

Das Äquivalenzprinzip

Von der Universalität des freien Falls zur Lichtablenkung im Schwerfeld

Ute Kraus, Corvin Zahn

6. Mai 2024

Das Äquivalenzprinzip ist eine der Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie und mit schulischen Mitteln gut zugänglich. Wenn Lehrpläne eine Einführung in die Allgemeine Relativitätstheorie vorsehen, ist das Äquivalenzprinzip in der Regel enthalten. Ausgehend von der newtonschen Gravitationstheorie kann es auch gut als Anknüpfungspunkt für einen kurzen Ausblick auf die Allgemeine Relativitätstheorie genutzt werden.

Wir beschreiben eine Unterrichtseinheit zum Äquivalenzprinzip in vier Teilen: Die Einheit beginnt mit der Universalität des freien Falls und führt über die Themen Schwerelosigkeit und newtonsches Äquivalenzprinzip zum einsteinschen Äquivalenzprinzip, aus dem das Auftreten von Lichtablenkung im Schwerfeld gefolgert wird.

Alle wesentlichen Aspekte werden dabei durch Schüleraktivitäten erarbeitet. Eingesetzt werden Realexperimente zur Bewegung im Schwerfeld sowie Modellexperimente zum Äquivalenzprinzip. Die Letzteren setzen Gedankenexperimente praktisch um und machen dadurch abstrakte Gedankengänge anschaulicher. Für die Schüleraktivitäten werden durchwegs einfache Materialien und Geräte verwendet, die kostengünstig erstellt werden können. Die Aktivitäten sind für Schülergruppen ab der Jahrgangsstufe 10 konzipiert; die Teile 1 und 2 sind auch bereits für Jüngere geeignet. Diese Unterrichtseinheit wurde im Schülerlabor *Raumzeitwerkstatt* der Universität Hildesheim entwickelt und in vielen Veranstaltungen eingesetzt.

Die im folgenden beschriebenen Experimente und Modellexperimente sind in erster Linie als Schülerexperimente gedacht. Bei Bedarf (z.B. Platzmangel, Materialmangel) können sie aber auch als Demonstrationsexperimente eingesetzt werden. Die konkreten Aufgabenstellungen sind in den Kästen zu finden; die erwarteten Antworten sind in Grün eingefügt.

Teil 1: Bewegung im Schwerfeld

Im ersten Teil der Einheit sollen die Schülerinnen und Schüler erkennen, dass die Bewegung im Schwerfeld universell ist, d.h. unabhängig von den Eigenschaften des fallenden Körpers.

Hier ist mit der bekannten Alltagsvorstellung zu rechnen, dass ein schweres Objekt schneller falle als ein leichtes. Der erste Versuch (s. Kasten 1, oben), besteht deshalb im Vergleich der Fallbewegungen verschieden schwerer Objekte. Der zweite Fallversuch (s. Kasten 1, unten) verdeutlicht, dass die Fallbewegung nur universell ist, wenn außer der Schwerkraft keine weiteren Kräfte wirken (bzw. wenn alle weiteren Kräfte vernachlässigbar klein sind). Im Vergleich zwischen Papier und Schlüsselbund wird einmal ein hoher Luftwiderstand auf das Papier erzeugt (indem das Papier zu Beginn waagrecht ausgerichtet ist) und einmal ein geringer (durch Zusammenknüllen). Ist der Luftwiderstand gering, fallen Papier und Schlüsselbund gleich schnell. Papier und Schlüsselbund unterscheiden sich klar in Material und Form.

Kasten 1: Bewegung im Schwerfeld – Fallexperimente

1. Versuch: Objekte unterschiedlicher Masse

Materialien

2 Stoffsäckchen mit einer Füllung aus Reiskörnern. Beide Säckchen haben dieselbe Größe und Form, eines ist mit doppelt so viel Reis befüllt wie das andere.



Aufgaben

Zwei Säckchen werden in der gleichen Höhe gleichzeitig losgelassen. Eines hat ungefähr doppelt so viel Masse wie das andere.

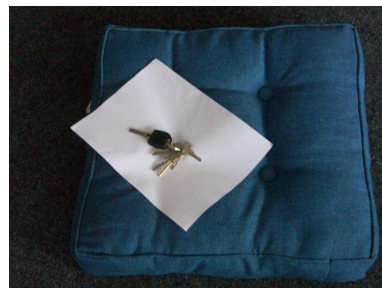
- Stellt zunächst eine Vermutung auf: Kommen die beiden Säckchen gleichzeitig auf dem Boden auf? Wenn nicht, welches Säckchen kommt zuerst an?
- Führt dann den Versuch durch.
- Welche Rolle spielt die Masse für die Fallbewegung?

Die Masse spielt keine Rolle.

2. Versuch: Blatt und Schlüsselbund

Materialien

Ein Blatt Papier, ein Schlüsselbund.



Aufgaben

Haltet zunächst das Blatt Papier waagrecht in einer Hand und den Schlüsselbund in der anderen. Lasst beide Gegenstände gleichzeitig in derselben Höhe los.

- Vergleicht die Fallbewegungen.
Der Schlüsselbund fällt gerade nach unten, das Papier schwebt zu Boden. Das Papier kommt später am Boden an.
- Wie lässt sich eure Beobachtung erklären?
Der Luftwiderstand bremst den Fall des Papiers. Der Luftwiderstand ist nur für das Papier hoch.

Nun knüllt ihr das Blatt Papier zusammen und führt den Versuch noch einmal durch.

- Beschreibt, wie die Fallbewegungen jetzt verlaufen. Wie kann man den Unterschied zum ersten Versuch erklären?
Schlüsselbund und Papier fallen nebeneinander her und kommen gleichzeitig unten an. Zusammengeknüllt erfährt das Papier nicht mehr einen hohen Luftwiderstand.

Der Versuch verdeutlicht somit auch, dass die Fallbewegung von diesen Eigenschaften der Objekte nicht abhängt.

Als Fazit aus den Fallexperimenten halten wir fest:

Fazit 1: Wenn nur die Schwerkraft wirkt und andere Kräfte (z.B. Luftwiderstand) keine Rolle spielen, dann fallen alle Körper gleich schnell. Allgemein gilt:

Die Bewegung im Schwerfeld ist universell, d.h. unabhängig von den Eigenschaften des fallenden Körpers.

Praktischer Hinweis: Wir verwenden für diesen Versuch Jutesäckchen (erhältlich als Geschenkverpackungen), in denen sich jeweils Plastiktüten mit Reiskörnern befinden. Da die Säckchen trotz verschiedener Masse praktisch dieselbe Form und Größe haben, ist es einfach, sie in der gleichen Höhe und gleichzeitig loszulassen. Das gleichzeitige Auftreffen auf dem Boden ist gut hörbar, weil die Säckchen, anders als Bälle, nach dem Aufprall auf dem Boden liegen bleiben.

Varianten: Es gibt viele andere Möglichkeiten für derartige Fallversuche. Ein schöner Demonstrationsversuch ist die evakuierbare Fallröhre.

Vertiefungen

Mathematische Darstellung des Fazits zur Bewegung im Schwerfeld: Das newtonsche Kraftgesetz $F = ma$, zusammen mit dem Gravitationsgesetz $F = GMm/r^2$ (bzw. $F = mg$ im homogenen Gravitationsfeld) liefert die Beschleunigung $a = GM/r^2$ (bzw. $a = g$). Dieser Ausdruck ist unabhängig von der Masse m des Objekts. (Hier ist a die Beschleunigung eines Körpers der Masse m unter der Einwirkung der Kraft F , die dieser Körper im Gravitationsfeld einer Masse M im Abstand r bzw. im homogenen Gravitationsfeld der Feldstärke g erfährt.)

Auf die **experimentelle Überprüfung** eingehen: Man unterscheidet zwischen der Masse als Maß für die Trägheit eines Objekts (träge Masse m_t), die ins newtonsche Kraftgesetz eingeht ($F = m_t a$) und der Masse als Maß dafür, wie stark ein Objekt an der gravitativen Wechselwirkung teilnimmt (schwere Masse m_g), die die auf das Objekt wirkende Schwerkraft bestimmt ($F = GMm_g/r^2$). Die schwere Masse spielt für die Gravitation dieselbe Rolle wie die Ladung für elektrische Kräfte. Die Beschleunigung, die ein Objekt erfährt, ist dann $a = (m_g/m_t)(GM/r^2)$. D.h. nur wenn das Verhältnis m_g/m_t für alle Körper denselben Wert hat, ist die Bewegung im Schwerfeld universell. Beginnend mit den Experimenten von Eötvös (ab ca. 1885) wird dies seitdem mit steigender Genauigkeit überprüft.

Verständnisaufgabe:

Aus der Werbebroschüre einer Kindertagesstätte:

„Ein Phänomen weckt die Neugier des Kindes. Zum Beispiel, dass eine Feder langsamer zu Boden fällt, als ein Bauklotz. Aufgabe der Erzieherinnen ist, dieses Phänomen aufzugreifen, es mit dem Kind spielerisch zu verfolgen und zu erkunden. Das bringt weiter als die schlichte Erklärung, dass die Feder leichter ist.“

Stimmt ihr zu, dass „die Feder ist leichter“ eine Erklärung für das beschriebene Phänomen ist? Begründet eure Meinung.

Teil 2: Schwerkraft messen

Ziel des zweiten Teils ist ein Verständnis für Schwerelosigkeit: Schwerelos sein bedeutet im freien Fall zu sein.

Für die Versuche zu Schwerkraft und Schwerelosigkeit bauen sich die Lernenden zunächst ein einfaches Gravimeter, ein Schwerkraftmessgerät (Kasten 2a). Das Gravimeter besteht aus zwei Magneten auf einem Stab, die so orientiert sind, dass sie einander abstoßen. In mehreren Schritten (Kasten 2a, Aufgaben 1 bis 4) wird zunächst das Messprinzip des Gravimeters geklärt: Man hält den Stab senkrecht; der obere Magnet nimmt dann eine Position ein, die vom Gleichgewicht zwischen Schwerkraft (nach unten) und magnetischer Kraft (nach oben) bestimmt ist. Je geringer die Schwerkraft ist, desto weiter oben befindet sich der Magnet.

Anschließend wird mit dem Gravimeter experimentiert (Kasten 2b). Auf die Überlegung, dass der Magnet ganz oben sitzt, wenn die Schwerkraft null ist (Kasten 2b, Aufgabe 5) folgt der zentrale Versuch dieses Teils (Kasten 2b, Aufgabe 6): Man lässt das Gravimeter fallen und beobachtet die Anzeige während der Flugphase: Das Gravimeter zeigt Schwerkraft null an. Im Fall besteht also Schwerelosigkeit. Der abschließende Versuch (Kasten 2b, Aufgabe 7) zeigt, dass es nicht darauf ankommt, in welche Richtung sich das Gravimeter bewegt: Auch im Flug nach oben oder zur Seite zeigt es Schwerelosigkeit an. Alle diese Bewegungen sind freier Fall.

Als Fazit aus den Versuchen mit dem Gravimeter halten wir fest:

Fazit 2: Während einer Bewegung, die nur unter dem Einfluss der Schwerkraft erfolgt, besteht Schwerelosigkeit.

Freier Fall bedeutet Schwerelosigkeit.

Praktische Hinweise: Wir verwenden Neodym-Supermagnete mit Außendurchmesser 15 mm und Holzstäbchen (erhältlich als Bastelbedarf) mit 13 cm Länge (passend zur Magnetkraft). Der Stabdurchmesser ist ca. 1 mm kleiner als das Loch im Magneten.

Die Magnete sind spröde und brechen leicht: Nicht auf einen harten Fußboden fallen lassen, nicht zusammenschnappen lassen.

Erweiterungen und Vertiefungen

Alltagsbezug: Wir stellen gerne vor und nach Teil 2 die Fragen: *Habt ihr schon einmal Schwerelosigkeit erlebt? Kennt ihr jemanden (persönlich oder aus den Medien), der oder die Schwerelosigkeit erlebt hat? Was könntet ihr tun, um Schwerelosigkeit zu erleben?*

Nach Teil 2 sollte die Antwort lauten, dass man selbst Schwerelosigkeit erlebt hat, z.B. wenn man im Schwimmbad ins Wasser springt.

Im Gedankenexperiment Fazit 2 aus Fazit 1 folgern: Im Gedankenexperiment stellen wir uns eine Astronautin vor, die sich weit weg von allen Himmelskörpern befindet, so dass ein Schwerfeld an ihrem Ort praktisch nicht existiert. Die Astronautin hat einen Ball in der Hand. Wenn sie ihn loslässt, ohne ihm einen Schubs zu geben, verharrt der Ball an seinem Ort.

Ein anderer Astronaut befindet sich nahe der Erde im freien Fall. Er hat ebenfalls einen Ball und lässt ihn ohne Anschubsen los. Ball und Astronaut haben im Moment des Loslassens dieselbe Geschwindigkeit. Sie führen im Schwerfeld dieselbe universelle Fallbewegung aus. Der Ball bleibt deshalb relativ zum Astronauten am selben Ort. Der Astronaut stellt Schwerelosigkeit fest.

D.h.: *Freier Fall bedeutet Schwerelosigkeit lässt sich folgern aus Die Bewegung im Schwerfeld ist universell.*

Kasten 2a: Die Schwerkraft messen – Das Gravimeter

Materialien

Je Messgerät benötigt man zwei ringförmige Supermagnete, ein Holzstäbchen und zwei durchbohrte Holzkugeln. *Sicherheitshinweis:* Die Supermagnete sind stark. Magnete nicht zusammenschnappen lassen: Man kann sich dabei die Finger klemmen!



Aufbau: Zwei Ringmagnete werden auf einen Stab geschoben und mit Kugeln gesichert. Wichtig: Die Magnete müssen einander abstoßen!



Aufgaben

1. Haltet das Gravimeter waagrecht (Bild (b)). Erklärt, warum die Magnete die Positionen an den beiden Enden einnehmen.

Die abstoßende magnetische Kraft drückt die Magnete auseinander, sie liegen deshalb so weit voneinander entfernt wie möglich.

2. Haltet das Gravimeter senkrecht (Bild (c)). Beschreibt und erklärt die Positionen der beiden Magnete.

Der untere Magnet liegt auf der unteren Holzkugel auf. Auf ihn wirken die Schwerkraft und die magnetische Abstoßung durch den anderen Magneten, beide Kräfte weisen nach unten. Der obere Magnet nimmt eine mittlere Höhe ein. Auf ihn wirken die Schwerkraft nach unten und die magnetische Abstoßung durch den anderen Magneten nach oben. Die Position stellt sich so ein, dass Kräftegleichgewicht herrscht.

3. Eine Astronautin auf dem Mond hält das Gravimeter senkrecht. Die Schwerebeschleunigung auf dem Mond beträgt etwa ein Sechstel der Schwerebeschleunigung auf der Erde.

Formuliert eine Vermutung, wie sich die Positionen der Magnete auf dem Mond und auf der Erde unterscheiden. Begründet eure Vermutung.

Auf dem Mond ist die Schwerkraft geringer als auf der Erde. Der obere Magnet nimmt deshalb eine höhere Lage ein als in Bild (c). Der untere Magnet liegt auch hier ganz unten.

4. Warum kann man mit dem Gravimeter die Schwerkraft messen? Formuliert das Messprinzip.

Wenn man das Gravimeter senkrecht hält, ist die Position des oberen Magneten durch das Kräftegleichgewicht zwischen Schwerkraft und magnetischer Kraft bestimmt. Je größer die Schwerkraft ist, desto weiter unten liegt der Magnet.



Kasten 2b: Die Schwerkraft messen – Experimente mit dem Gravimeter

Aufgaben (Fortsetzung)

5. Wie zeigt das Gravimeter Schwerkraft null an? Begründet eure Aussage.
Bei Schwerkraft null liegen die beiden Magnete ganz außen an den beiden Holzkugeln an. Denn es wirkt dann nur die magnetische Abstoßung und die Magnete liegen so weit voneinander entfernt wie möglich.
6. Legt ein Kissen vor euch auf den Boden und lasst das Gravimeter aus Schulterhöhe auf das Kissen fallen. Das Gravimeter soll dabei senkrecht sein.
Welche Schwerkraft zeigt das Gravimeter an, während es fällt?
Das Gravimeter zeigt Schwerkraft null an, während es fällt.
7. Untersucht welche Schwerkraft das Gravimeter bei den folgenden Bewegungen anzeigt; stellt immer zuerst eine Vermutung auf.
 - a) Haltet das Gravimeter senkrecht und werft es senkrecht nach oben. Was zeigt es bei der Aufwärtsbewegung an, was am höchsten Punkt, was bei der Abwärtsbewegung?
Das Gravimeter zeigt in allen Phasen der Bewegung Schwerkraft null an.
 - b) Haltet das Gravimeter senkrecht und werft es jemandem zu. Ein Abstand von ungefähr zwei Metern ist günstig. Das Gravimeter soll im Flug senkrecht bleiben. Was zeigt es in den verschiedenen Phasen der Bewegung jeweils an?
Das Gravimeter zeigt in allen Phasen der Bewegung Schwerkraft null an.

Ein **Fallturm** ermöglicht Experimente in Schwerelosigkeit. Im Fallturm der Uni Bremen beispielsweise durchfällt die Versuchskapsel eine 120 m hohe, fast vollständig luftleere Röhre; Während des knapp fünfsekündigen Falls besteht in der Kapsel Schwerelosigkeit ([1], vgl. Kasten 2b, Aufgabe 6).

Der Bremer Fallturm besitzt ein unterirdisches Katapult. Damit kann die Kapsel auch von unten gestartet werden. Die Kapsel wird mit dem Katapult nach oben geschleudert, fliegt bis knapp unter die Turmspitze und fällt dann wieder zurück. Während des gesamten Fluges besteht Schwerelosigkeit in der Kapsel (vgl. Kasten 2b, Aufgabe 7a), dadurch verlängert sich die Dauer der Schwerelosigkeitsphase auf 9,3 Sekunden.

Parabelflüge erlauben Experimente und Astronautentraining in Schwerelosigkeit. Ein Parabelflug ist ein Flugmanöver, bei dem das Flugzeug erst in einem Steigflug beschleunigt wird und dann nach Drosselung der Triebwerke einer Wurfparabel folgt. Schließlich wird es im Sturzflug wieder abgefangen. In der Phase der Wurfparabel, die typischerweise 20 Sekunden dauert, besteht Schwerelosigkeit im Flugzeug ([2], vgl. Kasten 2b, Aufgabe 7b).

Schwerelosigkeit auf der **Internationalen Raumstation ISS**: Vergleicht man die Schwerebeschleunigung $a = GM/r^2$ (r die Entfernung zum Erdmittelpunkt) auf dem Erdboden (Erdradius $r_E = 6400$ km) mit der Schwerebeschleunigung am Ort der ISS in 400 km Höhe ($r_{ISS} = 6800$ km), erhält man $a_{ISS}/a_E = r_E^2/r_{ISS}^2 = 0,89$, d.h. am Ort der ISS ist die Schwerebeschleunigung der Erde etwa zehn Prozent kleiner als am Erdboden. Warum erfahren die Astronauten in der ISS Schwerelosigkeit? Es liegt an der Bewegung der ISS. Auf die ISS wirkt nur die Schwerkraft der Erde, keine nicht-gravitativen Kräfte. Die ISS befindet sich deshalb im freien Fall (um die Erde herum) und freier Fall bedeutet Schwerelosigkeit.

Teil 3: Schwerfeld oder kein Schwerfeld? - das newtonsche Äquivalenzprinzip

Das Lernziel des dritten Teils ist das newtonsche Äquivalenzprinzip der Mechanik in der Formulierung: Mechanische Experimente verlaufen im Schwerfeld genauso wie in einem beschleunigten Bezugssystem (ohne Schwerfeld).

Dazu führen die Schülerinnen und Schüler ein Modellexperiment durch, das ein Gedankenexperiment auf anschauliche Weise wiedergibt. Diese Aufgabe haben wir in eine kleine Geschichte eingebettet, die es ermöglicht, die Fragestellung konkreter zu formulieren, so dass sie eindrücklicher und gleichzeitig leichter verständlich wird.

Es wird die Frage aufgeworfen, wie man im Inneren eines abgeschlossenen Raums unterscheiden kann, ob man in einem Schwerfeld ruht oder sich ohne Schwerfeld beschleunigt bewegt. Vorgeschlagen wird ein Fallexperiment: Im Schwerfeld fällt ein Ball nach Loslassen beschleunigt zu Boden. Im Modellexperiment wird untersucht, welche Bewegung der Ball ausführt, wenn er in einer beschleunigten Rakete (ohne Schwerfeld) losgelassen wird (Kasten 3a).

Gearbeitet wird mit zwei Bildern, die entweder ausgedruckt oder in einer interaktiven Simulation verwendet werden (Druckvorlagen und Simulation sind online verfügbar unter [3]). Ein Bild stellt die Rakete dar (Ausdruck auf Folie), das andere ein äußeres Bezugssystem (Inertialsystem), in dem sich die Rakete beschleunigt bewegt (Ausdruck auf Papier). Das äußere Bezugssystem ist für das Experiment passend gewählt: In dem Augenblick, in dem der Ball losgelassen wird, ist es das Ruhesystem der Rakete. Zunächst wird die Bewegung des Balls im äußeren System beschrieben (Kasten 3a, Aufgaben 1 und 2): Der Ball bleibt in Ruhe. Diese Bewegung wird dann zeichnerisch für mehrere Zeitpunkte in das beschleunigte System übertragen (Kasten 3a, Aufgabe 3, Lösung in Kasten 3b): Der Ball nähert sich beschleunigt dem Boden der Rakete. Mit dem Fallexperiment kann man also nicht nachweisen oder widerlegen, dass man sich im Schwerfeld der Erde befindet.

Als Fazit aus dem Modellexperiment zum Äquivalenzprinzip halten wir fest:

Fazit 3: In der beschleunigten Rakete verläuft das untersuchte Fallexperiment genauso wie im Schwerfeld. Allgemein gilt:

Beliebige mechanische Experimente verlaufen in der beschleunigten Rakete genauso wie im Schwerfeld (newtonsches Äquivalenzprinzip).

Vertiefung

Zum **Gültigkeitsbereich des Äquivalenzprinzips**: Wir stellen uns das Bondsche Fallexperiment mit zwei Bällen vor. Sie werden gleichzeitig losgelassen, einer oben in der Rakete, der zweite weiter unten. In der beschleunigten Rakete nähern sich beide mit derselben Beschleunigung (der Raketenbeschleunigung) dem Boden. Stellen wir uns weiter vor, wir hätten eine extrem lange Rakete. Im Schwerfeld wäre die Spitze viel weiter von der Erde weg als der Boden. Da das Schwerfeld der Erde nach oben geringer wird, wäre die Schwerebeschleunigung für den oberen Ball geringer als für den unteren. In der Rakete würde eine Relativbeschleunigung zwischen den Bällen beobachtet. Aus dieser Beobachtung könnte Bond tatsächlich folgern, dass sich die Rakete im Schwerfeld der Erde befindet.

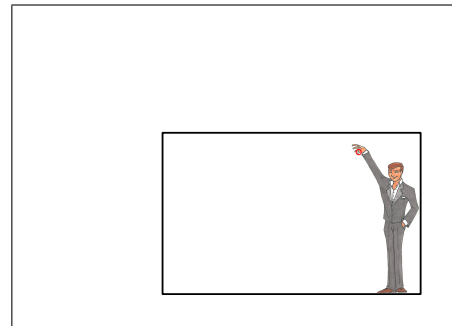
Das Äquivalenzprinzip gilt also lokal: Wenn die Rakete so klein ist, dass das Schwerfeld überall in der Rakete gleich ist (im Rahmen der Messgenauigkeit des betrachteten Experiments), dann ist die Rakete im Schwerfeld von der beschleunigten Rakete nicht unterscheidbar.

Kasten 3a: Schwerfeld oder kein Schwerfeld? – Modellexperiment „James Bond in der Rakete“

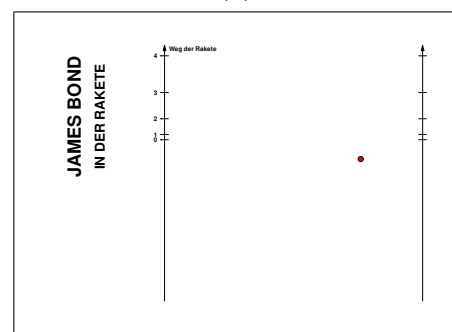
Materialien

Interaktive Simulation [3] oder Ausdruck der Vorlage „Rakete“ (Bild (a)) auf Folie, Ausdruck der Vorlage „Bewegung der Rakete“ (Bild (b)) auf Papier, Folienstift (nicht permanent)

Beschleunigte Bewegung der Rakete: Die Beschleunigung beträgt $1 g$ ($9,8 \text{ m/s}^2$), Striche markieren die Positionen der Kabinendecke nach Zeitschritten von jeweils $0,13$ Sekunden.



(a)



(b)

Rahmengeschichte

James Bond wurde von einem seiner fiesen Widersacher, der geheime Codes von ihm erpressen will, gefangen genommen und in einer Rakete eingesperrt. Eine Übertragung eröffnet ihm, dass er tief im All ausgesetzt wurde und seine Rakete mit $g = 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ immer weiter von der Erde weg beschleunigt wird. Er solle einfach die geheimen Codes nennen und sein Trip in die Tiefen des Alls hätte ein Ende. Die Rakete hat keine Fenster, Bond nur einen Ball bei sich. Bond: „Nach dem Loslassen fiel mein Ball mit g beschleunigt zu Boden, ich vermute, ich stehe in Wirklichkeit auf der Erde.“ Hat Bond recht?

Aufgaben

Überprüft, wie sich der Ball in einer mit g beschleunigten Rakete verhalten würde.

1. Vorbereitung: Ordnet die Rakete so auf der Vorlage „Bewegung der Rakete“ an, dass Bond den Ball in der Hand hält. Die Decke von Bonds Kabine liegt dann auf Position 0. Zeichnet den Ball in der Rakete ein. Dies ist der Augenblick, in dem Bond den Ball loslässt.
2. Beschreibt die Bewegung des Balls aus Außensicht, d.h. aus der Sicht eines Astronauten in einer unbeschleunigten Rakete auf Position 0.

Der Ball ist nach dem Loslassen in Ruhe und bleibt in Ruhe.

3. Bestimmt die Bewegung des Balls aus der Sicht von Bond:
Beim Loslassen des Balls ist die Rakete in Position 0. Nach dem ersten Zeitschritt erreicht sie Position 1. Schiebt die Rakete dorthin und zeichnet den Ball in der Rakete ein. Führt dies fort für drei weitere Zeitschritte.

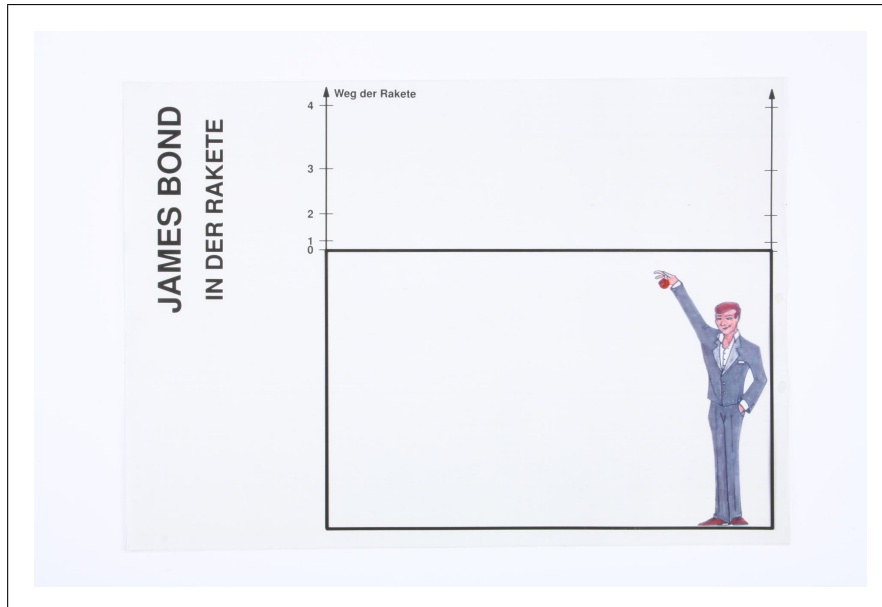
Wie beschreibt Bond die Bewegung des Balls in der Rakete?

Der Ball fällt beschleunigt zu Boden. (Lösung der Zeichenaufgabe in Kasten 3b.)

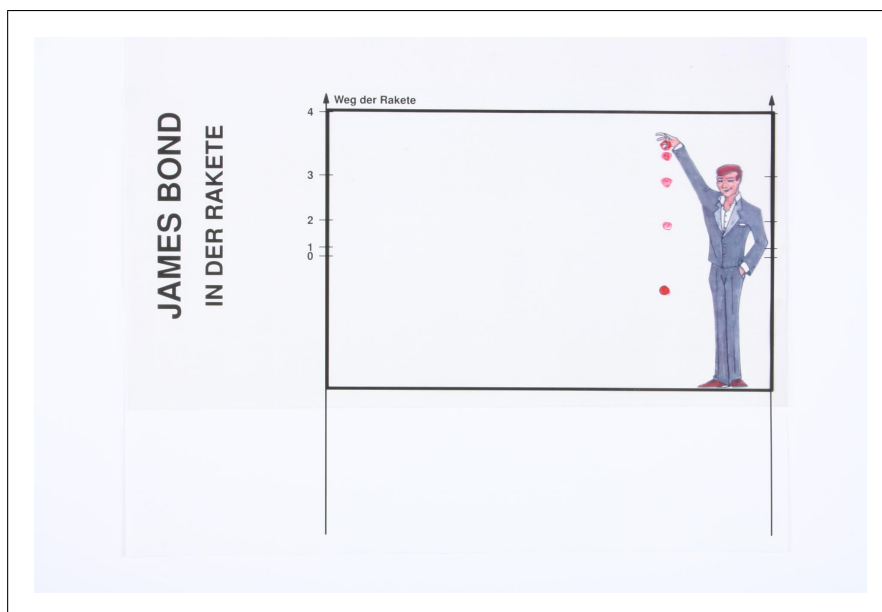
4. Ist Bonds Vermutung, dass er auf der Erde steht, richtig?
Bond kann nicht feststellen, ob er auf der Erde steht. Der Ball hat in der mit $9,8 \text{ m/s}^2$ beschleunigten Rakete dieselbe Bahnbewegung wie in einer Rakete, die auf der Erdoberfläche ruht.

Kasten 3b: Schwerefeld oder kein Schwerefeld? – Lösung der Zeichenaufgabe

Modellexperiment „James Bond in der Rakete“



(a)



(b)

(a) Start: Bond lässt den Ball los.

(b) Positionen des Balls beim Start und nach den Zeitschritten 1 bis 4.

Teil 4: Licht im Schwerfeld - das einsteinsche Äquivalenzprinzip

Der abschließende vierte Teil geht über die klassische Mechanik hinaus und bietet einen ersten Einblick in die Allgemeine Relativitätstheorie. Ausgangspunkt ist die einsteinsche Verallgemeinerung des Äquivalenzprinzips auf alle Bereiche der Physik:

Alle physikalischen Experimente verlaufen in der beschleunigten Rakete genauso wie im Schwerfeld (einsteinsches Äquivalenzprinzip).

D.h. nicht nur mit mechanischen Versuchen sind Schwerfeld und Beschleunigung ununterscheidbar, sondern überhaupt mit allen physikalischen Versuchen.

In Folgenden wird das Äquivalenzprinzip auf die Lichtausbreitung angewandt und es wird gezeigt, wie aus dem Äquivalenzprinzip zwingend folgt, dass es Lichtablenkung im Schwerfeld geben muss.

Die Schülerinnen und Schüler führen ein weiteres Modellexperiment durch, das ganz analog zu dem in Teil 3 bearbeitet wird (interaktive Simulation sowie Druckvorlagen online verfügbar unter [3]).

Diesmal geht es um die Ausbreitung von Licht. Die Lichtausbreitung wird am Beispiel eines Laserpulses untersucht (Kasten 4a). Die Bahn des Laserpulses wird zunächst im äußeren Bezugssystem, einem Inertialsystem, beschrieben (Kasten 4a, Aufgaben 1 und 2): Licht breitet sich geradlinig aus. Die Bahn wird dann im Raketensystem zeichnerisch konstruiert (Kasten 4a, Aufgabe 3, Lösung in Kasten 4b). Das Resultat: Relativ zur beschleunigten Rakete ist die Bahn des Laserpulses gekrümmt.

Anschließend erfolgt der Übertrag auf die Lichtausbreitung im Schwerfeld. Wenn die Bahn des Laserpulses in einer beschleunigten Rakete gekrümmt ist, dann muss gemäß dem Äquivalenzprinzip dasselbe gelten, wenn die Rakete im Schwerfeld ruht.

Als Fazit aus dem Modellexperiment zur Lichtausbreitung halten wir fest:

Fazit 4: Licht wird im Schwerfeld abgelenkt.

Anmerkungen: Dass die Rakete im Modellexperiment extrem beschleunigt wird und sehr schnell eine hohe Geschwindigkeit erreicht, ist nur dem einfacheren Zeichnen geschuldet. Für das Gedankenexperiment an sich genügen kleine Beschleunigungen und kleine Geschwindigkeiten. Der Himmelskörper mit der extremen Schwerebeschleunigung ist rein hypothetisch. Die höchste reale Schwerebeschleunigung haben Neutronensterne mit ca. 200 Milliarden g ($2 \cdot 10^{11} g$).

Vertiefung

Wer ist hier eigentlich beschleunigt? – klassische vs. relativistische Sichtweise.

Wir stellen uns zwei Raumschiffe vor, die sich beide in der Nähe der Erde befinden. Raumschiff A nimmt eine feste Position ein, hält also den Abstand zur Erdoberfläche konstant. Raumschiff B ist im freien Fall in Richtung Erdmittelpunkt. Welches der beiden Raumschiffe ist beschleunigt?

Die klassische Antwort: Raumschiff A ist in Ruhe, Raumschiff B bewegt sich beschleunigt auf die Erde zu. Die relativistische Antwort: Bei Raumschiff A laufen die Triebwerke. Sie erzeugen den Schub, der den Fall Richtung Erde verhindert. Die Astronauten spüren den Schub, er drückt sie in ihre Sitze. D.h. Raumschiff A wird (von den eigenen Triebwerken) beschleunigt.

In Raumschiff B erfahren die Astronauten Schwerelosigkeit. Alles spielt sich in Raumschiff B so ab, wie in einem dritten Raumschiff C, das sich mit ausgeschalteten Triebwerken weit draußen im All befindet, ohne

Kasten 4a: Licht im Schwerfeld – Modellexperiment „Laserpuls“

Materialien

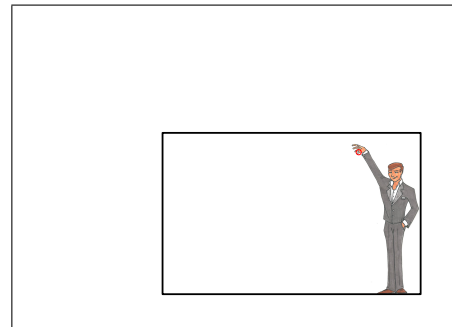
Interaktive Simulation [3] oder Ausdruck der Vorlage „Rakete“ (Bild (a), identisch mit der „Rakete“ aus Kasten 3a), auf Folie, Ausdruck der Vorlage „Bewegung der Rakete / Laserpuls“ (Bild (b)) auf Papier, Folienstift (nicht permanent).

Extrem beschleunigte Bewegung der Rakete mit 2,5 Billionen g ($2,5 \cdot 10^{15} g$); Striche markieren die Positionen der Kabinendecke nach Zeitschritten von jeweils 2,5 Nanosekunden.

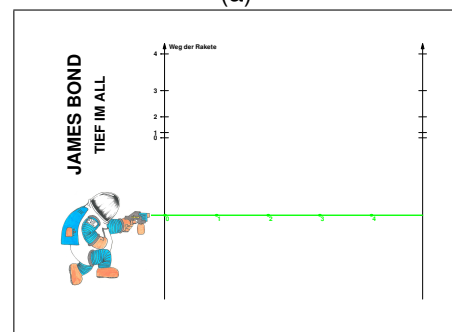
Rahmengeschichte

James Bond sitzt immer noch in der Rakete fest, weiß aber mittlerweile, dass er sich tatsächlich draußen im All befindet, da die Beschleunigung extrem angestiegen ist: Sie beträgt jetzt 2,5 Billionen g ($2,5 \cdot 10^{15} g$).

Bonds böser Widersacher will auf Nummer sicher gehen und schießt einen Laserpuls auf Bond ab. Der Laserpuls dringt an der linken Seite ein. Findet heraus, ob dies Bonds letztes Abenteuer ist.



(a)



(b)

Aufgaben

1. Vorbereitung: Ordnet die Rakete so auf der Vorlage „Bewegung der Rakete“ an, dass die Kabinendecke auf Position 0 liegt. Dies ist der Augenblick, in dem der Laserpuls in die Rakete eintritt.

2. Beschreibt die Bahn des Laserpulses aus Außersicht, d.h. aus der Sicht eines Astronauten in einer unbeschleunigten Rakete auf Position 0.

Gibt auch an, mit welcher Geschwindigkeit sich der Laserpuls bewegt.

Die Bahn ist eine Gerade. Der Laserpuls bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit (300.000 km/s).

3. Bestimmt die Bahn des Laserpulses aus der Sicht von Bond:

Zu Beginn ist der Laserpuls am Eintrittsort und die Rakete bei Position 0. Nach einem Zeitschritt hat die Rakete Position 1 erreicht und der Laserpuls den mit 1 markierten Punkt auf seiner Bahn. Geht wie in Aufg. 3 Zeitschritt für Zeitschritt vor und zeichnet jeweils den Laserpuls in die Rakete ein.

Wird Bond vom Laserpuls getroffen?

Nein, der Laserpuls trifft vor Bond auf den Boden auf. (Lösung der Zeichenaufgabe in Kasten 4b.)

4. Beschreibt die Bahn des Laserpulses aus der Sicht von Bond.

Die Bahn ist gekrümmt.

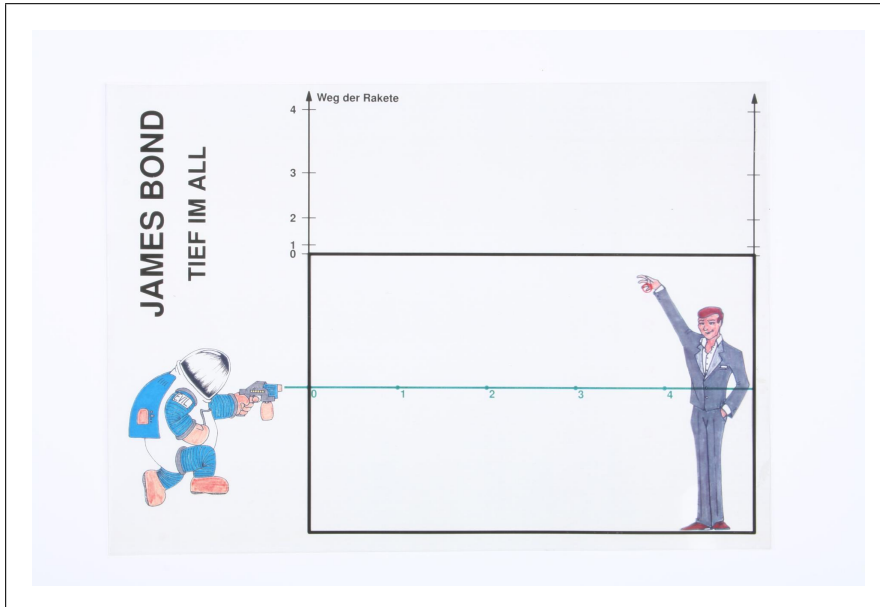
5. Bonds Rakete steht auf einem Himmelskörper mit einer Schwerebeschleunigung von 2,5 Billionen g ($2,5 \cdot 10^{15} g$). Wieder schießt sein böser Widersacher einen Laserpuls auf die Rakete ab. Er tritt an derselben Stelle und mit derselben Richtung ein.

Stellt eine Vermutung auf und begründet sie: Wird Bond diesmal vom Laserpuls getroffen?

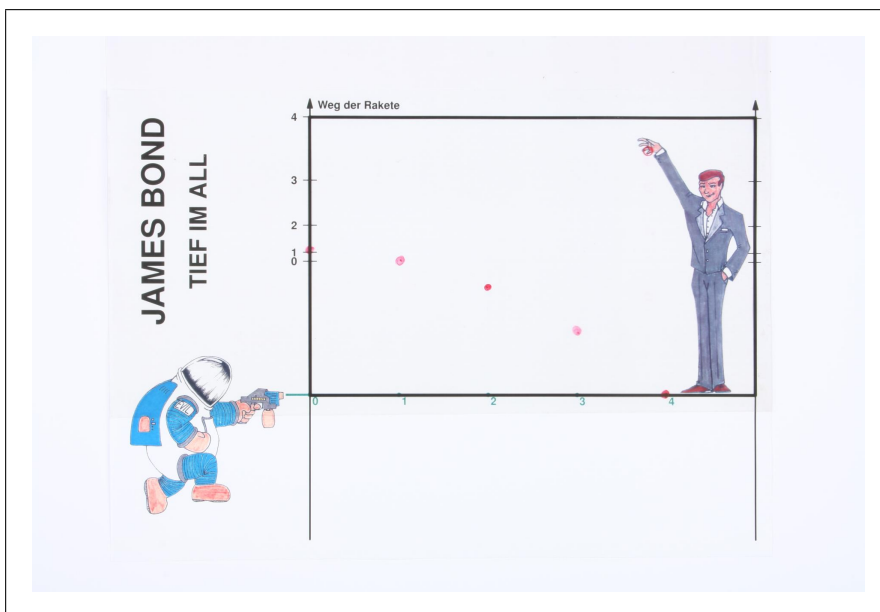
Bond wird nicht getroffen. Begründung: Die Schwerebeschleunigung ist genauso groß wie vorher die Beschleunigung der Rakete. Deshalb verläuft der Laserpuls in diesem Schwerfeld genauso wie vorher in der beschleunigten Rakete. Seine Bahn ist gekrümmt und er trifft vor Bond auf den Boden auf.

Kasten 4b: Licht im Schwerfeld – Lösung der Zeichenaufgabe

Modellexperiment „Laserpuls“



(a)



(b)

(a) Start: Der Laserpuls dringt an der linken Seite ein.

(b) Positionen des Laserpulses beim Start und nach den Zeitschritten 1 bis 4.

Schwerefeld. Das Raumschiff C wird man sicher unbeschleunigt nennen. Für die Astronauten ist, solange sie nicht aus dem Fenster schauen, B ununterscheidbar von C. Deshalb: B ist unbeschleunigt.

Anmerkung

An Entwicklung und Tests der vorgestellten Aktivitäten haben Studierende der Universität Hildesheim mitgewirkt, in besonderem Maße Sven Behrens, Mona Friedrich und Alice Schmitz.

Literatur

[1] Zum Fallturm der Universität Bremen:

<https://www.zarm.uni-bremen.de/de/fallturm/allgemeine-informationen.html>

[2] Zu Parabelflügen:

https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Parabolic_flights
und <https://www.dlr.de/content/de/artikel/missionen-projekte/parabelflug/parabelflug-programm.html>

[3] Kraus, U., Zahn, C., Unterrichtsmaterialien zu diesem Beitrag,

<https://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/equi22>