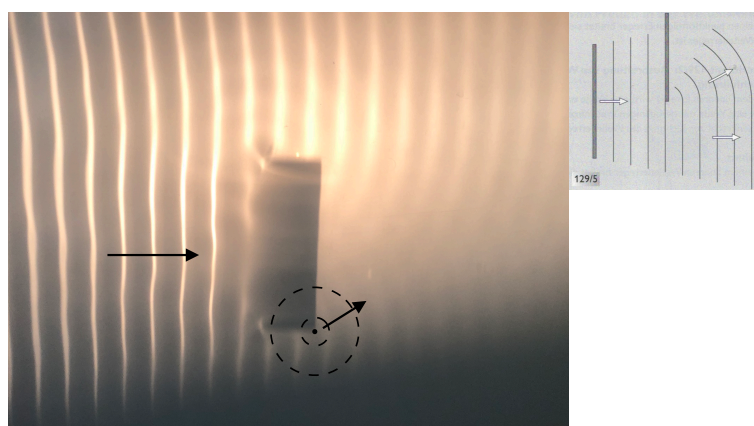


Abbildung 3.11: Beugung von Wellen an einem Hindernis

## f) Interferenz

Aufbau: Zweipunkt-Erreger verwenden, zwei Wellen überlagern sich

Beobachtung: Es entstehen Zonen der Auslöschung (A) und der Verstärkung (V)

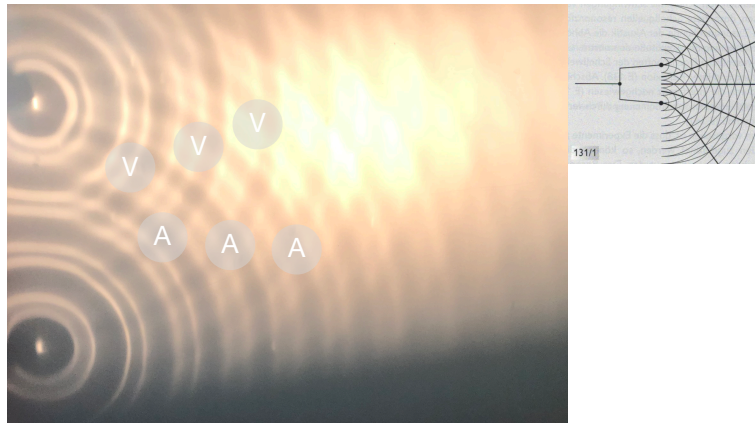


Abbildung 3.12: Interferenzen sich zweier überlagernder Wellen

## Einsatz im Unterricht

Der Einsatz im Unterricht ist denkbar, leider ist der Materialaufwand für die meisten Schulen zu hoch. Dazu kommt der Platzbedarf, den die Einlagerung benötigt. Andere Varianten z.B. über eine Videoaufnahme und einem flachen Wasserbecken sollten geprüft werden. Der Bezug zu dem den Lernenden bekannten Wasserwellen ist gut und bietet einen übersichtlichen und nachvollziehbaren Ansatz.

## 3.3 WEG-ZEIT-DIAGRAMM EINES GEDÄMPFTEN FEDERSCHWINGERS

### 3.3.1 Einbettung in den Unterricht

Lehrplaneinordnung:

- Kennen mechanischer Schwingungen; Energieumwandlungen - ungedämpfte und gedämpfte Schwingungen (Kl. 9 RS -LB 4)

Voraussetzungen:

Je nach Einsatz, kann das Experiment der Vertiefung oder der Erarbeitung einer gedämpften Schwingung am Beispiel des Feder-Masse-Schwingers verwendet werden. Beim Einsatz in der Vertiefung ist die selbständige Arbeit der Lernenden ausgeprägter, denn als Vorwissen bringen Sie

bereits Kenntnisse über die gedämpfte Schwingung mit. Beim Einsatz des Experimentes in der Erarbeitungsphase ist das Experiment auch ohne diese Kenntnisse durchgeführt werden. Das Video erlaubt eine erkenntnisreiche Analyse mit einem hohen Erkenntnisgewinn für die Lernenden. Die Begriffe Frequenz und Amplitude sollten die Lernenden beherrschen.

Charakterisieren des Experiments:

Kategorie des Experiments: halbquantitativ oder qualitativ

Ziel(e) des Experiments: Ermitteln der Frequenz, der Amplitude und insgesamt des Bewegungsablaufes.

Art: Schülerexperiment

Lernziel:

(HS/RS) Die Schüler und Schülerinnen bauen einen Feder-Masse-Schwinger aus Stativmaterial auf und gewinnen Einblick in die Videoanalyse Viana, um die Bewegung(en) zu analysieren. Sie beherrschen das Zeichnen und Interpretieren des Amplituden-Zeit-Diagramm einer exemplarischen ungedämpften oder gedämpften Federschwingung. (RS) Ermitteln der Frequenz und der Amplitude eines Schwingers aus dem Amplituden-Zeit-Diagramm.

Einordnung in die KMK-Kompetenzbereiche für das Fach Physik:

Die Anforderungen dieses Schülerexperimentes entsprechen dem Bereich II im Erkenntnisgewinn in einer Aneignungsphase auch dem Bereich III

	I	II	III
F		✓	
E		✓	✓*
K			
B			

Tabelle 3.3: Einordnung in die KMK-Kompetenzbereiche für das Fach Physik, \*...Einsatz des Experimentes zum Erkenntnisgewinn

### 3.3.2 Darlegung des Experiments

Aufgabenstellung an die Lernenden

Untersuche die Bewegung eines ungedämpften, eines schwach gedämpften und eines stark gedämpften Federschwingers. Filme die Bewegungen mit einem Smartphone bzw. Tablet. Achte darauf optisch leicht erkennbare Trackingpunkte für eine digitale Analyse vorzusehen. Um die Bewegung im Vergleich zu sehen, kannst Du einen ungedämpften Schwinger neben dem gedämpften Schwinger montieren. Bestimme dabei die Amplitude und die Frequenz mit dem Videoanalyseprogramm Viana, in dem du die gefilmte Bewegung des Schwingers analysieren lässt.

## Vorbetrachtung

Die schwache Dämpfung wird durch Luftreibung mit einer Pappscheibe auf der Masse des Schwingers erzeugt. Für eine stärkere Dämpfung wird die Masse direkt in einem Wasserbad gedämpft. Mit stärkerer Dämpfung sollte auch eine Zunahme der Schwingungsdauer bzw. eine Abnahme der Frequenz beobachtbar sein.

## Geräte und Hilfsmittel

Stativmaterial (Stativfuß, langer und kurzer Stativstab, Kreuzmuffe), Feder, Massekörper, smartes Gerät mit dem Programm Viana - Videoanalyse (siehe auch Abbildung 3.13). Für eine Bessere Analyse der Bewegung sollte der Hintergrund abgedeckt sein und ein Lineal zur Abstandsermittlung im Videobild sichtbar sein. Es ist günstig, das Lineal direkt am Stativ zu befestigen. Damit ist gleichzeitig auch die Bildschärfe dadurch gegeben, dass sich das Lineal und das bewegte Objekt in gleicher Entfernung von der Kamera befinden.

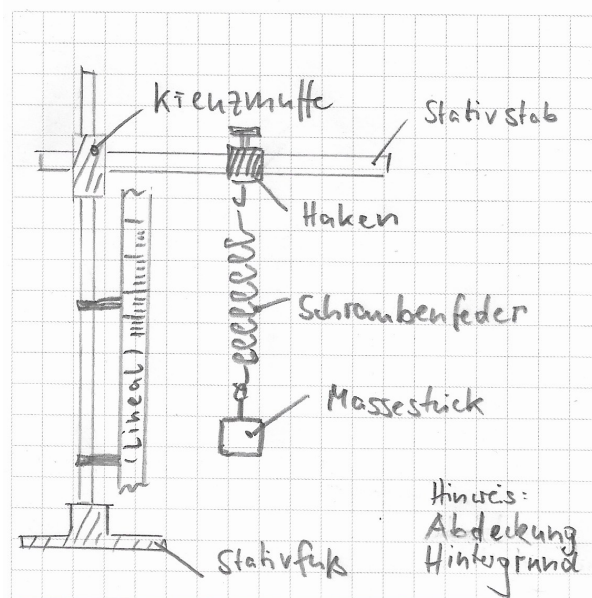


Abbildung 3.13: Aufbauskitze

### 3.3.3 Reflexion des Experimentes

#### Auswertung

#### Feder-Masse-Schwinger ohne zusätzliche Dämpfung

In einem ersten Aufbau wurde eine Feder-Masse-Schwinger ohne zusätzliche Bewegungsdämpfung aufgebaut die Bilder 3.14 bis 3.17 zeigen den Aufbau und die Einstellungen und das Ergebnis. Als Bewegungsrichtung wurde die vorgeschlagene y-Achse verwendet (siehe Bild 3.16)

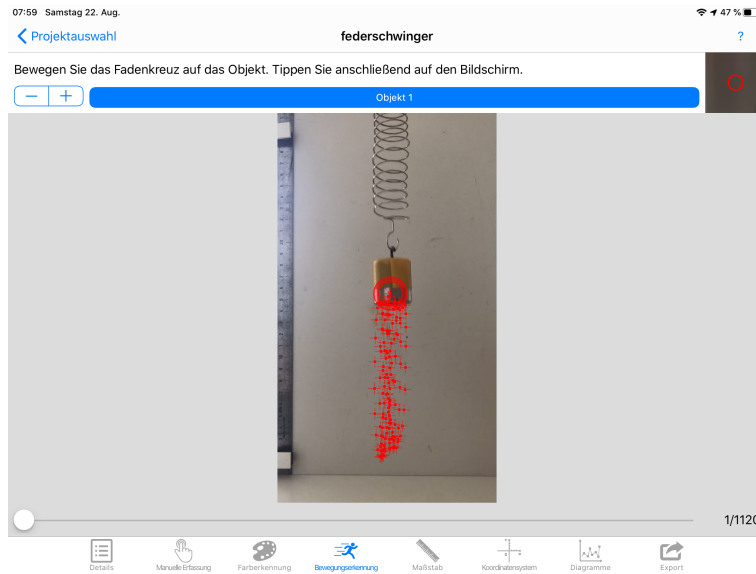


Abbildung 3.14: Bildschirmfoto d. Videoanalyse - Viana: Feder-Masse-Schwinger, Bewegungserkennung

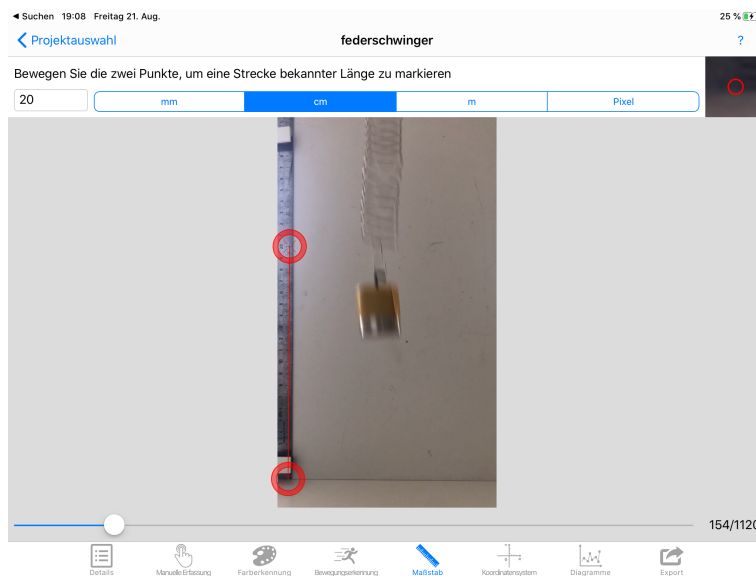


Abbildung 3.15: Bildschirmfoto d. Videoanalyse - Viana: Feder-Masse-Schwinger, Einstellung des Maßstabes

Die Daten können mit der Exportfunktion von Viana auch in eine Tabellenkalkulation übertragen werden. Bild 3.18 zeigt den Import und die Bearbeitung in Numbers.

Ermitteln der Periodendauer, Frequenz und Amplitude

Für die sechs Schwingungen wurde eine Zeit von 3,9 s aus dem bearbeiteten Numbers-Diagramm (siehe Abbildung 3.19) ermittelt. Für eine Schwingung ergibt sich damit eine Periodendauer und Frequenz von:

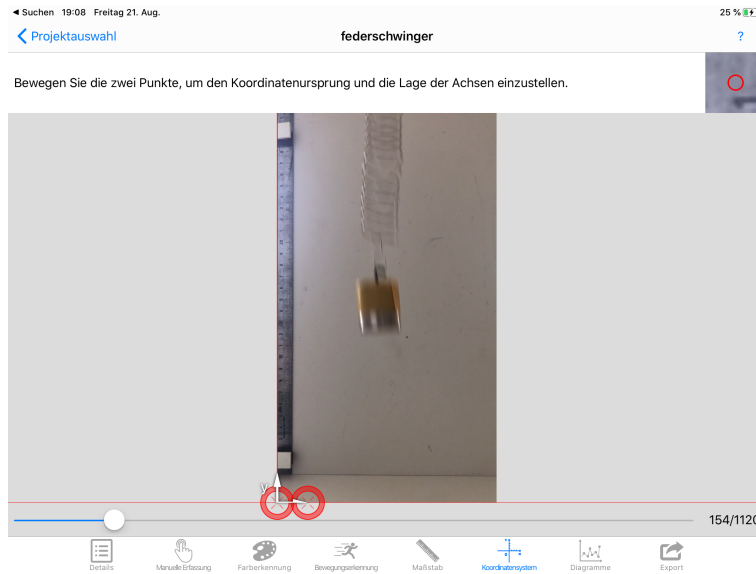


Abbildung 3.16: Bildschirmfoto d. Videoanalyse - Viana: Feder-Masse-Schwinger, Einrichtung des Koordinatensystems

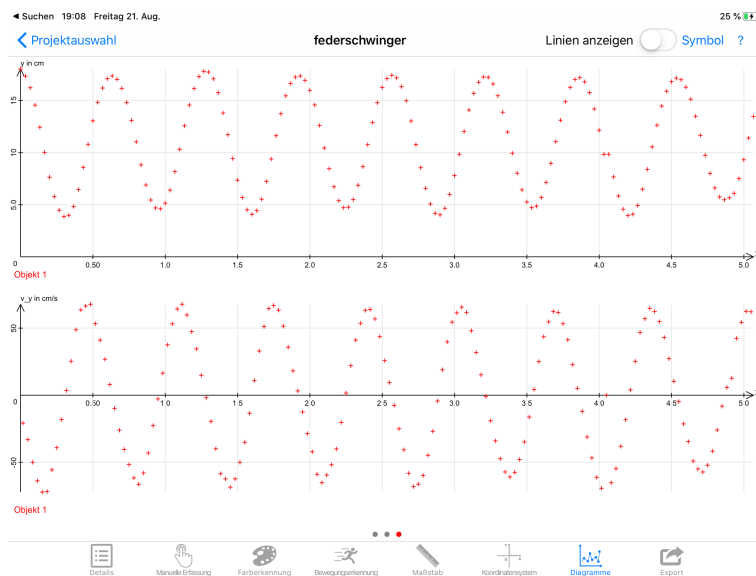


Abbildung 3.17: Bildschirmfoto d. Videoanalyse - Viana: Feder-Masse-Schwinger, Auswertungsdiagramme der Bewegung in y-Richtung

$$T = \frac{3,9 \text{ s}}{6} = 0,65 \text{ s} \quad (3.2)$$

$$f = \frac{1}{T} = 1,54 \text{ Hz} \quad (3.3)$$

Die Amplitude von ca. 7 cm nimmt bei den aufgezeichneten 6 Schwingungen kaum ab.

Feder-Masse-Schwinger mit geringer Dämpfung

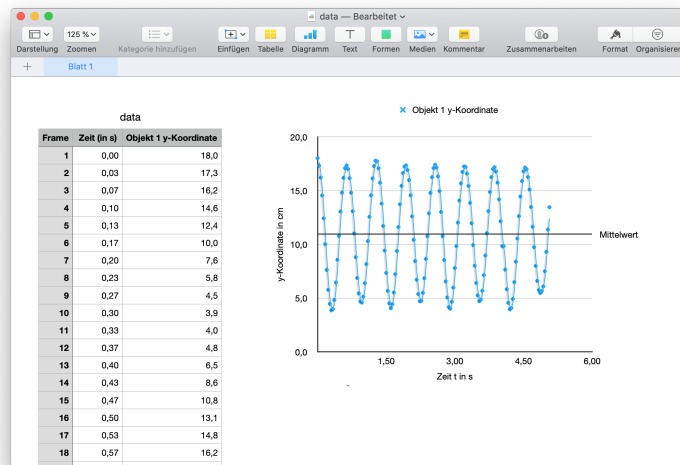


Abbildung 3.18: Aufbereitete Daten als Diagramm in der Tabellenkalkulation Numbers

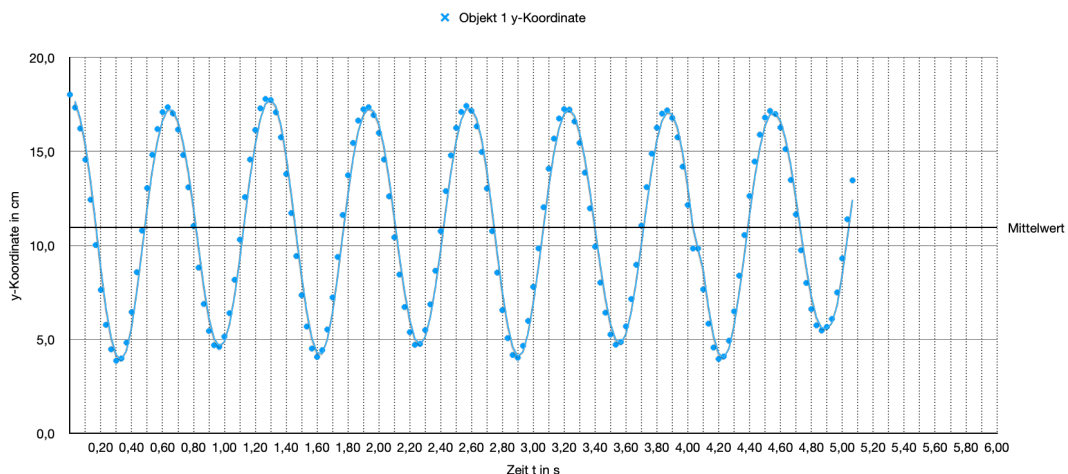


Abbildung 3.19: Importierte Daten in die Tabellenkalkulation Numbers mit Darstellung als x-y-Streudiagramm

Im zweiten Aufbau wurde mit Hilfe einer Pappscheibe die Luftreibung erhöht, um eine schwach gedämpfte Schwingung zu erzeugen. Bild 3.20 zeigt den Aufbau und die Bewegungsanalyse in Viana.

Ermitteln der Periodendauer, Frequenz und Amplitude

Für die 10 Schwingungen wurde eine Zeit von 6s s aus dem bearbeiteten Numbers-Diagramm (siehe Abbildung 3.21) ermittelt. Für eine Schwingung ergibt sich damit eine Periodendauer und Frequenz von:

$$T = \frac{6 \text{ s}}{10} = 0,6 \text{ s} \quad (3.4)$$

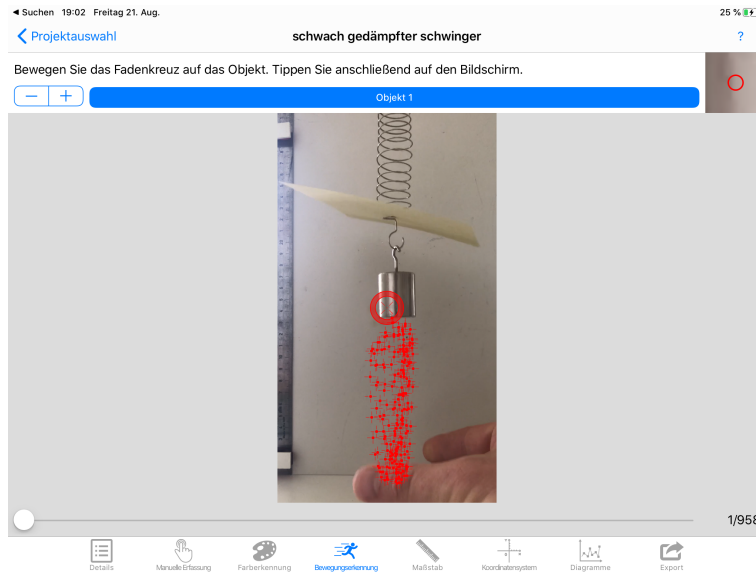


Abbildung 3.20: Bildschirmfoto d. Videoanalyse - Viana: Bewegungserkennung

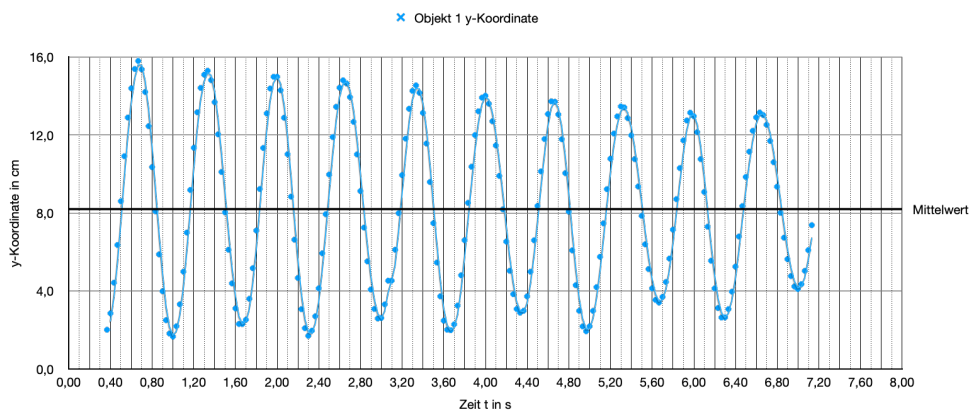


Abbildung 3.21: Aufbereitete Daten als Diagramm in der Tabellenkalkulation Numbers

$$f = \frac{1}{T} = 1,67 \text{ Hz} \quad (3.5)$$

Die Amplitude beträgt für die erste Schwingung 7,2 cm und nimmt bis zur 10. Schwingung auf 4,7 cm ab.

#### Feder-Masse-Schwinger mit starker Dämpfung

In einem dritten Aufbau wurde ein noch stärker gedämpfte Schwinger parallel zu einem ungedämpften Schwinger aufgebaut und gleichzeitig gestartet. Dabei wurde die Bewegung wieder aufgezeichnet und mit Viana analysiert. Bild 3.22 zeigt den Aufbau und die Einrichtung der Koordinaten in Viana. In Bild 3.23 sieht man die Auswertung bei der Bewegung in y-Richtung.

Ermitteln der Periodendauer, Frequenz und Amplitude

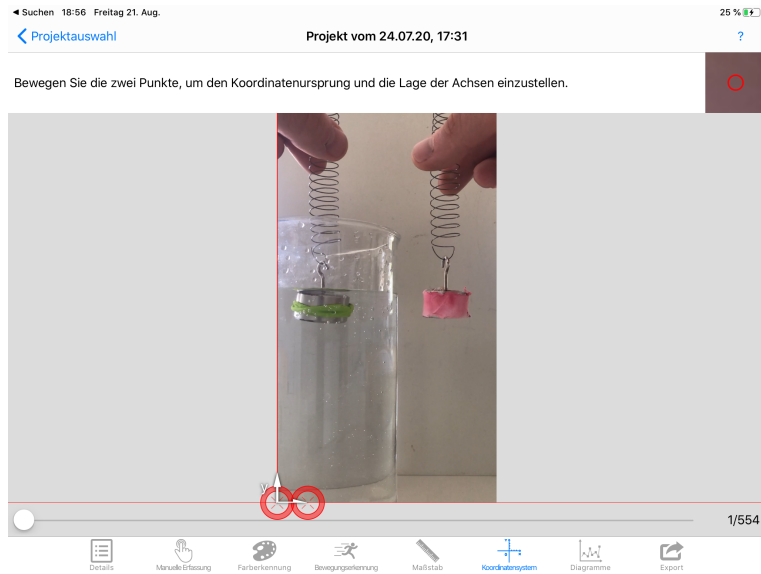


Abbildung 3.22: Bildschirmfoto d. Videoanalyse - Viana: Feder-Masse-Schwinger, Zuordnung der Koordinatenachsen

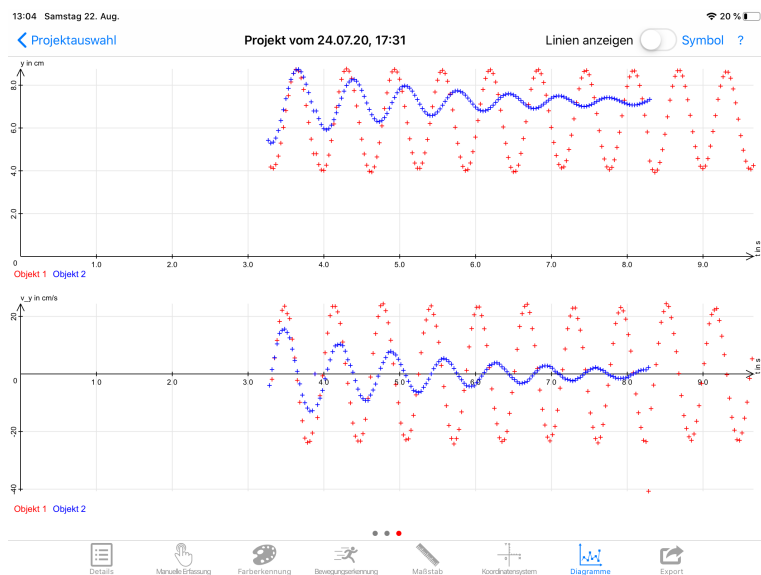


Abbildung 3.23: Bildschirmfoto d. Videoanalyse - Viana: Feder-Masse-Schwinger, Auswertungsdiagramme der Bewegung in y-Richtung

gedämpfte Schwingung Für die 8 Schwingungen wurde eine Zeit von 4,7s s aus dem bearbeiteten Numbers-Diagramm (siehe Abbildung 3.24) ermittelt. Für eine Schwingung ergibt sich damit eine Periodendauer und Frequenz von:

$$T = \frac{4,7 \text{ s}}{8} = 0,6 \text{ s} \quad (3.6)$$

$$f = \frac{1}{T} = 1,67 \text{ Hz} \quad (3.7)$$

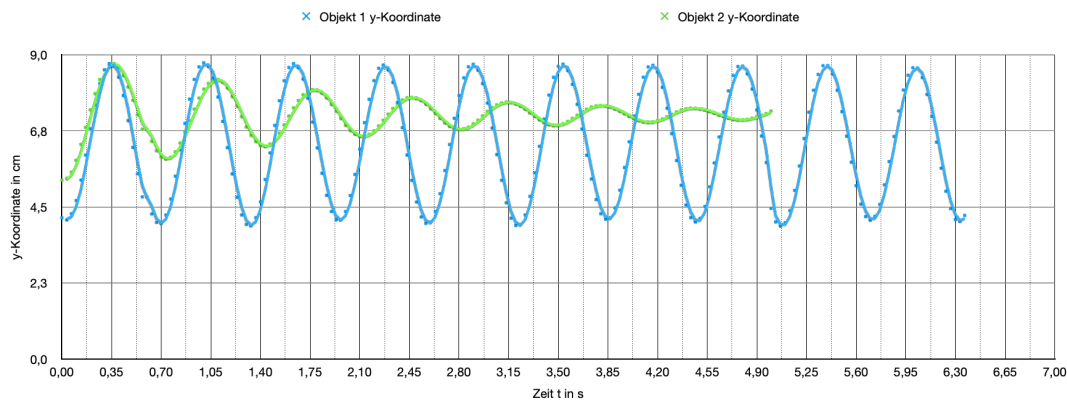


Abbildung 3.24: Aufbereitete Daten als Diagramm in der Tabellenkalkulation Numbers

### ungedämpfte Schwingung

Für die 10 Schwingungen wurde eine Zeit von 5,7 s aus dem bearbeiteten Numbers-Diagramm (siehe Abbildung 3.24) ermittelt. Für eine Schwingung ergibt sich damit eine Periodendauer und Frequenz von:

$$T = \frac{5,7 \text{ s}}{10} = 0,57 \text{ s} \quad (3.8)$$

$$f = \frac{1}{T} = 1,75 \text{ Hz} \quad (3.9)$$

In den Abbildungen 3.23 und 3.24 ist die Abnahme der Amplitude bei der gedämpften Schwingung gegenüber der ungedämpften Schwingung deutlich zu sehen.

### Einsatz im Unterricht

Für den Einsatz in den Unterricht ist der Versuch sehr gut geeignet. Die verwendete Videoanalyse liefert auch ohne den hier verwendeten Datenexport bereits eine sehr gute Aufbereitung der Daten. Die Bewegungserkennung des Programms arbeitet zuverlässig bei guten Kontrast auch ohne besondere Farbkennzeichnung. Leider fehlt es an den Schulen noch an einer geeigneten IT-Infrastruktur, z.B. WLAN und Tablets. Open-Source-Projekte, wie z.B. das verwendete Viana sollten stärker durch Bund und Länder gefördert werden, damit im Schuleinsatz auch für die Nutzung und einer evtl. Weiterentwicklung keine bzw. nur Servicekosten entstehen.

## 4 ELEKTRONISCHES TAFELBILD

Das vorliegende Tafelbild wurde im Rahmen des Seminars passend zum Thema mechanische Schwingungen und Wellen erstellt. Als Software wurde eine Testversion von Easiteach verwendet, auch um im Rahmen des Seminars weitere Möglichkeiten aufzuzeigen. Es zeigte sich, dass es im Bereich der Software für elektronische Tafeln keine geeignete Opensource-Alternative gibt. Noch am weitesten entwickelt war das vom schweizer Öffentlichen Bildungsdepartement geförderte Projekt OpenBoard, dem allerdings noch interaktive Aktionen, wie z.B. aufdecken von Text fehlen.

Als Einstieg in eine fiktive Unterrichtsstunde zum Thema Schallwellen wurde ein Ratespiel nach Art des Galgenmännchens verwendet (siehe Abbildungen 4.1 und 4.2). Im Tafelprogramm easyteach sind eine ganze Menge an solchen kleinen Spielen enthalten. Hier wurde das Spiel als Unterrichtseinstieg gewählt, um Interesse zu wecken und die Lernenden in die Begriffswelt der Wellen und des Schalls zu führen.

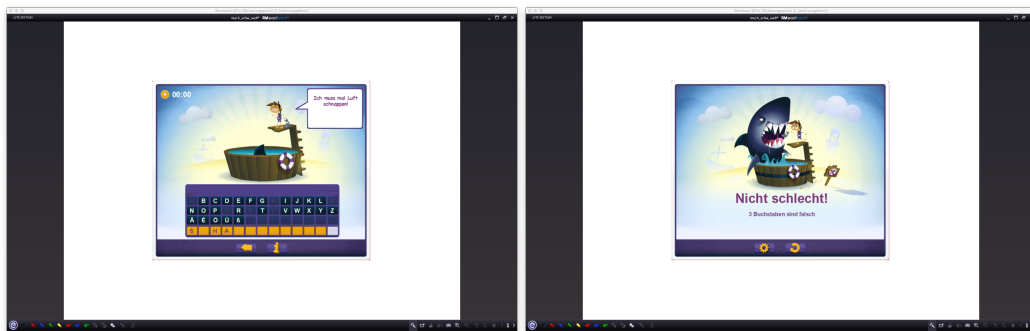


Abbildung 4.1: Bildschirmfoto: easyteach, Raten eines Begriffes  
Abbildung 4.2: Bildschirmfoto: easyteach, Spielende

Das nachfolgende Tafelbild (Abbildung 4.3), welches parallel mit einem Freihandexperiment (zuschlagen eines Buches) begleitet wird, dient der Erklärung zum Entstehen und Wahrnehmen von Schall. Das Tafelbild wird in zwei Schritten aufgedeckt und soll anschließend von den Lernenden übernommen werden.

Die letzte Seite (Abbildung 4.4 des vorbereiteten elektronischen Tafelbildes nutzt die Interaktivität

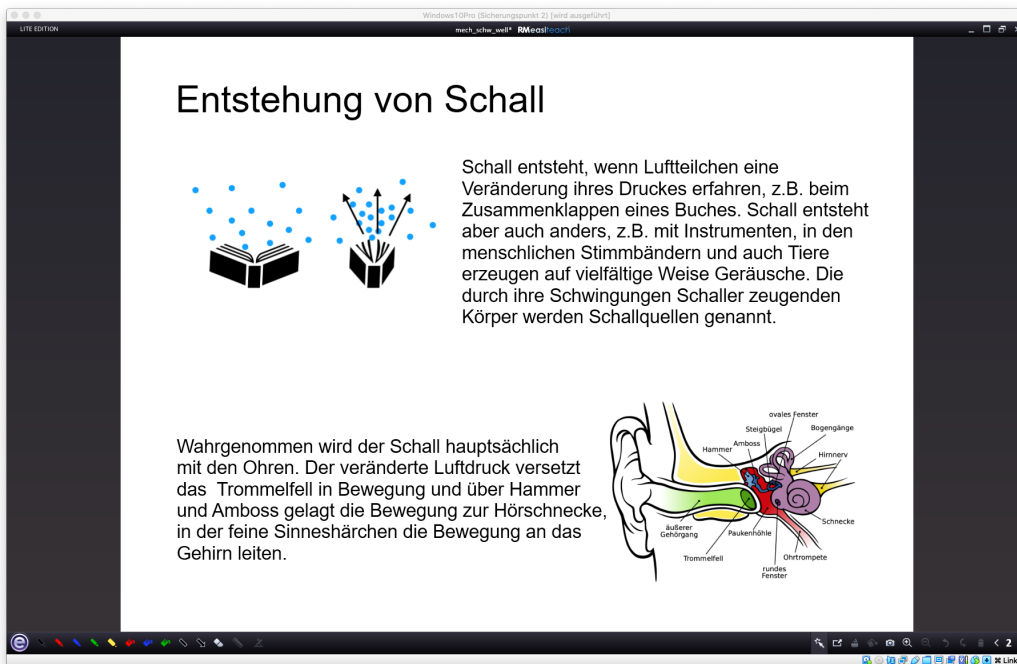


Abbildung 4.3: Bildschirmfoto: easyteach: Darstellung von Lehrinhalten

Aufdecken von Text. Hier sollen in einem Unterrichtsgespräch die entsprechenden Begriffe gemeinsam erarbeitet werden und einzeln nach der Erarbeitung aufgedeckt werden. Im Anschluss sollen auch hier die Lernenden das Tafelbild in ihre Hefter übernehmen.

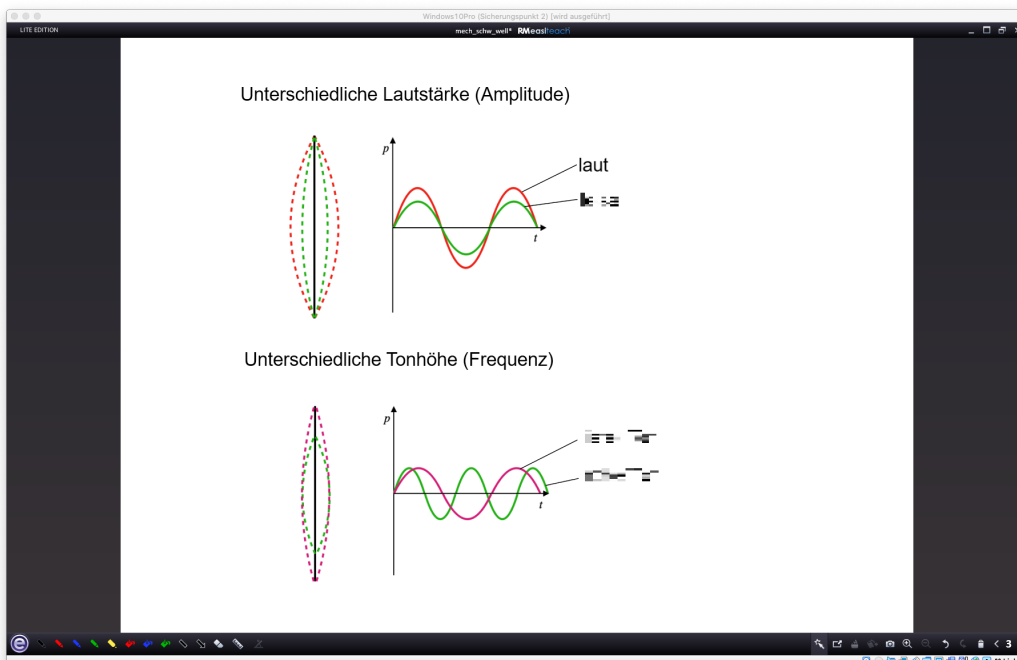


Abbildung 4.4: Bildschirmfoto: easyteach: interaktive Aktion - aufdecken von Text, das erste Wort "laut" ist schon sichtbar

5

## SELBSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsinstitution vorgelegt und ist auch noch nicht veröffentlicht worden.



Falk Beuchel (Dresden, 24.08.2020)

# LITERATURVERZEICHNIS

- [Aut12] Autorenkollektiv: Formelsammlung. Duden/Paetec, 2012
- [Don18] Donabaum, Peter: Diplomarbeit. Universität Wien, 2018 <http://othes.univie.ac.at/52710/1/55702.pdf>
- [Gia10] Giancoli, Douglas C.: Physik. Pearson Deutschland GmbH, 2010
- [KG96] Kattmann, U. ; Gropengießer, H.: Lernen in den Naturwissenschaften. Duit & Rhöneck, 1996
- [MHB13] Mendel, Sebastian ; Hemberger, Joachim ; Bresges, André: Schülervorstellungen zu Wellen. In: Didaktik der Physik, Frühjahrstagung – Jena 2013 (2013). <https://core.ac.uk/download/pdf/228859291.pdf>, Abruf: 20.08.2020
- [SWHD18] Schecker, Horst ; Wilhelm, Thomas ; Hopf, Martin ; Duit, Reinders: Schülervorstellungen und Physikunterricht. Springer Berlin Heidelberg, 2018
- [Wil97] Wilke, Hans-Joachim: Physikalische Schulexperimente. Volk und Wissen, 1997 (Band 1)

# A ANHANG

## A.1 KMK-KOMPETENZBEREICHE FÜR DAS FACH PHYSIK

Im Dokument erfolgt an verschiedenen Stellen eine Einordnung in diese Kompetenzbereiche. Dazu wurde eine Matrix aus drei Anforderungsbereichen und vier Kompetenzbereichen in Form der folgenden Tabelle dargestellt.

	I	II	III
F			
E			
K			
B			

Tabelle A.1: KMK-Kompetenzbereiche für das Fach Physik

Die großen, römischen Ziffern stehen für die Anforderungsbereiche und die Buchstaben für die Kompetenzbereiche mit folgender Bedeutung:

F Fachwissen

E Erkenntnisgewinnung

K Kommunikation

B Bewertung