

2023

# Abitur

Original-Prüfungsaufgaben  
mit Lösungen

**MEHR  
ERFAHREN**

Niedersachsen

**Physik**

+ Übungsaufgaben zum Download

**ActiveBook**  
• Interaktives  
Training

Original-Prüfungsaufgaben  
**2022** zum Download

**STARK**

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Stichwortverzeichnis

## Hinweise und Tipps zur schriftlichen Abiturprüfung

1	Ablauf der Prüfung .....	I
2	Inhalte und Kompetenzen .....	III
3	Leistungsanforderungen und Bewertung .....	VII
4	Operatoren und Anforderungsbereiche .....	VIII
5	Methodische Hinweise und allgemeine Tipps zur schriftlichen Prüfung ...	XI
6	Hinweise zum Lösen von Aufgaben mit dem GTR .....	XV
7	Zum Umgang mit diesem Buch. ....	XVI

## Original-Abiturprüfungen – Erhöhtes Anforderungsniveau

### Abiturprüfung 2017

Aufgabe I:	Experimente mit Wellen und Quantenobjekten .....	EA 2017-1
Aufgabe II:	Längenbestimmungen mit Interferenzexperimenten .....	EA 2017-26

### Abiturprüfung 2018

Aufgabe I:	Periodische Vorgänge. ....	EA 2018-1
Aufgabe II:	Experimente mit Licht .....	EA 2018-24

### Abiturprüfung 2019

Aufgabe I:	Identifikation durch Messung. ....	EA 2019-1
Aufgabe II:	Experimentelle Bestimmung von Konstanten .....	EA 2019-24

## **Abiturprüfung 2020**

Aufgabe I: Experimente mit Elektronen .....	EA 2020-1
Aufgabe II: Messunsicherheiten in zentralen Experimenten der Physik .....	EA 2020-25

## **Abiturprüfung 2021**

Aufgabe I: Ladungen .....	EA 2021-1
Aufgabe II: Versuche und Anwendungen mit LEDs und Lasern; Interferenz von Licht und Magnetfeldmessungen am geraden Leiter .....	EA 2021-21

### **Abiturprüfung 2022 ..... [www.stark-verlag.de/mystark](http://www.stark-verlag.de/mystark)**

Sobald die Original-Prüfungsaufgaben 2022 freigegeben sind, können sie als PDF auf der Plattform MyStark heruntergeladen werden (Zugangscode vgl. Farbseiten vorne im Buch).

### **ActiveBook: Aufgaben zum Download**

## **Original-Abiturprüfung 2022 – Erhöhtes Anforderungsniveau**

### **Original-Abiturprüfungen – Grundlegendes Anforderungsniveau**

Jahrgang 2017 .....	1
Jahrgang 2018 .....	34
Jahrgang 2019 .....	63
Jahrgang 2020 .....	95
Jahrgang 2021 .....	128
Jahrgang 2022 .....	169

### **Übungsaufgaben**

Felder und Induktion (7 Aufgaben) .....	1
Wellen und Quanten (5 Aufgaben) .....	66
Hülle und Kern (5 Aufgaben)* .....	105
Schwingende mechanische Systeme (1 Aufgabe) .....	150

**Zusatzblatt:** Farabbildungen zu EA 2021, Aufgabe II, Material M1c und M1d

## **Autor der Übungsaufgaben und Lösungen:**

StD Dirk Raecke

# Vorwort

Liebe Schülerinnen und Schüler,

Sie haben das Fach Physik im neunjährigen Gymnasium des Landes Niedersachsen auf grundlegendem oder erhöhtem Anforderungsniveau belegt und werden in diesem Fach Ihr Abitur ablegen.

Für die schriftliche Abiturprüfung werden landesweit einheitliche Abituraufgaben gestellt, d. h., es wird ein Zentralabitur durchgeführt. Dieses Buch wird Ihnen helfen, sich gut und effektiv auf dieses Zentralabitur vorzubereiten.

- Dazu werden Ihnen zunächst **ausführliche Hinweise** zu den Rahmenbedingungen der Prüfungen, zu Inhalten, Methoden und Prüfungskriterien gegeben.
- Der Hauptteil enthält die **offiziellen niedersächsischen Abituraufgaben der Jahrgänge 2017 bis 2021** für das **erhöhte** Anforderungsniveau.
- Alle Aufgaben weisen vom Autor ausgearbeitete vollständige und kommentierte **Lösungsvorschläge** sowie separate **Lösungshinweise** auf, die Sie beim selbstständigen Lösen der Aufgaben unterstützen.

Zudem ist dieses Buch ein **ActiveBook** – das bedeutet, Sie erhalten zusätzliches Übungsmaterial **online auf MyStark**:

- **Interaktives Training** mit Aufgaben und Lernvideos zu allen relevanten Themengebieten des Physikabiturs.
- Die **Original-Prüfungsaufgaben 2022** im **erhöhten** Anforderungsniveau zum Download.
- Die **Original-Prüfungsaufgaben 2017 bis 2022** für das **grundlegende** Anforderungsniveau sowie zusätzliche **Übungsaufgaben** zum Download.



Ausführliche Infos inkl. Zugangscode finden Sie auf den Farbseiten vorne im Buch.

Sollten nach Erscheinen dieses Bandes noch wichtige Änderungen in der Abiturprüfung 2023 vom niedersächsischen Kultusministerium bekannt gegeben werden, finden Sie aktuelle Informationen dazu ebenfalls im Internet auf MyStark.

Ich wünsche Ihnen viel Erfolg bei der Abiturprüfung!

A stylized, handwritten signature in black ink, which appears to read 'Dirk Raecke'.

Dirk Raecke

# Hinweise und Tipps zum Zentralabitur

## 1 Ablauf der Prüfung

### 1.1 Die zentrale schriftliche Abiturprüfung

Seit dem Schuljahr 2005/2006 gibt es im Land Niedersachsen im Fach Physik zentrale schriftliche Abiturprüfungen.

Die verbindlichen Vorgaben des Kerncurriculums Physik bilden die Grundlage für die Inhalte und Anforderungen sowohl in den vier Halbjahren der Qualifikationsphase als auch in den landesweit einheitlichen Aufgabenstellungen für das Abitur. Die Vorgaben wurden auf die bundesweiten „Einheitlichen Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung“ (EPA) angepasst; sie lassen aber Freiräume für den konkreten Unterricht an Ihrer Schule, die es Ihren Lehrkräften ermöglichen, Inhalte und/oder den Erwerb der vorgeschriebenen Kompetenzen zu vertiefen und zu ergänzen.

### 1.2 Aufbau der Prüfungsaufgaben

Jede Prüfungsaufgabe wird unter einem zusammenfassenden Thema stehen und sich nicht nur auf einen Themenbaustein beziehen. Die Aufgaben werden sich auf Material stützen, das sich an Experimenten orientiert. Die Lösungen setzen die Beherrschung der fachlichen Qualifikationen entsprechend den Vorgaben des Kerncurriculums und Erfahrungen im Umgang mit Experimenten voraus. In der Prüfung werden Ihnen zwei Aufgabenvorschläge vorgelegt, von denen Sie einen auswählen und bearbeiten müssen. In der Regel wird ein Vorschlag aus mehreren Teilaufgaben bestehen, die untereinander einen mehr oder minder großen Zusammenhang haben.

Seit dem Abitur 2009 gibt es auch experimentell ausgerichtete Abiturvorschläge (vorerst nur in Kursen auf erhöhtem Niveau). Dazu sind folgende Hinweise wichtig: Spätestens zu Beginn des Unterrichts in der jeweiligen Qualifikationsphase muss die Schule entscheiden, ob und, wenn ja, welche Lerngruppen des Prüfungsfaches Physik mit den Experimentierkästen arbeiten werden. Nur für die Schüler, die in der Qualifikationsphase mit diesem Experimentierkasten gearbeitet haben, besteht dann im Abitur die Möglichkeit, zwischen einer Aufgabe mit Schülerübungen und einer ohne

Schülerübungen zu wählen. Alle anderen Schüler wählen nach wie vor aus zwei Vorschlägen ohne Schülerübungen einen ihrer Wahl aus.

Sollten Sie in einem Kurs unterrichtet worden sein, der das experimentelle Physikabitur ablegen wird, so beachten Sie, dass Sie zwei Vorschläge bekommen – in einem der beiden ist eine Experimentieraufgabe enthalten. Sie können natürlich auch den Vorschlag ohne Experiment wählen. Zur Vorbereitung auf die Experimente sollten Sie sehr genau den hierfür relevanten Prüfungsstoff analysieren (siehe den Abschnitt „Inhalte und Kompetenzen“): Alle Stellen, wo davon die Rede ist, dass der Prüfling Kenntnisse über Experimente oder Erfahrungen mit Messungen o. ä. haben sollte, enthalten Hinweise auf wahrscheinliche Experimentieraufgaben. In diesem Buch finden Sie zwar keine Experimentieraufgaben, jedoch vermitteln die Abitur- und Übungsaufgaben auch Kompetenzen und Ideen hinsichtlich Planung, Darstellung und v. a. Auswertung und Analyse von Experimenten, da die Aufgaben oftmals an Experimenten oder Material aus solchen orientiert sind.

Insgesamt wird das Experiment im Abitur eine große Rolle spielen – sei es als echtes Experiment oder als in Papierform beschriebenes. Neben Erfahrungen im eigenen Experimentieren sollten Sie dabei vor allem über wichtige methodische Kompetenzen rings um das Auswerten von Experimenten verfügen. Sie finden die besonders wichtigen Experimente im Kerncurriculum recht leicht, da sie dort explizit aufgeführt sind und somit auch als quasi verpflichtend für Ihre Lehrkräfte gelten. Beachten Sie: Für die **schriftliche Abiturprüfung 2023 auf erhöhtem Niveau** mit experimentellem Anteil sind die **Experimentierkästen Optik und Atomphysik** sowie **Magnetismus – Elektrik – Elektronik** festgelegt.

### 1.3 Dauer der Prüfung

Seit 2021 beträgt die Bearbeitungszeit im erhöhten Niveau 270 Minuten, im grundlegenden Niveau 220 Minuten. Es gibt zusätzlich eine Auswahlzeit von 30 Minuten, sodass die Gesamtbearbeitungszeit 300 Minuten (eA) bzw. 250 Minuten (gA) beträgt.

### 1.4 Zugelassene Hilfsmittel

Die für die schriftliche Abiturprüfung im Fach Physik zugelassenen Hilfsmittel ergeben sich aus den Rechtsvorschriften und den Präzisierungen für das jeweilige Prüfungsjahr. Zugelassen sind

- Wörterbücher der deutschen Rechtschreibung;
- Taschenrechner, wobei sicherzustellen ist, dass innerhalb einer Prüfungsgruppe die benutzten Taschenrechner gleichwertig bzgl. Ausstattung und Funktion sind;
- Schreib- und Zeichengeräte, die im Fach Physik Anwendung finden;
- ggf. sind natürlich der Experimentierkasten, Netzgeräte und Messinstrumente zugelassen, wenn der Experimentalvorschlag ausgewählt wird.
- Eine von der Schule eingeführte, zur Abiturprüfung zugelassene physikalische beziehungsweise mathematische Formelsammlung. Gedruckte Formelsammlungen der Schulbuchverlage sind gemäß der „Informationen zur Nutzung von Formelsammlungen“ in der Abiturprüfung zugelassen.

- Die Liste der zugelassenen Hilfsmittel finden Sie stets aktuell unter dem Link [https://nibis.de/zentralabitur\\_1395](https://nibis.de/zentralabitur_1395) bei der betreffenden Abiturprüfung.

Sämtliche Entwürfe und Aufzeichnungen gehören zur Abiturarbeit und dürfen nur auf Papier, das den Stempel der Schule trägt, angefertigt werden.

## 2 Inhalte und Kompetenzen

Unterricht auf grundlegendem Anforderungsniveau bzw. auf erhöhtem Anforderungsniveau soll sich entsprechend der EPA nicht nur quantitativ, sondern vor allem qualitativ unterscheiden. Die Unterschiede bei den Prüfungsaufgaben bestehen insbesondere in folgenden Aspekten:

- Grad der Selbstständigkeit in der Bearbeitung
- Umfang und Spezialisierungsgrad bezüglich des Fachwissens, des Experimentierens und der Theoriebildung
- Grad der Elementarisierung und Mathematisierung physikalischer Sachverhalte sowie Anspruch an die verwendete Fachsprache
- Komplexität der Kontexte, physikalischen Sachverhalte, Theorien und Modelle

Im Unterricht auf erhöhtem Niveau müssen Sie sich auf sehr viel mehr Eigenverantwortlichkeit und selbstständige Nacharbeit des Unterrichtsstoffes einstellen.

Um vergleichbare Voraussetzungen für die Prüfungsvorbereitung zu schaffen, wird der verbindliche Kern des Physikunterrichts recht genau im Kerncurriculum beschrieben – und zwar sowohl inhaltlich als auch in Bezug auf die zu erwerbenden Kompetenzen (damit sind die fachtypischen Fähigkeiten und Fertigkeiten gemeint, die Sie erwerben sollen, um physikalische Probleme lösen zu können). Diese Kernelemente sollten dann auch die wesentliche Grundlage für die zu erwartenden Prüfungsaufgaben sein. Die folgende Übersicht zeigt Ihnen, welche **Inhalte** in der Qualifikationsphase erarbeitet bzw. erworben werden sollen.

Sollten nach Erscheinen dieses Bandes noch wichtige Änderungen in der Abiturprüfung 2023 vom niedersächsischen Kultusministerium bekannt gegeben werden, finden Sie aktuelle Informationen dazu im Internet auf MyStark (siehe Farbseiten vorne im Buch).

### 2.1 Themenbereich Elektrizität

- Beschreibung elektrischer Felder über ihre Kraftwirkungen (Feldlinienbilder, Bedeutung und Anwendungsbeispiele, Definition der Feldstärke und Verfahren (inkl. Auswertung) zu ihrer Messung, Analogie zum Gravitationsfeld)
- Zusammenhänge zwischen Ladung und Stromstärke sowie Spannung und Energie
- Feldstärke im Plattenkondensator
- Energiebilanzen für Bewegungen im homogenen elektrischen Feld (Geschwindigkeiten in Beschleunigungsstrecken)





**MESSUNSICHERHEITEN IN ZENTRALEN EXPERIMENTEN DER PHYSIK**

Bei einem Fadenpendel wird in Aufgabe 1 der Einfluss des Auslenkwinkels auf die Periodendauer untersucht. In Aufgabe 2 erfolgt die Bestimmung der Gitterkonstanten eines Gitters. In Aufgabe 3 werden mittels einer Stromwaage Daten zum magnetischen Feld erfasst und ausgewertet.

**Aufgabenstellung ohne Experimentieren**

- 1** In einem Experiment wird für ein Fadenpendel die Abhängigkeit der Periodendauer  $T$  vom Auslenkwinkel  $\alpha$  untersucht. Material 1a (M 1a) zeigt einen möglichen Versuchsaufbau.
- 1.1** Beschreiben Sie die Durchführung eines Versuchs, um die in M 1b dargestellten Messdaten zu erheben, wobei Sie auch auf eine Verringerung der Messunsicherheit eingehen.  
Zeichnen Sie ein  $\alpha$ - $T$ -Diagramm (M 1b) mit geeigneter Skalierung der Hochachse.  
Beurteilen Sie, für welchen Winkelbereich  $\alpha$  von einer konstanten Periodendauer  $T$  ausgegangen werden kann. **9**
- 1.2** Die Periodendauer  $T$  eines Fadenpendels wird durch die folgende Gleichung angegeben:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

- Prüfen Sie unter Verwendung von M 1c und der Berücksichtigung von Messunsicherheiten, ob die Gleichung Gültigkeit besitzt. **6**
- 1.3** In einem Experiment mit elektronischer Messwerterfassung wird als Pendelkörper ein Sensor eingesetzt. Die von ihm erfassten Daten zeigt M 1d. Erläutern Sie die Bedeutung der Hochpunkte in diesem Sachzusammenhang. Ermitteln Sie ausgehend von M 1d unter Abschätzung von Messunsicherheiten die Länge  $\ell$  des Fadenpendels. **6**
- 1.4** Unter einem harmonischen Oszillator versteht man ein schwingendes System, bei welchem die Rückstellkraft  $F_R$  proportional zur Auslenkung  $s$  ist. M 1e enthält die in M 1a dargestellte Rückstellkraft  $F_R$  in Abhängigkeit von der Auslenkung  $s$  bzw. dem Winkel  $\alpha$ .  
Prüfen Sie, ob es einen Wertebereich gibt, in dem sich das Pendel wie ein harmonischer Oszillator verhält. **7**

- 2** In dieser Aufgabe wird die Gitterkonstante eines Transmissionsgitters unter Verwendung von sichtbarem Licht und Beobachtung eines Interferenzbildes untersucht.
- 2.1** Planen Sie den Aufbau eines Experiments zur Bestimmung der Gitterkonstanten eines Transmissionsgitters unter Verwendung von monochromatischem Licht und der objektiven Methode.  
Erläutern Sie das Entstehen der Maxima bei der Interferenz an einem Gitter. Bei der Interferenz am Gitter gilt:

$$\sin\left(\arctan \frac{a_n}{e}\right) = \frac{n \cdot \lambda}{g}$$

(n: Ordnung des Maximums;  $\lambda$ : Wellenlänge; g: Gitterkonstante; e: Abstand Gitter–Schirm;  $a_n$ : Abstand Maximum n-ter Ordnung–Hauptmaximum)

Leiten Sie die Gleichung anhand mindestens einer geeigneten Skizze begründet her.

**HINWEIS:** Bei der Herleitung genügt die Betrachtung zweier benachbarter Gitteröffnungen.

**13**

- 2.2** Mit einem geeigneten Aufbau erhält man mit einer rot leuchtenden LED und einem Gitter ein Interferenzbild (M2a). Laut Hersteller weist das Gitter 500 Striche pro Millimeter auf.  
Bestimmen Sie unter Verwendung von M2a die Gitterkonstante des Gitters. Beurteilen Sie die Herstellerangabe unter Einbeziehung der Messunsicherheiten für e und  $a_n$ .  
Erläutern Sie eine experimentelle Maßnahme zur Verringerung der Messunsicherheiten.

**9**

- 2.3** In einer Abwandlung des Experiments werden auch Maxima höherer Ordnung beobachtet.  
Ermitteln Sie die höchste Ordnung der theoretisch zu beobachtenden Maxima. In einem Gedankenexperiment wird jeder zweite Spalt des Gitters verdeckt. Stellen Sie eine begründete Hypothese bezüglich der Veränderungen am Interferenzbild hinsichtlich der Ordnung der theoretisch zu beobachtenden Maxima auf.

**6**

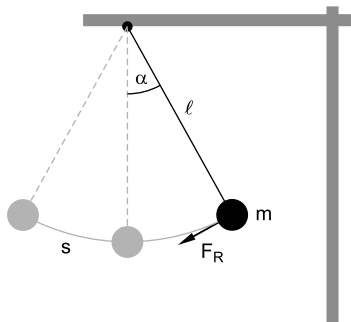
- 3** In M3a ist der schematische Aufbau einer sogenannten Stromwaage dargestellt, mit der die Kraft auf einen stromführenden Leiter in einem Magnetfeld untersucht werden kann. Bei allen Telexperimenten befindet sich der jeweilige Leiter im homogenen Bereich des zeitlich konstanten Magnetfeldes.  
**HINWEIS:** Gravitationskräfte sollen bei der Bearbeitung der Aufgabe nicht berücksichtigt werden.



## Material

### M 1a Vereinfachter Aufbau eines Fadenpendels

An einem Faden ist ein Massestück der Masse  $m$  befestigt. Das Fadenpendel der Pendellänge  $\ell$  wird um einen bestimmten Winkel  $\alpha$  bzw. einen Weg  $s$  ausgelenkt. Anschließend wird die Periodendauer  $T$  bestimmt. Die Rückstellkraft  $F_R$  beschleunigt das Pendel.



### M 1b Messdaten zur Bestimmung der Periodendauer $T$ in Abhängigkeit des Auslenkwinkels $\alpha$

Die Abhängigkeit der Periodendauer  $T$  von dem Auslenkwinkel  $\alpha$  wird an einem Fadenpendel der Pendellänge  $\ell = 62,5$  cm untersucht. Die Messung erfolgt über 10 Perioden. Die Masse des Pendels beträgt  $m = 50$  g.

$\alpha$ in $^\circ$	5	10	15	20	30	40	50	60
$10 \cdot T$ in s	15,84	15,83	15,86	15,91	16,00	16,09	16,54	17,00

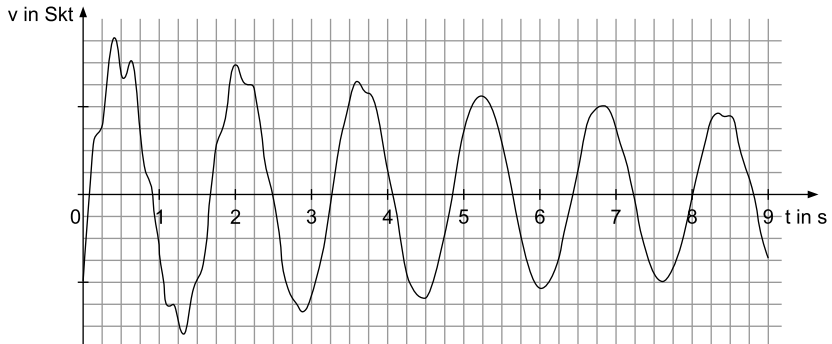
### M 1c Gemessene Größen zur Bestimmung der Periodendauer $T$

**HINWEIS:** Eine Messunsicherheit der Erdbeschleunigung  $g$  ist nicht zu berücksichtigen.

Größe	Messwert	Absolute Messunsicherheit
Pendellänge $\ell$	62,5 cm	0,1 cm
Dauer $10 \cdot T$	15,86 s	0,20 s
Winkel $\alpha$	$15^\circ$	$1^\circ$

### M 1d Zeitlicher Verlauf der Geschwindigkeit $v$ des Fadenpendels

Ein Sensor eines Messwerterfassungssystems wird am Fadenpendel als neue Masse befestigt. Dieser misst die Geschwindigkeit des Pendels.



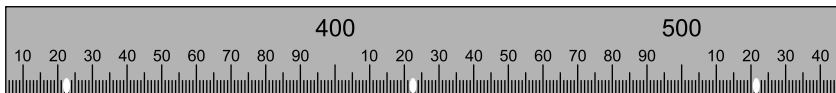
### M 1e Abhängigkeit der Rückstellkraft $F_R$ vom Winkel $\alpha$

Die Rückstellkraft beschleunigt das Pendel. Die Auslenkung  $s$  wird anhand der geometrischen Abmessungen und M 1a ermittelt.

$\alpha$ in $^\circ$	5	10	20	30	40	50	60
$s$ in m	0,05	0,11	0,22	0,33	0,44	0,55	0,65
$F_R$ in N	0,039	0,085	0,168	0,245	0,315	0,376	0,425

### M 2a Interferenzbild auf dem Schirm

Der Maßstab zeigt Millimeter, das Maximum 0. Ordnung ist in der Mitte,  $\lambda = 631 \text{ nm}$ ,  $e = 32,0 \text{ cm}$ .





**Teilaufgabe 1.1**

Der Grundaufbau sollten Ihnen bekannt sein und lässt sich mit Faden, Massestück und Stativmaterial realisieren.

Es soll die Periodendauer gemessen werden – eine Minimierung des Fehlers der Zeitmessung kann durch sinnvolle „Verlängerung“ der Messzeit erreicht werden. Warum sinkt dadurch der Fehler? Was bedeutet das für die Anzahl der zu vermessenden Perioden?

Woran erkennt man die Konstanz eines Funktionswertes? Übertragen Sie diese Überlegung auf das dargestellte Diagramm!

**Teilaufgabe 1.2**

Die Überprüfung kann in einem ersten Schritt durch einfaches Nachrechnen anhand der Messwerte erfolgen.

Bei der Berücksichtigung der Fehler hilft eine Minimal-Maximal-Abschätzung.

**Teilaufgabe 1.3**

Welche Eigenschaft der Geschwindigkeit wird durch die Hochpunkte abgebildet? Zu welchen Zeitpunkten ist diese Eigenschaft im Grundsatz immer wieder gleich? Stellen Sie also den Zusammenhang zwischen den Hochpunkten, der Pendellage und der Periodendauer her.

Als Messunsicherheit für  $T$  können Sie entsprechend einen halben Skalenteil im abgebildeten  $t$ - $v$ -Diagramm verwenden.

Nutzen Sie den größtmöglichen Zeitbereich, um den „Messfehler“ zu minimieren.

Die Länge  $\ell$  kann dann einfach berechnet werden, indem Sie den Zusammenhang aus 1.2 umstellen.

Beachten Sie wieder: Die Messunsicherheit soll bei der Berechnung berücksichtigt werden – was ergibt sich als kleinstmögliche, was als größtmögliche Länge?

**Teilaufgabe 1.4**

In dem entsprechenden Wertebereich muss  $F \sim s$  gelten – dies muss nur geprüft werden.

Eine Proportionalität kann mittels Quotientengleichheit nachgewiesen werden oder per linearer Regression (mit Achsenschnitt bei 0).

**Teilaufgabe 2.1**

Der Aufbau zu Messungen an Transmissionsgittern ist Standardschulstoff.

Für die Erläuterung sollten Sie die Kenntnis der ungestörten Überlagerung (kohärenter) Wellenzüge nutzen und insbesondere auf die Bedingungen für konstruktive Interferenz eingehen. Die Funktion des Gitters als „Strahlteiler“ ist ebenfalls essenziell.





## Lösungsvorschlag zu Aufgabe II

### 1 Aufgabenstellung ohne Experimentieren

#### 1.1 Versuchsdurchführung

Im Versuch soll die Abhängigkeit der Periodendauer vom Auslenkwinkel gemessen werden. Man wird also den Pendelkörper auslenken und diesen anschließend frei schwingen lassen. Gemessen wird die Periodendauer  $T$  mittels Stoppuhr. Dabei misst man sinnvollerweise die Zeit für beispielsweise 10 komplette Schwingungen und dividiert diese dann durch 10. Somit reduziert man die Zeit-Messunsicherheit auf den Faktor  $\frac{1}{10}$ .

Den Auslenkwinkel  $\alpha$  misst man z. B. mithilfe einer Winkelscheibe, die man „hinter“ dem Aufbau anbringt.

**TIPP** Alternativ kann man die Anordnung mit ausgelenktem Pendelkörper fotografieren und dann den Winkel in einem Grafikprogramm/DTP-Programm im Foto ausmessen. (Der Aufwand hierfür ist im normalen Unterricht natürlich zu groß.)

#### $\alpha$ -T-Diagramm

Zu beachten ist hier, dass in M 1b die zehnfache Periodendauer angegeben ist, somit muss für die Zeiten  $T$  im Diagramm das Komma um eine Stelle nach links verschoben werden (Abb. 1).

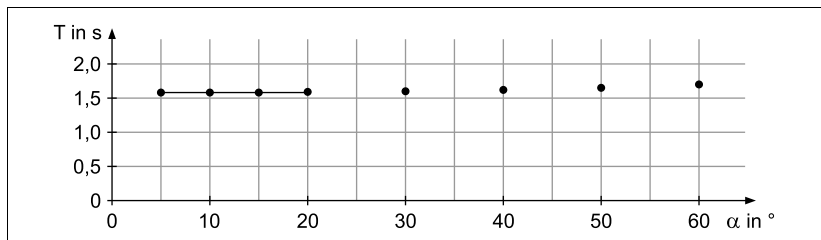


Abb. 1

**TIPP** Im Diagramm der Abb. 1 wird die  $T$ -Achse (Hochachse) beginnend von  $T = 0$  s skaliert. Dadurch betont man die geringe absolute Abweichung der gemessenen  $T$ -Werte voneinander (die Werte liegen zwischen 1,5 s und 1,7 s) und erreicht, dass speziell der horizontale Verlauf der Messkurve für kleine Auslenkungen (= Konstanz von  $T$ ) im Diagramm unmittelbar sichtbar wird.

Möchte man durch die Darstellung dagegen die Unterschiedlichkeit der  $T$ -Werte herausstellen, kann man alternativ die  $T$ -Skala erst bei 1,5 s beginnen lassen. Durch die damit verbundene Streckung der  $T$ -Achse erzielt man einen „Lupen-effekt“, durch den die Messunsicherheiten, aber auch das Ansteigen der Periodendauer für genügend große Auslenkungen ( $> 20^\circ$ ) deutlich wird.

## Winkelbereich und Konstanz der Periodendauer

Nach den obigen Überlegungen scheint eine fast konstante Periodendauer bei einem Auslenkwinkel bis etwa knapp  $20^\circ$  vorzuliegen – dies bestätigen sowohl die Tabelle als auch das  $\alpha$ -T-Diagramm. Für relativ kleine Winkel scheint die Periodendauer also relativ unabhängig vom konkreten Auslenkwinkel zu sein. Für größere Winkel nimmt T zu.

### 1.2 Gültigkeit der T-Formel

Die angegebene Gleichung für T zeigt an, dass theoretisch keine Winkelabhängigkeit vorliegen sollte. Setzt man die Werte aus M1c ein, dann folgt:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\ell}{g}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{0,625 \text{ m}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} \approx 1,586 \text{ s}$$

Dieser Wert (theoretisch) stimmt **exakt** mit dem in M1c angegebenen Messwert für T überein, sodass es auf den ersten Blick schwer fallen mag, den Einfluss von Messunsicherheiten in die Bewertung des Ergebnisses zu integrieren. Allerdings sollten Sie beachten: Der Wert für die Länge  $\ell$  selbst ist fehlerbehaftet mit einer Unsicherheit von  $0,1 \text{ cm} = 0,001 \text{ m}$ , der Wert der Zeitmessung weist eine Unsicherheit von  $0,2 \text{ s}$  auf. Da 10 Perioden vermessen wurden, ist die konkrete Zeit T also mit einem Messfehler von  $0,02 \text{ s}$  versehen. Man kann daher auf Basis dieser Messunsicherheiten eine Min-Max-Abschätzung durchführen und so einen Bereich ermitteln, in dem die Zeit T liegen sollte:

$$T_{\min} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{(0,625 - 0,001) \text{ m}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} \approx 1,5847 \text{ s}$$

$$T_{\max} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{(0,625 + 0,001) \text{ m}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} \approx 1,5872 \text{ s}$$

Zu erwarten sind also Messwerte für T aus dem Intervall  $[1,5847 \text{ s}; 1,5872 \text{ s}]$ . Die tatsächlich gemessene Zeit liegt im zu erwartenden Intervall.

Aber: Gemessen wurde  $T = 1,586 \text{ s}$  mit einer Unsicherheit von  $0,02 \text{ s}$ . Man muss also davon ausgehen, dass die wahre Zeit im Bereich  $[1,584 \text{ s}; 1,588 \text{ s}]$  liegen könnte. Rein mathematisch betrachtet könnte also die wahre Zeit aufgrund aufgetretener Messunsicherheiten auch ein klein wenig außerhalb des „Prognoseintervalls“ liegen. Praktisch gesehen wird man hier aber von nahezu identischen Intervallen ausgehen können und die Tatsache anbringen, dass der gemessene Wert sehr gut mittig im Prognoseintervall liegt. Messung und Theorie scheinen also zueinander zu passen.

**TIPP** Beachten Sie auch, dass der Auslenkwinkel der in M1c angegebenen Messung bei  $15^\circ \pm 1^\circ$  und damit in dem Bereich kleiner Auslenkwinkel liegt, für den in Teilaufgabe 1.1 die Konstanz der Periodendauer festgestellt wurde.

### 1.3 Bedeutung der Hochpunkte

Die Hochpunkte in M1d sind die Zeitpunkte, an denen der Betrag der Geschwindigkeit  $v$  des Pendelkörpers maximal ist. Das ist beim Durchgang durch die Ruhelage der Fall: Dort besitzt der Pendelkörper maximale kinetische Energie, in die sich die zuvor vorhandene – bei voller Auslenkung – maximale Lageenergie umgewandelt hat.

Das Vorzeichen von  $v$  beschreibt die Bewegungsrichtung des Körpers, einmal in der ersten Halbperiode und einmal in der zweiten Halbperiode – jeweils mit entgegengesetzter Orientierung dieser Richtung.

Die Abnahme der Geschwindigkeit mit zunehmender Schwingzeit wird sichtbar an den fallenden Amplituden der  $t$ - $v$ -Kurve. Sie ist bedingt durch die auftretenden Reibungsverluste.

#### Ermitteln der Fadenpendel-Länge

Für die Länge des Pendels nutzt man den Zusammenhang  $T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\ell}{g}}$  aus Teilaufgabe 1.2 und erhält durch Umstellen nach der Pendellänge:

$$\ell = \frac{T^2}{4\pi^2} \cdot g$$

Misst man  $T$ , kann die Länge  $\ell$  errechnet werden. Mithilfe des Materials M1d lässt sich  $T$  abschätzen: 5 vollständige Perioden – gemessen anhand der Nullstellen der  $t$ - $v$ -Kurve – beanspruchen eine Zeitspanne von ca. 0,1 s bis 8 s, sodass folgt:

$$T = \frac{7,9 \text{ s}}{5} = 1,58 \text{ s}$$

Die Messunsicherheit beträgt abgeschätzt etwa 0,1 s (die Skaleneinteilung ist in 0,25-s-Schritten sichtbar, deshalb schätzt man also etwa die Hälfte als Fehler).

Für die Abschätzung des Fehlers in der Pendellängenbestimmung nimmt man nun den „schlechtestmöglichen“ Fall an, dass nämlich der Ablesefehler am Start und am Ende des Intervalls in verschiedene Richtungen auftritt. Dann wäre der maximale Fehler beim Messen des Intervalls für die 5 Perioden etwa 0,2 s groß, der Fehler für  $T$  selbst folglich  $\frac{1}{5}$  davon, also etwa 0,04 s. Mit dieser geschätzten Unsicherheit ergibt sich dann die Fadenlänge minimal bzw. maximal zu

$$\ell_{\min} = \frac{(T - 0,04 \text{ s})^2}{4\pi^2} \cdot g = \frac{(1,58 \text{ s} - 0,04 \text{ s})^2}{4\pi^2} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0,589 \text{ m}$$

und

$$\ell_{\max} = \frac{(T + 0,04 \text{ s})^2}{4\pi^2} \cdot g = \frac{(1,58 \text{ s} + 0,04 \text{ s})^2}{4\pi^2} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0,652 \text{ m}.$$

Die Pendellänge liegt daher unter Beachtung der Messungenauigkeit im Intervall

$$\underline{\underline{58,9 \text{ cm} \leq \ell \leq 65,2 \text{ cm}}}.$$

## 1.4 Verhält sich das Pendel wie ein harmonischer Oszillator?

Für die Prüfung muss lediglich die Tabelle daraufhin untersucht werden, ob es einen Bereich gibt, indem eine Proportionalität zwischen  $F$  und  $s$  vorliegt.

**TIPP** Beachten Sie, dass Sie den Winkel für die Prüfung nicht nutzen müssen. Er dient nur als Mittel, um  $s$  zu bestimmen.

Zunächst zeigt ein erster Blick auf die in M1e tabellierten Messwerte, dass bis etwa zu Werten von  $s=0,22\text{ m}$  und  $s=0,33\text{ m}$  eine recht gute Proportionalität vorzuliegen scheint, die aber bei  $0,33\text{ m}$  schon mit einem deutlichen „in etwa“ versehen ist. Dieser Eindruck bestätigt sich, wenn man in einem zweiten Schritt das Vorliegen der Proportionalität rechnerisch prüft, indem man jeweils den Quotienten aus Rückstellkraft  $F_R$  und Auslenkung  $s$  bildet:

$\alpha$ in $^\circ$	5	10	20	30	40	50	60
$s$ in m	0,05	0,11	0,22	0,33	0,44	0,55	0,65
$F_R$ in N	0,039	0,085	0,168	0,245	0,315	0,376	0,425
$\frac{F_R}{s}$ in $\frac{\text{N}}{\text{m}}$	<b>0,78</b>	<b>0,77</b>	<b>0,76</b>	<b>0,74</b>	0,72	0,68	0,65

Es ist zu erkennen, dass die Quotienten bis zu  $s=0,22\text{ m}$  etwa gleich sind, danach deutlich abfallen. Die abfallende Tendenz ist zwar auch schon bei den ersten drei Quotienten vorhanden, jedoch deutlich geringer.

Man kann also als Wertebereich für einen **harmonischen** Verlauf Auslenkungen im Bereich **von  $s=0\text{ m}$  bis etwa  $s=0,2\text{ m}$**  angeben.

**TIPP** Der Bereich deckt sich mit dem Bereich konstanter Periodendauer aus Teilaufgabe 1.1, was auch zu erwarten war, da bei einem harmonischen Oszillator  $T$  ja unabhängig von  $s$  ist.

## 2.1 Versuchsaufbau

Laut Aufgabenstellung kann man von einer monochromatischen Lichtquelle ausgehen. Vor diese sollte ein Beleuchtungsspalt/Kohärenzspalt gesetzt werden, um ein dünnes, scharfes Spaltbild auf dem Schirm abbilden zu können. Hier kann eine Linsenkonstruktion hilfreich sein, es kann aber auch ein Laser als monochromatische und kohärente Lichtquelle genutzt werden. Dieser ist selbst hinreichend fokussiert, um Interferenzen auch an entfernten Schirmen scharf messen zu können. Die Grundanordnung besteht also aus monochromatischer (und kohärenter) Lichtquelle, einem Schirm und einem in den Lichtweg zu bringenden Transmissionsgitter, das senkrecht zu seinen „Strichen“ vom Licht durchsetzt wird. Die Interferenzfigur wird sich dann ebenfalls senkrecht zur Gitterstrich-Ausrichtung ausbilden. Am einfachsten und gebräuchlichsten ist es deshalb, wenn man das Gitter so positioniert, dass seine Striche vertikal ausgerichtet sind. Die Interferenzfigur (die Abstände  $a$ ) kann dann waagrecht vermessen werden und die Messung direkt auf dem Schirm erfolgen.

## Entstehung der Interferenzmaxima

Die einzelnen Gitterpunkte werden zeitgleich und damit bei kohärenter Ursprungswelle phasengleich vom Licht der Quelle durchsetzt. Dabei entstehen Elementarwellen, die sich von jedem Gitterpunkt ungestört in alle Richtungen ausbreiten. Je nach Laufweg und Position im Raum überlagern sich dann an einem Ort viele Elementarwellen. An Orten, an denen der Gangunterschied aller sich überlagernden Teilwellen genau immer ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge beträgt, werden sich Stellen maximaler Verstärkung ausbilden, da hier alle Wellenzüge phasengleich aufaddiert werden. So entstehen Orte maximaler Intensität – die Interferenzmaxima.

## Herleitung der Gittergleichung

In Abb. 2 ist die Situation am Gitter (links) und am Schirm (rechts) skizziert. Am Gitter selbst gilt die Beziehung

$$\sin \alpha = \frac{\Delta s}{g}.$$

Die Wellenzüge werden deshalb als nahezu parallel betrachtet, sodass vom Gitter ausgehend alle diese Wellenzüge zur Stelle eines Maximums gelangen. Dies ist eine plausible Annahme, da der Gitter-Schirm-Abstand  $e$  deutlich größer als der Abstand  $a_n$  des Maximums  $n$ -ter Ordnung zum Maximum 0. Ordnung ist und vor allem die Gitterabmessungen so klein sind, dass quasi vom gesamten Gitter ausgehend die „gleiche“ Richtung zum Punkt des Maximums angenommen werden kann.

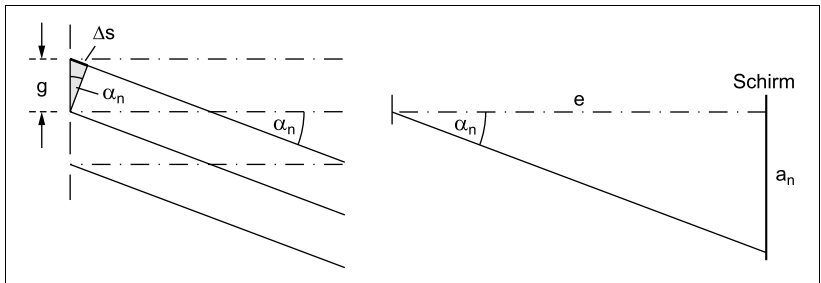


Abb. 2

Der Gangunterschied  $\Delta s$  muss bei einem Maximum ein Vielfaches der Wellenlänge  $\lambda$  sein, also gilt:

$$\sin \alpha_n = \frac{n \cdot \lambda}{g} \quad (1)$$

Die Anordnungsgeometrie (Abb. 2 rechts) liefert sofort:

$$\tan \alpha_n = \frac{a_n}{e} \Rightarrow \alpha_n = \arctan\left(\frac{a_n}{e}\right) \quad (2)$$

Durch Kombination der Gleichungen (1) und (2) folgt sofort die gesuchte Interferenzbedingung:

$$\sin\left(\arctan\left(\frac{a_n}{e}\right)\right) = \frac{n \cdot \lambda}{g} \quad (3)$$

## 2.2 Bestimmung der Gitterkonstante

Das Gitter besitzt laut Hersteller 500 Striche pro mm, also gilt

$$g_H = \frac{1}{500} \text{ mm} = 0,00200 \text{ mm}.$$

Man kann dies in Meter umrechnen oder aber alle weiteren Angaben in „mm“ nutzen. Hier wird der zweite Weg verfolgt.

Die Wellenlänge beträgt  $631 \text{ nm} = 0,000631 \text{ mm}$ , die Entfernung  $e = 320 \text{ mm}$ .

In M2a kann man das „linke“ Maximum 1. Ordnung bei ca.  $323 \text{ mm}$  lokalisieren, das „rechte“ bei ca.  $522 \text{ mm}$ . Der Abstand zwischen den beiden Maxima 1. Ordnung beträgt somit ca.  $199 \text{ mm}$ . Der Abstand  $a_1$  ist also  $a_1 = 99,5 \text{ mm}$ .

Mithilfe der Interferenzbedingung (3) folgt für die Gitterkonstante:

$$g = \frac{n \cdot \lambda}{\sin\left(\arctan\left(\frac{a_n}{e}\right)\right)}$$

Nach Einsetzen von  $n = 1$  und der vorliegenden Messwerte für die Maxima 1. Ordnung erhält man:

$$g = \frac{1 \cdot 0,000631 \text{ mm}}{\sin\left(\arctan\left(\frac{99,5 \text{ mm}}{320 \text{ mm}}\right)\right)} = \underline{\underline{0,00213 \text{ mm}}}$$

Dies entspricht rund 470 Strichen pro Millimeter.

### Beurteilen der Herstellerangabe

Der Herstellerangabe von 500 Strichen pro mm steht der gemessene Wert von 470 Strichen pro mm gegenüber. Für ein Schulexperiment ist die ermittelte Gitterkonstante recht genau am Herstellerwert. Will man die Unsicherheiten in der Messung berücksichtigen, dann erhält man ein Intervall, indem mit großer Sicherheit der wahre Wert von  $g$  liegen sollte.

Die Messunsicherheit von  $a$  liegt aufgrund von M2a bei etwa  $1 \text{ mm}$  „pro Ableseung“. Da zwei Werte abgelesen werden, das Intervall dann aber auch wieder durch 2 dividiert wird, ist also der Fehler in  $a$  mit  $1 \text{ mm}$  recht gut abgeschätzt. Die Messunsicherheit von  $e$  kann nur aus der Angabe  $32,0$  abgeschätzt werden. Die letzte Stelle ist als unsicher anzunehmen, somit folgt eine Ungenauigkeit von  $0,05 \text{ cm} = 0,5 \text{ mm}$  für  $e$ .

Damit ergeben sich folgende Intervallgrenzen für den vermutlich wahren Wert von  $g$ :

$$g_{\min} = \frac{1 \cdot 0,000631 \text{ mm}}{\sin\left(\arctan\left(\frac{(99,5 + 1) \text{ mm}}{(320 - 0,5) \text{ mm}}\right)\right)} = 0,002103 \text{ mm}$$

$$g_{\max} = \frac{1 \cdot 0,000631 \text{ mm}}{\sin\left(\arctan\left(\frac{(99,5 - 1) \text{ mm}}{(320 + 0,5) \text{ mm}}\right)\right)} = 0,002148 \text{ mm}$$

Das Intervall beinhaltet den Wert des Herstellers von  $g = 0,00200 \text{ mm}$  sehr knapp nicht. Ob man deshalb diesen verwerfen sollte, ist fraglich. Allerdings soll betont werden, dass er am unteren Rand des zu erwartenden Bereichs liegt, und somit kann man zumindest vermuten, dass er die „Feinheit“ seines Gitters durch wohlwollendes Abrunden auf  $0,0200 \text{ mm}$  geschönt hat.

### Mögliche Maßnahme zur Messunsicherheitsverringern

In der Aufgabenstellung ist eine Maßnahme verlangt, es muss also nur eine der folgenden Ideen aufgegriffen werden.

- *Vergrößerung von  $e$* : Dadurch wird der Fehlereinfluss der  $e$ -Messung verringert und gleichzeitig werden die Abstände  $a_n$  auf dem Schirm größer und somit leichter messbar. Durch diese Vergrößerung von  $a_n$  wird auch der hier auftretende gleichbleibende Messfehler in seiner Wirkung minimiert.
- *Vermessung von höheren Maxima-Ordnungen*: Indem die (im Vergleich zur 1. Ordnung) größeren Abstände vom 3. Maximum links zum 3. Maximum rechts gemessen werden, vergrößert sich der absolute  $a_n$ -Messwert und verringert sich so der Messfehlereinfluss.
- *Kombination mehrerer Messungen*: Vermessung von Ordnungen 1, 2, 3, ... und Ermittlung mehrerer  $g$ -Werte mit anschließender Mittelwertbildung.

## 2.3 Ermitteln der theoretisch höchsten Ordnung

Die höchste theoretisch sichtbare Ordnung folgt aus der Bedingung  $\sin \alpha = \frac{n \cdot \lambda}{g}$ . Der Wert des Sinus kann maximal 1 werden ( $\hat{=} \alpha = 90^\circ$ ), dann ist das entsprechende Maximum theoretisch unendlich weit vom 0. Maximum entfernt. Mit dieser Grenzbedingung folgt:

$$1 = \frac{n \cdot \lambda}{g} \Rightarrow n < \frac{g}{\lambda} = \frac{0,00200 \text{ mm}}{0,000631 \text{ mm}} = 3,17$$

Man kann also maximal das 3. Maximum beobachten.

### Hypothese zur Interferenzbildveränderung

Nun wird jeder zweite Spalt des Gitters verdeckt. Das Gitter hat also nur noch eine halb so große Anzahl an Strichen pro Millimeter (250) und damit eine doppelt so große Gitterkonstante.



© **STARK Verlag**

[www.stark-verlag.de](http://www.stark-verlag.de)  
[info@stark-verlag.de](mailto:info@stark-verlag.de)

Der Datenbestand der STARK Verlag GmbH  
ist urheberrechtlich international geschützt.  
Kein Teil dieser Daten darf ohne Zustimmung  
des Rechteinhabers in irgendeiner Form  
verwertet werden.

**STARK**