

**Arbeitsblätter:**

# **Weiche Landung auf dem Mars**

**Markus Nielbock**

30. Januar 2019



**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).

## **Einleitung**

In ferner Zukunft werden sicher Menschen zum Mars fliegen. Schon heute führen Sonden und Fahrzeuge auf der Marsoberfläche Messungen durch. Das Landen auf dem Mars ist jedoch nicht leicht. Du wirst in dieser Übung erfahren, warum weiche Landungen auf dem Mars alleine mit Fallschirmen in den meisten Fällen nicht möglich sind. Zum Vergleich: Bei der Rückkehr zur Erde werden Sojus-Kapseln, die Crewmitglieder von der ISS zurückbringen, fast ausschließlich durch Fallschirme gebremst. Stattdessen verwendet man bei Marslandungen Landemodule, die mit Triebwerken die Fallgeschwindigkeit 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.

## **Materialien**

- Arbeitsblätter
- Stift
- Taschenrechner
- Computer/Tablet/Smartphone mit Internetzugang (optional)

## **Dauer**

90 Minuten

## Aktivitäten

### Vorbereitung

Zur Einstimmung kannst du dir zwei 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>

Recherchiere die grundlegenden Eigenschaften des Mars (z. B. Größe, Masse, Entfernung, Atmosphäre) und versuche, mit deinem bisherigen Wissen die folgenden Fragen zu beantworten.

- 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 Aufgaben umfassen folgende Themen:

- Endgeschwindigkeit eines Fallschirmsprungs
- Vergleich der Wirkung von Fallschirmen auf der Erde und auf dem Mars
- Dimension eines Fallschirms für eine weiche Landung auf dem Mars

Bei den nachfolgenden Berechnungen machen wir folgende vereinfachende Annahmen.

- 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 CO<sub>2</sub>-Atmosphäre auf dem Mars
- Ideales Gas

Bei der Lösung der Aufgaben werden die physikalischen Größen aus Tab. 1 benötigt.

**Tabelle 1:** Wichtige Größen zur Berechnung der Aufgaben.

Größe	Formelzeichen	Wert
Masse der ExoMars <sup>1</sup> -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 <sup>2</sup>
Atmosphärischer Druck Mars	$p_M$	636 Pa
Atmosphärischer Druck Erde	$p_E$	101325 Pa
Dichte Luft bei Normaldruck	$\rho_L$	$1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Mittlere Temperatur Mars	$T_M$	280 K
Spezielle Gaskonstante CO <sub>2</sub>	$R_{S,\text{CO}_2}$	$188,9 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

<sup>1</sup>ExoMars ist ein Marserkundungsprogramm von ESA (Europa) und Roskosmos (Russland).

## 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. 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.

Nimm zur Berechnung der Dichte der Marsatmosphäre an, dass diese ausschließlich aus Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) besteht und die in der Tabelle angegebenen Eigenschaften hat. Der Zusammenhang zwischen Dichte und atmosphärischem Druck folgt aus der allgemeinen Gasgleichung für ideale Gase.

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

## 3. Landung am Fallschirm auf der Erde

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

#### 4. Diskussion

Wie in Abb. 6 gezeigt und auf Seite 10 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?

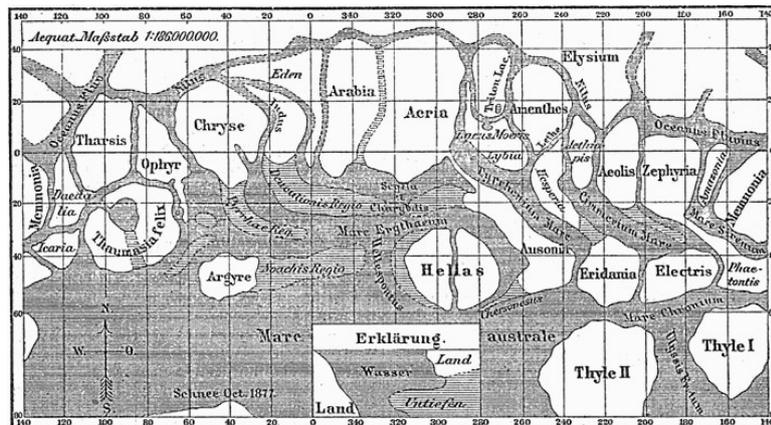
#### 5. Dimension eines idealen Fallschirms

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?

## Hintergrundinformationen

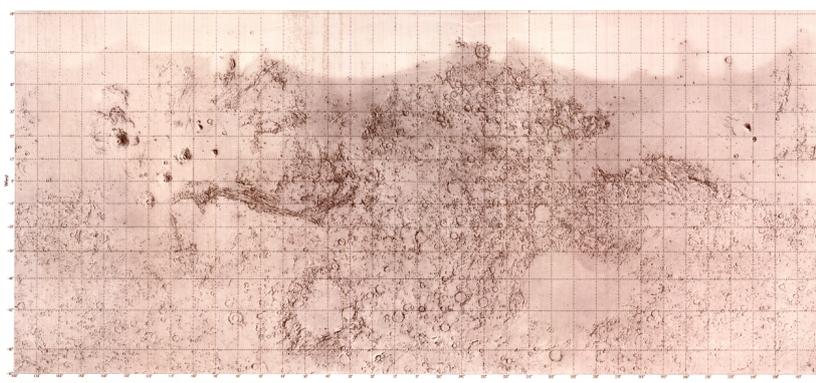
### Der Weg zum Mars

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 (Abb. 2), 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, der die Idee eines belebten Mars literarisch aufgriff. Ein darauf basierendes Hörspiel erzeugte während seiner Radioausstrahlung 1938 Irritationen unter der Bevölkerung der USA, die die Sendung als einen Bericht missverstand.



**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](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 funkte. Zur Überraschung der Forscher schien der Mars völlig trocken zu sein. Als erster künstlicher Marssatellit schwenkte Mariner 9 1971 in den Orbit ein und erstellte die erste detaillierte Marskarte (Abb. 3).



**Abbildung 3:** 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](https://www.lpi.usra.edu/resources/mars_maps/mariner9/index.html)).

Die ersten Landungen auf dem Mars gelangten 1976 mit Viking 1 und Viking 2. 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.

## 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 reduzieren<sup>2</sup>.



**Abbildung 4:** Die Kapsel der Apollo 15-Mission wassert mit nur zwei intakten Fallschirmen (Bild: NASA)

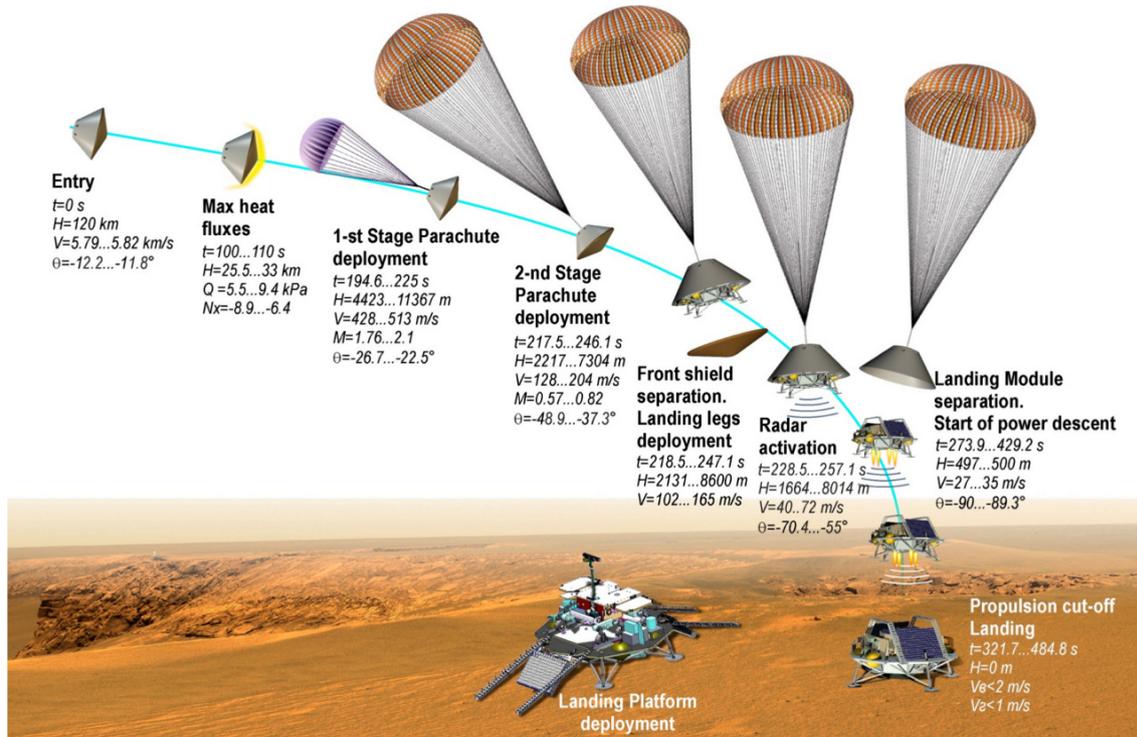
Landungen auf dem Mars gestalten sich jedoch anders. Seit Viking 1 werden die Sonden zwar durch Fallschirme abgebremst. Auf den letzten Kilometern wird die weiche Landung jedoch meistens durch Düsen bewerkstelligt. Auf diese Weise konnten das mobile Labor Curiosity und die geologische Messeinheit InSight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



**Abbildung 5:** 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).

<sup>2</sup>[https://www.esa.int/kids/de/lernen/Leben\\_im\\_Weltraum/Astronauten/Achterbahnfahrt\\_zurueck\\_zur\\_Erde](https://www.esa.int/kids/de/lernen/Leben_im_Weltraum/Astronauten/Achterbahnfahrt_zurueck_zur_Erde)

Auch der gemeinsam von ESA<sup>3</sup> und Roskosmos<sup>4</sup> 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 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).

Doch warum ist das so? Diese Antwort wirst du anhand der Aufgaben dieses Arbeitsmaterials selbst finden.

## Freier Fall

Gemäß des Newtonschen Gravitationsgesetzes wird ein Körper gleichmäßig zum Massezentrum hin beschleunigt. Das gilt aber nur beim Fall im Vakuum. Findet der Fall innerhalb eines Mediums statt, bremst es ihn durch die Reibung ab. So entsteht bei einem Fallschirmabsprung 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.

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

<sup>3</sup>European Space Agency, Europa

<sup>4</sup>Russland

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

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.

Die Kraft des Luftwiderstands 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 Kraft 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.

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

## 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.

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  $c_w = 0,4$ .

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. Ein typischer Widerstandsbeiwert für solche Fallschirme ist  $c_w = 1,28$ .

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.

