

Weiche Landung auf dem Mars

In Bezug auf den Beitrag „ExoMars 2020 soll in Oxia Planum landen“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 2/2019, Rubrik „Nachrichten“, WIS-ID: 1421021, Zielgruppe: Mittelstufe-Oberstufe

Markus Nielbock, Haus der Astronomie, Heidelberg

Aktuelle und zukünftige Sonden und Rover, die den Mars erkunden, werden mit aufwendigen Triebwerksmodulen auf dem Mars gelandet. Warum können ExoMars 2020 und InSight nicht alleine mit Fallschirmen weich auf dem Mars aufsetzen? Mit simplen Rechnungen und einigen vereinfachenden Annahmen berechnen Schülerinnen und Schüler die Fallgeschwindigkeit einer Sonde mit Fallschirm auf dem Mars. Dadurch erkennt man, dass aufgrund der dünnen Marsatmosphäre die Endgeschwindigkeit keine weiche Landung zulässt.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Raumfahrt, Planeten	Mars , Atmosphäre , Erkundung , Landemodule
Physik	Mechanik, Thermodynamik	Reibung , Luftwiderstand , Beschleunigung , Luftdruck , Dichte
Fächer- verknüpfung	Astro-Technik	Antrieb , Strömung
Lehre allgemein	Kompetenzen (Wissen und Erkenntnis), Lehr-/Sozialformen, Unterrichtsmittel	Berechnungen und Vergleiche durchführen , Arbeitsblatt

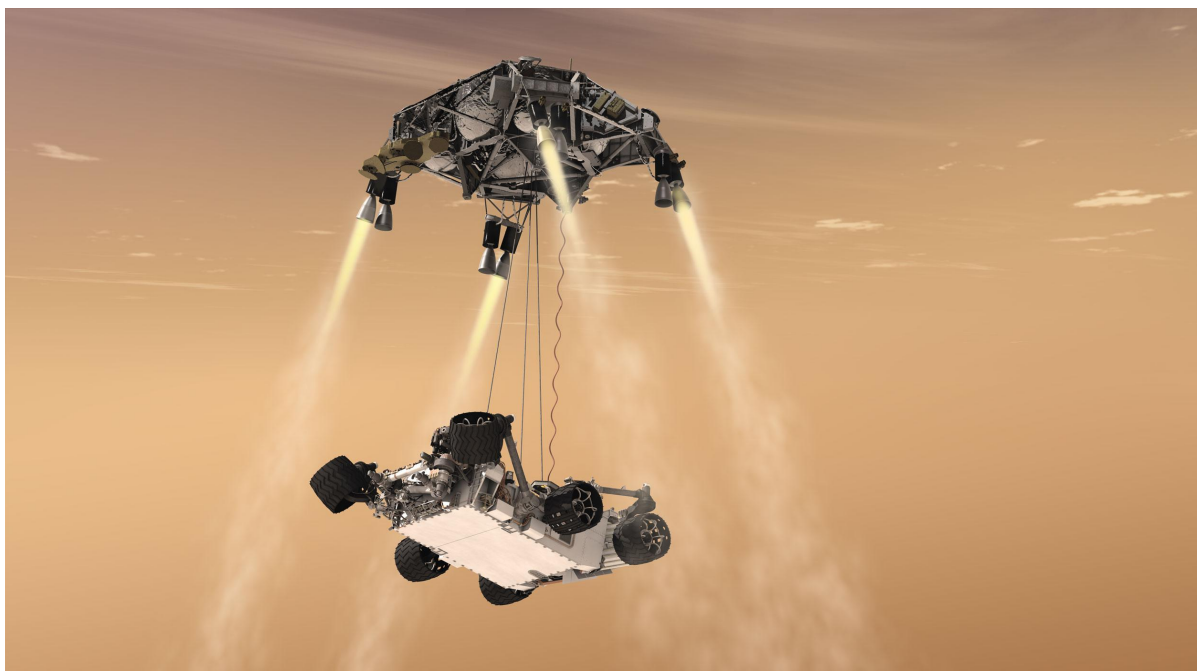


Abbildung 1: Künstlerische Darstellung der letzten Sequenz der Landung des Mars-Roboters „Curiosity“. Das Bremsmanöver wird nicht mit Fallschirmen, sondern mit Triebwerken durchgeführt (Bild: NASA/JPL-Caltech).

[zurück zum Anfang](#)

Inhalt

1	Hintergrundinformationen	3
1.1	<i>Der Weg zum Mars</i>	3
1.2	<i>Landung auf Erde und Mars</i>	4
1.3	<i>Physik des Fallschirms.....</i>	5
1.3.1	<i>Freier Fall ohne Luftwiderstand</i>	6
1.3.2	<i>Freier Fall mit Luftwiderstand</i>	6
1.4	<i>Fallschirme für Marsmissionen.....</i>	7
2	Aufgaben.....	8
2.1	<i>Endgeschwindigkeit eines Fallschirmsprungs</i>	9
2.2	<i>Landung am Fallschirm auf dem Mars</i>	9
2.3	<i>Landung am Fallschirm auf der Erde</i>	9
2.4	<i>Diskussion</i>	10
2.5	<i>Dimension eines idealen Fallschirms</i>	10
3	Lösungen.....	11
3.1	<i>Endgeschwindigkeit eines Fallschirmsprungs</i>	11
3.2	<i>Landung am Fallschirm auf dem Mars</i>	11
3.3	<i>Landung am Fallschirm auf der Erde</i>	11
3.4	<i>Diskussion</i>	11
3.5	<i>Dimension eines idealen Fallschirms</i>	12
4	Literaturverzeichnis	13

1 Hintergrundinformationen

1.1 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 entdeckt hatte (Meyer 1885, 11:282), gilt er als der Himmelskörper, der in puncto außerirdisches Leben am meisten fasziniert. Eine Vielzahl von Erzählungen und Romanen spiegelt geradezu eine Sehnsucht wider, die gegen die vermeintliche Einsamkeit unserer Existenz auf der Erde ankämpft. 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 missverstanden.

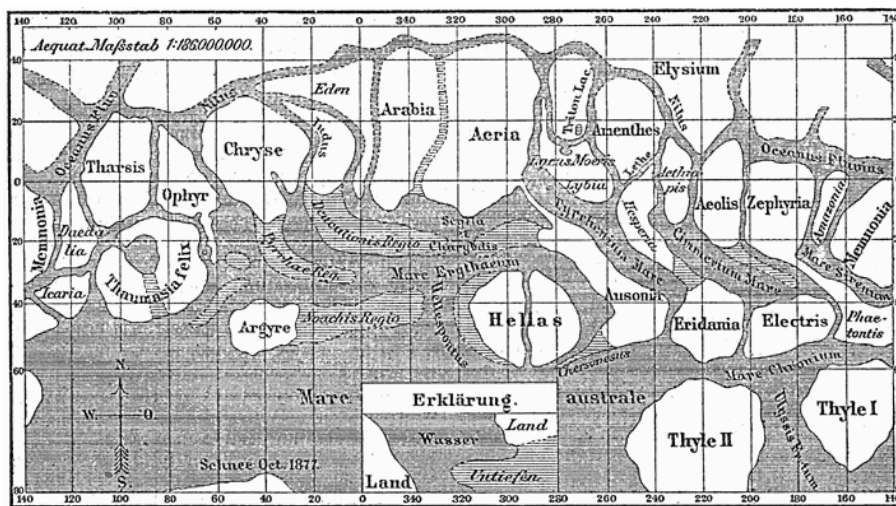


Abbildung 2: Karte der Marsoberfläche von 1877 nach Beobachtungen von Giovanni Schiaparelli (Quelle: Meyers Konversations-Lexikon, 1888, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Karte_Mars_Schiaparelli_MKL1888.png, public domain)

Es ist also kaum verwunderlich, dass der Mars inzwischen mit wissenschaftlichen Methoden und raffinierten Maschinen erforscht wird, immer mit der Idee, dort Leben zu finden.

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. 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. Dass Flüge zum Mars generell eine große technologische Herausforderung sind, erkennt man daran, dass nur ca. 50% aller Marsmissionen erfolgreich sind. Der WIS-Beitrag von 11/2012 erläutert, wie man von der Erde zum Mars kommt (Fischer 2012).

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>

³ <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1975-075C>

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

[zurück zum Anfang](#)

1.2 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 (siehe Abbildung 3), während Düsen an den Sojus-Landemodulen kurz vor dem Aufsetzen zünden und die Restgeschwindigkeit auf akzeptable Werte reduzieren⁵.

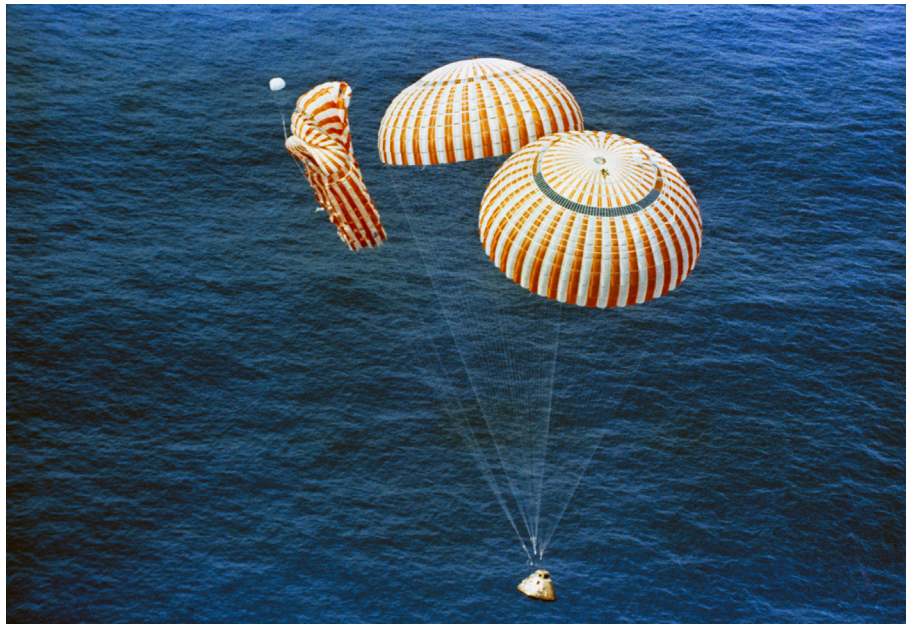


Abbildung 3: Die Kapsel der Apollo 15-Mission wassert mit nur zwei intakten Fallschirmen (Bild: NASA, public domain).

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 das seismische Experiment InSight (beide NASA⁶) erfolgreich auf dem Mars aufsetzen. Die nachfolgenden beiden Videos enthalten Animationen der LandeprozEDUREN.

Curiosity has landed (Dauer: 2:30)

<https://youtu.be/N9hXqzkH7YA>

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

<https://youtu.be/C0lwFLPiZEE>

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

⁶ National Aeronautics and Space Administration, USA

Auch der gemeinsam von ESA⁷ und Roskosmos⁸ entwickelte ExoMars-Rover wird 2021 mit einer Landeeinheit durch Bremsraketen auf dem Mars landen (siehe Abbildung 4). Bei zukünftigen astronautischen Missionen wird es nicht anders sein.

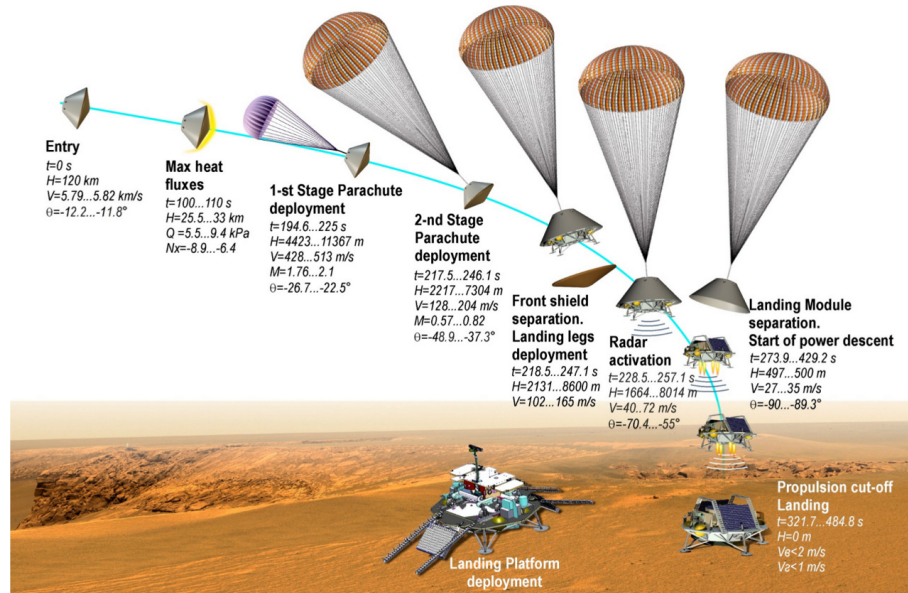


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Landessequenz des ExoMars-Rovers. Obwohl mehrere Fallschirme die Landeeinheit abbremsen, erfolgt die Landung unter dem Einsatz von Triebwerken (Bild: ESA).

Doch warum ist das so? Die einfache Antwort ist: Die Atmosphäre ist zu dünn. Fallschirme alleine können die Sinkgeschwindigkeit nicht ausreichend reduzieren. Die Details werden im nächsten Abschnitt erläutert. Kurz gesagt, ist die Atmosphäre des Mars zu dünn. 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.

1.3 Physik des Fallschirms

Der Fall mit Fallschirm ist eine Modifikation des freien Falls mit einer zusätzlichen zeitabhängigen Randbedingung durch ein bremsendes Medium. Im Vakuum entspricht dies jedoch der Anwendung des Newtonschen Gravitationsgesetzes, bei dem ein Körper zum Massenzentrum hin beschleunigt wird. Bei Hinzunahme eines Mediums entsteht durch den Luftwiderstand eine Kraft, die der Beschleunigung entgegen wirkt. Deswegen ist es sinnvoll, sich zunächst den idealisierten freien Fall im Vakuum genauer anzusehen. Um die nachfolgenden Betrachtungen zu erleichtern, nehmen wir an, dass der Fall stets senkrecht zur Oberfläche, d. h. parallel zur Gravitationswirkung verläuft.

⁷ European Space Agency, Europa

⁸ Russland

[zurück zum Anfang](#)

1.3.1 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 .

$$\begin{aligned}v(t) &= v_0 + G \cdot \frac{M}{r^2} \cdot t = v_0 + g \cdot t \\ s(t) &= s_0 + v_0 \cdot t + G \cdot \frac{M}{2 \cdot r^2} \cdot t^2 = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2\end{aligned}$$

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

1.3.2 Freier Fall mit Luftwiderstand

Die Kraft des Luftwiderstands⁹ wirkt in umgekehrter Richtung der Gravitationswirkung und beträgt:

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

Diese Kraft¹⁰ 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.

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

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

⁹ Herleitung unter: <https://www.leifiphysik.de/mechanik/reibung-und-fortbewegung/luftreibung>

¹⁰ Bei laminarer Strömung folgt der Luftwiderstand aus dem Stokesschen Gesetz.

Die Newtonsche Kraftgleichung lautet demnach:

$$m \cdot a = F_g - F_w$$
$$\Leftrightarrow m \cdot a = m \cdot g - c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \rho \cdot A$$

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.

$$m \cdot a = 0 = m \cdot g - c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot v_E^2 \cdot \rho \cdot A$$
$$\Leftrightarrow m \cdot g = c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot v_E^2 \cdot \rho \cdot A$$
$$\Leftrightarrow v_E = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{c_w \cdot \rho \cdot A}}$$

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 zu $v_0 = 0$ und $s_0 = 0$, wird die Lösung übersichtlicher, und es folgt:

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

Auch hier erkennt man, dass gilt:

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

1.4 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 2018, Abbildung 4).

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 besonders großer Fallschirm mit einem Durchmesser von 35 m zum Einsatz (ESA 2018b). Ein typischer Widerstandsbeiwert für solche Fallschirme ist $c_w = 1,28$ (Hillje 1967, 47).

[zurück zum Anfang](#)

2 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-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}	$188,9 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

2.1 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.

2.2 Landung am Fallschirm auf dem Mars

Nutze die Daten aus Tabelle 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.

Nimm zur Berechnung der Dichte der Marsatmosphäre an, dass diese ausschließlich aus Kohlenstoffdioxid (CO_2) besteht und die in der Tabelle angegebenen Eigenschaften hat. Der Zusammenhang der Dichte zum atmosphärischen Druck folgt aus der allgemeinen Gasgleichung für ideale Gase.

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

2.3 Landung am Fallschirm auf der Erde

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

[zurück zum Anfang](#)

2.4 Diskussion

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

2.5 Dimension eines idealen Fallschirms

Welche Querschnittsfläche bzw. welchen Durchmesser müsste ein Fallschirm auf dem Mars haben, damit die Endgeschwindigkeit so groß wie aus Aufgabe 2.3 ist? Ist das realistisch?

3 Lösungen

3.1 Endgeschwindigkeit eines Fallschirmsprungs

Die Herleitung der Gleichung ist in Kapitel 1.3.2 erläutert.

3.2 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.

$$\rho_M = \frac{p_M}{R_S \cdot T_M} = \frac{636 \text{ Pa}}{188,9 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot 280 \text{ K}} = 0,012 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$v_{E,M} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g_M}{c_w \cdot \rho_M \cdot A}} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g_M \cdot R_{S,\text{CO}_2} \cdot T_M}{c_w \cdot p_M \cdot A}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1140 \text{ kg} \cdot 3,71 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 188,9 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot 280 \text{ K}}{1,28 \cdot 636 \text{ Pa} \cdot 960 \text{ m}^2}}$$

$$= 23,93 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 86,1 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

3.3 Landung am Fallschirm auf der Erde

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

3.4 Diskussion

Die Endgeschwindigkeit ist auf dem Mars mehr als 6 mal höher als 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 bringen 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.

[zurück zum Anfang](#)

3.5 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 $v_{E,E}$.

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

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.

4 Literaturverzeichnis

- ESA. 2018a. „ExoMars 2020 Parachute Deployment Sequence“. Robotic Exploration of Mars. 29. März 2018. <http://exploration.esa.int/mars/60120-exomars-2020-parachute-deployment-sequence/>.
- . 2018b. „First Test Success for Largest Mars Mission Parachute“. Robotic Exploration of Mars. 29. März 2018. <http://exploration.esa.int/mars/60118-first-test-success-for-largest-mars-mission-parachute/>.
- Fischer, Olaf. 2012. „Der Weg zum Mars“. *Wissenschaft in die Schulen*, November 2012. <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/der-weg-zum-mars/1128723>.
- 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. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19670027745.pdf>.
- Meyer, Herrmann Julius. 1885. *Meyers Konversations-lexikon. Eine Encyclopädie des allgemeinen Wissens*. 4. Aufl. Bd. 11. 19 Bde. Leipzig: Verlag des Bibliographischen Instituts. http://archive.org/details/bub_gb_IpEQAQAIAAJ.
- Takayanagi, Hiroki, Toshiyuki Suzuki, Kazuhiko Yamada, Yusuke Maru, Shingo Matsuyama, und Kazuhisa Fujita. 2016. „Development of Supersonic Parachute for Japanese Mars Rover Mission“. *TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN* 14 (ists30): Pe_87-Pe_94. https://doi.org/10.2322/tastj.14.Pe_87.

Weitere WIS-Materialien zur Astronomie und allen ihren Bezügen finden Sie unter der Adresse www.wissenschaft/schulen.de (Fachgebiet Astronomie).

Wir würden uns freuen, wenn Sie zum vorliegenden Beitrag Hinweise Kritiken und Bewertungen an die Kontaktadresse des Autors senden könnten.

Markus Nielbock wird durch die Joachim Herz Stiftung gefördert.