

# 55. Internationale PhysikOlympiade Paris, Frankreich 2025



## Wettbewerbsleitung

Dr. Stefan Petersen                      Dürken Quaas  
Tel.: 0431 / 880 - 5120                      Tel.: 0431 / 880 - 5387  
email: [petersen@ipho.info](mailto:petersen@ipho.info)                      email: [quaas@ipho.info](mailto:quaas@ipho.info)

Anschrift: IPN · Leibniz-Institut für die Pädagogik der  
Naturwissenschaften und Mathematik  
Olshausenstraße 62, 24118 Kiel

web: [www.ipho.info](http://www.ipho.info)

## Lösungen und Bewertungsvorschläge zu den Aufgaben der 1. Runde im Auswahlwettbewerb zur 55. IPhO 2025

PhysikOlympiade am IPN, CC BY 4.0

**Nur für betreuende Lehrkräfte. Nicht vor Oktober 2024 an Schüler:innen weitergeben!**

Sehr geehrte Fachlehrerin, sehr geehrter Fachlehrer,

Ihnen gebührt unser besonderer Dank. Ohne Ihr Engagement bei der Betreuung der Teilnehmenden sowie bei der Korrektur der Arbeiten wäre es uns nicht möglich, den Auswahlwettbewerb für die Internationale PhysikOlympiade in dieser Form durchzuführen. Wir bitten Sie daher auch in diesem Jahr herzlich, Ihre Schülerinnen und Schüler zur Teilnahme an dem Wettbewerb anzuregen und die Bearbeitungen Ihrer Kandidatinnen bzw. Kandidaten anhand dieser Musterlösung zu bewerten. Die Teilnehmenden sollten ihre Bearbeitung regulär bis zum **06. September 2024** bei Ihnen abgeben. Sie können gerne, z. B. aufgrund später Sommerferien, individuell einen anderen Abgabetermin verabreden. Wichtig ist dabei, dass der Stichtag für die Online-Übermittlung der Ergebnisse und die Einsendung der bewerteten Bearbeitungen der 1. Runde an Ihre(n) zuständige(n) Landesbeauftragte(n) bis zum **27. September 2024** eingehalten wird. Ermuntern Sie Ihre Schülerinnen und Schüler gerne auch zur frühzeitigen Abgabe einzelner Aufgabenbearbeitungen, damit sie zum Ende hin nicht alle Aufgaben auf einmal lösen müssen.

Es liegt in der Natur eines Wettbewerbes, dass nicht alle Teilnehmenden bis in die Endrunde gelangen können. Wir denken, dass sich eine Teilnahme aber in jedem Fall lohnt. Neben spannenden Aufgaben und der Möglichkeit, interessante Kontakte zu knüpfen, erhalten auch Teilnehmende, die nicht in die nächste Runde gelangen, eine Teilnahmebestätigung.

Weitere Informationen zum Ablauf der 1. und der weiteren Runden sind unter [www.ipho.info](http://www.ipho.info) zu finden.

Wir freuen uns sehr über Ihre Unterstützung und wünschen Ihnen sowie Ihren Schülerinnen und Schülern viel Erfolg! Ihr Team der PhysikOlympiade.

**Bitte beachten Sie unbedingt auch die Hinweise auf der Folgeseite!**



Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik

## Hinweise zur 1. Wettbewerbsrunde für betreuende Lehrkräfte

Im Auswahlwettbewerb zur Internationalen PhysikOlympiade kommt ein Online-Anmelde- und -Bewertungssystem zum Einsatz, welches Sie unter [www.scienceolympiaden.de/portal](http://www.scienceolympiaden.de/portal) erreichen.

**Wichtig:** Daten aus dem bis 2022 verwendeten alten Online-System wurden nicht übernommen. Daher ist eine Registrierung im neuen Onlineportal der ScienceOlympiaden auch für bereits in der PhysikOlympiade aktive Lehrkräfte erforderlich, sofern diese nicht schon erfolgt ist.

### Registrierung bzw. Anmeldung als betreuende Lehrkraft

- Bitte **registrieren** Sie sich frühzeitig unter [www.scienceolympiaden.de/portal/register](http://www.scienceolympiaden.de/portal/register) als Betreuerin bzw. Betreuer in den ScienceOlympiaden, sofern Sie noch keinen Account besitzen.
- Nach der Registrierung können Sie sich unter [www.scienceolympiaden.de/portal](http://www.scienceolympiaden.de/portal) in dem Onlineportal einloggen und von Ihrer Startseite ab dem 01. April 2024 für die PhysikOlympiade 2025 **anmelden**.
- Bei der Anmeldung ist für neue Betreuer:innen das Hochladen eines ausgefüllten und von der Schule abgestempelten **Verifikationsformulars** erforderlich, das benötigt wird, um Ihre Zugehörigkeit zu der von Ihnen angegebenen Körperschaft zu verifizieren. Wenn Sie bereits für eine der ScienceOlympiaden im Onlineportal freigeschaltet sind, entfällt dieser und der folgende Schritt.
- Nach Abschluss der Anmeldung prüfen wir diese und schalten Sie für die PhysikOlympiade als Betreuerin bzw. Betreuer frei.
- Nach erfolgreicher Freischaltung sehen Sie auf der Startseite des Onlineportals oben links Ihren **Personencode**. Geben Sie diesen bitte an alle von Ihnen betreuten Teilnehmenden weiter. Diese benötigen ihn für ihre Anmeldung zur PhysikOlympiade.
- Im Bereich „Meine Dokumente“ finden Sie dann auch die Musterlösung zur 1. Runde und ggf. weitere Dokumente zum Wettbewerb als Download.

### Bearbeitung der Aufgaben durch Schülerinnen und Schüler

- Schülerinnen und Schüler bearbeiten die Aufgaben der 1. Runde in Hausarbeit. Dabei sind nur Einzelarbeiten zugelassen. Die Ausarbeitungen sollten bis zum **06. September 2024** bei Ihnen abgegeben werden, damit Sie die Korrektur durchführen und die Ergebnisse rechtzeitig weitergeben können (s. auch unten). Sie können mit Ihren Schülerinnen und Schülern individuell auch andere Termine verabreden, sofern der Rückmeldetermin an die Landesbeauftragten eingehalten wird.
- Vor der Abgabe der Arbeit müssen sich teilnehmende Schülerinnen und Schüler ebenfalls im Onlineportal registrieren und für die PhysikOlympiade anmelden. Dafür benötigen sie Ihren Personencode.
- Nach der Anmeldung eines Schülers bzw. einer Schülerin erhalten Sie per E-Mail eine Betreuungsanfrage. Bitte bestätigen Sie diese, damit die Teilnehmenden Ihnen zugeordnet werden und Sie deren Ergebnisse eingeben können.

### Bewertung der Arbeiten und Übermittlung der Ergebnisse

- Bewerten Sie die Ausarbeitungen Ihrer Kandidaten bitte anhand dieser Musterlösung und füllen Sie jeweils einen Bewertungsbogen (s. letzte Seite) aus.
- Gemäß den Gepflogenheiten bei der Internationalen PhysikOlympiade sollte bei der Bewertung der Arbeit die Richtigkeit der Lösung im Mittelpunkt stehen, nicht die Sauberkeit der Ausarbeitung und der sprachliche Ausdruck. Die jeweils angegebenen Punktzahlen beziehen sich auf einen möglichen Lösungsweg. In der Regel gibt es neben dem von uns angegebenen auch andere richtige Lösungswege. Bei anderen Lösungswegen muss die Bewertung sinngemäß abgeändert werden, wobei die Gesamtpunktzahl pro Aufgabe beizubehalten ist.

- Schülerinnen und Schüler, die im Schuljahr 2024/2025 noch nicht die vorletzte Jahrgangsstufe erreicht haben, können durch die Bearbeitung der **Junioraufgabe** einen Bonus von maximal 10 Punkten erreichen. Bei allen anderen wird die Junioraufgabe nicht gewertet.
- Die Punktegrenze für das Erreichen der 2. Runde liegt bei **30 Punkten**.
- Teilen Sie uns bitte die Bewertungsergebnisse Ihrer Schülerinnen und Schüler **online** über das Onlineportal mit und schließen Sie Ihre Bewertungseingabe am Ende ab.
- Schicken Sie die bewerteten Arbeiten zusammen mit den Bewertungsbögen bis spätestens **27. September 2024** an Ihre(n) Landesbeauftragte(n). Kontaktinformationen zu den Landesbeauftragten finden Sie unter [www.ipho.info](http://www.ipho.info). Das Zusenden einer Übersicht der online eingetragenen Ergebnisse ist mit dem neuen Onlineportal nicht mehr notwendig.

Bei Fragen oder Problemen helfen die Landesbeauftragten und das Team der PhysikOlympiade am IPN gerne weiter.

Wir danken Ihnen sehr für Ihre Unterstützung der PhysikOlympiade.

**Aufgabe 1 Blick durch die Glaskugel**
**(10 Pkt.)**

In dem Foto auf der ersten Seite des Aufgabenblattes ist der Eiffelturm in der Glaskugel als auf dem Kopf stehendes Bild zu sehen. Die Glaskugel besitzt einen Durchmesser von 9,5 cm und kann für achsennahe Strahlen näherungsweise wie eine dünne Linse mit einer Brennweite von 7,0 cm behandelt werden. Das Foto wurde mit einer Handykamera aufgenommen, deren sehr kleines Objektiv sich in einem Abstand von etwa 30 cm vom Mittelpunkt der Glaskugel befindet.

Schätze mit Hilfe des Fotos ab, in welcher Entfernung vom Eiffelturm es aufgenommen wurde. Verwende dazu zwei unterschiedliche Methoden, einmal mit Nutzung des Bildes in der Glaskugel und einmal ohne. Vergleiche die erhaltenen Ergebnisse.

*Hinweis:* Benötigte Daten zum Eiffelturm kannst du gerne recherchieren.

**Lösung**
**Entfernungsbestimmung mit Hilfe ähnlicher Dreiecke (Strahlensatz)**

Eine Möglichkeit der Entfernungsbestimmung ergibt sich aus der Betrachtung von Lichtstrahlen, die vom Eiffelturm entlang des Randes der Glaskugel verlaufen und auf das aufgrund seiner geringen Ausdehnung als näherungsweise punktförmig angenommene Objektiv treffen. Die Lichtstrahlen bilden mit dem Durchmesser der Glaskugel und den durch die Glaskugel abgedeckten Höhenabschnitt des Eiffelturms ähnliche Dreiecke, wie in der folgenden Skizze gezeigt.

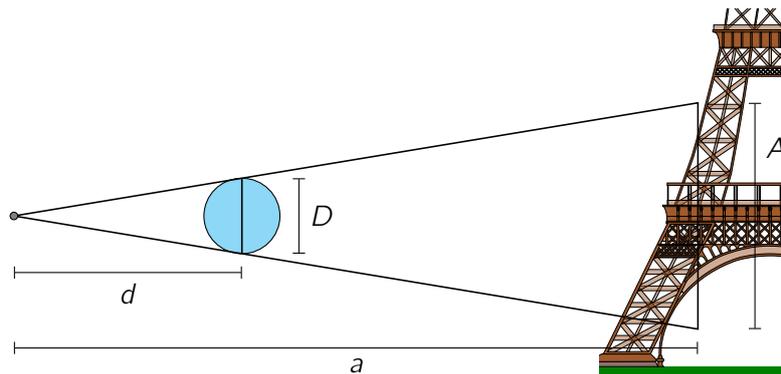


Abb. 1. Skizze zur Entfernungsbestimmung mit Hilfe ähnlicher Dreiecke (Abb. des Eiffelturms: Alexandre Jaborska, Wikimedia Commons, Public Domain).

In der Abbildung bezeichnen  $D = 9,5$  cm den Durchmesser der Glaskugel  $d = 30$  cm den Abstand des Mittelpunktes der Glaskugel zum Objektiv<sup>1</sup>,  $A$  die Höhe des durch die Glaskugel abgedeckten Abschnitts des Eiffelturms und  $a$  die gesuchte Entfernung vom Eiffelturm, gemessen bis zum Rand des Turmes etwa auf Höhe der ersten Plattform<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Der Abstand wird tatsächlich durch die Punkte festgelegt, an denen die Lichtstrahlen die Glaskugel tangential berühren. Es ist leicht nachzuprüfen, dass dies in dem untersuchten Aufbau zu keiner merklichen Änderung des Wertes führt.

<sup>2</sup>Die Aufgabe gibt nicht klar vor, bis zu welchem Teil des Eiffelturms die Entfernung bestimmt werden soll. Da es hier um eine Abschätzung der Entfernung geht, sind mehrere Möglichkeiten denkbar, sofern sie einen Vergleich der beiden verwendeten Methoden erlauben.

Mit Hilfe des Fotos und der nebenstehenden Zeichnung lässt sich die Höhe  $A$  des durch die Kugel verdeckten Turmabschnittes abschätzen zu  $A = (75 \pm 5)$  m. Daraus ergibt sich mit den ähnlichen Dreiecken in Abbildung 1 die Entfernungsabschätzung

$$a = A \frac{d}{D} \approx 75 \text{ m} \frac{30 \text{ cm}}{9,5 \text{ cm}} \approx 240 \text{ m}. \quad (1.1)$$

### Entfernungsbestimmung mit der Abbildungsgleichung

Die Abbildungsgleichung für dünne Linsen liefert zwischen der Gegenstandsweite  $g$  und der Bildweite  $b$  den Zusammenhang

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}, \quad (1.2)$$

wobei  $f = 7,0$  cm die Brennweite der Linse<sup>3</sup> angibt. Zusammen mit der Vergrößerung  $\frac{B}{G} = \frac{b}{g}$  der Abbildung ergibt sich daraus für die Gegenstandsweite durch Umformung

$$g = f \left( 1 + \frac{G}{B} \right). \quad (1.3)$$

Als abzubildender Gegenstand kann auch hier wieder ein Teil des Turms betrachtet werden. Dieser sollte nicht zu groß gewählt werden, um möglichst achsennahe Strahlen zu erhalten.

Die folgende Abbildung zeigt schematisch die für die Bildentstehung in der Kugellinse wichtigen Größen.

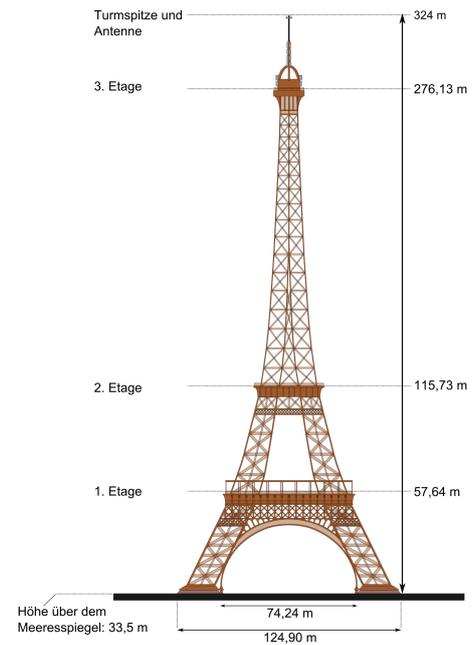


Abb. 2. Zeichnung des Eiffelturms mit Größenangaben (Alabasterstein, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0).

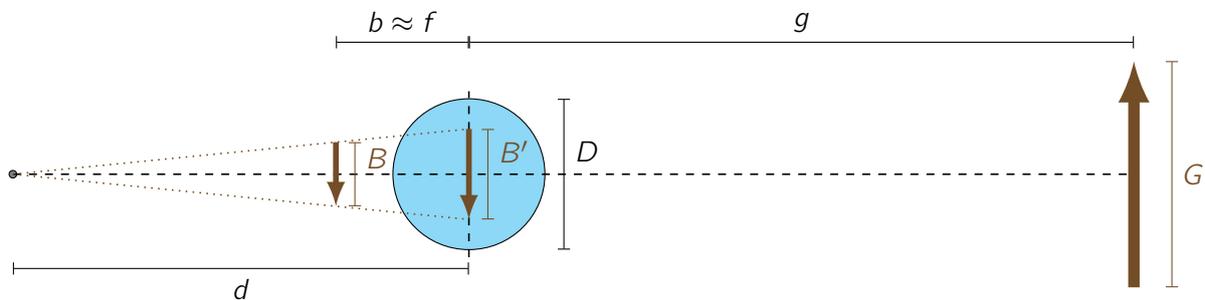


Abb. 3. Skizze zur Bildentstehung bei der Abbildung durch die Kugellinse. Der Einfachheit halber wurde ein Pfeil als Abbildungsgegenstand eingezeichnet.

Da sich der Gegenstand in einer zur Brennweite großen Entfernung  $g$  von der Linse befindet, entsteht das reale Bild des Gegenstandes etwa im Brennpunkt der Linse. Die Bildweite  $b$  entspricht also ungefähr der Brennweite  $f$ . Die Gegenstandsgröße  $G$  kann erneut mit Hilfe der Zeichnung in Abbildung 2 abgeschätzt werden. Für die Bildgröße  $B$  kann die Größe der Kugel auf dem Foto als Maßstab benutzt werden. Dabei ist zu beachten, dass sich das Bild von der Kamera aus ein kleines Stück vor der Linse befindet und dadurch beim Verwenden der Kugel als Maßstab eine auf die Kugelmittlebene projizierte scheinbare Bildgröße  $B'$  bestimmt wird, für die mit den Bezeichnungen in Abbildung 3 gilt

<sup>3</sup>Hinweis: Die Brennweite einer Kugellinse in Luft ergibt sich mit Hilfe der Linsenschleiferformel aus dem Durchmesser  $D$  und dem Brechungsindex  $n$  des Linsenmaterials zu  $f = \frac{nD}{4(n-1)}$ . Bei einer Kugellinse fallen außerdem die beiden Hauptebenen mit der Kugelmittlebene zusammen.

$$B = B' \frac{d-f}{d} \approx 0,77 \cdot B' . \quad (1.4)$$

Für die Entfernungsbestimmung aus dem Bild des Eiffelturms wird als abzubildender Turmabschnitt der Teil zwischen dem Boden und der Plattform auf der ersten Etage gewählt, der in dem Bild des Eiffelturms, wie in dem nebenstehenden Ausschnitt zu sehen, einigermaßen gut zu erkennen ist. Die Gegenstandsgröße ergibt sich aus Abbildung 2 zu  $G \approx 58$  m. Die scheinbare Bildgröße ergibt sich durch Ausmessen an dem Bild zu  $B' \approx \frac{5,0 \text{ cm}}{17,8 \text{ cm}} 9,5 \text{ cm} \approx 2,67 \text{ cm}$ .

Daraus folgt schließlich mit (1.3) und (1.4) für die Gegenstandsweite bzw. die Entfernung  $a$  zum Eiffelturm

$$a = g \approx f \left( 1 + \frac{G}{0,77 \cdot B'} \right) \approx 200 \text{ m} . \quad (1.5)$$

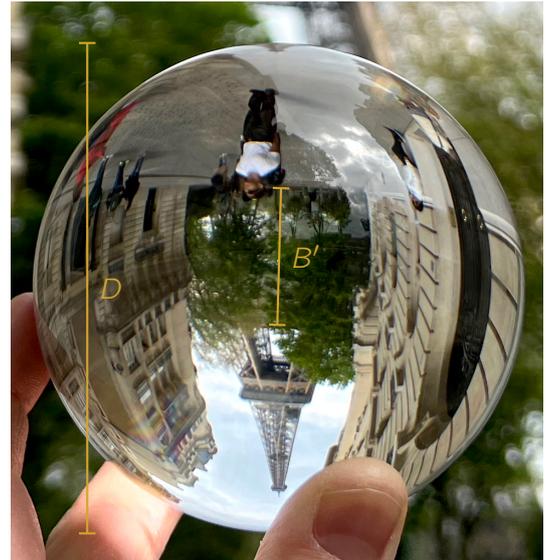


Abb. 4. Ausschnitt des Fotos zur Bestimmung der scheinbaren Bildgröße.

Die beiden Ergebnisse für die Entfernung weichen also um etwa 20 % voneinander ab - für eine Abschätzung keine schlechte Übereinstimmung. Aufgenommen wurde das Foto am Anfang der Rue Buenos-Ayres in einer Entfernung von etwa 225 m zum Fußpunkt der Spitze des Eiffelturms bzw. etwa 200 m bis zum Rand des Turmes auf Höhe der ersten Plattform. Damit liefert die Methode unter Nutzung der optischen Abbildung ein Ergebnis, das der tatsächlichen Entfernung sehr nahe kommt.

*Hinweis:* Die beiden Methoden können, je nach Wahl der betrachteten Abschnitte an dem Turm und der Qualität der Ausmessung, auch deutlich andere Ergebnisse liefern. Bewertet werden sollte in dieser Aufgabe primär die physikalisch korrekte Lösung und weniger ein genaues Ergebnis.

Bewertung - Blick durch die Glaskugel		Punkte
1	Angeben der Abbildungsgleichung (1.2) und der Vergrößerung	1.0
	Umformen zu einem Ausdruck für die Gegenstandsweite (1.3)	0.5
	Formulieren einer Idee zur Bestimmung von Gegenstands- und Bildgröße	1.0
	Wählen eines Turmabschnittes, der zur Näherung achsennaher Strahlen passt (Abschnitt sollte vollständig unterhalb der zweiten Plattform sein)	0.5
	Erkennen, dass das Bild etwa in der Brennebene entsteht	0.5
	Berücksichtigen der scheinbaren Bildgröße	0.5
	Ablesen bzw. Bestimmen passender Werte für $G$ und $B$ (bzw. $B'$ )	1.0
	Berechnen der Entfernung mit Nutzung des Bildes in der Glaskugel	1.0
	Formulieren einer alternativen Idee zur Entfernungsbestimmung (z.B. über ähnliche Dreiecke)	1.0
	Ablesen bzw. Bestimmen passender Werte zur Entfernungsbestimmung	1.0
	Berechnen der Entfernung ohne Nutzung des Bildes in der Glaskugel	1.0
	Vergleichen der Ergebnisse	1.0
		<b>10.0</b>

**Aufgabe 2 Planetenbeobachtung**
**(10 Pkt.)**

Zwei Planeten bewegen sich, wie nebenstehend skizziert, auf kreisförmigen Bahnen in einer gemeinsamen Ebene und mit gleichem Umlaufsinn um einen Stern der Masse  $M = 2,0 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ .

Von einem der Planeten aus hat ein Astronom den in der folgenden Abbildung dargestellten Winkel zwischen dem Zentralstern und dem anderen Planeten in Abhängigkeit von der Zeit gemessen. Eine Einheit auf der horizontalen Zeitachse entspricht einem Erdjahr a. Die Größe einer Einheit der Winkelachse ist nicht angegeben.

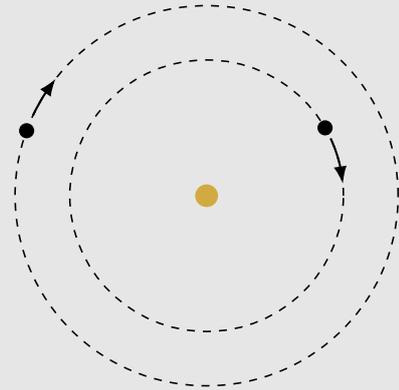


Abb. 5. Skizze zur Planetenbeobachtung.

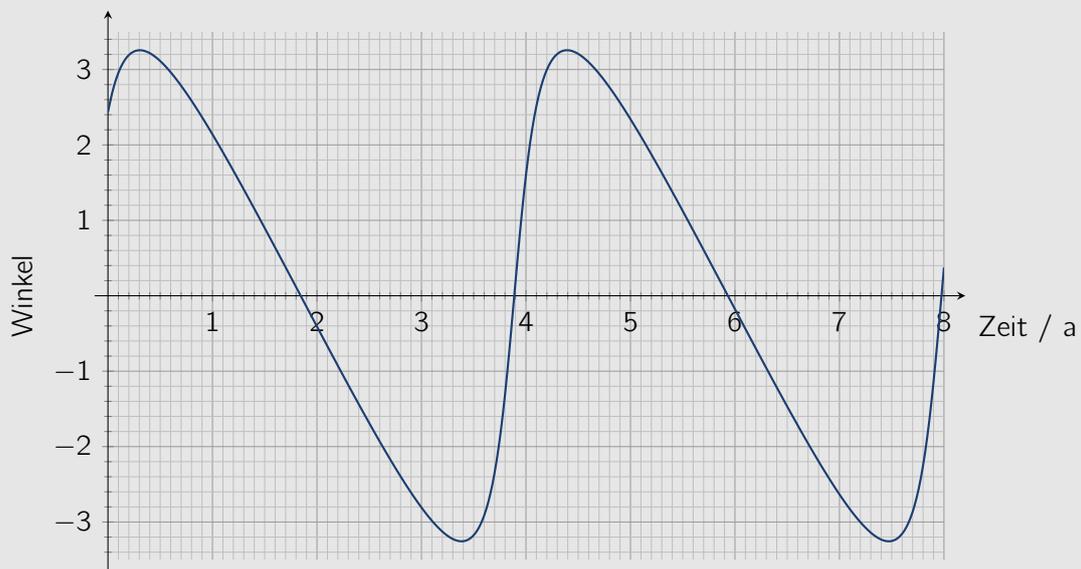
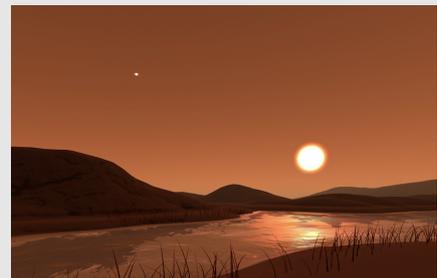


Abb. 6. Von einem der Planeten aus gemessener Winkel zwischen dem Stern und dem anderen Planeten.

- 2.a) Zeige mit Hilfe der Daten aus dem Graphen, dass der Radius der Bahn des äußeren Planeten etwa 1,4 mal so groß ist wie der Radius der Bahn des inneren Planeten.
- 2.b) Gib an, welchem Winkel (in Grad) eine Einheit auf der vertikalen Achse entspricht.
- 2.c) Bestimme die Radien der Planetenbahnen.



**Lösung**

- 2.a) Der Verlauf des Winkels kann nur durch eine Beobachtung von dem äußeren der beiden Planeten erklärt werden. Würde die Beobachtung von dem inneren Planeten erfolgen, hätte der Winkel kein absolutes Maximum oder wäre unstetig, da der äußere Planet den gesamten Horizont durchlaufen kann.

Bezeichne, wie in der nebenstehenden Abbildung, mit  $r_1$  und  $r_2 =: k r_1$  die Bahnradien des inneren bzw. äußeren Planeten und mit  $\alpha$  den vom äußeren Planeten beobachteten Winkel zwischen innerem Planet und Stern. Der Winkel  $\alpha$  soll dabei positiv im Gegenuhrzeigersinn gezählt werden, der Winkel  $\varphi$  hingegen im Uhrzeigersinn.

In der Abbildung ist die Situation für den maximalen Winkel dargestellt, bei dem die Verbindungsline der Planeten die innere Bahn tangiert.

Es ist hilfreich, die Bewegung der Planeten in einem sternzentrierten System zu betrachten, das sich mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_2$  des äußeren Planeten mitdreht. In diesem System ist der äußere Planet in Ruhe und der innere rotiert mit der Winkelgeschwindigkeit  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 > 0$ , wobei  $\omega_1$  die Winkelgeschwindigkeit des inneren Planeten im nichtrotierenden System ist.

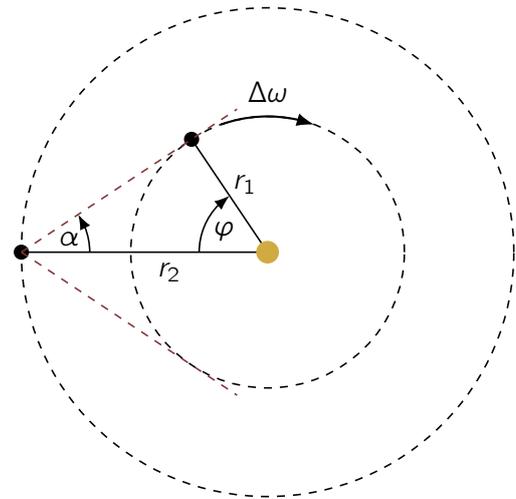


Abb. 7. Skizze zur Planetenbeobachtung bei maximalen Wert von  $\alpha$ .

**Verhältnis der Radien - Lösungsmöglichkeit 1**

Für den maximalen und minimalen Beobachtungswinkel  $\alpha_{\max, \min}$  ergibt sich aus der Geometrie in Abbildung 5

$$\sin \alpha_{\max, \min} = \pm \frac{r_1}{r_2} = \pm \frac{1}{k} \quad \text{und damit} \quad \alpha_{\max, \min} = \pm \arcsin \frac{1}{k}. \quad (2.1)$$

Die dazugehörigen Winkel  $\varphi_{\max, \min}$  sind entsprechend

$$\varphi_{\max, \min} = \arccos \left( \pm \frac{1}{k} \right). \quad (2.2)$$

Zwischen zwei maximalen bzw. minimalen Winkeln muss der innere Planet einen ganzen Umlauf absolvieren. Der zeitliche Abstand  $T$  zwischen zwei maximalen oder minimalen Winkeln beträgt daher  $T = \frac{2\pi}{\Delta\omega}$ . Zwischen einem maximalen Winkel und der darauffolgenden Konfiguration mit minimalem Winkel liegt hingegen eine Zeit  $T'$  mit

$$T' = \frac{2\pi - 2 \arccos \frac{1}{k}}{\Delta\omega}. \quad (2.3)$$

Daraus ergibt sich

$$\frac{T'}{T} = \frac{\pi - \arccos \frac{1}{k}}{\pi} \quad \text{und damit} \quad \frac{1}{k} = \cos \left\{ \pi \left( 1 - \frac{T'}{T} \right) \right\}. \quad (2.4)$$

Aus dem Graphen lassen sich die Zeiten ablesen zu  $T \approx 4,1 \text{ a}$  sowie  $T' \approx 3,1 \text{ a}$ . Daraus ergibt sich für das gesuchte Verhältnis der Radien

$$\frac{r_2}{r_1} = k = \frac{1}{\cos \left\{ \pi \left( 1 - \frac{T'}{T} \right) \right\}} \approx 1,4. \quad (2.5)$$

### Verhältnis der Radien - Lösungsmöglichkeit 2

Eine zweite Möglichkeit, das Verhältnis  $k = r_2/r_1$  zu bestimmen ergibt sich aus der Betrachtung der Tangenten an den Nullstellen in dem Graphen.

Für die Nullstellen bei  $\varphi = \pi + n2\pi$  mit  $n \in \mathbb{Z}$ , also wenn die Planeten maximal voneinander entfernt sind, gilt für die Änderung  $\Delta\alpha$  des beobachteten Winkels bei kleiner Änderung  $\Delta\varphi$  des Winkels  $\varphi$  eine negative Änderung  $\Delta\alpha$  des Beobachtungswinkels  $\alpha$  und es gilt

$$-(r_1 + r_2) \Delta\alpha \approx r_1 \Delta\varphi \quad \text{und damit} \quad b_1 := \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} \approx \frac{-r_1}{r_1 + r_2} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{-1}{1+k} \Delta\omega. \quad (2.6)$$

Dabei wurde verwendet, dass die zeitliche Änderung  $\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$  des Winkel  $\varphi$  die Winkelgeschwindigkeit  $\Delta\omega$  ist.

Analog ergibt sich für die Änderung  $\Delta\alpha$  bei  $\varphi = n2\pi$  mit  $n \in \mathbb{Z}$ , also bei minimalem Abstand der beiden Planeten,

$$(r_2 - r_1) \Delta\alpha \approx r_1 \Delta\varphi \quad \text{und damit} \quad b_2 := \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} \approx \frac{r_1}{r_2 - r_1} \Delta\omega = \frac{1}{k-1} \Delta\omega. \quad (2.7)$$

In dem Graphen lassen sich die Werte der Steigungen bestimmen zu  $b_1 \approx -2,7$  Winkeleinheiten pro Jahr sowie  $b_2 \approx 14$  Winkeleinheiten pro Jahr. Aus dem Verhältnis dieser beiden Steigungen lässt sich der Wert von  $k$  bestimmen. Es ist

$$\frac{b_1}{b_2} = -\frac{k-1}{k+1} \quad \text{und damit} \quad \boxed{k = \frac{1 - \frac{b_1}{b_2}}{1 + \frac{b_1}{b_2}} \approx 1,5}. \quad (2.8)$$

Da insbesondere die Steigung  $b_2$  in dem steilen Teil des Graphen nicht so genau bestimmt werden kann, ist das mit dieser Methode ermittelte Ergebnis ungenauer als das der ersten Lösungsmöglichkeit und auch mit dem gegebenen Wert von  $k = 1,4$  vereinbar.

2.b) Mit dem Wert  $k = 1,4$  ergibt sich aus (2.1)

$$\alpha_{\max} = \arcsin \frac{1}{k} \approx 46^\circ. \quad (2.9)$$

Im Graphen entspricht dieser Wert etwa 3,25 Winkeleinheiten. Damit entspricht eine Winkeleinheit etwa  $14^\circ$ .

2.c) Für Planeten der Masse  $m$ , die den Stern auf kreisförmigen Bahnen umrunden, muss die Gravitationskraft des Sterns die Zentripetalkraft auf den Planeten sein. Es muss also

$$m\omega^2 r = G \frac{mM}{r^2} \quad \text{und damit} \quad \omega^2 r^3 = GM \quad (2.10)$$

gelten (3. Keplersches Gesetz). Für die beiden betrachteten Planeten ist  $r_2 = k r_1$ , so dass  $\omega_2 = \sqrt{GM r_2^{-3}} = \omega_1 k^{-3/2}$ . Damit ergibt sich

$$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 = \omega_1 \left(1 - \frac{1}{k^{3/2}}\right) \quad \text{und damit} \quad \omega_1 = \frac{\Delta\omega}{1 - \frac{1}{k^{3/2}}}. \quad (2.11)$$

Mit dem Wert  $\Delta\omega = 2\pi/4,1 \text{ a} \approx 1,5 \text{ a}^{-1}$  folgen daraus die Winkelgeschwindigkeiten  $\omega_1 \approx 3,9 \text{ a}^{-1}$  und  $\omega_2 \approx 2,3 \text{ a}^{-1}$ , was Umlaufzeiten von 1,6 und 2,7 Jahren entspricht. Mit (2.10) ergeben sich daraus die gesuchten Radien zu

$$\boxed{r_1 = \left(\frac{GM}{\omega_1^2}\right)^{1/3} \approx 2,1 \cdot 10^{11} \text{ m}} \quad \text{sowie} \quad \boxed{r_2 = \left(\frac{GM}{\omega_2^2}\right)^{1/3} \approx 2,9 \cdot 10^{11} \text{ m}}. \quad (2.12)$$

Bewertung - Planetenbeobachtung		Punkte
2.a)	Erkennen, dass die Beobachtung von dem äußeren Planeten erfolgt	1.0
	Erkennen der Konfiguration, bei der die maximale Winkelablenkung vorliegt	1.0
	Formulieren einer Idee, für die Bestimmung des Radienverhältnisses	1.0
	Ausführen der Idee inkl. Wertebestimmung am Graphen	1.0
	Bestimmen des Radienverhältnisses zu $k = (1,4 \pm 0,2)$	1.0
2.b)	Ermitteln der Skalierung der Winkelachse basierend auf Ergebnis für $k$	1.0
2.c)	Herstellen eines Zusammenhanges zwischen $r$ und $\omega$ sowie bekannten Größen (2.10)	1.0
	Bestimmen eines Ausdrucks für die Winkelgeschwindigkeit $\Delta\omega$ (2.11)	1.0
	Bestimmen des Wertes von $\Delta\omega$	1.0
	Berechnen der Radien unter Nutzung der vorher bestimmten Größen	1.0
		<b>10.0</b>

*Hinweise:*

Neben den beschriebenen Lösungswegen gibt es weitere Möglichkeiten zum Ermitteln der gesuchten Größen. Eine Möglichkeit ist die Untersuchung des analytischen Ausdrucks für den Winkel

$$\alpha(t) = \arcsin \left\{ \frac{\sin(\Delta\omega t + \varphi_0)}{\sqrt{1 + k^2 - 2k \cos(\Delta\omega t + \varphi_0)}} \right\}.$$

Außerdem können andere Bezeichnungen und Vorzeichenkonventionen für die Winkel verwendet werden. Dies sollte, wenn konsistent gemacht, nicht zu Punktabzug führen.

Die Illustration der Planetenoberfläche ist mit Hilfe des Oberflächenerkundungsmoduls der NASA Website *Exoplanet Travel Bureau* unter [exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/exoplanet-travel-bureau/](https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/exoplanet-travel-bureau/) erstellt worden.

**Aufgabe 3 Giant Magnetoresistance**
**(10 Pkt.)**

Im Jahr 2007 wurde der Physiknobelpreis für die Entdeckung des Giant Magnetoresistance (GMR), eines quantenphysikalischen Phänomens, durch die Forschergruppen um Albert Fert sowie Peter Grünberg vergeben. Aufgrund des Effektes lässt sich der elektrische Widerstand von speziellen, sehr dünnen Schichtsystemen durch ein äußeres Magnetfeld gezielt beeinflussen.

Betrachte das rechts abgebildete Beispiel für ein Co-Cu-Co Schichtsystem. Auf einem sehr gut leitfähigen Substrat befinden sich zwei gleich große Cobaltschichten (Co, ferromagnetisch), die durch eine dünne Kupferschicht (Cu, näherungsweise nicht magnetisch) getrennt sind. Durch den direkten Kontakt mit dem Substrat ist die Magnetisierungsrichtung der unteren Cobaltschicht festgelegt. Die Magnetisierung der oberen Cobaltschicht kann aber anders orientiert sein. Ohne äußeres Magnetfeld sind die Magnetisierungsrichtungen der Schichten antiparallel orientiert (Situation A). Ein starkes äußeres Magnetfeld führt zur parallelen Orientierung (Situation B).

Senkrecht zum Schichtsystem wird nun eine Spannung angelegt, die zu einem durch Elektronentransport erzeugten Strom führt. Die Spinorientierung der Elektronen ist entweder parallel ( $\rightarrow$ ) oder antiparallel ( $\leftarrow$ ) zur Magnetisierungsrichtung der unteren Cobaltschicht. Dies führt zu unterschiedlichen elektrischen Widerständen in den Cobaltschichten.

Nimm für die Beschreibung des elektrischen Widerstandes folgendes an:

- Jeweils die Hälfte der Leitungselektronen hat Spinorientierung  $\rightarrow$  und  $\leftarrow$ . Die Spinorientierung ändert sich nicht.
- In einer Cobaltschicht haben Elektronen, deren Spin parallel zur Magnetisierungsrichtung der Schicht ausgerichtet ist, einen niedrigeren spezifischen Widerstand ( $\rho_{\uparrow\uparrow}$ ) als Elektronen mit antiparalleler Spinorientierung ( $\rho_{\uparrow\downarrow}$ ).
- Der elektrische Widerstand von Substrat und Kupferschicht ist vernachlässigbar.
- Das äußere Magnetfeld beeinflusst die Elektronenbewegung nicht.

3.a) Erstelle für die Situationen A und B je eine Ersatzschaltskizze für den Stromfluss durch das Co-Cu-Co Schichtsystem

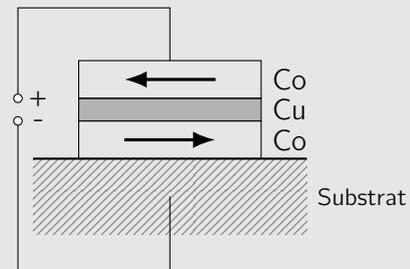
3.b) Zeige, dass für die Gesamtwiderstände  $R_A$  und  $R_B$  des Schichtsystems gilt:  $R_A > R_B$ .

3.c) Berechne mit Hilfe deiner Ersatzschaltbilder die relative Änderung

$$\frac{\Delta R}{R_A} = \frac{R_A - R_B}{R_A}$$

des Widerstandes des Schichtsystems aufgrund des GMR-Effekts. Drücke dein Ergebnis durch das Verhältnis  $\alpha = \rho_{\uparrow\uparrow}/\rho_{\uparrow\downarrow}$  aus.

Situation A: kein Magnetfeld



Situation B: externes Magnetfeld

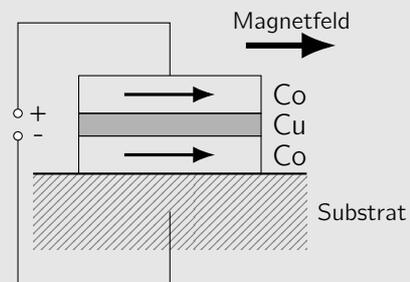


Abb. 8. Magnetisierungsrichtungen im Co-Cu-Co Schichtsystem.

**Lösung**

- 3.a) Der Stromfluss lässt sich entsprechend der beiden Spinorientierungen in zwei separate Stromkomponenten  $I_{\rightarrow}$  und  $I_{\leftarrow}$  aufteilen, die sich zum Gesamtstrom  $I$  addieren. Im Ersatzschaltbild werden diese separaten Komponenten in einer Parallelschaltung dargestellt. Entsprechend der spezifischen Widerstände ist der Widerstand einer Cobaltschicht bei antiparalleler Orientierung der Spins zur Magnetisierung der Schicht ( $R_{\uparrow\downarrow}$ ) höher als für parallele Orientierung ( $R_{\uparrow\uparrow}$ ). Es gilt also  $R_{\uparrow\downarrow} > R_{\uparrow\uparrow}$ .

*Situation A:* Beide Stromkomponenten passieren eine Schicht mit geringerer Beweglichkeit und eine Schicht mit höherer Beweglichkeit. In den Ästen für  $I_{\rightarrow}$  und  $I_{\leftarrow}$  befindet sich jeweils einmal  $R_{\uparrow\downarrow}$  und einmal  $R_{\uparrow\uparrow}$  (die Reihenfolge ist im Ersatzschaltbild egal).

*Situation B:*  $I_{\rightarrow}$  hat parallele Orientierung zu beiden Schichten, im Ast steht zweimal  $R_{\uparrow\uparrow}$ .  $I_{\leftarrow}$  hat antiparallele Orientierung zu beiden Schichten, im Ast steht zweimal  $R_{\uparrow\downarrow}$ .

Entsprechende Schaltskizzen könnten folgendermaßen aussehen:

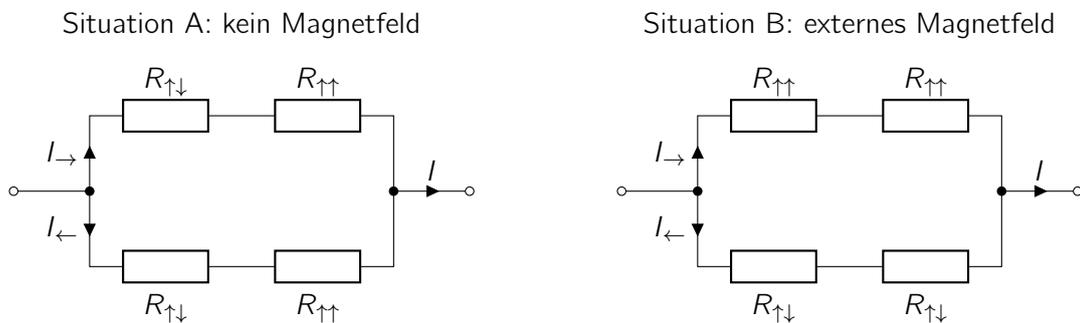


Abb. 9. Ersatzschaltbilder für die beiden Situationen im Co-Cu-Co Schichtsystem.

- 3.b) Für die Gesamtwiderstände in den beiden Fällen ergibt sich aus den Schaltskizzen in Abbildung 9

$$R_A = \frac{R_{\uparrow\downarrow} + R_{\uparrow\uparrow}}{2} \quad \text{sowie} \quad R_B = \left( \frac{1}{2R_{\uparrow\uparrow}} + \frac{1}{2R_{\uparrow\downarrow}} \right)^{-1} = \frac{2R_{\uparrow\downarrow}R_{\uparrow\uparrow}}{R_{\uparrow\downarrow} + R_{\uparrow\uparrow}}. \quad (3.1)$$

Die zu zeigende Behauptung  $R_A > R_B$  ist mit (3.1) äquivalent zu

$$\frac{R_{\uparrow\downarrow} + R_{\uparrow\uparrow}}{2} > \frac{2R_{\uparrow\downarrow}R_{\uparrow\uparrow}}{R_{\uparrow\downarrow} + R_{\uparrow\uparrow}} \iff (R_{\uparrow\downarrow} + R_{\uparrow\uparrow})^2 > 4R_{\uparrow\downarrow}R_{\uparrow\uparrow} \iff (R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow})^2 > 0. \quad (3.2)$$

Da die rechte Ungleichung für  $R_{\uparrow\downarrow} \neq R_{\uparrow\uparrow}$  korrekt ist, gilt auch die zu zeigende Ungleichung.

- 3.c) Die Widerstände  $R_{\uparrow\uparrow}$  und  $R_{\uparrow\downarrow}$  sind proportional zu den spezifischen Widerständen  $\rho_{\uparrow\uparrow}$  bzw.  $\rho_{\uparrow\downarrow}$ . Da die Geometrien beider Cobaltschichten identisch sind und die Spinorientierungen zu gleichen Anteilen vorkommen, existiert eine Konstante  $\kappa$ , für die

$$R_{\uparrow\uparrow} = \kappa \rho_{\uparrow\uparrow} \quad \text{sowie} \quad R_{\uparrow\downarrow} = \kappa \rho_{\uparrow\downarrow} \quad (3.3)$$

gilt. Die Widerstände  $R_A$  und  $R_B$  lassen sich damit schreiben als

$$R_A = \kappa \frac{\rho_{\uparrow\downarrow} + \rho_{\uparrow\uparrow}}{2} \quad \text{sowie} \quad R_B = \kappa \frac{2\rho_{\uparrow\downarrow}\rho_{\uparrow\uparrow}}{\rho_{\uparrow\downarrow} + \rho_{\uparrow\uparrow}}. \quad (3.4)$$

Damit ergibt sich für die relative Änderung schließlich

$$\frac{\Delta R}{R_A} = \frac{\frac{\rho_{\uparrow\downarrow} + \rho_{\uparrow\uparrow}}{2} - \frac{2\rho_{\uparrow\downarrow}\rho_{\uparrow\uparrow}}{\rho_{\uparrow\downarrow} + \rho_{\uparrow\uparrow}}}{\frac{\rho_{\uparrow\downarrow} + \rho_{\uparrow\uparrow}}{2}} = \frac{(\rho_{\uparrow\uparrow} + \rho_{\uparrow\downarrow})^2 - 4\rho_{\uparrow\uparrow}\rho_{\uparrow\downarrow}}{(\rho_{\uparrow\uparrow} + \rho_{\uparrow\downarrow})^2} = \left( \frac{\rho_{\uparrow\uparrow} - \rho_{\uparrow\downarrow}}{\rho_{\uparrow\uparrow} + \rho_{\uparrow\downarrow}} \right)^2 = \left( \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \right)^2. \quad (3.5)$$

*Hinweis:* Die Idee zu der Aufgabe stammt von Anne van Klinken, einer ehemaligen Teilnehmerin der PhysikOlympiade in Deutschland.

<b>Bewertung - Giant Magnetoresistance</b>		<b>Punkte</b>
3.a)	Aufteilen des Stromflusses entsprechend der Spinorientierung und Verwenden einer Parallelschaltung	1.0
	Definieren passender Widerstände entsprechend der Spinorientierung	1.0
	Angeben einer Schaltskizze für Situation A (korrekte Zuordnung der Widerstände zu den Ästen, richtige Bezeichnung, Übersichtlichkeit des Schaltbildes)	1.0
	Angeben einer Schaltskizze für Situation B (korrekte Zuordnung der Widerstände zu den Ästen, richtige Bezeichnung, Übersichtlichkeit des Schaltbildes)	1.0
3.b)	Angeben der Widerstände $R_A$ und $R_B$ (3.1)	1.0
	Zeigen, dass $R_A > R_B$	2.0
3.c)	Ausdrücken der Widerstände durch spezifische Widerstände (3.4)	1.0
	Berechnen der relativen Änderung (3.5) und Ausdrücken durch $\alpha$	2.0
		<b>10.0</b>

**Aufgabe 4 Fallende Backformen**
**(10 Pkt.)**

In der Atmosphäre wird der freie Fall durch Luftreibung gebremst. Die Reibungskraft  $F$  ist dabei proportional zum Quadrat der Fallgeschwindigkeit  $v$  und lässt sich ausdrücken durch

$$F = \frac{1}{2} A c_W \rho_{\text{Luft}} v^2.$$

Dabei bezeichnen  $A$  die Querschnittsfläche des fallenden Körpers,  $\rho_{\text{Luft}}$  die Luftdichte und  $c_W$  den so genannten Luftwiderstandsbeiwert, der von der Form des Körpers abhängig ist.



Mit Backformen aus Papier, wie den auf dem Foto zu sehenden Muffinförmchen, lässt sich der gebremste Fall experimentell untersuchen. Neben einigen identischen Backformen benötigst du dafür ein Gerät zur Zeitmessung, wie z.B. eine Stoppuhr, ein Metermaß oder einen Zollstock sowie eine genaue Waage, wie du sie z.B. in der Schule finden kannst.

- 4.a) Bestimme einen Ausdruck für die Endgeschwindigkeit, die ein Körper beim Fall mit Reibung erreichen kann.
- 4.b) Lass fünf ineinandergesteckte Backformen mehrfach fallen und miss die Fallzeiten für unterschiedliche Fallstrecken. Erstelle daraus einen Graphen der Fallzeit als Funktion der Fallstrecke. Bestimme damit näherungsweise die Fallstrecke nach der die Endgeschwindigkeit erreicht wird. Beachte, dass diese Fallstrecke mehrere Meter betragen kann.
- 4.c) Verändere nun die Anzahl der ineinander gesteckten Backformen und miss die sich jeweils einstellende Endgeschwindigkeit. Bestimme mit Hilfe eines geeigneten Graphen den Luftwiderstandsbeiwert deiner Backformen.

Verwende bei der Auswertung für die Dichte von Luft  $\rho_{\text{Luft}} = 1,2 \text{ kg m}^{-3}$  und für die Schwerebeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ .

**Lösung**

- 4.a) Wenn der fallende Körper seine Endgeschwindigkeit  $v_E$  erreicht, wird er nicht weiter beschleunigt, so dass sich die auf ihn wirkenden Kräfte ausgleichen müssen. Die nach unten wirkende Gravitationskraft muss also gleich groß wie die entgegen der Bewegung wirkende Reibungskraft sein. Bezeichne mit  $m$  die Masse des Körpers. Dann gilt in diesem Fall

$$m g = \frac{1}{2} A c_W \rho_{\text{Luft}} v_E^2 \quad \text{und damit} \quad \boxed{v_E = \sqrt{\frac{2 m g}{A c_W \rho_{\text{Luft}}}}} \quad \text{bzw.} \quad v_E^2 = \frac{2 g}{A c_W \rho_{\text{Luft}}} m. \quad (4.1)$$

Das Quadrat der End- oder Grenzgeschwindigkeit ist bei konstanter Querschnittsfläche theoretisch also proportional zur Masse des fallenden Körpers.

- 4.b) Um zu bestimmen, nach welcher Fallstrecke die Endgeschwindigkeit erreicht wird, werden fünf ineinandergesteckte Backformen aus unterschiedlichen, mit einem Zollstock gemessenen, Höhen  $h$  fallengelassen und die Zeit  $t$  bis zum Auftreffen auf den Boden mit einer Stoppuhr gemessen. Da die Zeiten relativ kurz und damit nicht einfach zu bestimmen sind, wurde die Fallzeit für jede Höhe zehn Mal gemessen und der Mittelwert gebildet. Die folgende Tabelle stellt die gemessenen Werte dar.

Tabelle 1. Messwerte der für verschiedene Fallhöhen  $h$  gemessenen Fallzeiten  $t$  bei fünf ineinandergesteckten Backformen zusammen mit der gemittelten Fallzeit  $\bar{t}$ .

$h/\text{cm}$	$t/\text{s}$										$\bar{t}/\text{s}$
200	0,76	0,79	0,79	0,78	0,86	0,85	0,81	0,83	0,83	0,73	0,80
190	0,78	0,83	0,76	0,78	0,78	0,71	0,81	0,79	0,81	0,75	0,78
180	0,85	0,75	0,82	0,70	0,78	0,63	0,74	0,78	0,80	0,71	0,76
160	0,73	0,68	0,73	0,71	0,66	0,78	0,63	0,70	0,74	0,73	0,71
140	0,61	0,66	0,61	0,66	0,66	0,63	0,66	0,58	0,64	0,58	0,63
120	0,58	0,63	0,66	0,53	0,55	0,55	0,50	0,61	0,64	0,53	0,58
100	0,51	0,50	0,51	0,51	0,55	0,53	0,55	0,58	0,55	0,51	0,53
80	0,38	0,45	0,41	0,46	0,47	0,49	0,48	0,53	0,43	0,41	0,45
60	0,38	0,41	0,36	0,41	0,33	0,41	0,38	0,38	0,34	0,33	0,37
40	0,33	0,28	0,26	0,28	0,28	0,33	0,30	0,26	0,26	0,25	0,28
20	0,18	0,20	0,19	0,20	0,23	0,23	0,24	0,21	0,19	0,17	0,20

Die Unsicherheit bei der Höhenmessung beträgt  $\Delta h = 1 \text{ cm}$ . Die Unsicherheit der Zeitmessung wird als Standardabweichung des Mittelwertes der Zeiten für eine Höhe plus ein möglicher systematischer Fehler durch die Reaktionszeit beim Stoppen der Zeitdifferenzen von  $0,05 \text{ s}$  bestimmt.

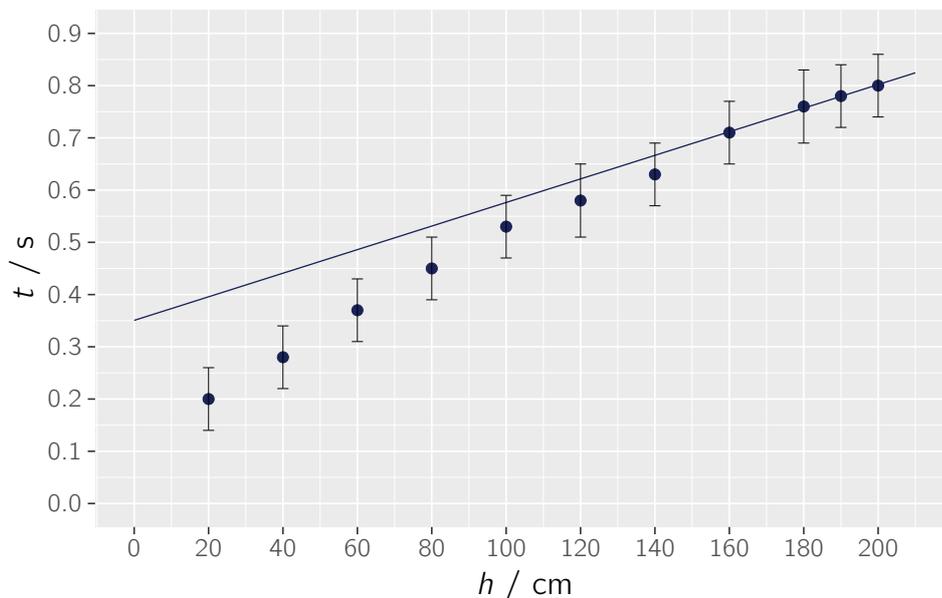


Abb. 10. Fallzeiten  $t$  für fünf ineinandergesteckte Backformen in Abhängigkeit von der Fallhöhe  $h$  mit einer aus den letzten vier Werten erstellten Ausgleichsgeraden.

In Abbildung 10 sind die gemittelten Fallzeiten über der Fallhöhe aufgetragen. Wenn die Endgeschwindigkeit erreicht ist, fallen die Backformen mit konstanter Geschwindigkeit weiter. Daher steigt die Fallzeit dann linear mit der Fallhöhe. Um festzustellen, ab welcher Höhe dies etwa passiert, wird durch die vier Messwerte bei den größten Fallhöhen eine Ausgleichsgerade gelegt. Diese vier Fallzeiten liegen sehr gut auf der Ausgleichsgerade, so dass davon ausgegangen werden kann, dass hier die Grenzggeschwindigkeit erreicht wurde. Bis zu einer Fallhöhe von etwa  $100 \text{ cm}$  kann der Verlauf im Rahmen der Messgenauigkeit noch als linear angenommen werden. Für kleinere Höhen weichen die Messwerte deutlich von dem linearen Verhalten ab. Die Grenzggeschwindigkeit ist also dort noch nicht erreicht.

Da die Grenzggeschwindigkeit nach (4.1) mit steigender Masse zunimmt, wird die Endgeschwindigkeit bei größerer Masse erst bei einer noch größeren Fallhöhe erreicht, wohingegen für geringere Massen die Endgeschwindigkeit bereits bei geringeren Höhen erreicht wird.

- 4.c) Beim Fall mehrerer ineinandergesteckter Backformen ist die Querschnittsfläche  $A$  unabhängig von der Anzahl der Backformen. Nach Gleichung (4.1) ist damit  $v_E^2$  proportional zur Masse der Backformen  $m$ . Die Proportionalitätskonstante  $b$  ist dabei gegeben durch  $b = \frac{2g}{A c_W \rho_{\text{Luft}}}$ . Trägt man in einem Graphen  $v_E^2$  über  $m$  auf, so lässt sich aus der Steigung  $b$  einer Ausgleichsgeraden der Luftwiderstandsbeiwert einer fallenden Backform berechnen durch

$$c_W = \frac{2g}{A \rho_{\text{Luft}} b}. \quad (4.2)$$

Zunächst werden die Masse  $m$  und die Fläche  $A$  einer Backform quer zur Fallrichtung bestimmt. Zur Massenbestimmung werden zehn Backformen auf eine Waage mit einer Anzeigengenauigkeit von 0,01 g gelegt. Für die Querschnittsfläche wird der obere Durchmesser einer Backform mit dem Lineal vermessen. Es ergeben sich

$$m = \frac{(3,13 \pm 0,02) \text{ g}}{10} = (0,313 \pm 0,002) \text{ g}, \quad A = \frac{\pi}{4} ((7,1 \pm 0,1) \text{ cm})^2 = (40 \pm 1) \text{ cm}^2. \quad (4.3)$$

Zur Messung der Fallzeiten werden eine einzelne oder mehrere ineinandergesteckte Backformen in einem Treppenhaus fallengelassen. Damit bei der Messung der Fallzeit die Endgeschwindigkeit bereits erreicht ist, durchlaufen die Backformen zunächst einen Fall von mindestens einem Meter. Dann wird mit einer Stoppuhr die Zeit gestoppt, die die Backformen für das Zurücklegen einer anschließenden Fallstrecke von  $h = (3,48 \pm 0,02) \text{ m}$  bis zum Auftreffen auf den Boden zurücklegen. Um das Passieren des Beginns der Messstrecke zuverlässig bestimmen zu können, wird ein Laserpointer verwendet, dessen Strahl horizontal auf Höhe des oberen Endes der Messstrecke verläuft. Die Zeitmessung wird dann per Hand gestartet, sobald der Laserstrahl durch die fallenden Backformen unterbrochen wird. Für die Auswertung wird aus den Mittelwerten  $\bar{t}$  der Fallzeiten die der Einfachheit halber hier mit  $v$  bezeichnete Endgeschwindigkeit nach

$$v = \frac{h}{\bar{t}} = \frac{(3,48 \pm 0,02) \text{ m}}{\bar{t}} \quad (4.4)$$

bestimmt. Die folgende Tabelle stellt die gemessenen und berechneten Werte dar.

Tabelle 2. Messwerte der für verschiedene Anzahlen  $n$  ineinandergesteckter Backformen gemessenen Fallzeiten  $t$  für eine Fallstrecke von  $h = (3,48 \pm 0,02) \text{ m}$  nach Erreichen der Endgeschwindigkeit. Angegeben sind darüber hinaus die Masse  $m$  der zusammengesteckten Backformen, die stationäre Fallgeschwindigkeit  $v$  sowie deren Quadrat  $v^2$ .

$n$	$m/\text{g}$	$t/\text{s}$										$\bar{t}/\text{s}$	$v/\text{m s}^{-1}$	$(v/\text{m s}^{-1})^2$
1	0,313	2,16	2,37	2,22	2,21	2,28	2,10	2,40	2,37	2,38	2,31	2,28	1,53	2,33
2	0,626	1,53	1,59	1,48	1,59	1,62	1,72	1,57	1,50	1,65	1,72	1,60	2,18	4,75
3	0,939	1,40	1,22	1,34	1,35	1,25	1,19	1,22	1,35	1,32	1,34	1,30	2,68	7,19
4	1,252	1,10	1,22	1,16	1,22	1,10	1,15	1,16	1,28	1,12	1,25	1,18	2,96	8,76
5	1,565	1,15	1,15	1,16	0,97	1,00	1,12	0,97	1,04	1,21	1,06	1,08	3,21	10,33
6	1,878	0,97	1,07	1,00	1,07	0,97	0,94	1,06	1,04	0,97	0,94	1,00	3,47	12,04

Die Unsicherheiten der Masse und der Höhenmessung sind vernachlässigbar gering. Die Unsicherheit der Geschwindigkeit ergibt sich aus der Unsicherheit der Zeitmessung, die wie im vorherigen Versuch bestimmt wird.

In Abbildung 11 sind die Quadrate der Geschwindigkeiten über der Masse der fallenden Backformen aufgetragen. Die Ausgleichsgerade wurde so gelegt, dass sie durch den Ursprung geht, da für  $m \rightarrow 0$  der Fall beliebig abgebremst wird. Außerdem wurden die letzten beiden Messwerte bei der Linearisierung nicht berücksichtigt, da hier die Endgeschwindigkeit zu Beginn der Messstrecke evtl. noch nicht erreicht war.

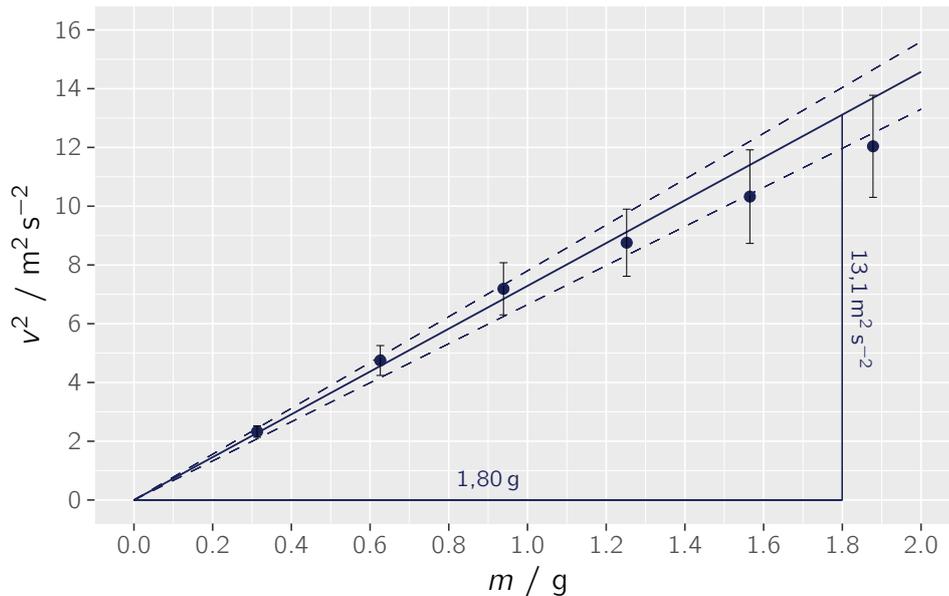


Abb. 11. Quadrat der Endgeschwindigkeit  $v$  des Falls in Abhängigkeit von der Masse  $m$  der fallenden Backformen mit Ausgleichsgerade.

Aus der Ausgleichsgeraden lässt sich die Steigung bestimmen zu  $b = (7,3 \pm 0,6) \cdot 10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ . Dabei wurde die Unsicherheit durch alternative Ausgleichsgeraden mit anderer Steigung abgeschätzt. Für den gesuchten Luftwiderstandsbeiwert ergibt sich damit aus (4.2) der Wert

$$c_w = \frac{2g}{A \rho_{\text{Luft}} b} = \frac{2 \cdot 9,81 \text{ m s}^{-2}}{4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 1,2 \text{ kg m}^{-3} \cdot 7,3 \cdot 10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}} = 0,56 \pm 0,06 \quad (4.5)$$

Die Unsicherheit wurde aus den mit den Unsicherheiten der einzelnen Variablen bestimmten minimalen und maximalen Werten ermittelt. Der Luftwiderstandsbeiwert liegt zwischen dem einer Kugel sowie einem stehenden Menschen und erscheint damit plausibel.

Bewertung - Fallende Backformen		Punkte
4.a)	Aufstellen eines Kräftegleichgewichts und Bestimmen von $v$ (4.4)	1.0
4.b)	Beschreiben eines geeigneten Aufbaus und der Durchführung des Versuches	1.0
	Aufnehmen und Angeben von Messwerten inkl. Messwiederholung	1.0
	Erstellen eines Graphen für die Fallzeiten	1.0
	Konsistentes Bestimmen, ab welcher Höhe die Endgeschwindigkeit erreicht wird	1.0
4.c)	Beschreiben der Durchführung des Versuches und der Auswertung	1.0
	Bestimmen benötigter Daten der Backformen (Masse, Fläche)	1.0
	Aufnehmen und Angeben von Messwerten inkl. Messwiederholung	1.0
	Durchführen einer passenden graphischen Auswertung	1.0
	Bestimmen eines plausiblen Wertes für $c_w$ (4.5)	1.0
		<b>10.0</b>

*Hinweise:* Die Durchführung und Auswertung des Versuches ist auch auf anderen Wegen, z.B. durch die Analyse von Videoaufnahmen des Falls, möglich. Es wird von den Teilnehmenden außerdem keine Betrachtung der Unsicherheiten erwartet.

**Aufgabe 5 Junioraufgabe - Linsenkonstruktion**
**(10 Pkt.)**

Eine große aber dünne, symmetrische Linse wird genutzt, um ein Bild der beiden Punkte A und B in der nebenstehenden Abbildung zu erzeugen. Die Punkte A' und B' sind die dabei erzeugten realen Bilder der Punkte A und B.

Konstruiere in der Abbildung die Lage der Linse und ihrer Brennpunkte. Begründe dein Vorgehen physikalisch. Gib außerdem die Brennweite der Linse an.



Abb. 12. Skizze der Punkte und ihrer durch eine Linse erzeugten Abbildungen.

**Lösung**
**Linsenmittelpunkt**

Strahlen, die durch die Linsenmitte M gehen, werden nicht abgelenkt. Daher liegt der Linsenmittelpunkt im Schnittpunkt der Verbindungsstrecken  $AA'$  und  $BB'$ .

**Linsenebene und optische Achse**

Strahlen, die vom Punkt A ausgehen und auf die Linse treffen, verlaufen hinter der Linse durch den Punkt A'. Insbesondere gilt dies auch für den Strahl, der von A kommend durch B verläuft. Dieser muss hinter der Linse durch die Punkte A' und B' verlaufen. Der Schnittpunkt der Geraden durch A und B bzw. A' und B' (Punkt C in Abbildung 13) liegt daher in der Linsenebene<sup>4</sup>. Die Verbindungslinie  $\overline{MC}$  definiert damit die Linsenebene. Die dazu senkrechte Linie durch M ist die optische Achse.

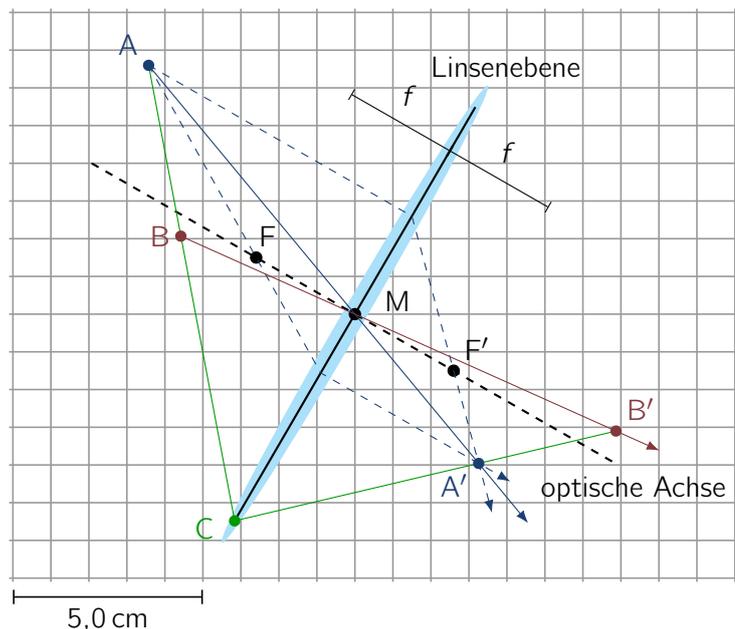


Abb. 13. Lösungsskizze zur Linsenkonstruktion.

**Brennpunkte und Brennweite**

Die von den Punkten A und A' ausgehenden Strahlen parallel zur optischen Achse verlaufen auf der

<sup>4</sup>Wenn die Geraden durch A und B sowie die durch A' und B' parallel verlaufen würden, verliefte auch die Linsenebene parallel dazu und durch M.

jeweils anderen Linsenseite durch die Punkte  $A'$  und  $A$  sowie durch die Brennpunkte  $F$  und  $F'$ , die damit gefunden sind.

Die Brennweite  $f$  der Linse lässt sich aus der Abbildung mit Hilfe des Maßstabes ausmessen zu

$$f \approx 3,0 \text{ cm} . \quad (5.1)$$

Bewertung - Junioraufgabe - Linsenkonstruktion		Punkte
5	Angeben, dass Mittelpunktstrahlen nicht abgelenkt werden	1.0
	Konstruieren des Linsenmittelpunktes	1.0
	Erkennen und begründen, dass Strahlen entlang der beiden Gegenstandspunkte auf der anderen Linsenseite entlang der beiden Bildpunkte verlaufen	2.0
	Bestimmen der Linsenebene	1.0
	Angeben, dass die optische Achse senkrecht zur Linsenebene ist	1.0
	Konstruieren der optischen Achse	1.0
	Angeben des Strahlenverlaufs achsenparalleler Strahlen	1.0
	Konstruieren der beiden Brennpunkte	1.0
	Bestimmen der Brennweite mit $f = (3,0 \pm 0,3) \text{ cm}$	1.0
		<b>10.0</b>

*Hinweis:* Für die Konstruktion insbesondere der Linsenebene sind mehrere Wege denkbar. Alternative Lösungswege sollten, sofern korrekt durchgeführt und begründet, ebenfalls zu voller Punktzahl führen. Dabei werden maximal 2 Pkt. für den Linsenmittelpunkt, 3 Pkt. für die Linsenebene, 2 Pkt. für die optische Achse, 2 Pkt. für die Brennpunkte und 1 Pkt. für die Bestimmung der Brennweite vergeben.

**Bewertungsbogen für die 1. Runde zur 55. IPhO 2025**

(Dieser Bogen ist auch unter [www.ipho.info](http://www.ipho.info) bei den Hinweisen zur 1. Runde erhältlich)

**Von der korrigierenden Lehrkraft auszufüllen und bis spätestens zum 27. September 2024 zusammen mit der korrigierten Bearbeitung der Aufgaben an die/den zuständige(n) Landesbeauftragte(n) zu schicken.**

**Bitte tragen Sie die Punktzahlen ebenfalls im Onlineportal der IPhO ein.  
Nur so können wir sicherstellen, dass die Bearbeitung korrekt erfasst wird.**

Schülername (-code): \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ )

Schule, Ort: \_\_\_\_\_

Lehrkraft (-code): \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ )

Aufgabe	Maximalpunktzahl	Erreichte Punktzahl
1 Blick durch die Glaskugel	10	
2 Planetenbeobachtung	10	
3 Giant Magnetoresistance	10	
4 Fallende Backformen	10	

Bonuspunkte für jüngere Teilnehmende

5 Junioraufgabe - Linsenkonstruktion	10	
	<b>40 (+10)</b>	

Kommentare und Anregungen:

Unterschrift: \_\_\_\_\_