

Handreichung für Lehrpersonen: Weiche Landung auf dem Mars

Klassen 9-13

Markus Nielbock

30. Januar 2019

Zusammenfassung

In ferner Zukunft werden sicher Menschen zum Mars fliegen. Schon heute führen Sonden und Fahrzeuge auf der Marsoberfläche Messungen durch. Landungen können auf dem Mars jedoch meistens nicht alleine mit Fallschirmen durchgeführt werden. Stattdessen verwendet man Landemodule, die mit Triebwerken die Geschwindigkeit auf akzeptable Werte verringern. Im Vergleich zur Erde übt der Mars zwar eine geringere Anziehungskraft auf die Sonden aus. Jedoch ist seine Atmosphäre sehr viel dünner als die der Erde. Mit simplen Rechnungen und einigen vereinfachenden Annahmen berechnen Schülerinnen und Schüler die Geschwindigkeit einer Marssonde mit Fallschirm. Dadurch erkennen sie, dass aufgrund der dünnen Marsatmosphäre die Endgeschwindigkeit keine weiche Landung zulässt.

Lernziele

Die Schülerinnen und Schüler

- ermitteln eine Bestimmungsgleichung für die Endgeschwindigkeit eines Falls mit Fallschirm,
- berechnen die Endgeschwindigkeiten von Fallschirmabwürfen auf dem Mars und auf der Erde,
- erläutern die Gründe dafür, dass Fallschirme alleine keine weiche Landung zulassen,
- berechnen die Größe eines Fallschirms, der eine weiche Marslandung ermöglichen würde.

Materialien

- Arbeitsblätter (erhältlich unter <http://www.haus-der-astronomie.de/raum-fuer-bildung>)
- Stift
- Taschenrechner
- Computer/Tablet/Smartphone mit Internetzugang (optional)

Stichworte

Mars, Erkundung, Reibung, Luftwiderstand, Luftdruck, Dichte, Strömung

Dauer

90 Minuten

Hintergrund

Der Weg zum Mars

Der Mars ist wohl der Planet im Sonnensystem, der die meisten Fantasien weckt. Spätestens seitdem Giovanni Schiaparelli 1877 auf dem Mars angeblich Kanäle entdeckte (Abb. 1 Meyer 1885; Schiaparelli 1882, 1897), gilt er als der Himmelskörper, der in puncto außerirdisches Leben am meisten fasziniert. Besondere Berühmtheit erlangte das Buch „War of Worlds (Krieg der Welten)“ von H. G. Wells aus dem Jahre 1898. Ein darauf basierendes Hörspiel erzeugte während seiner Radioausstrahlung 1938 Irritationen unter der Bevölkerung der USA, die die Sendung als einen Bericht missverstand (Chilton 2016).

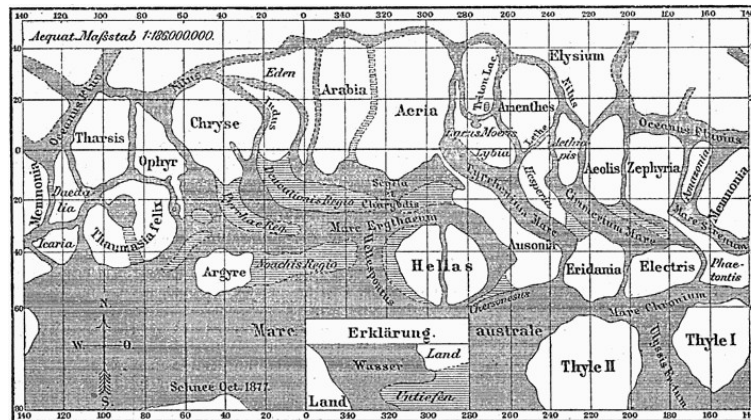


Abbildung 1: Karte der Marsoberfläche von 1877 nach Beobachtungen von Giovanni Schiaparelli (Quelle: Meyers Konversations-Lexikon, 1888, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Karte_Mars_Schiaparelli_MKL1888.png).

Jenseits dieser fantastischen Erzählungen versuchen Wissenschaftler bereits seit dem Beginn der Raumfahrt, den Mars genauer zu erkunden. Die erste erfolgreiche Mission zum Mars war die Sonde Mariner 4, die 1965 auf ihrem Vorbeiflug die ersten Aufnahmen der Oberfläche aus unmittelbarer Nähe zur Erde funkte¹. Als erster künstlicher Marssatellit schwenkte Mariner 9 1971 in den Orbit ein² und erstellte die erste detaillierte Marskarte (Abb. 2).

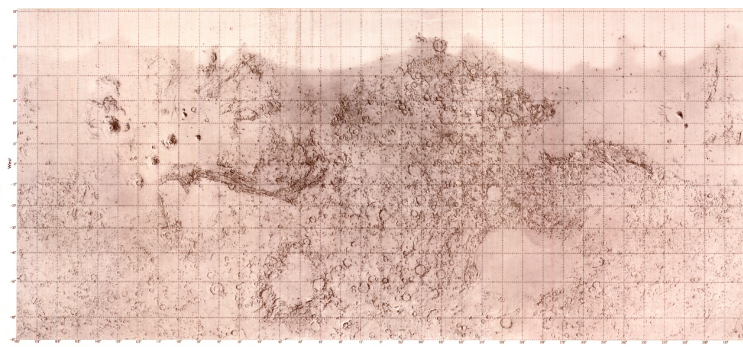


Abbildung 2: Karte der Marsoberfläche erstellt aus Fotografien der Marssonde Mariner 9 (Bild: USRA – Universities Space and Research Association, Lunar and Planetary Catalog, https://www.lpi.usra.edu/resources/mars_maps/mariner9/index.html).

¹<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1964-077A>

²<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1971-051A>

Die ersten Landungen auf dem Mars gelangen 1976 mit Viking 1³ und Viking 2⁴. Sie definierten bereits die grundlegenden Technologien für weiche Landungen auf dem Mars, die unter anderem aus Fallschirmen und Bremsraketen bestanden. Dass Flüge zum Mars generell eine große technologische Herausforderung sind, erkennt man daran, dass nur ca. 50% aller Marsmissionen erfolgreich sind (Zündel 2016).

Landung auf Erde und Mars

Wenn Raumschiffe wie früher Apollo oder noch heute die Sojus-Kapseln auf der Erde landen, werden sie durch Fallschirme auf Geschwindigkeiten abgebremst, die eine nahezu weiche Landung ermöglichen. Der Aufprall der Apollo-Raumschiffe wurde durch eine Wasserung im Ozean abgemildert, während Düsen an den Sojus-Landemodulen kurz vor dem Aufsetzen zünden und die Restgeschwindigkeit auf akzeptable Werte reduzieren⁵.



Abbildung 3: Die Kapsel der Apollo 15-Mission wassert mit nur zwei intakten Fallschirmen (Bild: NASA)

Landungen auf dem Mars gestalten sich jedoch anders. Seit Viking 1 werden die Sonden zwar durch Fallschirme abgebremst. Auf den letzten Kilometern wird die weiche Landung jedoch meistens durch Düsen bewerkstelligt. Auf diese Weise konnten das mobile Labor Curiosity und die geologische Messeinheit InSight erfolgreich auf dem Mars aufsetzen.



Abbildung 4: Der Fallschirm nach der Landung des Sojus MS-09-Raumschiffs, mit dem Alexander Gerst am 20. Dezember 2018 auf die Erde zurückkehrte (Bild: NASA, <https://www.flickr.com/photos/nasahqphoto/45477952845>, CC BY-NC-ND 2.0).

⁴<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1975-083C>

⁵https://www.esa.int/kids/de/lernen/Leben_im_Weltraum/Astronauten/Achterbahnfahrt_zurueck_zur_Erde

Auch der gemeinsam von ESA⁶ und Roskosmos⁷ entwickelte ExoMars-Rover wird 2021 mit einer Landeeinheit durch Bremsraketen auf dem Mars landen (siehe Abb. 6). Bei zukünftigen astronautischen Missionen wird es nicht anders sein.

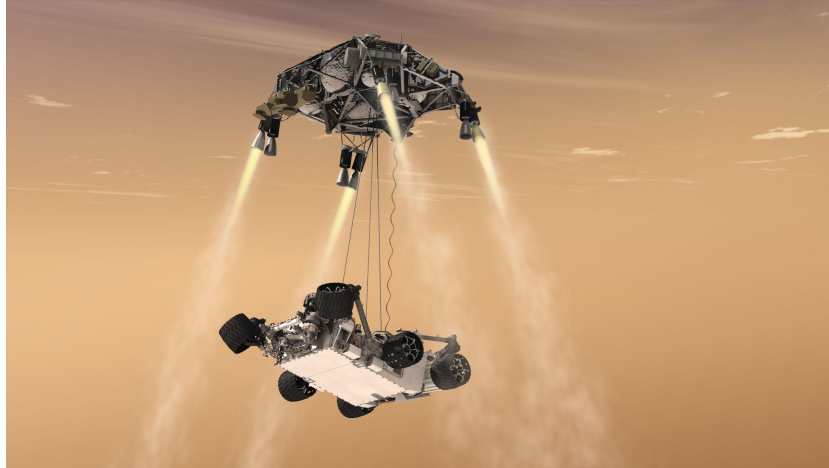


Abbildung 5: Künstliche Darstellung der letzten Sequenz der Landung des Mars-Roboters „Curiosity“. Das Bremsmanöver wird nicht mit Fallschirmen sondern mit Triebwerken durchgeführt (Bild: NASA/JPL-Caltech).

Doch warum ist das so? Die einfache Antwort ist: Die Atmosphäre ist zu dünn. Fallschirme alleine können die Sinkgeschwindigkeit nicht ausreichend reduzieren. Somit ist der Luftwiderstand zu gering, um genügend Reibung zu erzeugen. Die vom Fallschirm erzeugte Bremskraft reicht nicht aus, um die von der Gravitation ausgeübte Beschleunigung ausreichend zu kompensieren. Die Details werden im nächsten Abschnitt erläutert.

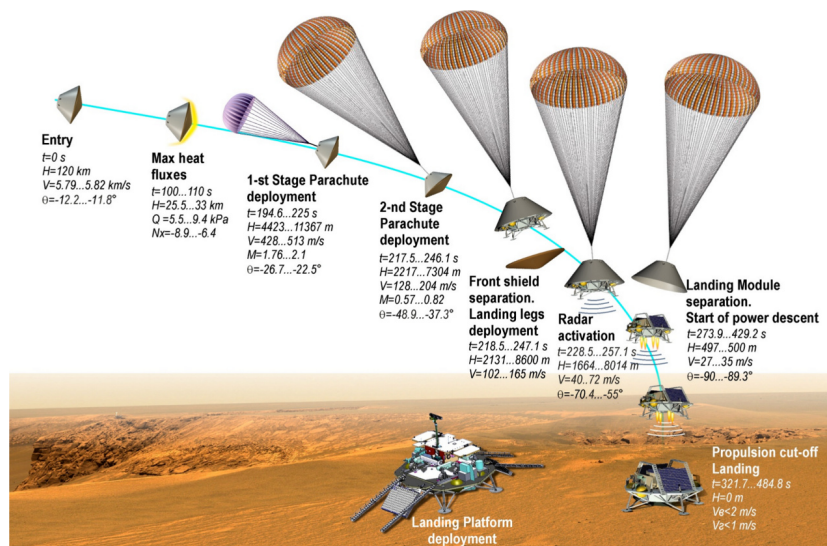


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Landessequenz des ExoMars-Rovers. Mehrere große Fallschirme bremsen die Landeeinheit ab. Jedoch reicht die Reduktion der Geschwindigkeit für eine weiche Landung nicht aus. Die Sonde würde zerstört. Daher werden in der letzten Phase Triebwerke eingesetzt, so dass die Landeeinheit schließlich sanft aufsetzt (Bild: ESA).

⁶European Space Agency, Europa

⁷Russland

Physik des Fallschirms

Der Fall mit Fallschirm ist eine Modifikation des freien Falls mit einer zusätzlichen zeitabhängigen Randbedingung durch ein bremsendes Medium. Dadurch entsteht eine Kraft, die der Beschleunigung entgegen wirkt. Im Vakuum existiert ein solches Medium jedoch nicht. Dann entspricht dies dem idealisierten freien Fall. Um die nachfolgenden Betrachtungen zu erleichtern, nehmen wir an, dass der Fall stets senkrecht zur Oberfläche, d. h. parallel zur Gravitationswirkung verläuft.

Freier Fall ohne Luftwiderstand

Gemäß des Newtonschen Gravitationsgesetzes übt die Gravitationskraft F_g auf einen Körper der Masse m eine Beschleunigung a aus. Daher kann man schreiben:

$$\begin{aligned}F_g &= m \cdot a \\ \Leftrightarrow G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} &= m \cdot a \\ \Leftrightarrow a &= G \cdot \frac{M}{r^2} \equiv g\end{aligned}$$

Dieser Term stellt eine allgemeine Bewegungsgleichung für eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung dar. Hierbei ist r der Abstand zwischen den Massenmittelpunkten. Daraus folgen per Integration die bekannten Gleichungen für die Geschwindigkeit und den Ort der beschleunigten Masse zum Zeitpunkt t .

$$v(t) = v_0 + G \cdot \frac{M}{r^2} \cdot t = v_0 + g \cdot t \quad (1)$$

$$s(t) = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot G \cdot \frac{M}{r^2} \cdot t^2 = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (2)$$

Dabei stellen s_0 den Ort und v_0 die Geschwindigkeit zu Beginn der Beschleunigung dar.

Freier Fall mit Luftwiderstand

Die Kraft des Luftwiderstands⁸ wirkt in umgekehrter Richtung der Gravitationswirkung und beträgt:

$$F_w = c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \rho \cdot A \quad (3)$$

Diese Kraft⁹ wird bestimmt durch Größen, die das Medium und das Objekt im Luftstrom charakterisieren. Auf der einen Seite ist die Kraft proportional zur Dichte des Mediums, auf der anderen Seite zur Querschnittsfläche, auf die die Kraft wirkt, sowie zum Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit. Der Strömungswiderstandskoeffizient bzw. Widerstandsbeiwert c_w ist eine dimensionslose Proportionalitätskonstante, die den Einfluss der Form des Objekts auf die Strömung und damit auf den Luftwiderstand beschreibt. Umgangssprachlich beziffert sie die Windschlüpfrigkeit. Sie kann durch kontrollierte Experimente z. B. im Windkanal experimentell ermittelt werden.

⁸Herleitung unter: <https://www.leifiphysik.de/mechanik/reibung-und-fortbewegung/luftreibung>

⁹Bei laminarer Strömung folgt der Luftwiderstand aus dem Stokesschen Gesetz.

Die Dichte hängt zudem vom atmosphärischen Druck p und der Temperatur T ab. R_S ist die spezifische Gaskonstante.

$$\rho = \frac{p}{R_S \cdot T} \quad (4)$$

Die Newtonsche Kraftgleichung lautet demnach:

$$m \cdot a = F_g - F_w \quad (5)$$

$$\Leftrightarrow m \cdot a = m \cdot g - c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \rho \cdot A \quad (6)$$

Aus der Erfahrung ist bekannt, dass der Fallschirmspringer nach dem Öffnen des Fallschirms eine konstante Endgeschwindigkeit v_E erreicht – im Gegensatz zur Situation des freien Falls im Vakuum. Wenn $v_E = \text{const.}$, folgt $a = 0$. Damit erhalten wir die Bestimmungsgleichung der Endgeschwindigkeit eines Fallschirmsprungs.

$$m \cdot a = 0 = m \cdot g - c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \rho \cdot A \quad (7)$$

$$\Leftrightarrow m \cdot g = c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \rho \cdot A \quad (8)$$

$$\Leftrightarrow v_E = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{c_w \cdot \rho \cdot A}} \quad (9)$$

Anders als beim freien Fall im Vakuum ist die Geschwindigkeit nicht unabhängig von der Masse des fallenden Gegenstands.

Aus der Bewegungsgleichung folgen wiederum die Geschwindigkeits- und Ortsfunktionen. Setzen wir als Anfangsbedingungen $v_0 = 0$ und $s_0 = 0$, wird die Lösung übersichtlicher, und es folgt¹⁰:

$$v(t) = v_E \cdot \tanh\left(\frac{g \cdot t}{v_E}\right) \quad (10)$$

$$s(t) = \frac{v_E^2}{g} \cdot \ln\left(\cosh\left(\frac{g \cdot t}{v_E}\right)\right) \quad (11)$$

Auch hier erkennt man:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = v_E \quad (12)$$

Fallschirme für Marsmissionen

Um Sonden in der Marsatmosphäre abzubremsen, werden typischerweise mehrere verschiedene Fallschirme benutzt. So setzt man auch für die Landung des Rovers der ExoMars-Mission Schirme für die unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereiche ein (ESA 2018a, siehe auch Abb. 6).

¹⁰Das zu lösende Integral enthält eine Funktion der Form $\frac{1}{1-x^2}$, deren Stammfunktion artanh ist.

Beim Eintritt in die Atmosphäre bremst das Landemodul zunächst durch die Reibung. In der nächsten Phase werden spezielle Überschall-Fallschirme entfaltet. Sie haben bei diesen Geschwindigkeiten Widerstandsbeiwerte von etwa $c_w = 0,4$ (Takayanagi u. a. [2016](#)).

In der letzten Phase bremsen besonders große Fallschirme die Landemodule auf geringe Geschwindigkeiten ab. Im Fall des ExoMars-Landemoduls kommt ein Fallschirm mit einem Durchmesser von 35 m zum Einsatz (ESA [2018b](#)). Ein typischer Widerstandsbeiwert für solche Fallschirme ist $c_w = 1,28$ (Hillje [1967](#), S. 47).

Vorbereitung

Zur Einstimmung sollten sich die Schülerinnen und Schüler die nachfolgenden Videos ansehen. Sie zeigen Animationen von Landungen zweier Marssonden.

Curiosity has landed (Dauer: 2:30)

<https://youtu.be/N9hXqzkH7YA>

InSight: Landing on Mars (Dauer: 3:18)

<https://youtu.be/C0lwFLPiZEE>

Falls Sie die Eigenschaften des Mars nicht selber einführen, lassen Sie die Schülerinnen und Schüler die grundlegenden Charakteristika (z. B. Größe, Masse, Entfernung, Atmosphäre) selbst recherchieren. Hierzu bieten sich Artikel aus Wikipedia an. Nach dieser Einleitung lassen Sie die Schülerinnen und Schüler folgende Fragen beantworten. Ermuntern Sie sie zu Diskussionen.

- Warum hilft ein Fallschirm, einen Absprung aus einem Flugzeug unbeschadet zu überleben?
- Wie entsteht die Bremswirkung eines Fallschirms?
- Warum funktioniert ein Fallschirm auf dem Mond nicht?
- Was muss man beim Einsatz eines Fallschirms auf dem Mars beachten, damit er gut funktioniert?

Aufgaben

Die Schülerinnen und Schüler berechnen die Endgeschwindigkeiten für eine Landung auf dem Mars bzw. auf der Erde. Aus dem Vergleich wird ersichtlich, dass diese auf dem Mars für eine weiche Landung zu hoch ist. Bei den Berechnungen werden folgende vereinfachende Annahmen gemacht.

- Senkrechter Fall
- Auftrieb vernachlässigt
- Der Fallschirm hat keine Masse.
- Konstante Gravitationsbeschleunigung während des Falls
- Homogene Dichte der Atmosphäre während des Falls
- Konstante atmosphärische Temperatur
- Reine CO₂-Atmosphäre auf dem Mars
- Ideales Gas

Tabelle 1: Wichtige Größen zur Berechnung der Aufgaben.

Größe	Formelzeichen	Wert
Masse der ExoMars ¹¹ Landeeinheit	m	1140 kg
Schwerebeschleunigung Mars	g_M	$3,71 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Schwerebeschleunigung Erde	g_E	$9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Widerstandsbeiwert des Fallschirms	c_w	1,28
Querschnittsfläche des Fallschirms	A	960 m^2
Atmosphärischer Druck Mars	p_M	636 Pa
Atmosphärischer Druck Erde	p_E	101325 Pa
Dichte Luft bei Normaldruck	ρ_L	$1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Mittlere Temperatur Mars	T_M	280 K
Spezielle Gaskonstante CO ₂	R_{S,CO_2}	$188,9 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

Endgeschwindigkeit eines Fallschirmsprungs

Beim freien Fall im Vakuum beschleunigt ein Objekt gleichmäßig. Bei einem Fall mit einem Fallschirm innerhalb einer Atmosphäre strebt die Fallgeschwindigkeit jedoch einem konstanten Wert zu.

Leite aus dem Prinzip

$$F = m \cdot a$$

die Gleichung für die Berechnung der Endgeschwindigkeit eines Falls am Fallschirm v_E her.

$$v_E = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{c_w \cdot \rho \cdot A}}$$

Die wirkende Kraft F setzt sich aus der Gravitationskraft

$$F_g = m \cdot g$$

und der Kraft des Luftwiderstands

$$F_w = c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \rho \cdot A$$

zusammen. Beide Kräfte wirken in entgegengesetzte Richtungen.

Landung am Fallschirm auf dem Mars

Nutze die Daten aus Tab. 1, um die Endgeschwindigkeit des ExoMars-Rovers bei der Landung zu berechnen, die lediglich durch das Bremsen mit einem Fallschirm der Querschnittsfläche A erzielt wird. Drücke das Ergebnis in den Einheiten m/s und km/h aus.

¹¹ExoMars ist ein Marserkundungsprogramm von ESA (Europa) und Roskosmos (Russland).

Nimm zur Berechnung der Dichte der Marsatmosphäre an, dass diese ausschließlich aus Kohlenstoffdioxid (CO₂) besteht und die in der Tabelle angegebenen Eigenschaften hat. Der Zusammenhang zwischen Dichte und atmosphärischem Druck folgt aus der allgemeinen Gasgleichung für ideale Gase.

$$\rho = \frac{p}{R_S \cdot T}$$

Landung am Fallschirm auf der Erde

Ermittle die Endgeschwindigkeit für ein Bremsmanöver mit Fallschirm auf der Erde.

Diskussion

Wie in Abb. 6 gezeigt und auf Seite 6 beschrieben, werden Sonden, die auf dem Mars landen, nacheinander mit verschiedenen Fallschirmen abgebremst. Erkläre, warum es für die Berechnung der Endgeschwindigkeit genügt, lediglich den letzten Fallschirm in dieser Sequenz zu betrachten.

Erläutere den Unterschied der beiden berechneten Fälle. Beziehe dich hierbei auf die Eigenschaften der beiden Planeten und ihren Atmosphären.

Was ist für die unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausschlaggebend?

Würde der ExoMars-Rover die Landung auf diese Weise überstehen? Überlege, was mit einem Auto geschähe, das mit derselben Geschwindigkeit gegen eine Wand fährt.

Auf welche Weise verringert man die Sinkgeschwindigkeit, um eine weiche Landung auf dem Mars zu gewährleisten?

Dimension eines idealen Fallschirms

Auf welche Querschnittsfläche bzw. welchen Durchmesser müsste man den Fallschirm auf dem Mars verändern, damit die Endgeschwindigkeit so groß wie auf der Erde ist? Ist das realistisch?

Lösungen

Endgeschwindigkeit eines Fallschirmsprungs

Die Herleitung an Stelle der Gl. 9 auf Seite 5 erläutert.

Landung am Fallschirm auf dem Mars

Man kann entweder die Funktion der Dichte $\rho(p, T)$ in die Bestimmungsgleichung von v_E einsetzen oder die Dichte auf dem Mars ausrechnen.

$$\begin{aligned}\rho_M &= \frac{p_M}{R_S \cdot T_M} = \frac{636 \text{ Pa}}{188,9 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 280 \text{ K}} = 0,012 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ v_{E,M} &= \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g_M}{c_w \cdot \rho_M \cdot A}} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g_M \cdot R_{S,\text{CO}_2} \cdot T_M}{c_w \cdot p_M \cdot A}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot 1140 \text{ kg} \cdot 3,71 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 188,9 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 280 \text{ K}}{1,28 \cdot 636 \text{ Pa} \cdot 960 \text{ m}^2}} \\ &= 23,93 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 86,1 \frac{\text{km}}{\text{h}}\end{aligned}$$

Landung am Fallschirm auf der Erde

$$\begin{aligned}v_{E,E} &= \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g_E}{c_w \cdot \rho_L \cdot A}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1140 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1,28 \cdot 1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 960 \text{ m}^2}} \\ &= 3,74 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 13,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}\end{aligned}$$

Diskussion

Die Endgeschwindigkeit hängt nicht von der Anfangsgeschwindigkeit ab, vorausgesetzt der Bremsvorgang dauert lange genug. Somit sind die Geschwindigkeiten, die durch die vorgeschalteten Fallschirme erzielt werden, für die Berechnung irrelevant.

Die Endgeschwindigkeit ist auf dem Mars mehr als 6 mal so hoch wie auf der Erde. Obwohl die gravitative Anziehung auf dem Mars erheblich geringer als auf der Erde ist, fällt eine Sonde wie der ExoMars-Rover dort schneller zu Boden.

Letztendlich ist die Atmosphäre auf dem Mars zu dünn, als dass sie einen ausreichend großen Widerstand auf den Fallschirm ausüben könnte. Die Erdatmosphäre ist bedeutend dichter.

Der ExoMars-Rover würde den Aufprall mit einer Geschwindigkeit von 86 km/h sicher nicht überstehen.

Aus diesem Grund benötigt man auf dem Mars Triebwerke, um die Geschwindigkeit bei der Landung ausreichend zu verringern.

Dimension eines idealen Fallschirms

$$v_E = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{c_w \cdot \rho \cdot A}} \Leftrightarrow A = \frac{2 \cdot m \cdot g}{c_w \cdot \rho \cdot v_E^2}$$

Um nun die Querschnittsfläche des Fallschirms zu berechnen, setzen wir die Eigenschaften des Mars ein und nehmen als Endgeschwindigkeit $v_{E,E}$.

$$\begin{aligned} A_{id} &= \frac{2 \cdot m \cdot g_M}{c_w \cdot \rho_M} \cdot \frac{1}{v_{E,E}^2} = \frac{2 \cdot m \cdot g_M}{c_w \cdot \rho_M} \cdot \frac{c_w \cdot \rho_L \cdot A}{2 \cdot m \cdot g_E} = \frac{\rho_L \cdot g_M}{\rho_M \cdot g_E} \cdot A \\ &= \frac{1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3,71 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0,012 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \cdot A = 40,89 \cdot A = 39251 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Der Durchmesser eines runden Fallschirms mit dieser Querschnittsfläche beträgt:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 224 \text{ m}$$

Das ist völlig unrealistisch. Nicht nur kann man solch große Fallschirme nicht bauen und testen. Auch besitzen sie eine große Masse, die das Gesamtgewicht des Landemoduls enorm anwachsen ließe.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei den Lehrern Matthias Penselin, Florian Seitz und Martin Wetz für ihre wertvollen Hinweise, Kommentare und Änderungsvorschläge, die in die Erstellung dieses Materials eingeflossen sind. Weiterer Dank gilt Herrn Dr. Volker Kratzenberg-Annies für seine gewissenhafte Durchsicht.

Literatur

- Chilton, Martin (2016). *The War of the Worlds panic was a myth*. The Telegraph. URL: <https://www.telegraph.co.uk/radio/what-to-listen-to/the-war-of-the-worlds-panic-was-a-myth/> (besucht am 14. 01. 2019).
- ESA (2018a). *ExoMars 2020 parachute deployment sequence*. Robotic Exploration of Mars. URL: <http://exploration.esa.int/mars/60120-exomars-2020-parachute-deployment-sequence/> (besucht am 06. 01. 2019).
- (2018b). *First test success for largest Mars mission parachute*. Robotic Exploration of Mars. URL: <http://exploration.esa.int/mars/60118-first-test-success-for-largest-mars-mission-parachute/> (besucht am 06. 01. 2019).
- Hillje, Ernest R. (1967). *ENTRY FLIGHT AERODYNAMICS FROM APOLLO MISSION AS-202*. NASA Technical Note NASA TN D-4185. Houston, Texas, USA: NASA Manned Spacecraft Center. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19670027745.pdf>.
- Meyer, Herrmann Julius (1885). *Meyers Konversations-Lexikon. Eine Encyclopädie des allgemeinen Wissens*. Unter Mitarb. von University of California. 4. Aufl. Bd. 11. 19 Bde. Leipzig: Verlag des Bibliographischen Instituts. 1162 S. URL: http://archive.org/details/bub_gb_IpEQAQAIAAJ (besucht am 04. 01. 2019).
- Schiaparelli, Giovanni Virgilio (1882). „Découvertes Nouvelles sur la Planète Mars“. In: *L'Astronomie* 1, S. 216. URL: http://esoads.eso.org/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=1882LAstr...1..216S&link_type=ARTICLE&db_key=AST&high= (besucht am 14. 01. 2019).
- (1897). „Observations de la Planète Mars“. In: *Bulletin de la Societe Astronomique de France et Revue Mensuelle d'Astronomie, de Meteorologie et de Physique du Globe* 11, S. 107. URL: http://esoads.eso.org/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=1897BSAFR...11..107S&link_type=ARTICLE&db_key=AST&high= (besucht am 14. 01. 2019).
- Takayanagi, Hiroki u. a. (2016). „Development of Supersonic Parachute for Japanese Mars Rover Mission“. In: *TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN* 14 (ists30), Pe_87–Pe_94. ISSN: 1884-0485. DOI: 10.2322/tastj.14.Pe_87. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/tastj/14/ists30/14_Pe_87/_article/-char/en (besucht am 06. 01. 2019).
- Zündel, Wolfgang (2016). *Mars-Mission "ExoMars" – Suche nach Leben auf dem roten Planeten*. [W] wie Wissen - Das Erste. URL: <https://www.daserste.de/information/wissen-kultur/w-wie-wissen/weltall-218.html> (besucht am 14. 01. 2019).

Diese Unterrichtsmaterialien sind im Rahmen des Projekts *Raum für Bildung* am Haus der Astronomie in Heidelberg entstanden. Weitere Materialien des Projekts finden Sie unter:

<http://www.haus-der-astronomie.de/raum-fuer-bildung> und <http://www.dlr.de/next>

Das Projekt findet in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt statt und wird von der Joachim Herz Stiftung gefördert.

