

Exemplarischer Entwurf für das Lernen am gemeinsamen Gegenstand

Thema der Stunde: Mechanische Schwingungen - Schwingungsdauer Fadenpendel – im Baustein Schwingungen in der gymnasialen Oberstufe

1. Lernziele

- **Hauptanliegen**

Die Lernenden sollen erkennen, von welcher Größe die Schwingungsdauer eines Fadenpendels abhängt.

- **Teilziele:**

- Die Lernenden sollen die Vorgehensweise in einem Experiment zur Abhängigkeit von physikalischen Größen auf die Schwingungsdauer eines Fadenpendels unter Beachtung der Variablenkontrollstrategie planen (Niveau 3).
- Die Lernenden sollen das Experiment durch Mithilfe bei einem Demoexperiment (Leistungsniveau 3 mit Fokus auf Erkennen der mathematischen Zusammenhänge) oder durch Schülerexperimente (Niveau 2 mit Fokus auf dem Erleben der verschiedenen Schwingungsdauern je nach Fähigkeit inkl. Aufbau) durchführen und die Messwerte der Schwingungsdauern aufnehmen. Die Lernenden sollen Seilschaukeln verschiedener Seillänge erleben (Niveau 1).
- Die Lernenden sollen die Messgenauigkeit erhöhen, indem Sie sich mit geschickter Wahl der Anzahl der zu messenden Schwingungen zur Bestimmung der Schwingungsdauer auseinandersetzen (Niveau 2).
- Die Lernenden sollen das geplante Experiment anhand einer Aufgabenstellung auswerten inklusive der Nutzung eines Diagramms und dem Finden eines mathematischen Zusammenhangs (Niveau 3).
- Die Lernenden sollen den gefundenen Zusammenhang zur Lösung des anfangs gestellten Problems anwenden und das Problem lösen (Niveau 3).

- **Kompetenzschwerpunkt:** Erkenntnisgewinnung

2. Lerngruppe

Inhaltliches Vorwissen für die Unterrichtsstunde soll sein:

Niveau 1: kein Vorwissen nötig

Niveau 2 und 3: Kenntnis von Grundbegriffen und Kennzeichen von Schwingungsvorgängen wie dem Konzept der harmonischen Schwingung, Grundbegriffen der Schwingung wie Amplitude, Schwingungsdauer / Periodendauer und Rückstellkonstante.

Niveau 3: Die allgemeine Formel für die Schwingungsdauer bei harmonischen Schwingungen.

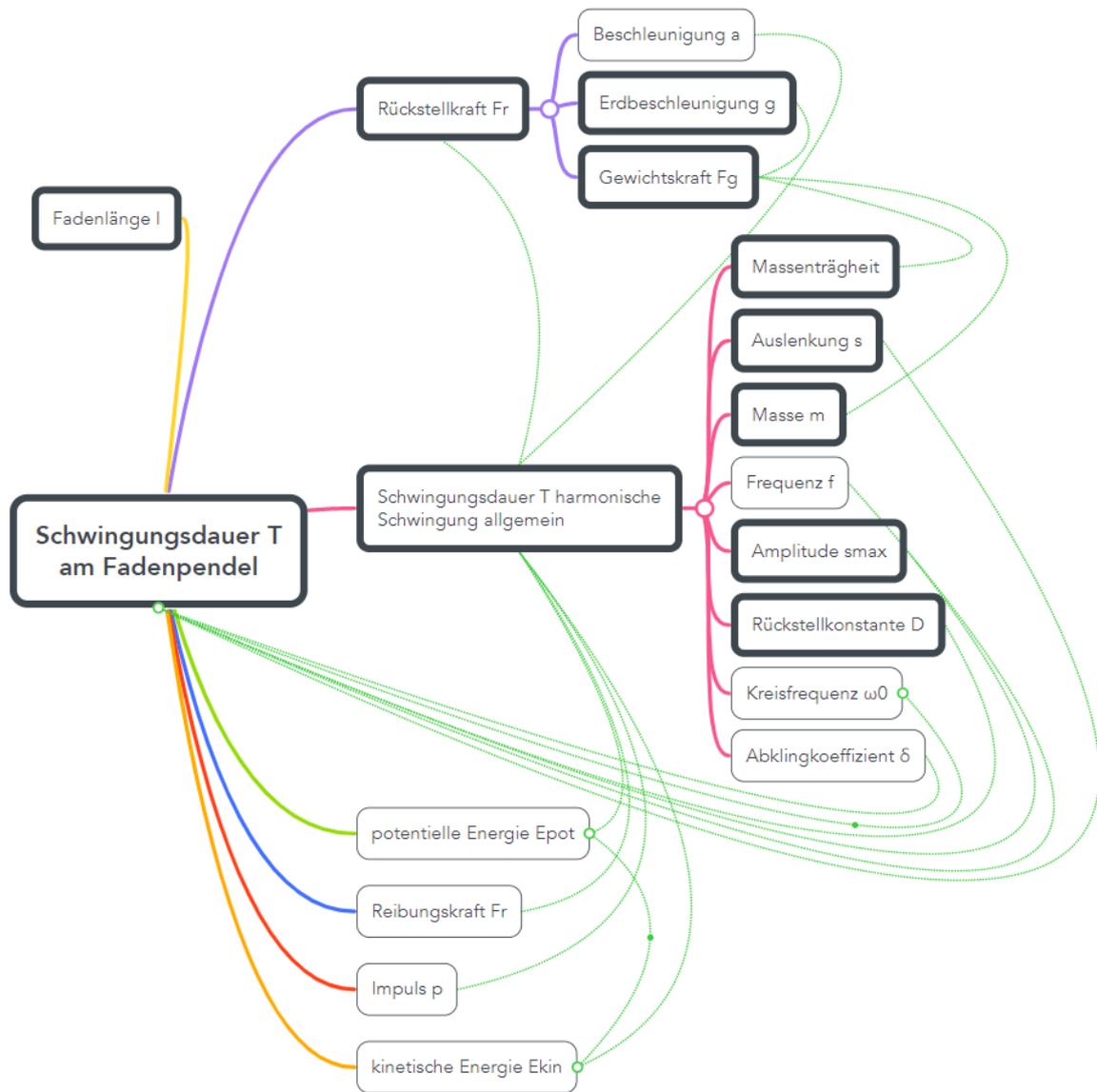
Methodisches Vorwissen:

Niveaus 2 und 3: Durchführung von Zeitmessungen und Planung von Experimenten

Niveau 3: Erstellung von Diagrammen, Umstellen von Formeln und das Federpendel

Wenn wenig oder kein sekundäres Vorwissen vorhanden ist, also bei Lernenden mit elementarem und primärem Zugang (Niveau 1), soll einer der alternativen Wege dieses Entwurfs beschriftet werden.

Sachanalyse



3. Einbettung in Lehrplan, Bildungsstandards und Unterrichtsreihe

- **Relevante Bezüge zum Lehrplan**

- Schwingungen: harmonische Schwingung; Schwingungsdauerformel: Formelinterpretationen und qualitative Analogiebetrachtungen haben Vorrang vor umfangreichen Herleitungen.

- **Angestrebte Kompetenzen**

- E1: Lernende identifizieren und entwickeln Fragestellungen zu physikalischen Sachverhalten.
 - S6: Lernende wenden bekannte Auswerteverfahren auf Messergebnisse an.
 - K6: Lernende veranschaulichen Informationen und Daten in ziel-, sach- und adressatengerechten Darstellungsformen.
- **Mögliche Einbettung in eine Unterrichtsreihe (Niveau 3)**

| Stundenzahl | Thema |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Beispiele für Schwingungen: U-Rohr Schwingung, Federschwingung Sekundärer Teilbereich: Mathematische Grundlagen für Schwingungen |
| 1 | Mechanische Schwingungen: Grundbegriffe und Kennzeichen einer harmonischen Schwingung sowie die Formel zur Schwingungsdauer bei harmonischen Schwingungen |
| 1 | Schwingungsdauer am Fadenpendel |
| 1 | Kräfte am Fadenpendel: geometrisch-mathematische Visualisierung. Harmonische Schwingungen im Zeit-Amplitudendiagramm |
| 1 | Transfer auf akustische Schwingungen |

- **Bedeutung des Lerngegenstands (Alltag und innerphysikalisch)**

Es gibt im Alltag vielfältige Schwingungsvorgänge: Vom Quietschen von Bremsen über Schwingungen bei Musikinstrumenten oder den Schwingungen bei der Schallerzeugung beim Sprechen. Warnsignale können mittels akustischer Schwingungen (Schall) übermittelt werden. Aber auch wenn Signale über Licht vermittelt werden, ist eine Schwingung beteiligt, denn Licht kann Schwingungs- und Welleneigenschaften zeigen (abgesehen von den Teilcheneigenschaften). Es sind hochfrequente elektromagnetische Schwingungen und Wellen, mit denen z.B. bei Mobiltelefonen Daten übertragen werden. Dies hat eine immense Bedeutung für die Alltagskommunikation. Schwingungen werden auch bei anderen technischen Geräten verwendet z.B. bei Uhren (Quarzuhr oder Atomuhr). Selbst die Temperatur makroskopische Körper kann mittels kleinster Teilchenschwingungen erklärt werden. Auch Hochhäuser schwingen: Diese Schwingungen müssen bei der Planung miteinkalkuliert werden, damit die Sicherheit im Alltag gewährleistet wird. Dazu müssen unerwünschte Schwingungen gedämpft werden. Dies ist auch bei Fahrzeugen der Fall, hier werden unerwünschte Schwingungen durch Stoßdämpfer abgedämpft, um ein Aufschaukeln des Fahrzeugs zu verhindern. Schwingungen kommen auch bei Erdbeben vor.

Da so viele Schwingungsvorgänge vorkommen in Alltag und Physik, ist ein Verständnis von Schwingungen sehr nützlich für das Verständnis von physikalischen Phänomenen und Experimenten: vom grundsätzlichen Schwingungsvorgang eines Fadenpendels kann das Konzept auf andere Schwingungen transferiert werden. In Bezug auf Zugänge im elementaren und primären Bereich können Schwingungen am Fadenpendel und die Schwingungsdauer prototypisch für das Konzept Schwingungen verwendet werden. Ein und zwei-Seil Schaukeln haben direkt damit zu tun. Im weiteren Verlauf kann man auf akustische Schwingungen eingehen, z.B. bei

Holzblasinstrumenten, bei denen das schwingende Blättchen direkt gespürt werden kann.

5. Erläuterung der didaktischen und methodischen Entscheidungen

Didaktische Entscheidungen

Das Fadenpendel ist ein einfacher, aber abstrakter Gegenstand, dessen Beschreibung der Schwingungsdauer auf Niveau 3 oftmals mit einer mathematischen Herleitung erfolgt. Damit das Thema zu einer ansprechenden und motivierenden Unterrichtsstunde mit lebensweltlichem Bezug der Lernenden führt, benötigt man aber einen problematisierenden und alltagsbezogenen Einstieg. Dies gilt auch bei den Niveaus 2 und 1. Daher soll auf einen zu Mathematik lastigen Einstieg verzichtet werden. Die Motivation kann zusätzlich mit einer spielerischen Wette gesteigert werden. Als Problemstellung wurde die Aufforderung: „Schätze die Seillänge“ bei einem Video einer Urwaldschaukel mit gegebener Schwingungsdauer gewählt. Ob der Einstieg, der zwar eine spektakuläre, aber auch gefährliche Situation zeigt, auch bei Niveau 1 angewendet werden soll, muss die Lehrkraft unter Berücksichtigung der entsprechenden Lernenden abwägen. Differenzierungsvorschläge werden nachfolgend gemacht.

Als vorbereitende Hausaufgabe für diese Stunde sollten die Lernenden die Grundbegriffe und Größen von Schwingungen wiederholen, damit in der heutigen Unterrichtsstunde ein Basiswissen vorhanden ist, auf dem aufgebaut werden kann.

Es wird als Einstieg (Lernschritt nach Leisen, 2017: Problemstellung entdecken / im Lernkontext ankommen) ein gut bekannter Alltagsgegenstand herangezogen: Die Schaukel mit nur einem Seil. Es wird als Videoimpuls eine spektakuläre Schaukel mit nur einem Seil ausgewählt, bei der die Seillänge nicht erkannt werden kann (die Sicherheitsaspekte dieser Schaukel könnten kurz kritisch diskutiert werden). Alternativ wären als Bildimpuls mehrere Schaukeln mit verschiedenen Parametern in Frage gekommen: Die Seillänge variiert dabei und die Masse. Es ergäbe sich die Frage, wie sich die Bewegungen der Schaukeln unterscheiden und was Einfluss auf die Schwingungsdauer haben könnte: Amplitude, Masse und Seillänge. Die Masse hat zwar beim Fadenpendel keinen Einfluss auf die Schwingungsdauer, jedoch bei dem in der Vorstunde erwähnten Federpendel. Daher muss davon ausgegangen werden, dass die Masse von den Lernenden als mögliche Einflussgröße vermutet wird. Die Amplitude wird von den Lernenden möglicherweise nicht erwähnt, da sie beim Federpendel keinen Einfluss hatte. Sie hat bei kleinen Auslenkungen (bis ca. 20°) des Fadenpendels ebenfalls praktisch keinen Einfluss.

Als alternativen Einstieg könnte man an einen außerschulischen Lernort gehen und dort vorhandene Seilschaukeln unterschiedlicher Seillänge von den Lernenden ausprobieren und hinsichtlich der Schwingungsdauern untersuchen lassen. Dies ist auch motivierend, hat für Niveau 3 und 2 aber Nachteil, dass es für Lernende der Sekundarstufe II nichts Neues ist und außerdem führt das Variieren der Masse auf dem Spielplatz zu Ungenauigkeiten beim Experimentieren, da sich der Schwerpunkt bei Menschen als eingesetzte Masse nicht immer an der gleichen Stelle befindet. Für Niveau 3 können diese Ungenauigkeiten bei mathematischen Analysen der Daten zu Problemen führen. Auch bei Niveau 2 könnte die unterschiedliche Schwerpunktlage der Lernenden als physikalische Masse eine falsche Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Masse entdeckt werden. Wenn man echte Schaukeln mit relativ geringen Seillängen einsetzt, muss man daher bei Niveau 3 und auch Niveau 2 auf den Umgang mit Messunsicherheiten gefasst sein und diese (falsche) Abhängigkeit in einem Experiment im Klassenzimmer prüfen. Da bei Niveau 1 das Erleben mehr im Vordergrund steht und kognitive Operationen oberhalb des elementaren oder primären Zugangs nicht zur Verfügung stehen, ist der Besuch des außerschulischen Lernorts aus physikdidaktischer Sicht empfehlenswert.

Für Differenzierungsniveau 2 und vor allem für Niveau 3 liegt ein stärkerer kognitiver Fokus vor und der sekundäre Zugang wird genutzt. Auf diesen Niveaus sind Schaukeln zwar eine schöne Sache, aber auch nicht mehr so spannend und entwicklungsgerecht wie für geringer kognitiv entwickelte Personen. Das spricht dafür, den erstgenannten Einstieg mit dem Video der Urwaldschaukel zu bevorzugen, da es eine für die Lernenden eine spektakuläre und dadurch spannendere Herangehensweise mit einer Visualisierung durch bewegte Bilder ist. Der Einstieg mit der Urwaldschaukel bringt den Titel der Stunde „Schwingungsdauer des Fadenpendels“ durch den Impuls „Schätze: Wie lang ist das Pendel?“ als Problem in die Köpfe der Lernenden. Als mögliche Folgefragen (Vorstellungen entwickeln): „Wie kann ich von der Schwingungsdauer auf die Seillänge schließen? Wie kann ich meine Schätzung überprüfen? Von welchen Größen hängt die Schwingungsdauer eines Seil- bzw. Fadenpendels ab?“ (siehe E1). Wenn die Lernenden nicht von sich aus auf die Einflussgrößen kommen, kann der Bildimpuls des alternativen Einstiegs genutzt werden.

Die Frage nach der Schwingungsdauer und den Einflussgrößen kann auf induktiv experimenteller oder auf deduktiv theoretischer Ebene (Formel Herleitung aus ähnlichen Dreiecken oder Analogiebildung zu bekannter Theorie) beantwortet werden. Beim Experimentieren muss bei der Anwendung der Variablenkontrollstrategie unterstützt werden (Lernschritt: Lernmaterial bearbeiten / erstellen), um Lernschwierigkeiten zu überwinden.

Ein Wechsel der Repräsentationsebenen ist eine Aufgabe des Physikunterrichts und trägt zur Vertiefung des Verständnisses bei (Leisen 1998). Daher soll in dieser Unterrichtsstunde als Repräsentationsebene nicht nur experimentiert werden (wobei auch dabei schon Tabellen und ein Diagramm zur Auswertung genutzt werden), sondern auch theoretische Arbeit geleistet werden: Die SuS interpretieren ein Diagramm, um einen funktionalen Zusammenhang zwischen Daten zu gewinnen und um eine Formel nachzuvollziehen. Auch in den Bildungsstandards wird das wissenschaftliche Vorgehen der Physik so beschrieben, dass es sich im Wesentlichen in zwei fundamentale Bereiche einteilen lässt: die theoretische Beschreibung von Phänomenen und das experimentelle Arbeiten. Diese Bereiche weisen eine starke Wechselwirkung und gegenseitige Durchdringung auf (KMK, 2020). Der Bezug von Repräsentationsebenen aufeinander (Übersetzen von Informationen von einer in eine andere Repräsentationsart) fördert die Verbindung zwischen Experiment und Theorie (siehe K6).

Zunächst soll ein Experiment durchgeführt werden, um den Beginn des Themas nicht zu Mathematik-fokussiert zu gestalten und um Gelegenheit zum Beobachten von Experimenten zu geben. Im Hinblick auf den späteren Wechsel zur mathematischen Ebene und dem Finden quantitativer Zusammenhänge kann im Experiment der Hinweis gegeben werden, dass die Pendellänge mehrfach halbiert werden soll.

Als Ergebnis kann dann ein je – desto Zusammenhang zwischen Einflussgrößen und der Schwingungsdauer (oder später eine Proportionalität zwischen T und der Wurzel aus l) angegeben werden. Um auf die Wurzelfunktion zu kommen, ist eine Prüfung einer Datentabelle oder eine Visualisierung der Messdaten in einem Diagramm nötig (siehe K6). Ein Problem beim Experimentieren und Diagrammerstellen kann ein enormer Zeitverbrauch sein.

Die Überprüfung der Seillängen-Schätzung kann z.B. mit der Schwingungsdauer-Formel oder alternativ zeitaufwendig und auch dann nur ungefähr durch Extrapolieren von Messwert-Tabellen und Überprüfungsexperimente der extrapolierten Werte beantwortet werden. Es bietet sich die Nutzung der aus der Vorstunde bekannten Formel für die Schwingungsdauer

an harmonischen Schwingungen als Analogie an (dazu wird ein Hinweis auf geringe Auslenkungen gegeben. Eigentlich müsste man strenggenommen erst zeigen, dass die Rückstellkraft bei kleinen Auslenkungen proportional zur Auslenkung des Fadenpendels ist. Dies kann nächste Stunde behandelt werden, daher wird das noch zeitnah thematisiert werden).

Da laut Lehrplan Formelinterpretationen und qualitative Analogiebetrachtungen Vorrang haben vor umfangreichen Herleitungen, wird auf die o.g. bekannte Schwingungsdauerformel von harmonischen Schwingungen zurückgegriffen. Die Idee wird umgekehrt genutzt: Hierbei ist eine Überführung von Experimentalergebnissen durch Interpretation in eine Formel vorgesehen.

Zur Analogiebetrachtung wird vor der Visualisierung der Schwingungsdauerformel die Rückstellkonstante D und die Masse m aus der Formel entfernt. Die Lernenden können nun anhand der experimentellen Ergebnisse eine Hypothese bilden, welche Größe an welche Stelle der Formel passen würde. Es kann nur die Seillänge l sein, da die Masse keinen Einfluss hat. Den mathematischen Zusammenhang konnten die Lernenden bereits dem Diagramm entnehmen. Sie haben wegen des o.g. entsprechenden Hinweises, der während des Experimentes gegeben wurde, die Chance, anhand der Messwerte in Diagramm oder Tabelle zu sehen, dass bei $\frac{1}{4}$ der Seillänge sich die Schwingungsdauer halbiert: Dies ist ein Indiz dafür, dass die Seillänge l in den Zähler unter das Wurzelzeichen gehört.

Diese Art von Hypothesenbildung ist eine naturwissenschaftliche Arbeitsweise und gehört zur Verbindung von Experiment und Mathematisierung. Es bietet sich also eine kombinierte Vorgehensweise an, mit der die Vorteile beider Methoden genutzt werden können. Es werden also verschiedene Repräsentationsebenen genutzt mit den o.g. Vorteilen der Übung von repräsentationseigenen Denkweisen und des resultierenden vertieften Verständnisses durch die Verbindungen der Repräsentationsebenen (nach Leisen, 1998, vgl. auch Scheid, 2013).

Die Vermutung, dass es als zweite Größe mit Einfluss auf die Schwingungsdauer noch die Erdbeschleunigung g gibt, wird bezogen auf das Vorwissen der Lernenden vermutlich zu fern liegen. Der Zugang zu dieser Größe ist auch nur auf theoretischen Weg z.B. über den Zusammenhang von Rückstellkraft und Gewichtskraft zu erreichen, nicht durch das Experiment im Klassenzimmer. Dafür wird ein Hinweis gebraucht. Dieser muss durch den Lehrenden zugänglich gemacht werden. Eine Überlegung in Richtung unterschiedlicher Werte für g kann beispielsweise durch folgenden Impuls geschehen: „Würde die Schaukel auf dem Mond mit der gleichen Schwingungsdauer schwingen?“. Die Argumentation würde dann über die geringere Anziehungskraft, der geringeren Fallbeschleunigung und den damit verbundenen geringeren Rückstellkräften und der längeren Schwingungsdauer geführt werden können.

Danach kann die Formel fertiggestellt werden und die Seillänge der Seilschaukel des Einstiegsvideos errechnet werden. Sollte die Zeit nicht reichen, wird die Gewinnung dieses Zahlenwertes oder auch die dazu nötige Fertigstellung der Formel alternative Hausaufgabe. Die Lernprodukte sollen diskutiert und vernetzt werden. Damit die Vernetzung besser gelingt, unterstützen es die entsprechenden Aufgaben 3 bis 5 auf dem Arbeitsblatt (Niveau 3).

Durch einen Fokus auf die Rückstellkraft und eine Visualisierung des entsprechenden Kräfteparallelogramms kann dann zu Beginn der nächsten Stunde verdeutlicht werden, dass die Rückstellkraft von der Gewichtskraft beeinflusst wird und die Gewichtskraft von g

abhängt. Dadurch wird es verdeutlicht, wie die Erdbeschleunigung die Schwingungsdauer des Fadenpendels beeinflusst.

Wenn wenig oder kein sekundäres Vorwissen vorhanden ist bei Lernenden mit elementarem und primärem Zugang, soll der Fokus von der mathematischen Beschreibung der Schwingungsdauer weggerückt werden zugunsten eines ausgedehnteren Experimentierens. Auf Niveau 2 und 3 wird am Schluss der Stunde das Problem der Seillänge der Urwaldschaukel gelöst. Dies soll als Belohnung für die Mühen erlebt werden. Als Transfer ist es für folgende Unterrichtsstunden wichtig, andere Schwingungsvorgänge (Brücken, Hochhäuser, Bäume etc.) nicht aus den Augen zu verlieren.

Zu erwartende Lernschwierigkeiten:

- Präkonzepte:
 - Eine Schwingungsdauer erstreckt sich von der Auslenkung ganz rechts nach ganz links (oder umgekehrt; jedenfalls weniger als eine fachlich korrekte vollständige Schwingung).
 - Die Masse beeinflusst die Schwingungsdauer des Federpendels (fachlich korrekt tut sie dies nicht).
 - Große Massen werden stärker beschleunigt als kleine (beim Fallen; fachlich korrekt werden sie gleich stark beschleunigt wenn man von der Luftreibung absieht).
- Die Lernenden kennen die Variablenkontrollstrategie nicht genügend.
- Die Lernenden brauchen unerwartet viel Zeit beim Experimentieren.
- Vereinfachungen wie z.B. Reibungsfreiheit werden in der Modellierung nicht angenommen.
- Die Lernenden unterscheiden nicht zwischen Wirklichkeit und Modell (die Formel ist eine Modellierung, welche Modellgrenzen besitzen).

Methodische Planungsentscheidungen

Um die Einflussgrößen auf die Schwingungsdauer zu untersuchen, kann ein Lernenden- oder ein Demonstrationsexperiment durchgeführt werden. Zu beiden Möglichkeiten gehört, dass ein einfaches Experiment geplant wird, bzw. die dort zu variierenden und konstant zu haltenden Größen. Durch die Planung des Experimentes durch die Lernenden wird eine stärkere kognitive Aktivierung erreicht als durch bloßes Abarbeiten einer vorgegebenen Experimentalanleitung. Bei der Planung wird im Wesentlichen die Variablenkontrollstrategie angewendet, es geht nicht primär um das Lernen des Aufbaus eines Fadenpendels. Da die Variablenkontrollstrategie wahrscheinlich nicht mehr sehr präsent ist, wird die Planung zwar, um eine hohe Denkaktivität zu erreichen, in einer kurzen Murmelrunde zwischen den Tischpartnern geleistet, jedoch zur Sicherheit bzgl. fachlicher Korrektheit im Plenum besprochen. Um Zeitverlust durch lange Tafelabschriebe zu vermindern, steht die Strategie auf dem später ausgeteilten Arbeitsblatt, das vor Beginn der Experiment-Durchführung ausgeteilt wird.

Das Experiment kann von den Lernenden skizziert werden. Alternativ kann der Aufbau vorgegeben werden: Der Aufbau des Experiments hat wenig Variationsmöglichkeiten, daher ist es möglich zum Einsparen von Zeichenzeit (der hier wenig Lernzuwachs bringt) auf einem Blatt eine Skizze des Experiments anzubieten. Ein Experiment planen lassen und dann die

Zeichnung vorzugeben könnte möglicherweise von den Lernenden als Widerspruch angesehen werden. Allerdings gibt es bei der Planung dieses Experimentalaufbaus wenige Variationsmöglichkeiten. Die Planung bezieht sich auf den Umgang mit den Variablen und Konstanten; man kann sich gestützt durch eine solche Erklärung für die Vorgabe der Skizze entscheiden (wegen Zeitmanagement) oder sie als Hilfe während der Erarbeitungsphase bereitstellen.

Wenn wenig oder kein sekundäres Vorwissen vorhanden ist bei Lernenden mit elementarem und primärem Zugang, soll der Fokus von der mathematischen Beschreibung der Schwingungsdauer weggerückt werden zugunsten eines ausgedehnteren Experimentierens als Lernenden Experiment. Mit Lernenden, die nicht so lange am Experiment arbeiten können, kann zum Erleben von Schwingungsdauern von Einseil-Schaukeln oder Zweiseil-Schaukeln der Spielplatz aufgesucht werden. Dies mag spannender sein, das eigene Erleben kostet aber mehr Zeit und rückt den Fokus auf das weniger Abstrakte. Für Lernende mit sekundärem Zugang ist der Besuch eines Spielplatzes mit mehreren Schaukeln zwar in dieser Planung nicht vorgesehen, kann aber gerne als Zusatz genutzt werden. Es soll dann aber weniger Zeit verwendet werden als für Lernende, für die ein primärer, elementarer oder basaler Zugang nötig ist. Möglichst sollten Schaukeln mit 3 verschiedenen Seillängen vorhanden sein, wenn ein Schwerpunkt auf das eigene Erleben gelegt wird.

Im Gespräch sollten auf der primären Stufe die Unterschiede der Schwingungsdauern gegenübergestellt werden: „Schaukeln brauchen unterschiedlich lange, um hin-und her zu schwingen. Längere Seile erzeugen längere Zeiten für eine Bewegung“. Zeichnungen verschiedener Schaukel mit unterschiedlicher Seillänge können angefertigt oder vorgefertigt zur Verfügung gestellt werden und die Schwingungsdauer zugeordnet werden. Auf elementarer Stufe genügt der erste Satz der Formulierung. Für einen basalen Zugang genügt das eigene Erleben von Schwingungsbewegungen einer Schaukel und die Beobachtung oder dem Erfühlen der Bewegung von außen (Achtung: Unfallgefahr). Als weitere Differenzierung ist Nutzung von z.B. Active Learning nach Lilli Nielsen (1996) möglich oder unter Verwendung von Universal Design of Instruction (2018) als Beispiel für allgemeine weiterführende Literatur.

Das Arbeitsblatt wird aus Zeitgründen mit (leeren) Tabellen für die Messwerte ausgegeben, in welche die Messergebnisse und darunter die konstant zu haltenden Größen eingetragen werden sollen (einige Ideen Anregungen für Niveau 3 hat das Arbeitsblatt von Sprenger und Schuster (o. J.) geliefert. Auch die Amplitude hat Berücksichtigung in Tabellen gefunden (materiale Steuerung des Unterrichts), obwohl sie bei größeren Auslenkungen für die spätere mathematische Modellierung wegen der Idealisierung und didaktischen Reduktion bzgl. der Schulmathematik zwar keinen Beitrag leistet, aber an ihr die Grenzen von Modellierungen thematisiert werden können. Die Untersuchungen sollen außer im Teil, in dem es um die Einflüsse der Amplituden geht, mit kleinen Amplituden durchgeführt werden (damit die Fehler gering gehalten werden). Das Arbeitsblatt (Niveaus 2 und 3) leitet die Lernenden auch zur Auswertung des Experimentes an und damit zur Beantwortung des Stundenthemas. Dazu wird die Lösung als Elementarisierung in mehrere Schritte aufgeteilt, um die Lernenden nicht zu überfordern:

- 1) Von welchen physikalischen Größen hängt die Schwingungsdauer eines Fadenpendels ab?
- 2) Vermute: Welcher mathematische Zusammenhang besteht zwischen Schwingungsdauer und der Variable mit dem größten Einfluss auf sie (vergleiche dazu die Werte jeweils nur innerhalb einer Tabelle)

Auf einer später auszuteilenden Ergänzung des Arbeitsblattes befinden sich weitere Aufgaben. Grund für das spätere Austeilen: Ein Hinweis auf die Formel würde direkt die Lösung von Aufgabe 2 „verraten“:

- 3) Analogiebildung zur bekannten Schwingungsdauerformel
- 4) Denkanregung mit Tipps, welche Größe der Schwingungsdauer-Formel noch fehlt
- 5) Berechnung der Seillänge des Einstiegsperiments (ggf. als Hausaufgabe)

Im Arbeitsblatt auf Niveau 2 entfallen die mathematischen Dinge. Niveau 1 erhält gar kein Arbeitsblatt, sondern die Lehrer erhalten ein Hinweisblatt zur Mitnahme zum Lernort mit den Seilschaukeln.

Das Arbeitsblatt (Niveau 2 und 3) soll in Partnerarbeit bearbeitet werden, damit fachliche Diskussionen möglich sind und Fragen untereinander geklärt werden können. Die Arbeit mit Lernenden auf Niveau 1 kann auch durch Kommunikation unter den Lernenden und Blickkontakt ansprechender gestaltet werden.

Das Experiment könnte grundsätzlich zwar in Einzelarbeit, Partnerarbeit oder in Vierergruppen stattfinden, jedoch auch als Demonstrationsexperiment ggf. mit Lernenden als Experimentatoren. Die Einbindung von Lernenden in ein Demonstrationsexperiment soll hier die Motivation und die Selbstwirksamkeitserwartung der Lernenden erhöhen. Der Lehrende kann sich zurücknehmen und als Moderator agieren.

Da es auf Niveau 3 jedoch mehr auf die Auswertung ankommt und das Experiment einfach in der Durchführung ist, kann als Alternative zum Lernendenexperiment durch Wahl eines Demonstrationsexperimentes mehr Unterrichtszeit für Diskussionen bezüglich der Auswertung verwendet werden. Zum Abkürzen der Messwertaufnahme kann durch Austeilen oder Visualisieren von weiteren Messdaten (auch als Diagramm) weitere Unterrichtszeit zugunsten von Diskussionen gewonnen werden.

Ein relevanter zusätzlicher Erkenntnisgewinn im Sinne des Studententhemas durch das Fadenpendel als Schülerexperiment wird also bei Niveau 3 als nicht sehr hoch eingeschätzt; die Gefahr, das Experiment nicht ganz auswerten zu können, dagegen als hoch. Daher habe ich mich für ein Demonstrationsexperiment entschieden. Da das Lernziel der Stunde nicht primär die naturwissenschaftliche Arbeitsweise ist, wird das Experiment aus Gründen der effizienten Zeitnutzung am Pult fertig aufgebaut bereitgestellt. Wenn die Lernenden einen anderen Aufbau geplant haben, kann das Experiment noch umgebaut werden. Dies ist jedoch nicht zu erwarten. Bei Niveau 2 hingegen hat das Experiment jedoch einen höheren Stellenwert und es soll als Schülerexperiment ausgeführt werden, da die Mathematisierung nicht im Fokus der Stunde steht. Hier gibt es einige Fingerfertigkeiten anzuwenden und die Messgenauigkeit kann thematisiert werden: Beim Abschätzen des Schwerpunktes der angehängten Masse und bei der geschickten Wahl der Anzahl der zu messenden Schwingungen zur Bestimmung der Schwingungsdauer.

Der funktionale Zusammenhang zwischen Seillänge und Schwingungsdauer soll grafisch aus dem selbsterstellten Diagramm entnommen werden (er kann auf Wunsch auch mit größerer Schwierigkeit aus der Messwerttabelle gewonnen werden). Sollte der funktionale Zusammenhang aus den Messwerten der Stunde nicht ersichtlich sein (es gibt bekanntlich einige Unwägbarkeiten beim Experimentieren), ist geplant zusätzlich den Zusammenhang in einem Diagramm aus einem anderen Experiment an der Leinwand zu visualisieren. Hier sind zwei charakteristische Wertepaare eingetragen. Aus diesen Wertepaaren kann der von den Lernenden gefundene Zusammenhang auch rechnerisch auf Plausibilität geprüft werden (wozu eigentlich viele Paare nötig wären, die Prüfung hat exemplarischen Charakter).

Durch den Rückbezug auf den Anfang der Stunde geschieht eine Rahmung der Arbeit: Das Problem, wie lange das Seil der Urwaldschaukel ist, wurde gelöst.

7. Geplanter Unterrichtsverlauf

| Datum: | | Uhrzeit: | Thema: Schwingungsdauer Fadenpendel | | | Klasse: 12 | Raum: Physiksaal | |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--|
| Zeit in min | Phase | Inhalt | Methode | Medium | Lehrerverhalten / mögliche Impulse | Erwartetes Schülerverhalten | Evtl. Funktion | |
| 5 | Problemstellung entdecken / im Lernkontext ankommen Vorstellung entwickeln | Video mit einer spektakulären Seilschaukel (Seillänge unbekannt) Hypothesen, Deutungsansätze, Bearbeitungsideen und individuelle Vorstellungen zur Problemstellung entwickeln | Videoimpuls (Niveau 2 und 3) (Niveau 1: Spielplatz mit Schaukel) | Beamer Tafel Tafel | Impuls: „Schätze: Wie lang ist das Pendel?“ Wovon könnte die Schwingungsdauer abhängen? Um es herauszufinden, planen wir ein Experiment ... und suchen danach eine mathematische Abhängigkeit. | Beschreiben das Video. Messen evtl. Schwingungsdauer Notieren v. Schätzwerten Äußern: „Seillänge, Masse“ Alternative für Niveau 1: Gang auf Spielplatz, erleben von verschiedenen Schaukeln | Einstieg / im Lernkontext ankommen Vorstellungen entwickeln | |
| 20 | Lernmaterial bearbeiten/ Lernprodukt erstellen | Bearbeitung des AB Aufgabe 1): Vorgehen im Experiment bzgl. der Variablen und Konstanten planen Durchführung Experiment | Partnerarbeit mit Plenumsanteilen (Niveau 3) (Niveau 2: betreutes Experiment) | AB Demonstrations- experiment | Welche Variablen sollen verändert werden, welche bleiben dabei jeweils konstant? Siehe Erwartungshorizont | Äußern Ihre Ideen Führen Zeitmessung durch, mehrere | | |

| | | | | | | | |
|----|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| | | | | | | beteiligen sich am Experiment | |
| | | Weitere Aufgaben: Diagrammeintrag, mathematischer Zusammenhang | Partnerarbeit | AB | Schaut sich am Arbeitsplatz den Fortschritt an, gibt wenn nötig Hilfen | Bearbeiten Aufgaben | |
| 15 | Lernprodukt diskutieren Sichern und vernetzen | Individuelle Ergebnisse werden ins Plenum gebracht, diskutiert und zum Konsens geführt. Vernetzen wird durch Aufgaben 3 und 4 angeregt | Plenum UG alle Niveaus, falls Niveau 1 vom Spielplatz wieder zurück | Beamer, Tafel | Lehrer moderiert, visualisiert Antworten. Gibt Hinweise zur Lösung der Aufgaben, wenn sie nicht gelöst wurden (vor allem bei Aufgabe 4, Niveau 3, mit der fehlenden Einflussgröße) | Lernende stellen ihre Antworten vor und diskutieren. Vergleichen ihre Ergebnisse Niveau 1 schaut sich in Stille unter Betreuung die Experimente an und lenkt die Pendel aus | Aufgaben 1 und 2 A Aufgaben 3 bis 5 |
| 5 | Ausstieg: Bewertung der Schätzergebnisse | Schätzergebnisse werden mit dem Rechenergebnis verglichen | Plenum UG Niveau 2 und 3 | Tafel | Markierung der besten Schätzergebnisse Möglicherweise erneutes Abspielen des Videos (nun mit der Kenntnis der Seillänge) | Lernende vergleichen Schätzwerte Ggf. wiederanschauen des Einstiegsvideos (alle Niveaus) mit dem Bewusstsein der bekannten Seillänge | Rahmenbildung und Abschluss |

Bemerkung:

Eine Excel-Datei zur Diagrammdarstellung der Messwerte des Experiments sowie eine PowerPoint-Präsentation mit dem Einstiegsvideo und einigen Lösungen liegen als separate Dateien vor.

Gefährdungsbeurteilung des Versuchs „Periodendauer Fadenpendel“

Lehrerversuch mit Anteilen von Schülern (Niveau 3) oder Schülerversuch mit Anteilen von Betreuungspersonen (Niveau 2 bzw. 1)

Aussagekräftige Beschreibung des Versuchs:

Ein Pendelkörper wird an einer Schnur hin und herpendeln gelassen.

Gefährdungsarten:

Mechanisch

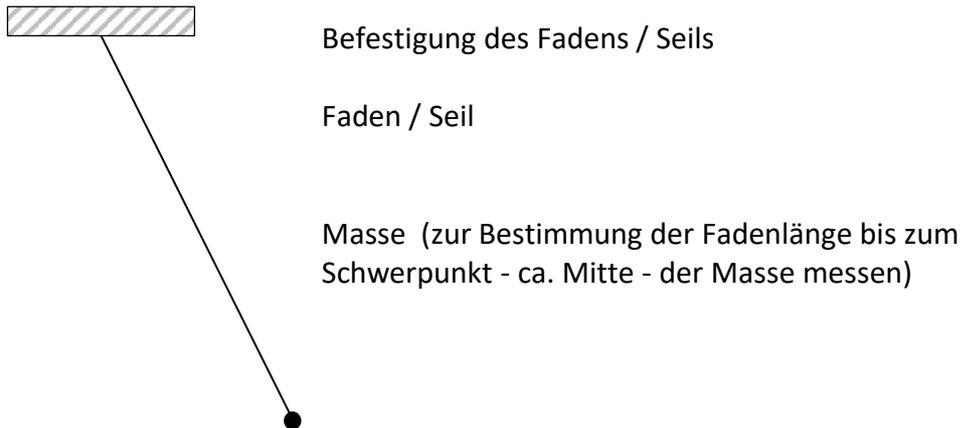
| Konkrete Gefährdungen | Schutzmaßnahmen (z.B. gerätebezogen, baulich, bei der Durchführung des Versuchs) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Umkippen des Versuchsaufbaus | Es werden Tischklemmen verwendet |
| Zusammenstoß mit dem schwingenden Pendelkörper | Keine hohen Massen und Auslenkungen verwenden, Abstand zu den nicht experimentierenden Lernenden einhalten |
| Herunterfallen des Pendelkörpers bei Abreißen der Schnur | Eine der angehängten Masse entsprechen belastbare Schnur verwenden. Alle Klemmen angemessen anziehen. |
| Auf Spielplatz: Herunterfallen von einer Schaukel | Nur Kinder schaukeln lassen, die genug Kraft und Koordination haben, sich selbstständig festzuhalten. Andernfalls auf Schaukeln mit Lehnen ringsum zurückgreifen |
| Auf Spielplatz: Anstoßen eines Körperteils an einer Schaukel oder einer Person, die die Schaukel benutzt | Kinder instruieren, Sicherheitsabstand einzuhalten. Durch Beobachtung und ggf. Eingreifen sicherstellen, dass der Sicherheitsabstand groß genug ist. |

Unterrichtliche Bedingungen (Lerngruppe, Unterrichtsraum, ...) müssen individuell berücksichtigt werden.

Die Schwingungsdauer eines Fadenpendels (Niveau 1). Hinweisblatt für Lehrende

Vorschlag: Gehen Sie mit Ihren Lernenden auf einen Spielplatz mit mehreren Seilschaukeln. Lassen Sie die Lernenden Seilschaukeln mit verschiedener Länge erleben. Je nach Entwicklungsstand, kann man die Lernenden die Seilschaukeln ohne Person darauf oder als Steigerung des Niveaus das folgende Experiment durch Beobachten oder „Selbtschaukeln“ erleben lassen. Hinweis: Die Schwingungsdauer ist die Zeit, in der die Schaukel einmal von ganz vorne nach hinten und wieder nach ganz vorne schwingt.

Skizze des Experiments:



Experiment: Verändern Sie bei dem Experiment nur eines der folgenden Dinge:

- Masse des angehängten Gewichtsstücks (verschiedene Lernende. Schwierigkeit: je nach Größe und Gewichtsverteilung wird die effektive Seillänge dadurch mit verändert)
- Länge des Fadens / des Seils (Schwierigkeit: man misst bis zum Schwerpunkt der Masse)
- Winkel der Auslenkung (wie weit das Pendel zur Seite gezogen wird, bevor man es loslässt)

Messwerte: Lohnen sich wegen der Ungenauigkeiten nur bei gleicher Person und verschiedenen Seillängen aufzuschreiben und zu thematisieren (bzw. gleicher Person und verschiedenen Auslenkungen).

| Zu verändernde Größe: Seillänge l | Gemessene Größe: Schwingungsdauer T |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| kurz; $l = \underline{\quad}$ m | |
| mittel; $l = \underline{\quad}$ m | |
| lang; $l = \underline{\quad}$ m | |

Konstant bleibende Größen

Person (Masse) und Auslenkung $\alpha = \text{klein}$

| Zu verändernde Größe: Auslenkung α | Gemessene Größe: Schwingungsdauer T |
|-------------------------------------------|---------------------------------------|
| klein | |
| mittel groß | |
| sehr groß (Achtung!) | |

Konstant bleibende Größen

Seillänge $l = \underline{\quad}$ m und Person (Masse)

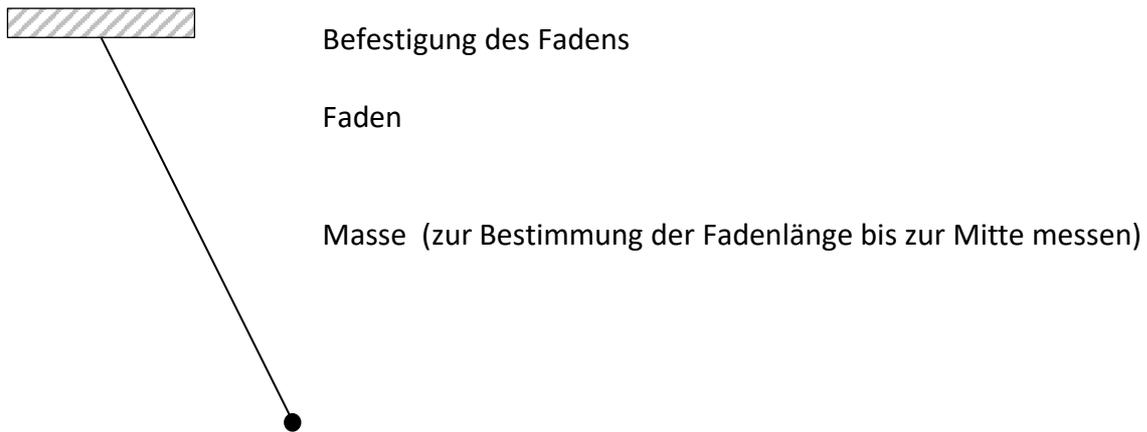
Die Schwingungsdauer eines Fadenpendels (Niveau 2)

Wovon hängt die Schwingungsdauer eines Fadenpendels ab?

Finde heraus, wovon die die Schwingungsdauer eines Fadenpendels abhängt. Lasse das Experiment möglichst gleich und verändere nur eines der folgenden Dinge:

- Masse des angehängten Gewichtsstücks
- Länge des Fadens
- Winkel der Auslenkung (wie weit das Pendel zur Seite gezogen wird, bevor man es loslässt)

Skizze des Experiments:



Messwerte

| Zu verändernde Größe: Seillänge l | Gemessene Größe: Schwingungsdauer T |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

| Zu verändernde Größe: Masse m | Gemessene Größe: Schwingungsdauer T |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

Konstant bleibende Größen mit Zahlenangabe:

Masse $m =$ _____ und Auslenkung $\alpha =$ _____

Konstant bleibende Größen mit Zahlenangabe:

Seillänge $l =$ _____ und Auslenkung $\alpha =$ _____

| Zu verändernde Größe: Auslenkung α | Gemessene Größe: Schwingungsdauer T |
|----------------------------------------------|------------------------------------------|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

Konstant bleibende Größen mit Zahlenangabe:

Masse $m =$ _____ und Seillänge $l =$ _____

Ergebnis:

Die Schwingungsdauer hängt von folgender Größe / folgenden Größen ab:

Die Schwingungsdauer ist hingegen unabhängig von folgender Größe / folgenden Größen:

Anwendung:

Petra möchte zwei Schaukeln mit verschieden langen Schwingungsdauern bauen. Zeichne, wie die beiden Schaukeln aussehen könnten!

1. Schaukel (lange Schwingungsdauer)

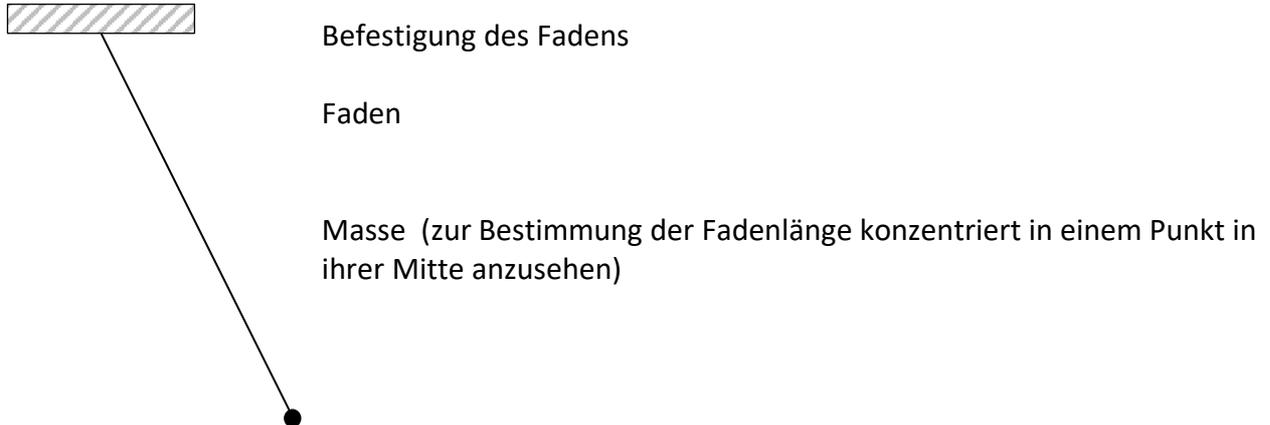
2. Schaukel (kurze Schwingungsdauer)

Die Schwingungsdauer eines Fadenpendels (Niveau 3)

1) Von welchen physikalischen Größen hängt die Schwingungsdauer eines Fadenpendels ab?

Plane die Vorgehensweise in einem Experiment, mit dem Einflussgrößen auf die Schwingungsdauer beim Fadenpendel herausgefunden werden können. Beachte, dass bei Experimenten immer nur eine Variable verändert werden darf und die anderen konstant bleiben müssen.

Skizze des Experiments:



Hinweise: Im Hinblick auf eine spätere mathematische Beschreibung: Verändere die Variablen so stark, dass du eine Halbierung der Schwingungsdauer erreichst (oder sogar ein Viertel). Verwende geringe Amplituden.

Messwerte:

| Zu verändernde Größe: Seillänge l | Gemessene Größe: Schwingungsdauer T |
|----------------------------------------|------------------------------------------|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

| Zu verändernde Größe: _____ | Gemessene Größe: Schwingungsdauer T |
|--------------------------------|------------------------------------------|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

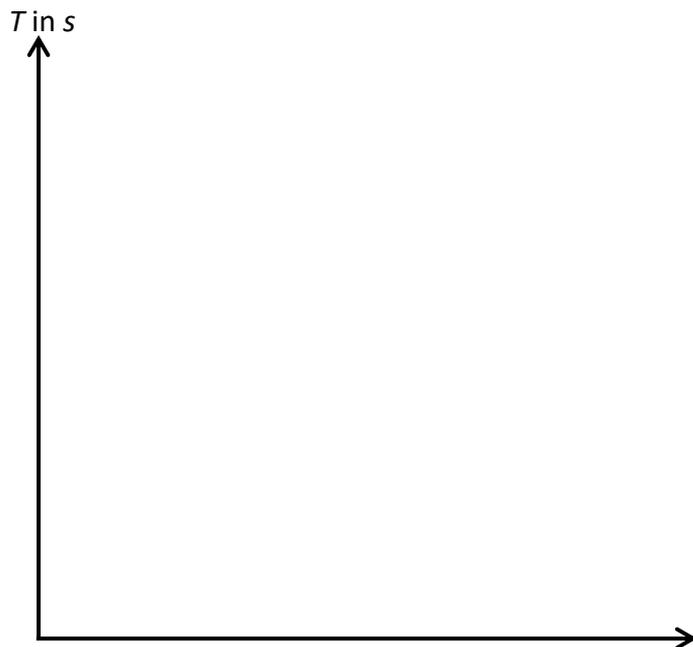
Konstant bleibende Größen mit Zahlenangabe:

_____ und _____

Konstant bleibende Größen mit Zahlenangabe:

_____ und _____

Diagramm der Messwerte: (die noch fehlende Größe soll auf der x-Achse eingetragen werden)



Ergebnis:

Die Schwingungsdauer hängt von folgender Größe / folgenden Größen ab:

→ Die Schwingungsdauer wird länger, wenn _____ die Seillänge _____ (Größe einsetzen) größer wird (Nichtzutreffendes streichen).

Die Schwingungsdauer ist hingegen bei kleiner Amplitude unabhängig von folgender Größe / folgenden Größen:

2) Vermute: Welcher mathematische Zusammenhang besteht zwischen Schwingungsdauer und der Variable mit dem größten Einfluss auf sie?

Die Schwingungsdauer ist proportional zur Wurzel der

_____ (Variable einsetzen); Als Formel ausgedrückt: $T \sim$ _____

3) Die Schwingungsdauerformel für harmonische Schwingungen lautet: $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}}$

Versuche eine ähnliche Formel zu bilden, die für das Fadenpendel gilt.

Vermutung: $T = 2\pi \sqrt{-}$

4) Überlege, welche Größe der Schwingungsdauer-Formel des Fadenpendels noch fehlen könnte (Tipp: das „D“ kann durch eine andere (in dieser Stunde noch nicht verwendete) Größe ersetzt werden).

Tipp: Denke an die Rückstellkraft. Unter welcher Bedingung ist sie bei gleicher Auslenkung und gleicher Masse größer? Die Rückstellkraft hängt von der Gewichtskraft ab, die auf ein Massestück wirkt. Hast du keine Idee, gehe weiter zu Aufgabe 5.

5) Recherchiere, ob deine Idee für die fehlende Größe aus Aufgabe 3 richtig ist! Stelle anschließend die Formel nach der Seillänge um und berechne die Seillänge der Urwaldschaukel vom Stundenanfang.

Die Schwingungsdauer eines Fadenpendels (Niveau 3; Erwartungshorizont)

1) Von welchen physikalischen Größen hängt die Schwingungsdauer eines Fadenpendels ab?

Plane die Vorgehensweise in einem Experiment, mit dem Einflussgrößen auf die Schwingungsdauer beim Fadenpendel herausgefunden werden können. Beachte, dass bei Experimenten immer nur eine Variable verändert werden darf und die anderen konstant bleiben müssen.

Skizze des Experiments:



Befestigung des Fadens

Faden

Masse (zur Bestimmung der Fadenlänge konzentriert in einem Punkt in ihrer Mitte anzusehen)

Hinweise Im Hinblick auf eine spätere mathematische Beschreibung: Verändere die Variablen so stark, dass du eine Halbierung der Schwingungsdauer erreichst (oder sogar ein Viertel). Verwende geringe Amplituden.

Messwerte:

| Zu verändernde Größe: Seillänge l | Gemessene Größe: Schwingungsdauer T |
|----------------------------------------|------------------------------------------|
| 0,20 m | 0,9 s |
| 0,40 m | 1,3 s |
| 0,60 m | 1,5 s |
| 0,80 m | 1,8 s |
| 1,00 m | 2,0 s |

| Zu verändernde Größe: _____ | Gemessene Größe: Schwingungsdauer T |
|--------------------------------|------------------------------------------|
| 0,05 kg | 1,8 s |
| 0,10 kg | 1,7 s |
| 0,15 kg | 1,8 s |
| 0,2 kg | 1,8 s |
| 1,0 kg | 1,7 s |

Konstant bleibende Größen mit Zahlenangabe:

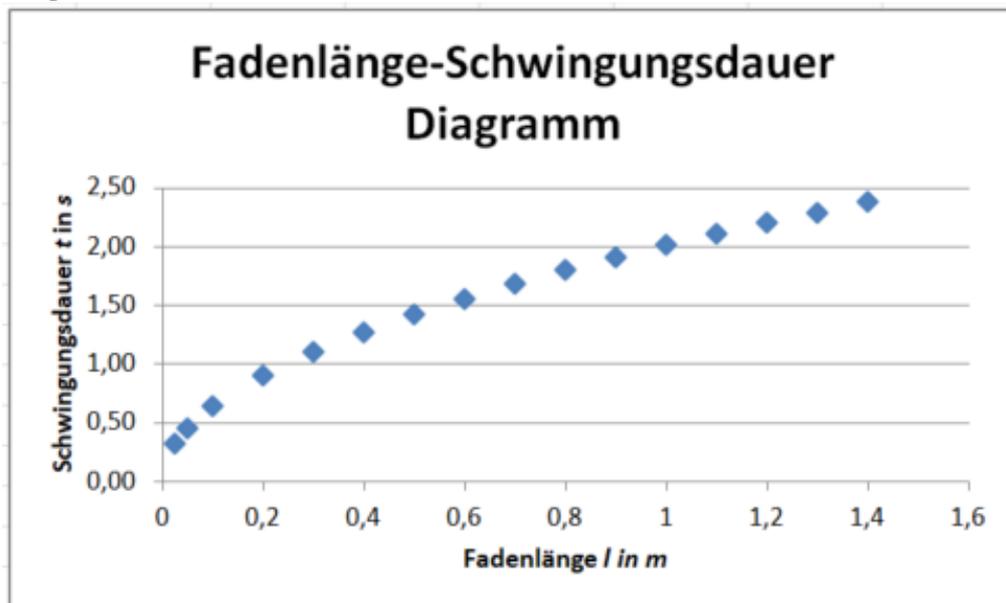
Amplitude: 10 cm und Masse = 0,1 kg

Konstant bleibende Größen mit Zahlenangabe:

Amplitude: 10 cm und Seillänge 80 cm

Mögliche Zusatzuntersuchung: Bei kleinen Amplituden hat die Amplitude keinen Einfluss auf T . Bei großen Amplituden aber schon.

Diagramm der Messwerte:



Ergebnis:

Die Schwingungsdauer hängt von folgender Größe / folgenden Größen ab:

_____ Seillänge _____

➔ Die Schwingungsdauer wird länger, wenn _____ Seillänge _____ (Größe einsetzen) größer / kleiner wird (nichtzutreffendes streichen).

Die Schwingungsdauer ist hingegen bei kleiner Amplitude unabhängig von folgender Größe / folgenden Größen:

_____ Masse _____

2) Vermute: Welcher mathematische Zusammenhang besteht zwischen Schwingungsdauer und der Variable mit dem größten Einfluss auf sie (vergleiche dazu die Werte jeweils nur innerhalb einer Tabelle)

Die Schwingungsdauer ist proportional ~~zum Quadrat von /~~ zur Wurzel von ~~/ zum Kehrwert von /~~ zur

_____ der Seillänge _____ (Variable einsetzen); Als Formel ausgedrückt: $T \sim \sqrt{l}$

3) Die Schwingungsdauerformel für harmonische Schwingungen lautet: $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}}$

Versuche eine ähnliche Formel zu bilden, die für das Fadenpendel gilt.

Vermutung: $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{D}}$

Überlege, welche Größe der Schwingungsdauer-Formel des Fadenpendels noch fehlen könnte (Tipp: das „D“ kann durch eine andere in dieser Stunde noch nicht verwendete Größe ersetzt werden). Hast du keine Idee, gehe weiter zu Aufgabe 4.

Tipp: Denke an die Rückstellkraft. Unter welcher Bedingung ist sie bei gleicher Auslenkung und gleicher Masse größer? Die Rückstellkraft hängt von der Gewichtskraft ab.

$$F_g = m \cdot g \quad m \text{ kann es nicht sein, da } m \text{ unabhängig ist von der Periodendauer } T. \\ \text{Es könnte } g \text{ sein.}$$

- 4) Recherchiere, ob deine Idee für die fehlende Größe aus Aufgabe 4 richtig ist! Stelle anschließend die Formel nach der Seillänge um und berechne die Seillänge der Urwaldschaukel vom Stundenanfang.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \\ l = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 g = \left(\frac{8s}{2\pi}\right)^2 9,81 \frac{m}{s^2} = 1,62s^2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 15,90m$$

Quellenangaben Exemplarische Anleitung Physik Fadenpendel

- Leisen, J. (2017). *Die Strukturierung und Planung von Unterricht*. [Online verfügbar unter <http://www.iosefleisen.de/downloads/lehrenlernen/10%20Strukturierung%20und%20Planung%20von%20Unterricht%20.pdf>, Stand 15.12.2022]
- Nielsen, L. (1996). *Schritt für Schritt*. Edition Bentheim, Würzburg.
- Sprenger, J. & Schuster, F. (ohne Jahr). *Arbeitsblatt Harmonische Schwingungen*. [Online verfügbar unter: https://dll-production.s3-de-central.profitbricks.com/media/filer_public/4f/44/4f44be88-c441-498c-8287-5ff361864c9f/codedllmediainhalteubausteinphysik_5_finalanhangarbeitsblatt.pdf <https://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/das-fadenpendel/> [Stand 11.05.2022] <https://www.leifiphysik.de/mechanik/mechanische-schwingungen/grundwissen/fadenpendel> [Stand 11.05.2022] <https://www.youtube.com/watch?v=i5depqv7IsM> [Stand 11.05.2022] (Einstiegsvideo) Einverständnis der Verwendung vom Autor erhalten am 03.11.2022.] <https://www.mindmeister.com/> [für Mindmap in Unterrichtsentwurf für Lernen am gemeinsamen Gegenstand, Stand 18.08.2024]