

Springen wie auf dem Mond – anwendungsorientierte Mechanik

von Matthias Borchardt, Bonn

Illustrationen von Dr. Wolfgang Zettlmeier



Astronauten sollen auf der Erde trainieren, wie man sich auf der Mond- oder Marsoberfläche unter stark veränderten Schwerkraftbedingungen bewegt. In den 1960er-Jahren entwickelte die NASA zu diesem Zweck eine Mechanik, die es erlaubt, die Sprünge der Astronauten zu simulieren. Ihre Schüler diskutieren drei Vorschläge für eine solche Mechanik unter physikalischen Gesichtspunkten. Sie berechnen die relevanten Größen und beurteilen die Modelle. Eine Computersimulation veranschaulicht darüber hinaus die Dynamik dieser Konstruktionen.

Impressum

RAABE UNTERRICHTS-MATERIALIEN Physik

6/2019

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Es ist gemäß § 60b UrhG hergestellt und ausschließlich zur Veranschaulichung des Unterrichts und der Lehre an Bildungseinrichtungen bestimmt. Die Dr. Josef Raabe Verlags-GmbH erteilt Ihnen für das Werk das einfache, nicht übertragbare Recht zur Nutzung für den persönlichen Gebrauch gemäß vorgenannter Zweckbestimmung. Unter Einhaltung der Nutzungsbedingungen sind Sie berechtigt, das Werk zum persönlichen Gebrauch gemäß vorgenannter Zweckbestimmung in Klassensatzstärke zu vervielfältigen. Jede darüber hinausgehende Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Hinweis zu §§ 60a, 60b UrhG: Das Werk oder Teile hiervon dürfen nicht ohne eine solche Einwilligung an Schulen oder in Unterrichts- und Lehrmedien (§ 60b Abs. 3 UrhG) vervielfältigt, insbesondere kopiert oder eingescannt, verbreitet oder in ein Netzwerk eingestellt oder sonst öffentlich zugänglich gemacht oder wiedergegeben werden. Dies gilt auch für Intra-nets von Schulen und sonstiger Bildungseinrichtungen. Die Aufführung abgedruckter musikalischer Werke ist ggf. GEMA-meldenpflichtig.

Für jedes Material wurden Fremdrechte recherchiert und ggf. angefragt.

In unseren Beiträgen sind wir bemüht, die für Experimente nötigen Substanzen mit den entsprechenden Gefahrenhinweisen zu kennzeichnen. Dies ist ein zusätzlicher Service. Dennoch ist jeder Experimentator selbst angehalten, sich vor der Durchführung der Experimente genauestens über das Gefährdungspotenzial der verwendeten Stoffe zu informieren, die nötigen Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen sowie alles ordnungsgemäß zu entsorgen. Es gelten die Vorschriften der Gefahrstoffverordnung sowie die Dienstvorschriften der Schulbehörde.

Dr. Josef Raabe Verlags-GmbH
Ein Unternehmen der Klett Gruppe
Rotebühlstraße 77
70178 Stuttgart
Telefon +49 711 62900-0
Fax +49 711 62900-60
meinRAABE@raabe.de
www.raabe.de

Redaktion: Anna-Greta Wittnebel
Satz: Röser MEDIA GmbH & Co. KG, Karlsruhe
Illustrationen: Dr. Wolfgang Zettlmeier, Barbing
Bildnachweis Titel: NASA
Korrektorat: Mona Hitznauer, Regensburg; Stefan Völker, Jena; Johanna Stotz, Wyhl a. K.
Druck: SDK Systemdruck Köln GmbH & Co. KG, Maarweg 233, 50825 Köln
Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

Springen wie auf dem Mond – anwendungsorientierte Mechanik

Mittelstufe (grundlegend)

von Matthias Borchardt, Bonn

Illustrationen von Dr. Wolfgang Zettlmeier

Überblick und Hinweise	1
M 1 Welcher von den dreien?	10
M 2 Sprünge auf Erde und Mond – ein Vergleich	12
M 3 Der Schraubenfeder-Simulator	13
M 4 Der Gegengewicht-Simulator	15
M 5 Der Seil-Simulator	16
M 6 Der Seil Simulator – reale Aufnahmen der NASA	17
M 7 Computersprünge	18
M 8 Tippkarten	19
Erläuterungen und Lösungen	21

© RAABE 2019

Die Schüler wiederholen:

In 5-6 Unterrichtseinheiten grundlegende Inhalte der Mechanik im Kontext: Beschleunigung und Trägheit, Bewegungsgesetze, senkrechter Wurf, Hook'sches Gesetz, Atwood'sche Fallmaschine und Kräftezerlegung am Pendel.

Überblick:

Legende der Abkürzungen:

SV: Schülerversuch

LV: Lehrerversuch

Fo: Folie

AB: Arbeitsblatt / Informationsblatt

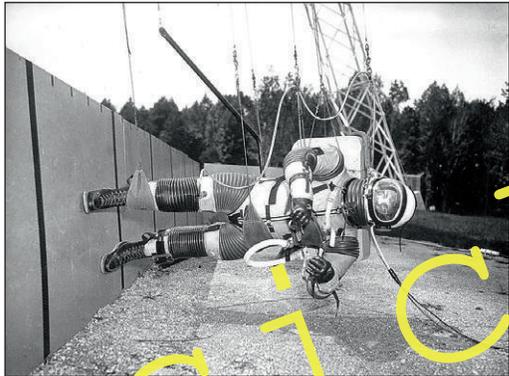
Thema	Material	Methode
Welcher von den dreien?	M1	AB
Sprünge auf Erde und Mond – ein Vergleich	M2	AB
Der Schraubenfeder-Simulator	M3	AB
Der Gegengewicht-Simulator	M4	AB
Der Seil-Simulator	M5	AB
Der Seil-Simulator – reale Aufnahmen der NASA	M6	Fo
Computersprünge	M7	AB
Tipplatten	M8	

Zusatz

Mondsprung-Simulation (exe-Datei)

Springen wie auf dem Mond – anwendungsorientierte Mechanik

Astronauten sollen auf der Erde trainieren, wie man sich auf der Mond- oder Marsoberfläche unter stark veränderten Schwerkraftbedingungen bewegt. In den 1960er-Jahren entwickelte die NASA zu diesem Zweck eine Mechanik, die es erlaubt, die Sprünge der Astronauten zu simulieren. Ihre Schüler diskutieren drei Vorschläge für eine solche Mechanik unter physikalischen Gesichtspunkten. Sie berechnen die relevanten Größen und beurteilen die Modelle. Eine Computersimulation veranschaulicht darüber hinaus die Dynamik dieser Konstruktionen.



© NASA

Wie hilft man Astronauten auf die Sprünge?

© RAABE 2019

Fachliche und didaktisch-methodische Hinweise

Fachliche Hintergrundinformation

Astronautentraining

Wie bringt man Astronauten bei, sich unter veränderten Schwerkraftverhältnissen, wie beispielsweise auf dem Mond oder auf dem Mars, richtig zu bewegen? Insbesondere im Vorfeld der Mondlandungen in den 1960-er Jahren war dies eine wichtige Frage, die im Rahmen der Astronautenausbildung intensiv diskutiert wurde. Hinsichtlich einer be-
manneten Marsmission hat die Thematik aber auch heute noch eine gewisse Relevanz.

Es gibt keine Möglichkeit, die Schwerkraft der Erde an einem bestimmten Ort um $5/6$ zu reduzieren. Daher ist man auf mechanische, vielleicht auch elektronisch-pneumatische Systeme angewiesen, um mondtypische Bewegungsabläufe im Schwerfeld der Erde nachstellen zu können. Wenn wir beispielsweise einen senkrecht nach oben gerichteten Sprung eines Astronauten auf dem Mond genauer betrachten, wird deutlich, wo die Probleme liegen: Während der Flugphase dürfen sich die beschleunigende Kraft von $1/6$ der Erdanziehungskraft und die beschleunigte Masse nicht verändern. Die Umsetzung dieser Forderungen ist nicht so einfach, wie es auf den ersten Blick erscheinen mag.

Ideen

Eine naheliegende Idee ist, das Gewicht des Astronauten dadurch zu reduzieren, dass man ihn an eine Schraubenfeder hängt. Sie würde so eingestellt, dass der Raumfahrer nur noch $1/6$ seines Gewichtes auf seinen Füßen spürt. Springt die Person allerdings nach oben, wird der Bewegungsablauf nicht so wie auf dem Mond sein. Der Grund liegt darin, dass sich die kompensierende Kraft der Feder beim Aufstieg des Astronauten ändert, weil ja die Feder verkürzt wird. Dem **Hooke'schen Gesetz** zufolge nimmt die Kraft der Feder mit zunehmendem Aufstieg ab, der Astronaut spürt daher eine größer werdende Kraft Richtung Erdboden, sodass Flughöhe und Flugdauer kleiner als auf dem Mond ausfallen werden.

Das Problem der nichtkonstanten Kraft könnte man durch ein Gegengewicht und eine Umlenkrolle in den Griff bekommen. Das Gegengewicht müsste $5/6$ der Masse des Astronauten haben, sodass dieser auch während der Flugphase eine beschleunigende Kraft von $1/6$ der Erdanziehungskraft spüren würde. Dieser Bewegungssimulator stellt jedoch den Bewegungsablauf auf der Mondoberfläche noch schlechter nach als der vorherige mit der Schraubenfeder. Das Problem liegt in der Masse, die hier bewegt werden muss, denn diese ist fast doppelt so groß wie die des Astronauten, was zu einem extrem trägen Bewegungsablauf führt. Die Situation entspricht der einer „**Atwood'schen Fallmaschine**“.

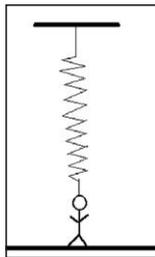


Abb. 1, Grafik: Dr. W. Zettlmeier

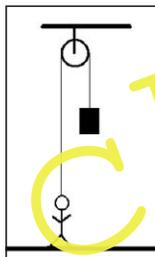


Abb. 2, Grafik: Dr. W. Zettlmeier

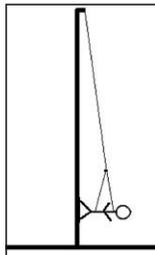


Abb. 3, Grafik: Dr. W. Zettlmeier

Mediathek

Simulationsprogramm:

- ▶ www.mabo-physik.de/mondsimulator.html

Ausgewählte Bilder zu den Apollo-Missionen:

- ▶ www.apollomissionphotos.com/index_apollo_saturn3.html

Informationen und Bilder zum Thema „reduced gravity simulator“:

- ▶ www.wired.com/wiredscience/2009/07/nasaarchive_gravitysimulator/

Videos und Filme:

Sehr informative kleine Filme aus den Archiven der NASA zeigen, wie typische Seil-Simulatoren zur Reduzierung der Schwerkraft in den 1960-er Jahren funktionierten.

- ▶ www.youtube.com/watch?v=U1CUhz0U-Gc

Informationen über ein modernes computergesteuertes System zur Simulation von reduzierter Schwerkraft:

- ▶ <http://www.nbcqyarea.com/news/tech/Moon-walk-with-NASAs-ARGOS-Reduced-Gravity-Simulator-133294565.html>

Ein interessanter Videoclip über einen Simulator zum Laufen auf dem Mars:

- ▶ <http://vimeo.com/14698974>



M 1 Welcher von den dreien?

Auf dem Mond beträgt die Schwerkraft nur $1/6$ des Wertes auf der Erde. Für die Ausbildung und Vorbereitung der amerikanischen Astronauten, die Ende der 1960-er Jahre an den Mondlandungen teilnehmen sollten, war es daher sehr wichtig, Gehen, Laufen und Springen unter solch veränderten Schwerkraftverhältnissen zu trainieren. Leider lässt sich auf der Erde die Schwerkraft nicht einfach um $5/6$ reduzieren. Daher wurde über mechanische Konstruktionen nachgedacht, die den Astronauten auf der Erde ein Gefühl dafür geben sollten, wie man sich auf der Mondoberfläche bewegt.

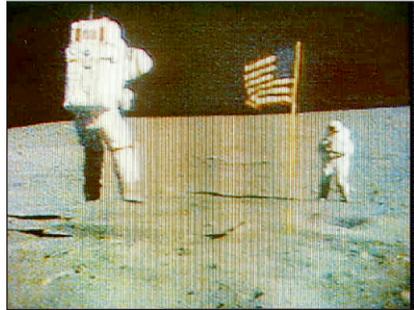


Abb. 5, © NASA

Im Weiteren werden Ihnen drei Vorschläge für die Umsetzung solcher Simulatoren vorgestellt. Diese mechanischen Hilfsmittel sollen vor allem **das Springen** auf dem Mond nachstellen können.

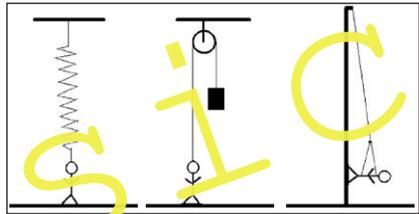


Abb. 6, Grafik: Dr. W. Zettlmeier

Vorschlag 1 Der Schraubenfeder-Simulator:

Dieser Simulator verwendet eine lange Schraubenfeder, die so eingestellt (gedehnt) werden muss, dass durch ihre Federkraft $5/6$ des Astronautengewichts kompensiert wird.

Vorschlag 2 Der Gegengewicht-Simulator:

Hier soll ein Gegengewicht die Gewichtskraft des Astronauten um $5/6$ reduzieren, damit er nur noch $1/6$ seines Körpergewichts auf seinen Füßen spürt.

Vorschlag 3 Der Seil-Simulator:

Bei diesem Simulator hängt der Astronaut waagrecht an einem Seil. Die Länge des Seils und der Winkel zur Wand müssen so eingestellt werden, dass die Füße des Astronauten mit nur $1/6$ seines Gewichts belastet werden. Drückt er sich von der Wand („Boden“) ab, bewegt er sich am Seil hängend nach rechts und entfernt sich somit vom „Boden“.

M 2 Sprünge auf Erde und Mond – ein Vergleich

Ein Astronaut geht leicht in die Knie und springt dann senkrecht nach oben. Im Weiteren untersuchen Sie, wie sich dieser Sprung auf der Erde von dem auf dem Mond unterscheidet.

1. Beim Training auf der Erde schafft es der Astronaut mit Raumanzug, genau 20 cm hoch zu springen.
 - a) Bestätigen Sie rechnerisch, dass die dazu notwendige Absprunggeschwindigkeit 1,981 m/s betragen muss.
 - b) Berechnen Sie die Dauer des Sprungs.



Abb. 7, © NASA

2. Wir nehmen an, dass der Astronaut auf dem Mond mit der gleichen Geschwindigkeit wie in Aufgabe 1a abspringt.
 - a) Berechnen Sie die Sprunghöhe des Astronauten auf dem Mond.
 - b) Berechnen Sie die Dauer des Sprungs auf dem Mond.

3. Wenn Sie richtig gerechnet haben, sollten Sie eine Sprunghöhe auf dem Mond von 1,2 m ermittelt haben. Da der Astronaut trotz seines Raumanzugs sehr wenig wiegt, sollte man annehmen, dass er sich sogar noch stärker als auf der Erde vom Boden abdrücken kann, womit eine noch größere Sprunghöhe erzielbar wäre. Auf alten Fernsehaufzeichnungen der Mondlandungen konnten aber lediglich Sprunghöhen von 40–60 cm ermittelt werden. Für eine Gruppe von Leuten, die behaupten, die Amerikaner seien gar nicht auf dem Mond gewesen, sondern hätten die Mondlandungen in einem Studio trickreich arrangiert und dort gefilmt, gilt diese „zu kleine Sprunghöhe“ oft als weitere Bestätigung ihrer Theorie. Versuchen Sie, dieses Argument zu entkräften.



Abb. 8, © NASA

M 3 Der Schraubenfeder-Simulator

Die Filmleiste demonstriert, wie dieser Simulator eingestellt werden soll.

Zunächst wird der Astronaut an eine lange Schraubenfeder gehängt, die sich so lange dehnt, bis sie das Gewicht der Person kompensiert hat. Nachdem sich alle Schwingungen beruhigt haben, wird die obere Aufhängung der Feder langsam nach unten gefahren, bis der Astronaut gerade den Boden berührt, ohne Gewicht auf seinen Füßen zu haben (Szene 1). Nun wird die Aufhängung noch weiter nach unten geschoben, bis auf den Füßen $1/6$ des Gewichtes lastet (Szene 2).

Die dritte Szene zeigt den Astronauten in seiner Bewegung nach oben, nachdem er sich vom Boden abgedrückt hat.

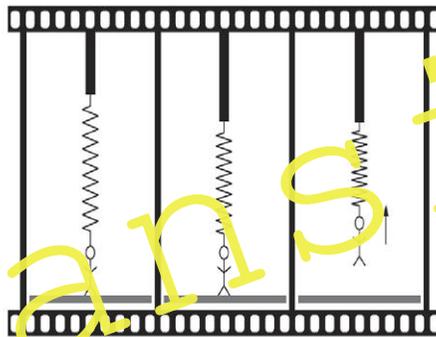


Abb. 9, Grafik: Dr. W. Zettlmeier

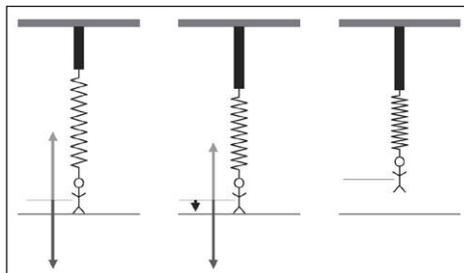


Abb. 10, Grafik: Dr. W. Zettlmeier

M 4 Der Gegengewicht-Simulator

Wenn der Astronaut auf dem Mond senkrecht nach oben springt, wirkt auch während der Flugphase stets die gleiche Anziehungskraft von $1/6 F_g$ auf ihn ein. Dies war bei dem Schraubenfeder-Simulator nicht der Fall, wie Sie auf Material **M 3** gelernt haben, denn durch das Verkürzen der Feder änderte sich – dem Hooke'schen Gesetz entsprechend – ständig die Kraft auf den angehängten Astronauten. Diesen Nachteil hat der Simulator, der in dieser Station untersucht werden soll, nicht, denn das Gegengewicht wirkt auch während der Flugphase immer mit der gleichen ausgleichenden Kraft.

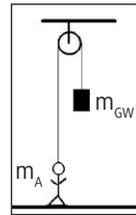


Abb. 11, Grafik:
Dr. W. Zettlmeier

Aufgaben

- Wir gehen weiterhin davon aus, dass die Masse des Astronauten mit seinem Raumanzug 120 kg beträgt. Überlegen Sie, welche Masse das Gegengewicht haben muss.
- Obwohl die Beschleunigung während des Sprungs aufgrund des Gegengewichtes stets $1/6 g$ beträgt, funktioniert dieser Simulator noch schlechter als der aus Material **M 3**. Der Bewegungsablauf ist nämlich deutlich **langsamer** (träger) und die Sprunghöhe **wesentlich höher** als auf dem Mond. Dies hängt mit der zu beschleunigenden Gesamtmasse zusammen.

Die genauen Zusammenhänge sollen Sie im Weiteren erklären:

Begründen Sie: Wenn der Astronaut den Boden verlassen hat, ist die beschleunigende Kraft für die weitere Bewegung: $F_a = (m_A - m_{GW}) \cdot g$,

wobei m_A die Masse des Astronauten und m_{GW} die des Gegengewichts ist.

- c) Erklären Sie weiter: Die Masse, die durch diese Kraft beschleunigt wird, ist

$$m_A + m_{GW}.$$

- d) Begründen Sie: Daraus ergibt sich der Ansatz

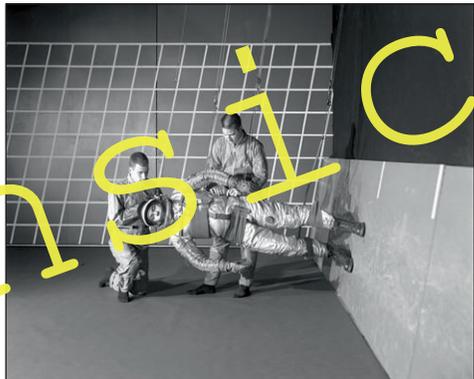
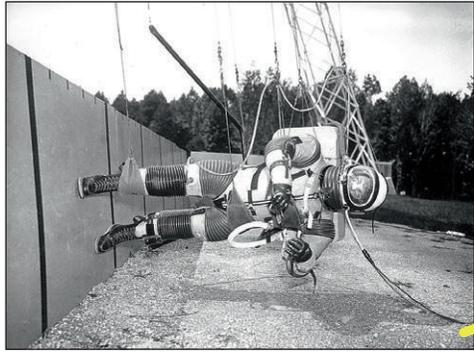
$$(m_A - m_{GW}) \cdot g = (m_A + m_{GW}) \cdot a \text{ und weiter eine Formel für die Beschleunigung dieser Bewegung: } a = \frac{(m_A - m_{GW})}{(m_A + m_{GW})} \cdot g.$$

- Berechnen Sie die Beschleunigung a und – mithilfe der Formeln aus Material **M 2** – die Sprunghöhe und die Dauer des Sprungs unter der Annahme, dass die Absprunggeschwindigkeit auch hier 1,981 m/s beträgt. Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit den Werten aus Material **M 2**.

Anmerkung: Die oben beschriebene Anordnung wird in der klassischen Mechanik auch als „Atwood'sche Fallmaschine“ bezeichnet.

M 6 Der Seil-Simulator – reale Aufnahmen der NASA

Astronautentraining im
„Lunar Gravity Simulator“



Alle drei Fotos: © NASA

© RAABE 2019

Oransich

M 7 Computersprünge

Mithilfe des Computerprogramms „moonjump.exe“ erhalten Sie einen Eindruck, wie sich die Bewegungsabläufe bei den vorgestellten Sprung-Simulatoren voneinander unterscheiden. Die Simulation stellt die Bewegungen nebeneinander dar, sodass ein direkter Vergleich möglich ist. Beim Schraubenfeder-Simulator kann die **Federhärte** verändert werden, und beim Seil-Simulator lässt sich die **Länge** des Seiles variieren.

Die Oberfläche des Simulationsprogramms

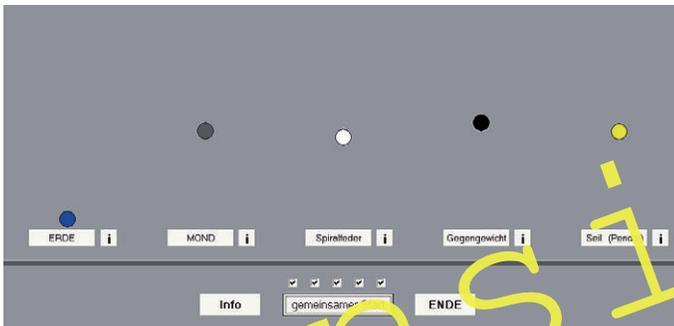


Abb. 13, Grafik: Dr. W. Zettlmeier

1. Führen Sie die Simulation mit den voreingestellten Werten durch. Beschreiben Sie, wie sich die Bewegungsabläufe der drei Simulatoren im Vergleich zu der Bewegung auf dem Mond unterscheiden.
2. Beschreiben Sie, wie sich das Verhalten des Schraubenfeder-Simulators verändert, wenn man die Federhärte variiert. Man kann der Mondsituation sogar recht nahekommen. Beschreiben Sie, bei welcher Einstellung dies der Fall ist und warum diese Situation mit einem anderen Nachteil verknüpft ist.
3. Beschreiben Sie, wie sich das Verhalten des Seil-Simulators verändert, wenn man die Länge des Seiles variiert. Bringen Sie dies mit der letzten Aussage der Station 5 in Zusammenhang.

Tipp: Die Schaltfläche „i“ neben jeder der fünf Simulationen liefert Ihnen **Informationen zu den Messwerten.**

Bei den Simulationen „Schraubenfeder“ bzw. „Seil (Pendel)“ können Sie über diese Schaltflächen die Federhärte bzw. die Länge des Seils variieren.

M 8 Tippkarten



M 2, Aufgabe 1 a)

Tipp 1

Verwenden Sie die Bewegungsgesetze des senkrechten Wurfes – auch der Energieerhaltungssatz kann hier weiterhelfen.

Tipp 2

Gesetze des senkrechten Wurfes:

$$s = v_0 \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \quad \text{und} \quad v = v_0 - g \cdot t,$$

oder auch Energieerhaltungssatz: Die kinetische Energie beim Absprung wird vollständig in Lageenergie verwandelt:

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = m \cdot g \cdot h$$

Tipp 3

Im Hochpunkt des Sprungs ist die Geschwindigkeit gleich null:

$$0 = v_0 - g \cdot t_H.$$

Lösen Sie nach t_H auf, setzen Sie Ihr Ergebnis in die erste Gleichung ein und stellen Sie diese nach der gesuchten Größe um.

Oder:

Lösen Sie den Energieansatz direkt nach v_0 auf.

M 2, Aufgabe 1 b)

Tipp 1

Im Hochpunkt des Sprungs ist die Geschwindigkeit gleich null: $0 = v_0 - g \cdot t_H$

M 2, Aufgabe 2 a)

Tipp 1

Verwenden Sie wieder den Energieerhaltungssatz. Achten Sie darauf, dass Sie die Beschleunigung auf dem Mond mit $1/6 g$ ansetzen.

Tipp 2

$$\text{Ansatz: } \frac{1}{2} m v_0^2 = m \cdot a_{\text{Mond}} \cdot h$$

Erläuterungen und Lösungen

M 1 Welcher von den dreien?

Bei dieser einleitenden Station geht es vor allem darum, dass Ihre Schüler miteinander ins Gespräch kommen und sich über die physikalischen Aspekte der vorgeschlagenen Simulatoren austauschen. Erfahrungsgemäß wird der Gegengewicht-Simulator dabei gerne favorisiert. Das Problem, dass hier fast doppelt so viel Masse bewegt werden muss und die Trägheit des Systems dadurch enorm zunimmt, wird selten gesehen. Selbst wenn Sie im Unterricht zuvor die **Atwood'sche Fallmaschine** besprochen haben, werden die Zusammenhänge oft nicht erkannt. Der Schraubenfeder-Simulator wird dagegen eher abgelehnt – nicht, weil das Problem der nichtkonstanten Kraft erkannt wurde, sondern weil die Schüler oft die Vorstellung haben, es würde hier zu einer periodischen Auf- und Abwärtsbewegung, also einer Federschwingung kommen. Der dritte Simulator wird meist direkt ausgeschlossen, was nicht verwunderlich ist, angesichts eines Astronauten, der waagrecht in einem Tragegeschirr hängt und die Erdanziehungskraft somit seitlich in voller Stärke spürt.

Greifen Sie möglichst nicht korrigierend oder mit zu großen Hilfen in die Bearbeitung dieser Station ein. Lassen Sie es zu, dass Ihre Schüler ihre eigenen Ideen und Vorstellungen diskutieren und schriftlich zusammenfassen, auch wenn sie zu einem falschen Ergebnis kommen, was erfahrungsgemäß sogar zu erwarten ist. Die Ergebnisse werden ja im Plenum diskutiert, oder Ihre Schüler führen in den folgenden Stationen schrittweise eine physikalische Analyse der mechanischen Konstruktionen durch und kommen schließlich so zu den richtigen Erkenntnissen.

M 2 Sprünge auf Erde und Mond – ein Vergleich

Wie unterscheidet sich ein Sprung auf dem Mond von dem auf der Erde hinsichtlich der Sprunghöhe und der Dauer des Sprungs? Diese Frage lässt sich mithilfe der Bewegungsgesetze einer beschleunigten Bewegung beantworten. Auch den Energieerhaltungssatz können Ihre Schüler hier einsetzen. Die Station stellt daher eine schöne **Wiederholung** bekannter Inhalte in einem neuen Zusammenhang dar.