Gemeinsame Abituraufgabenpools der Länder

Beispielaufgaben

Aufgabe für das Fach Physik

Kurzbeschreibung

Aufgabentitel	**Dämpfung von Schwingungen bei Wolkenkratzern – sensorgestütztes Experiment**
Anforderungsniveau	erhöht
Inhaltsbereiche	♦ Mechanische und elektromagnetische Schwingungen und Wellen ◆ Schwingungen ♦ mechanische und elektromagnetische harmonische Schwingungen: charakteristische Größen und ihre Zusammenhänge ♦ gedämpfte Schwingungen ♦ Resonanz bei erzwungenen Schwingungen
Materialien	♦ M 1 Pendel als Schwingungstilger ♦ M 2 Daten und Gleichungen ♦ M 3 Experiment
Quellenangaben	♦ Abb. 1: [carig] (2015). Taipei 101. Pixabay. Verfügbar unter: https://pixabay.com/de/photos/taipei-101-geb%C3%A4ude-taiwan-1272292/ (Zugriff am: 21.01.2020). ♦ Abb. 2: [Peggy_Marco] (2012). Schwingungstilger. Pixabay. Verfügbar unter: https://pixabay.com/de/photos/taiwan-taipeh-101-taipei-china-1954652/ (Zugriff am: 21.01.2020). ♦ Alle weiteren Materialien und Abbildungen wurden im Auftrag des IQB erstellt.
Hilfsmittel	♦ Wissenschaftlicher Taschenrechner ♦ Formelsammlung ♦ Experimentiergeräte s. Hinweise für die Hand der Lehrkraft
zusätzliche inhaltliche und methodische Voraussetzungen	♦ Fadenpendel: Energieumwandlungen, Periodendauer ♦ Beschreibung gedämpfter Schwingungen mit Hilfe einer Exponentialfunktion ♦ Bestimmung von Abklingkoeffizienten durch Linearisierung oder Mittelwertbildung
fachpraktischer Anteil	ja ☒ nein ☐ Zeitzuschlag: -
Hinweise	♦ Zusatzinformation Ersatzmesswerte für Prüflinge ♦ Hinweise zum Experiment für die Hand der Lehrkraft

1 Aufgabe

Dämpfung von Schwingungen bei Wolkenkratzern

Taipei 101 ist eines der höchsten Gebäude der Welt. Dieser Wolkenkratzer befindet sich in Taipeh, der Hauptstadt von Taiwan. In dieser Region gibt es oft tropische Stürme und Erdbeben. Dadurch wird Taipei 101 zu Schwingungen angeregt. Diese Schwingungen müssen gedämpft werden, damit Schäden am Gebäude und gesundheitliche Beeinträchtigungen der Menschen durch das Schwanken des Gebäudes vermieden werden. In dem Wolkenkratzer befindet sich ein riesiges Pendel, das als Schwingungstilger die Schwingungen des Wolkenkratzers dämpft.

Abb. 1: Taipei 101, Pixabay, 2015

		BE
1	Beschreiben Sie für die gedämpften Schwingungen des Pendels in dem Wolkenkratzer die auftretenden Energieumwandlungen.	3
	Erläutern Sie eine Möglichkeit, die Schwingung des Pendels stärker zu dämpfen.	2
2	Berechnen Sie für die Schwingungen des Pendels am 8. August 2015 die in den Dämpfern bei der Bewegung der Kugel vom Punkt der maximalen Auslenkung zurück zur Gleichgewichtslage umgewandelte Energie.	5
3	Begründen Sie, dass die Eigenfrequenz des Schwingungstilgers annähernd mit der Eigenfrequenz des Gebäudes übereinstimmen sollte.	2
	Vergleichen Sie auf der Grundlage von Berechnungen die Eigenfrequenzen des Wolkenkratzers mit der des Pendels im Schwingungstilger.	5
4	Erläutern Sie zwei mögliche Ursachen dafür, dass es sich bei den Berechnungen der Eigenfrequenz des Wolkenkratzers in Aufgabe 3 um eine Näherungsrechnung handelt. Betrachten Sie hierzu die Schwingungen eines Gebäudes in Analogie zu denen eines Federschwingers.	6

5 Experiment

Ein wichtiger Parameter für das Tilgen einer Schwingung ist die Dämpfungskonstante *k*. Als Modell für den Schwingungstilger wird das in M 3 beschriebene Fadenpendel verwendet.

- Nehmen Sie mithilfe eines Ultraschallsensors ein Diagramm für die Position des Pendelkörpers in Abhängigkeit von der Zeit auf. 3
  Speichern Sie die Daten.
- Bestimmen Sie aus dem Diagramm die Periodendauer *T*, die Anfangsamplitude und die ersten fünf aufeinanderfolgenden Amplituden mithilfe des entsprechenden Tools der verwendeten Software. 3
- Ermitteln Sie für dieses Fadenpendel aus allen Messwerten die Dämpfungskonstante *k*. 7
- Nennen Sie zwei mögliche Ursachen für Messunsicherheiten. 4
  Erläutern Sie die Auswirkung der Messunsicherheiten auf das Ergebnis der Dämpfungskonstante *k*.

Sollte Ihnen das Aufnehmen von Messwerten nicht gelingen, so können Sie bei der Lehrkraft Ersatzmesswerte anfordern. Den nicht erbrachten Leistungen entsprechend werden bis zu 6 Bewertungseinheiten nicht erteilt.

2 Material

Material 1

Pendel als Schwingungstilger

In dem Wolkenkratzer Taipei 101 befindet sich eine Kugel mit einer Masse von 660 t. Diese Kugel ist an 42 m langen armdicken Stahlseilen aufgehängt. Näherungsweise kann dieses Pendel als Fadenpendel angesehen werden. Während eines Sturms oder eines Erdbebens pendelt die Kugel hin und her. Unten an der Kugel sind Schwingungsdämpfer befestigt, die mit dem Gebäude verbunden sind. Diese Schwingungsdämpfer bremsen die Bewegung der Kugel, dadurch wird die Schwingung des Gebäudes gedämpft.

Am 8. August 2015 betrug während eines Taifuns die Amplitude der Schwingung der Kugel 100 cm. Dabei wurde die Kugel gegenüber der Gleichgewichtslage um 1,2 cm angehoben. In der Gleichgewichtslage hatte die Kugel eine Geschwindigkeit von $0{,}10\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

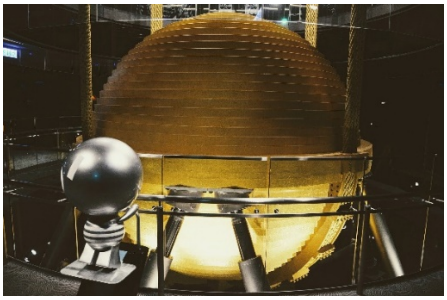


Abb. 2:
Schwingungstilger im Wolkenkratzer Taipei 101, Pixabay, 2012

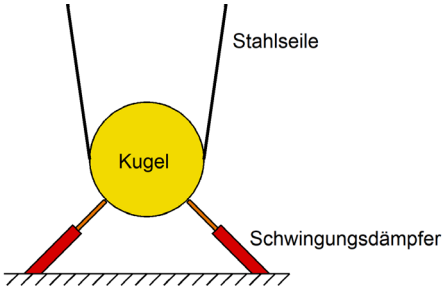


Abb. 3:
Schwingungstilger (stark vereinfacht), IQB

Material 2

Daten und Gleichungen

Tab. 1: Daten und Gleichungen (IQB)

Höhe Taipei 101 bis zur Spitze	508 m		
Höhe Taipei 101 bis zum Dach	448 m		
Fallbeschleunigung in Taiwan	$9{,}79\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$		
Periodendauer T der Eigenschwingungen von Gebäuden (Näherungsformel)	$T = \frac{H}{46\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}$	H	Höhe bis zum Dach des Gebäudes
Abnahme der Amplitude in einem schwingungsfähigen System bei einer exponentiellen Dämpfung	$y_{\text{max}}(\text{t}) = y_{\text{max},0} \cdot e^{-k \cdot t}$	$y_{\text{max},0}$	die Anfangsamplitude zum Zeitpunkt $t = 0$
		$y_{\text{max}}(\text{t})$	Amplitude zum Zeitpunkt $t = n \cdot T$ mit $n = 0; 1; 2; 3 \ldots$
		k	Dämpfungskonstante

Material 3

Experiment

Die Dämpfung von Schwingungen wird am Beispiel eines Fadenpendels untersucht.
Sie finden an Ihrem Arbeitsplatz die folgenden Geräte:

- Einen Versuchsaufbau mit einem Fadenpendel der Länge 1,00 m und einer Pappe als Dämpfer (s. Abbildung 4),
- einen Ultraschallsensor mit einem Datenlogger oder einem Tablett oder einem Notebook sowie
- ein Lineal und einen Zeiger zum Markieren der Anfangsamplitude.

Näherungsweise wird angenommen, dass die Schwingung exponentiell gedämpft wird.
Wählen Sie eine Anfangsamplitude von ca. 20 cm.

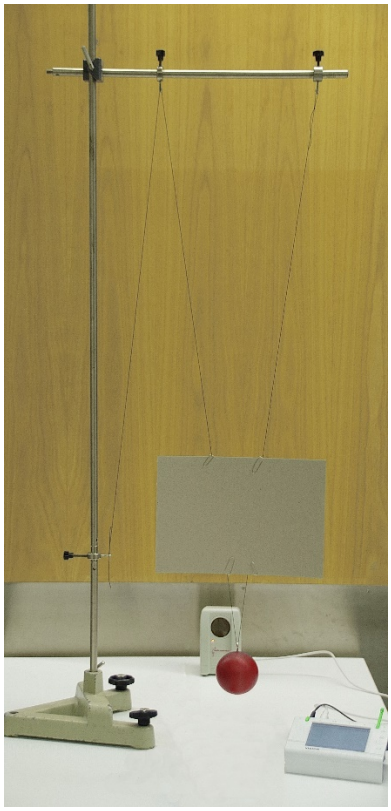


Abb. 4: Versuchsaufbau, IQB

3 Zusatzinformation Ersatzmesswerte für Prüflinge

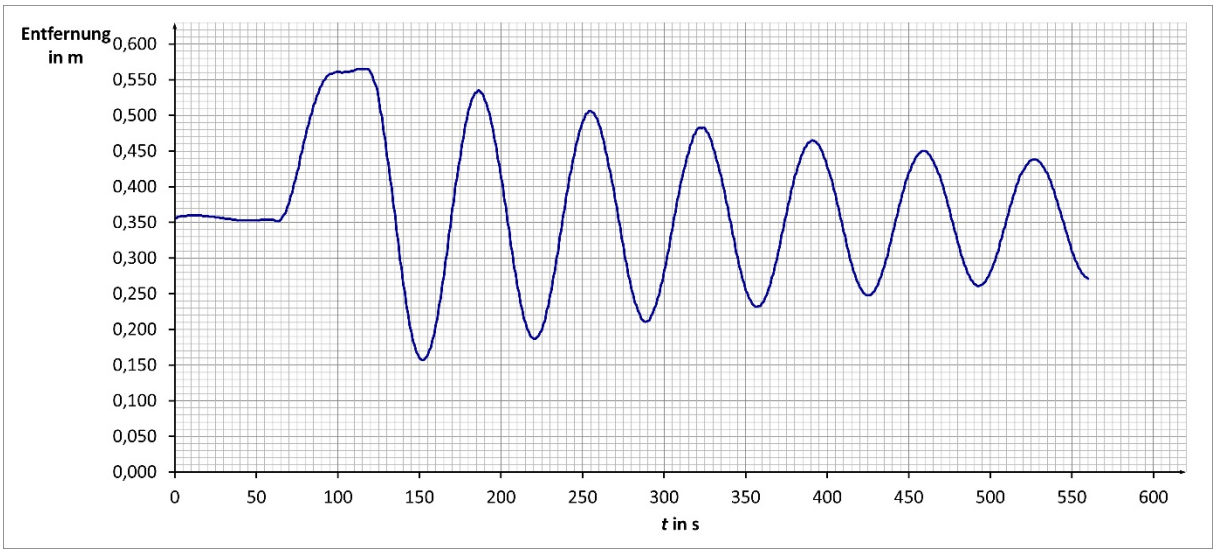
Zusatzinformation 1

Nur auf Anforderung

Es werden 3 Bewertungseinheiten nicht erteilt, wenn diese Werte benötigt werden.

Für die beschriebene Anordnung wurde das folgende Diagramm aufgenommen.

- Bestimmen Sie aus diesem Diagramm die Periodendauer *T*, die Anfangsamplitude und die ersten fünf aufeinanderfolgenden Amplituden.



Quelle: IQB

Zusatzinformation 2

Nur auf Anforderung

Es werden 3 Bewertungseinheiten nicht erteilt, wenn diese Werte benötigt werden.

Aus dem Diagramm wurden die folgenden Messwerte ermittelt:

Periodendauer T = 2,04 s

n	*t* in s	y_{max}(t) in cm
0	0,00	0,211
1	2,04	0,182
2	4,08	0,153
3	6,12	0,129
4	8,16	0,111
5	10,20	0,096

Quelle: IQB

4 Erwartungshorizont

Der Erwartungshorizont stellt für jede Teilaufgabe eine mögliche Lösung dar. Nicht dargestellte korrekte Lösungen sind als gleichwertig zu akzeptieren.

		BE/AFB		
		I	II	III
1	*Beschreiben Sie für die gedämpften Schwingungen des Pendels in dem Wolkenkratzer die auftretenden Energieumwandlungen.* Die Lernenden… S 1 erklären Phänomene unter Nutzung bekannter physikalischer Modelle und Theorien. *Die Lernenden beschreiben die Energieumwandlungen, z. B.:* Umwandlung von kinetischer Energie in potentielle Energie und umgekehrt beim Schwingen der Kugel Umwandlung kinetischer Energie in innere Energie in den Schwingungsdämpfern	3		
	Erläutern Sie eine Möglichkeit, die Schwingung des Pendels stärker zu dämpfen. Die Lernenden… S 1 erklären Phänomene unter Nutzung bekannter physikalischer Modelle und Theorien. *Die Lernenden erläutern eine Möglichkeit zur stärkeren Dämpfung, z. B.:* Durch die Verwendung von mehr Schwingungsdämpfern kann mehr mechanische Energie in Wärme umgewandelt werden. Eine andere Konstruktion der Schwingungsdämpfer mit einer größeren Dämpfungskonstante ermöglicht eine stärkere Dämpfung.		2	
2	*Berechnen Sie für die Schwingungen des Pendels am 8. August 2015 die in den Dämpfern bei der Bewegung der Kugel vom Punkt der maximalen Auslenkung zurück zur Gleichgewichtslage umgewandelte Energie.* Die Lernenden… S 3 wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen; S 7 wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an. *Die Prüflinge berechnen die Differenz aus potentieller und kinetischer Energie.*			

	$E_{pot} = m \cdot g \cdot h = 660\,000\,\text{kg} \cdot 9{,}79\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0{,}012\,\text{m} \approx 78000\,\text{J}$ $E_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v^2 = \frac{660\,000\,\text{kg}}{2} \cdot \left(0{,}10\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 3300\,\text{J}$ $\Delta E = E_{pot} - E_{kin} \approx 75000\,\text{J}$		5	
3	*Begründen Sie, dass die Eigenfrequenz des Schwingungstilgers annähernd mit der Eigenfrequenz des Gebäudes übereinstimmen sollte.* Die Lernenden… S 1 erklären Phänomene unter Nutzung bekannter physikalischer Modelle und Theorien. *Die Lernenden begründen die Notwendigkeit der Übereinstimmung:* Wenn die Frequenzen übereinstimmen, ist eine maximale Energieübertragung von dem Wolkenkratzer auf das Pendel möglich (Resonanz).		2	
	Vergleichen Sie auf der Grundlage von Berechnungen die Eigenfrequenzen des Wolkenkratzers mit der des Pendels im Schwingungstilger. Die Lernenden… S 7 wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an. *Die Lernenden berechnen die Eigenfrequenzen auf Grundlage der beiden Modellannahmen und vergleichen die Ergebnisse.* $T_{\text{T-101}} = \frac{H}{46\,\frac{\text{m}}{\text{s}}} = \frac{448\,\text{m}}{46\,\frac{\text{m}}{\text{s}}} \approx 9{,}7\,\text{s} \Rightarrow f_{\text{T-101}} = 0{,}10\,\text{Hz}$ $T_{\text{Pendel}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{42\,\text{m}}{9{,}79\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} \approx 13\,\text{s} \Rightarrow f_{\text{Pendel}} \approx 0{,}077\,\text{Hz}$ Mögliche Interpretationen des Ergebnisses: ♦ Die Frequenzen stimmen in grober Näherung überein. ♦ Die Abweichung beträgt 23% und ist signifikant.	5		
4	*Erläutern Sie zwei mögliche Ursachen dafür, dass es sich bei den Berechnungen der Eigenfrequenz des Wolkenkratzers in Aufgabe 3 um eine Näherungsrechnung handelt. Betrachten Sie hierzu die Schwingungen eines Gebäudes in Analogie zu denen eines Federschwingers.* Die Lernenden… S 2 erläutern Gültigkeitsbereiche von Modellen und Theorien und beschreiben deren Aussage- und Vorhersagemöglichkeiten. *Erläuterung zweier möglicher Ursachen, z. B:* Die Gleichung für $T_{\text{T-101}}$ ist nur eine Näherungsgleichung, es wird lediglich die Höhe berücksichtigt. Für die Berechnung der korrekten Periodendauer müssten jedoch weitere Faktoren berücksichtigt werden:			

	♦ Die Masse des Gebäudes kann aufgrund der Trägheit die Periodendauer beeinflussen. In Analogie zum Federschwinger: Je größer die Masse eines Schwingers, desto größer ist die Periodendauer. ♦ Die genaue Konstruktion (Statik/Festigkeit) beeinflusst die Periodendauer. In Analogie zum Federschwinger: Je härter die Feder, desto kleiner die Periodendauer.			6
5	*Ein wichtiger Parameter für das Tilgen einer Schwingung ist die Dämpfungskonstante k. Als Modell für den Schwingungstilger wird das in M 3 beschriebene Fadenpendel verwendet.* ♦ *Nehmen Sie mithilfe eines Ultraschallsensors ein Diagramm für die Position des Pendelkörpers in Abhängigkeit von der Zeit auf. Speichern Sie die Daten.* Die Lernenden… S 4 bauen Versuchsanordnungen auch unter Verwendung von digitalen Messwerterfassungssystemen nach Anleitungen auf, führen Experimente durch und protokollieren ihre Beobachtungen. *(Beispielmessungen und Auswertungsbeispiel s. Hinweise zum Experiment für die Hand der Lehrkraft)* ♦ nehmen ein Diagramm für die Position des Pendelkörpers in Abhängigkeit von der Zeit auf und speichern die Daten	3		
	♦ *Bestimmen Sie aus dem Diagramm die Periodendauer T, die Anfangsamplitude und die ersten fünf aufeinanderfolgenden Amplituden mithilfe des entsprechenden Tools der verwendeten Software.* ♦ *Ermitteln Sie für dieses Fadenpendel aus allen Messwerten die Dämpfungskonstante k.* Die Lernenden… S 4 bauen Versuchsanordnungen auch unter Verwendung von digitalen Messwerterfassungssystemen nach Anleitungen auf, führen Experimente durch und protokollieren ihre Beobachtungen; E 5 planen geeignete Experimente und Auswertungen zur Untersuchung einer physikalischen Fragestellung. (Beispielmessungen und Auswertungsbeispiel s. Hinweise zum Experiment für die Hand der Lehrkraft) Die Lernenden ♦ bestimmen aus dem Diagramm die Periodendauer, die Anfangsamplitude und fünf aufeinanderfolgende Amplituden ♦ fertigen eine Auswertung der Daten mit einem geeigneten Verfahren unter der Berücksichtigung aller Messwertpaare an. Dies kann wahlweise durch eine linearisierte Darstellung und die Bestimmung des Anstieges oder durch die Berechnung von *k* aus allen Messwertpaaren und Mittelwertbildung erfolgen.		3 7	

	♦ *Nennen Sie zwei mögliche Ursachen für Messunsicherheiten. Erläutern Sie die Auswirkung der Messunsicherheiten auf das Ergebnis der Dämpfungskonstante k.* Die Lernenden… E 7 berücksichtigen Messunsicherheiten und analysieren die Konsequenzen für die Interpretation des Ergebnisses. *Nennen zweier Ursachen und Erläuterung der Auswirkungen in Abhängigkeit von der gewählten konkreten Methode (z. B. Ermitteln der Daten aus dem Diagramm oder aus den Daten einer CSV-Datei), z. B.:* ♦ Abweichungen beim Ablesen von *T* aus dem Diagramm, ♦ Abweichungen aufgrund der Messfrequenz, ♦ Abweichungen beim Ablesen der Amplituden aus dem Diagramm, ♦ Abweichungen bei der Positionsbestimmung aufgrund der Auflösung des Ultraschallsensors. ♦ Je größer die Messunsicherheiten der Messgrößen sind, desto größere statistische Streuungen weist die Dämpfungskonstante *k* auf.		4	
	Summe	**11**	**23**	**6**
	Anteile der Bewertungseinheiten in Prozent	**27,5**	**57,5**	**15**

5 Standardbezug

Teilaufgabe	Kompetenzbereich			
	S	E	K	B
1	1			
2	3, 7			
3	1, 7			
4	2			
5	4	5, 7		

6 Bewertungshinweise

Die Bewertung der erbrachten Prüfungsleistungen hat sich für jede Teilaufgabe nach der am rechten Rand der Aufgabenstellung angegebenen Anzahl maximal erreichbarer Bewertungseinheiten (BE) zu richten.

Für die Bewertung der Gesamtleistung eines Prüflings ist ein Bewertungsraster[1] vorgesehen, das angibt, wie die in den drei Prüfungsteilen insgesamt erreichten Bewertungseinheiten in Notenpunkte umgesetzt werden.

7 Hinweise zum Experiment für die Hand der Lehrkraft

Geräte

Die bereitzustellenden Geräte aus der Liste mit dem Experimentiermaterial können hinsichtlich ihrer Daten durch gleichwertige Geräte ersetzt werden.

Das Experiment ist vor dem Tag der schriftlichen Prüfung von der prüfenden Lehrkraft durchzuführen. Alle Geräte müssen von der prüfenden Lehrkraft vor der Prüfung auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft werden.

Sensor, Endgerät und Software sind entsprechend der Ausstattung der Schule und dem im Vorunterricht verwendeten System zu wählen.

Geräte:
- Fadenpendel der Länge 1,00 m bifilar aufgehängt (s. Abbildung 4) mit einem Pendelkörper,
- Pappe A 4 als Dämpfer,
- Ultraschallsensor mit einem Datenlogger oder einem Tablet oder einem Notebook entsprechend der materiellen Ausstattung der Schule.

Versuchsaufbau

Ein Pendelkörper wird bifilar aufgehängt, die Pendellänge beträgt 1,00 m. Die Aufhängepunkte haben einen Abstand von ca. 20 cm. Eine Pappe A4 wird mit Klebeband oder Büroklammern entsprechend Abbildung 4 in der Aufgabe befestigt und dient als Dämpfung. Der Pendelkörper muss so groß sein, dass die Ultraschallwellen zuverlässig reflektiert werden.

Der Versuch wird den Prüflingen aufgebaut zur Verfügung gestellt. Ultraschallsensor und Endgerät stehen ebenfalls aufgebaut am Arbeitsplatz.

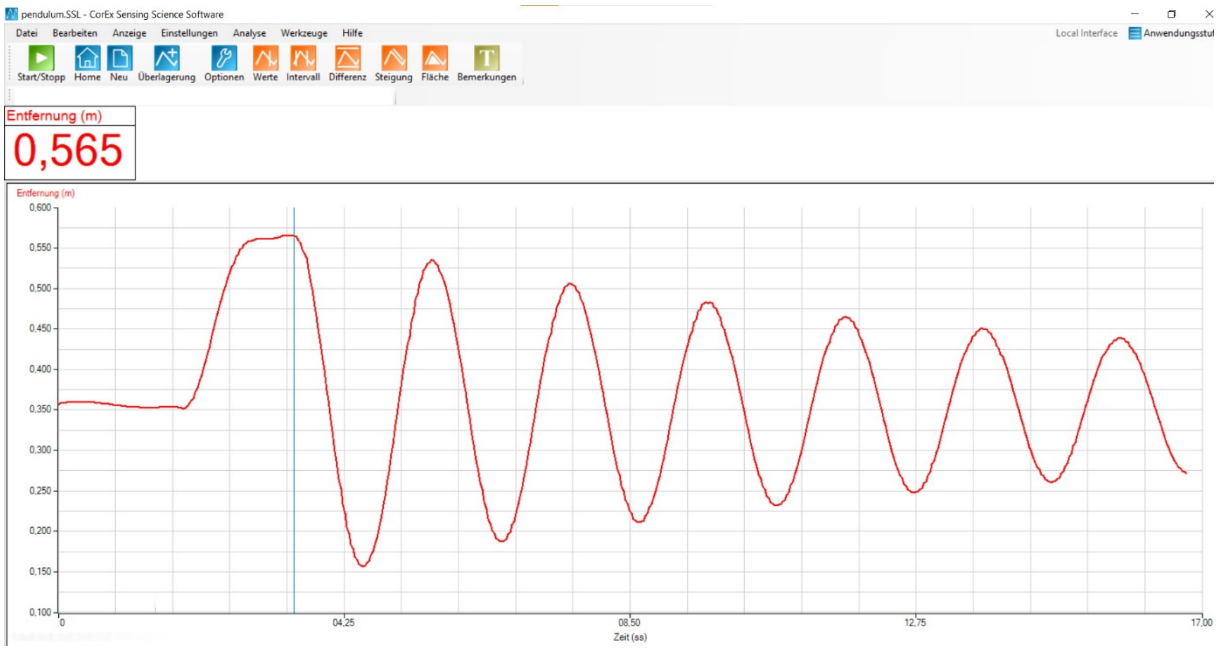
Versuchsdurchführung

Das Speichern der Daten erfolgt durch die Prüflinge entsprechend der Gegebenheiten der Schule.

[1] Das Bewertungsraster ist Teil des Dokuments „Beschreibung der Struktur“, das auf den Internetseiten des IQB zum Download bereitsteht.

Messwerte

Die Abbildung zeigt ein mögliches Diagramm.



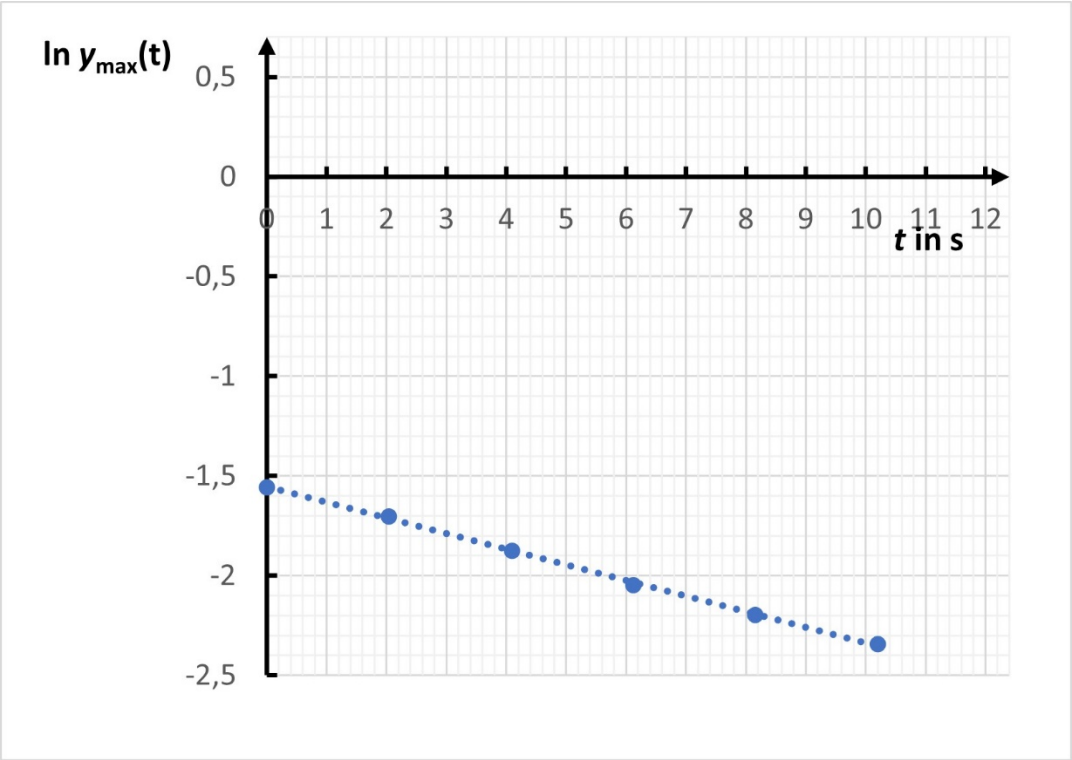
Für die beschriebene Anordnung ergeben sich beispielsweise die folgenden Messwerte:
Periodendauer T = 2,04 s

n	t in s	$y_{max}(t)$ in cm
0	0,00	0,211
1	2,04	0,182
2	4,08	0,153
3	6,12	0,129
4	8,16	0,111
5	10,20	0,096

Auswertung

Berechnung der Logarithmen von y_{max} und grafische Darstellung

n	t in s	$y_{max}(t)$ in cm	ln y_{max} (t)
0	0,00	0,211	-1,56
1	2,04	0,182	-1,70
2	4,08	0,153	-1,88
3	6,12	0,129	-2,05
4	8,16	0,111	-2,20
5	10,20	0,096	-2,34



Bestimmung von *k* über den Anstieg im Diagramm: k » 0,08 s^{-1}.

Alternativ ist eine Berechnung von *k* aus den Messwerten mit anschließender Mittelwertbildung möglich.