

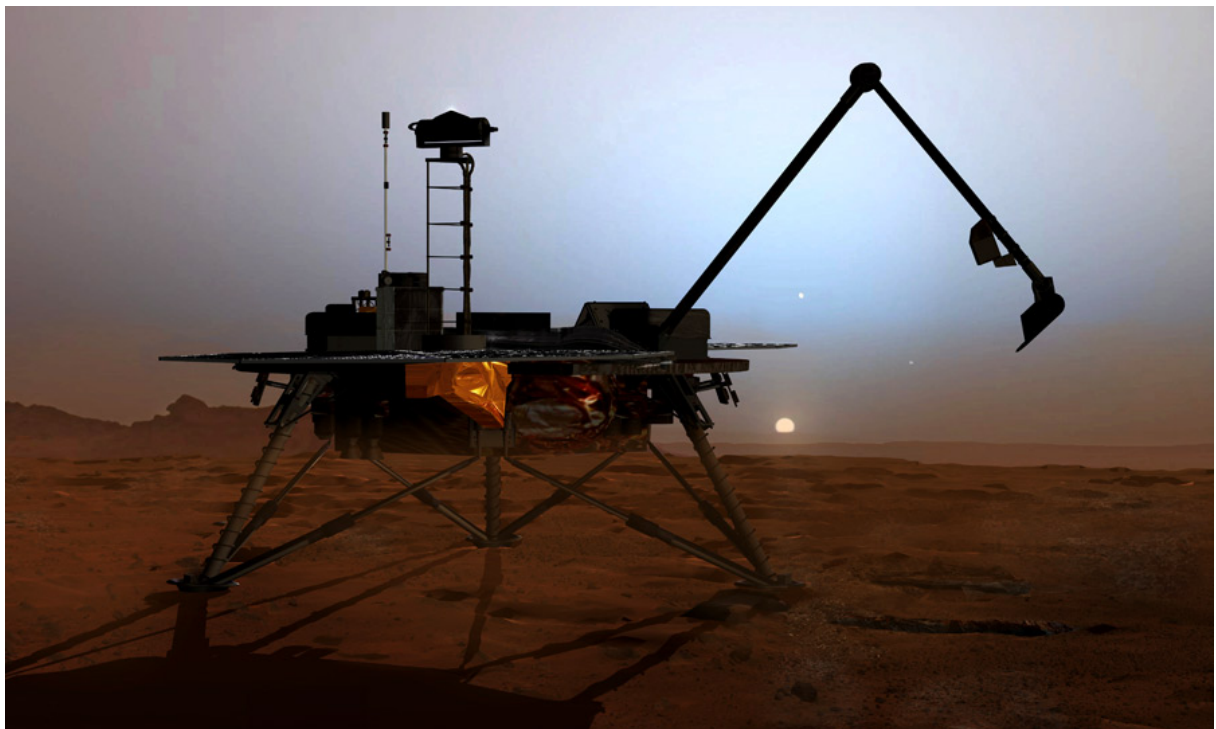
Spurensuche auf dem Mars

Cecilia Scorza und Olaf Fischer

Nach einem 711 Millionen Kilometer langen Flug zum roten Planeten und nur 20 Minuten nach der Landung nahe dem marsianischen Nordpol entfaltete die Marssonde Phoenix planmäßig die Sonnenpaneele und machte sich an die Arbeit. 152 Tage lang suchte Phoenix im Permafrostboden nach Eis und Spuren von organischen Verbindungen. Dafür nutzte er seinen knapp zweieinhalb Meter langem Roboterarm aus Titan und Aluminium, der auch über eine Schaufel und einen Bohrer verfügte.

Der vorliegende WiS!-Beitrag beginnt mit [Aufgaben zur Topografie](#) des Mars, wobei die Kenntnisse der irdischen Topografie zur Anwendung kommen können. Danach wird die [Spurensuche in Form von Aufgaben](#) und einem [Freihandexperiment](#) thematisiert. Dabei wird das interessante Wechselspiel zwischen dem Marsatmosphärendruck und den Polkappen in Aufgaben aufgegriffen. Abschließend finden sich noch [Aufgaben zu den Sonnenpanelen](#).

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Physik	Thermodynamik, Elektromagnetismus	Sublimation , Tripelpunkt , Phasenübergänge , Atmosphärendruck , Trockeneis , Elektrischer Widerstand , elektrische Leitfähigkeit , Widerstandsgesetz , elektrische Leistung
Astronomie	Planeten, Raumfahrt	Mars, Planetenoberflächen , Sonnenpaneele
Fächer- verknüpfung	Astro-Geo, Astro-Ch	Topografie , Klimawandel, Erosion, Suche nach Leben (Wasser), Phasendiagramm , Kohlenstoffdioxid



Künstlerische Darstellung der Marslandesonde Phoenix zur Zeit des einsetzenden Winters. Da der Landeort der Sonde bei hohen nördlichen Breiten liegt, kann sie während des Marswinters im Bereich von der entstehenden CO₂-Polkappe betroffen werden. ©: NASA/JPL-Caltech/University of Arizona.

Die Erforschung des roten Planeten vor der Phoenix-Mission

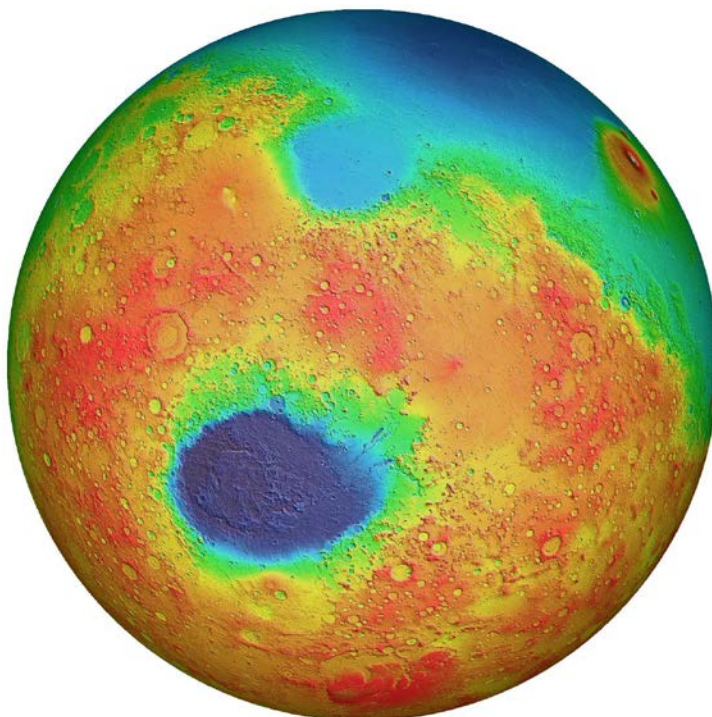
[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Noch ist unklar, ob Phoenix aus seinem langen Winterschlaf wiedererwachen wird. Der Erfolg der spannenden Marsmission bleibt aber unbestritten. Phoenix hat endgültige Beweise für die Existenz von Wasser auf dem Mars geliefert.

Jedoch, welche Erfahrungen unterstützten die Entwicklung und Durchführung der Phoenix-Mission? Warum wurde in diesem Fall angestrebt, eine Landesonde zu schicken? War die Forschung mit Orbitalsonden nicht ausreichend? Um diese Fragen zu beantworten, lohnt es sich, einen Blick auf die Information zu werfen, die durch den Einsatz von Raumsonden vor der Phönix-Mission gewonnen wurde. Dabei handelt es sich vor allem um Karten von der Planetenoberfläche.

In der Tat, ein wichtiger Schritt in der Planetenforschung besteht in der Erstellung von topografischen Karten. Bis Ende der 90er Jahre waren solche Karten vom Mars sogar genauer und von höherer Auflösung als die von der Erde! Der Grund für das große Interesse am Mars war und ist die Suche nach Wasser. Wasser gilt als eine der wichtigsten Voraussetzungen für organisches Leben und ist deswegen für die Astrobiologie und die Suche nach Leben im Sonnensystem so bedeutsam.

Im Lauf der vergangenen Jahrzehnte konnte mit Hilfe verschiedener Raumsonden viel über den Mars in Erfahrung gebracht werden. Unter anderem hat die Mission *Mars Global Surveyor* (MGS) der NASA in den 90er Jahren hoch auflösende Bilder geliefert: für die Vermessung und Kartierung, die Bestimmung der Zusammensetzung des Marsgesteins, die Klärung der Rolle des Wassers in der Planetengeschichte sowie für die Erforschung der Atmosphäre bzw. des Klimas und Wetters. Das Höhenmessgerät **Mars Orbiter Laser Altimeter-2** (MOLA-2), an Bord des MGS hatte die Aufgabe mit Hilfe von Laser-Höhenmessungen den Mars genau zu vermessen und Daten über Oberflächenbeschaffenheit und -form sowie über Wolkenhöhen zu ermitteln.



Bei der Laser-Höhenmessung, auch Laser-Scanning genannt, wird die Oberfläche der Planeten mittels eines Infrarotlasers zeilenförmig abgetastet. Die vom Boden reflektierten Strahlen werden von einem Detektor empfangen und registriert. Über die Laufzeit errechnet man dann die Entfernung von der Sonde zu jedem einzelnen Punkt der Oberfläche. Mit den gewonnenen Daten können dreidimensionale Bilder des gescannten Bereiches erstellt werden.

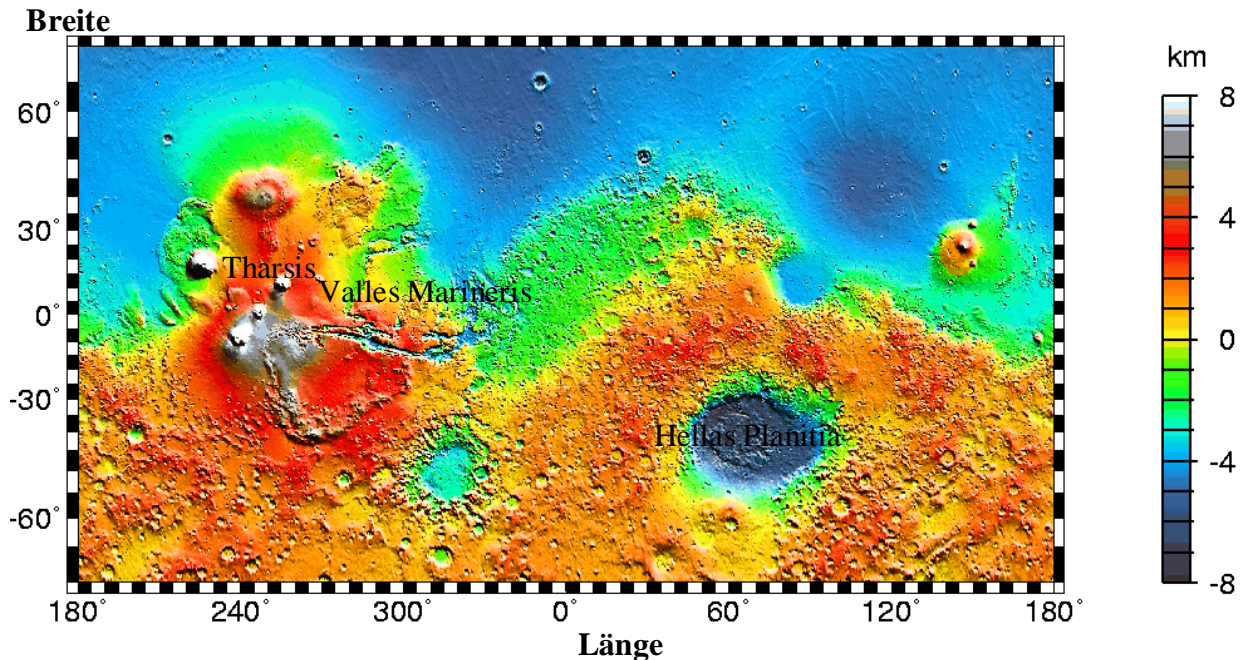
Marsglobus, erstellt mit Daten des MOLA-Höhenmessgeräts. ©: NASA / JPL / Goddard Space Flight Center - <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02040>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24440907>.

Welche Information kann aus den topografischen Karten vom Mars gewonnen werden? Man vergleiche auch die Marstopografie mit der Erdtopografie, die wir in der Schule lernen.

Globale Marstopografie

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Auf der topografischen „Welt“-Karte des Mars (Bild unten) ist folgendes zu sehen: Der Nordpol (oberer Kartenrand), der Südpol (unterer Kartenrand) und drei Hauptregionen in der Äquatorgegend. Dies sind a) die Tharsis-Region mit vielen Vulkanen (links), b) das sich anschließende Grabenbruchsystem mit dem Namen Valles Marineris und c) das Einschlagbecken Hellas Planitia (in dunkel blau markiert).



Topografische „Welt“-Karte vom Mars, gewonnen mit dem MOLA-Altimeter.

©: MOLA Science Team, MGS, NASA, https://attic.gsfc.nasa.gov/mola/images/mercat_med.jpg.

Aufgaben

- 1.) Betrachte eingehender die oben gezeigte MOLA-Karte des Mars. Vergleiche die Höhen des Nord- und Südpols. Was kann man hier feststellen? Betrachte die Radien von Mars in der Tabelle rechts. Wenn Du Mars als Körper zeichnen müsstest, wie würde er aussehen? Was könnte mit Mars in der Vergangenheit passiert sein, damit er diese Form bekam? Berücksichtige dabei die Grundabplattung durch Rotation.

	Radius in km
Äquator	3.396,200
Nordpol	3.376,189
Südpol	3.382,580

- 2.) Gib die Koordinatenbereiche an für: a) die Vulkanregion Tharsis, b) die Valles Marineris und c) die Hellas Planitia.

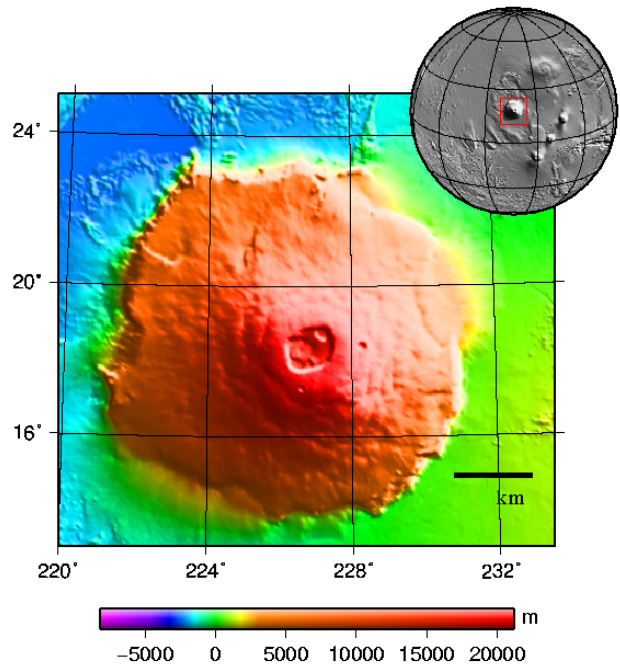
Lokale Marstopografie

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

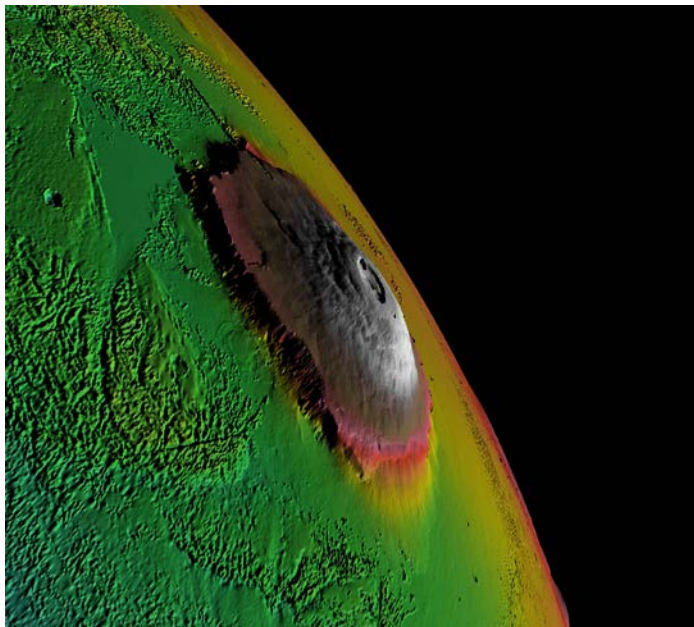
Am Beispiel von Mons Olympus, einem inaktiven Vulkan der Tharsisregion (siehe „Weltkarte“ des Mars) kann die Benutzung von Marskarten erläutert werden.

Aufgaben

- 1.) Der Mars hat einen Durchmesser von 6800 km. Schätze den Durchmesser des Olympus Mons (auch zu sehen innerhalb des kleinen roten Viereckes) anhand des grauen Marsglobus (rechts oben im Bild). Vergleiche dein Ergebnis mit der Größe Deutschlands. In welches Bundesland könnte der Mons Olympus passen? Was für eine Skala hat die MOLA-Karte rechts?
- 2.) Höhe des Mons Olympus: Betrachte die künstlichen Farben der MOLA-Karte von Olympus Mons (rechts) und mache mit Hilfe der unteren Skala eine Abschätzung über die Höhe des Olympus Mons. Vergleiche diese mit dem Mount Everest.



©: Chmee2 - plotted using GMT and gridded MOLA data archive meg0031t.grd, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3692188>.



©: NASA, https://www.dlr.de/rd/Portaldata/1/Resources/portal1_news/newsarchiv2009_1/2olympus-mola_nature.jpg.

- 3.) Schneide aus Papier eine kleine Silhouette des Mount Everest in demselben Maßstab wie im Bild links aus und klebe diese neben den höchsten Berg des Sonnensystems!
- 4.) Warum konnte der Olympus Mons auf dem Mars so groß werden? Denke an die niedrigere Masse von Mars im Vergleich zur Erdmasse und argumentiere.

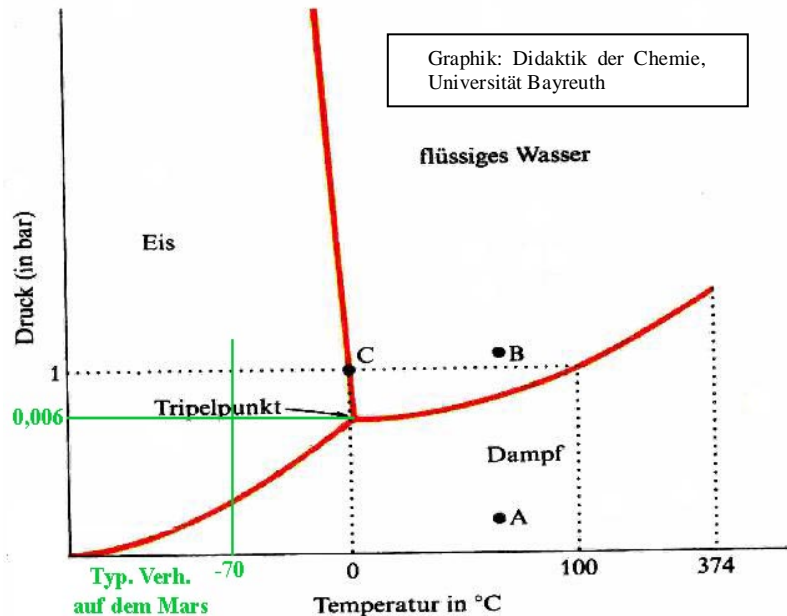
Zum Mons Olympus: Wegen seiner Form gehört der Olympus Mons zu den so genannten Schildvulkanen. Dieser Vulkantyp hat zwar eine relativ geringe Hangneigung, erreicht dabei aber besonders große Ausmaße. Die Inselgruppe Hawaii auf der Erde ist aus diesem Vulkantyp hervorgegangen. Anders als die Erde besitzt Mars jedoch keine bzw. nur eine sehr geringe Plattentektonik, bei der sich entlang der Plattenspalten neue Kruste bilden kann. Aus diesem Grunde konnte die Lava nur in einer Region des Planeten die Kruste durchbrechen und wenige, aber gewaltige Vulkane hervorzubringen!

Beweise für die Existenz von Wasser

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Auf Grund der von der Sonde Mars Odyssey gefundenen Hinweise (siehe SuW-Beitrag 8/2009, Seite 40) vermutete man riesige Wassereismengen in den Polarregionen von Mars. Nun hat Phoenix Beweise geliefert, dass in der Tat Wassereis in der Nordpolregion von Mars existiert:

- Der Roboterarm von Phoenix entnahm eine Probe des Permafrostbodens nahe dem Nordpol des Roten Planeten und erhitze sie im Ofen des Labors. Dabei wurde auch Wasserdampf frei.
- Direkte Aufnahmen zeigten „Eisbrocken“, die in geringer Tiefe durch die Schaufel freigelegt wurden und nach wenigen Tagen „verschwanden“ (sublimiert) waren. Um zu verstehen, was mit den Eisbrocken passiert ist, müssen wir das Phasendiagramm des Wassers (rechts) betrachten und die entsprechenden Bedingungen auf Mars in Betracht ziehen.



Das Phasendiagramm ist eine Veranschaulichung der Aggregatzustände (fest, flüssig, gasförmig) von Stoffen in Abhängigkeit von Temperatur und Druck. Aus der Physik und der Chemie kennen wir das Phasendiagramm des Wassers (rote Linien).

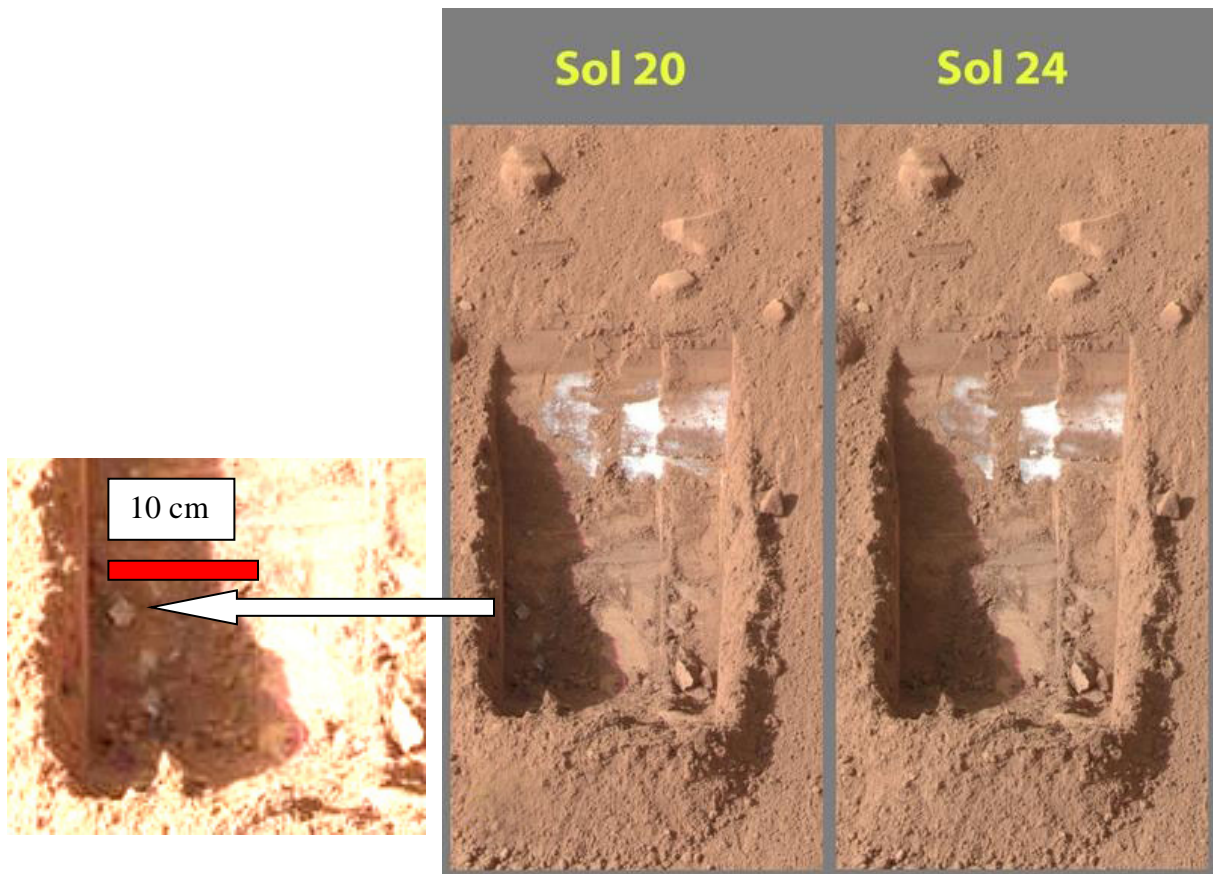
Beim Tripelpunkt des Wassers liegen flüssiges Wasser, Wassereis und Wasserdampf im Gleichgewicht nebeneinander vor; als zugehörige Temperatur ist $273.16\text{ K} = 0.01^\circ\text{C}$ definiert worden. Zu den grundlegenden physikalischen Eigenschaften des Wassers gehört die Fähigkeit des flüssigen Wassers, zu gefrieren (Übergang zum Feststoff Eis auf der Erde unter Normalbedingungen bei 0°C), zu verdampfen (Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand Dampf auf der Erde unter Normalbedingungen bei 100°C) oder zu *sublimieren* (Übergang vom festen direkt in den gasförmigen Zustand).

Der durchschnittliche Druck an der Marsoberfläche ist mit etwa 6-7 mbar sehr nahe am Tripelpunkt von Wasser (6,1 mbar). Dies bedeutet, dass schon bei ca. 0°C das Wasser zu sieden beginnt! *Bei den herrschenden Temperaturbedingungen auf dem Mars (min. -80 bis max. -10°C) wäre Wasser also entweder fest oder gasförmig vorhanden.* Erst bei sehr hohen Drücken im Marsinneren (Tiefe einige km) wären Bedingungen für flüssiges Wasser vorstellbar!

Die Sublimationsrate von Eisbrocken auf dem Mars

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Auf der Seite 46 des SuW-Beitrages (8/2009) wird einer der direkten Beweise für die Existenz von Wasser auf dem Mars präsentiert: Die Sublimation von Eisbrocken, so wie sie in einer Aufnahme einer von Phönix ausgegrabenen Stelle zu sehen sind. Am Sol 20 (der 20-ste Marstag nach der Landung von Phoenix) waren drei helle Brocken im Grabungsloch zu sehen (siehe vergrößertes Bild links). Vier Tag danach, am Sol 24, waren sie vollkommen verschwunden!



Bildquelle: Sterne und Weltraum 8/2009, S. 46

Aufgabe

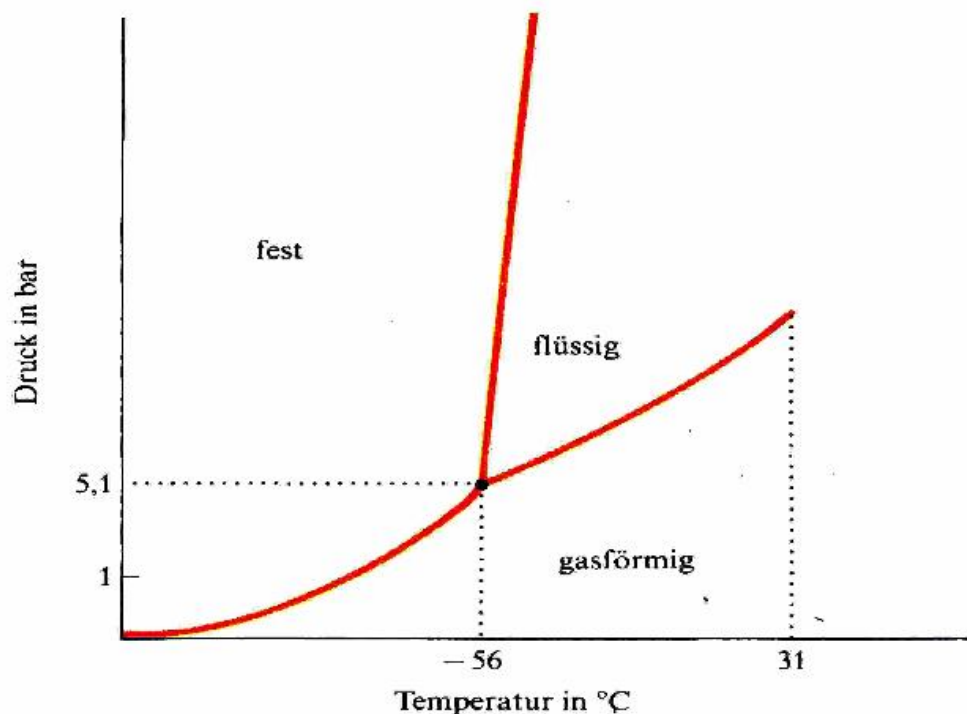
Schätze mit Hilfe des roten Maßstabstrichs im Bild die Länge des größten Eisbrockens und bestimme seine Sublimationsrate in μm pro Stunde, wissend, dass die Brocken nach vier Tagen (Sol 24) vollkommen verschwunden sind.

Warum sinkt der Marsatmosphärendruck in den Polarregionen während des Winters?

Es ist schon länger bekannt, dass der Mars auf seiner jeweiligen Winterhalbkugel eine Polkappe ausbildet, die im Sommer wieder schrumpft. Die Raumsonde Mars-Odyssey und nun Phoenix haben gezeigt, dass das Eis der Polkappen aus Kohlenstoffdioxid und etwas Wasser besteht. Beobachtet wurde schon vom Viking Lander (1976), dass der Luftdruck im Gebiet der Marspole während des Winters sinkt.

Aufgaben

- 1.) Die Atmosphäre von Mars besteht etwa zu 95% aus Kohlenstoffdioxid. Finde heraus, warum und um wie viel Prozent der Luftdruck am Marsnordpol im dortigen Winter sinkt. Nutze zur Lösung des Problems das unten gegebene Phasendiagramm von Kohlenstoffdioxid und die in der Tabelle gegebenen Messungen des Viking Landers.
- 2.) Der Tripelpunkt von CO₂ (Koexistenz von festem, flüssigem und gasförmigem Kohlenstoffdioxid) befindet sich bei ca. 220 K (°C?) und 5 bar. Wo auf dem Mars könnte so ein Druck auftreten?



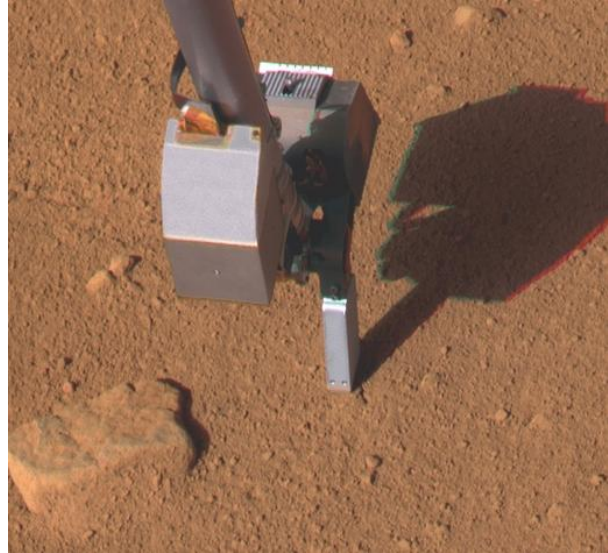
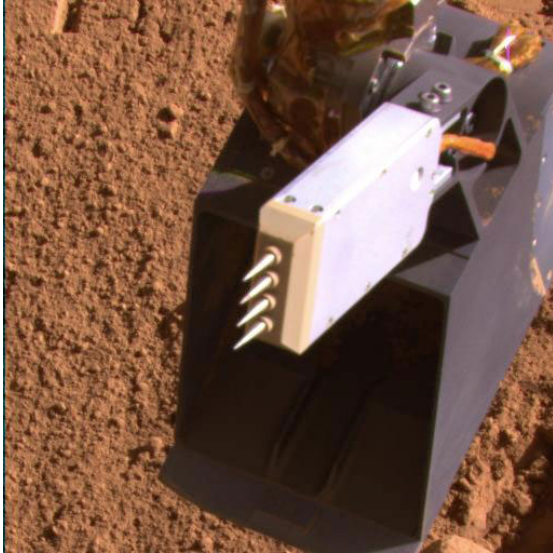
Bildquelle: Didaktik der Chemie, Universität Bayreuth.

Tag des Jahres	0	57	114	172	229	286	343	400	458	515	572	629
Druck in mbar	8,0	8,25	8,4	7,75	7,0	6,9	7,25	8,0	8,8	8,9	8,5	8,0

Experiment „Feuchte-Messung“

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Im SuW-Beitrag (8/2009) wird auf Seite 42 rechts von einem Sensor zur Bestimmung der thermischen und elektrischen Leitfähigkeit des Bodenmaterials berichtet (siehe auch Bild unten). Dieses Experiment kann mit schulischen Mitteln auf einfache Weise nachgeahmt werden. Dabei rücken der elektrische Widerstand (oder die elektrische Leitfähigkeit) und die damit verbundenen Größen und Zusammenhänge ins Blickfeld.



Die Messungen der Leitfähigkeit des Marsbodens mit der gabelähnlichen Sonde am Ende des Greifarms (siehe auch Bilder in SuW 8/2009, S. 43) ergaben bisher, dass dieser an der Oberfläche völlig trocken ist. Doch in tieferen Schichten wird Wassereis vermutet (Quelle: NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Texas A&M University).

Für das Experiment zur Demonstration des Prinzips der „Feuchte-Messung“ wird der im Bild unten dargestellte Versuchsaufbau benötigt. In eine Plastikbox wird etwas trockener Sand gegeben. Die Messung erfolgt mittels zweier in den Sand gesteckter Elektroden, die mit einem Ohmmeter verbunden sind. Der anfangs trockene Sand wird sukzessive im Gebiet zwischen den Elektroden durch einige Tropfen Wasser befeuchtet.



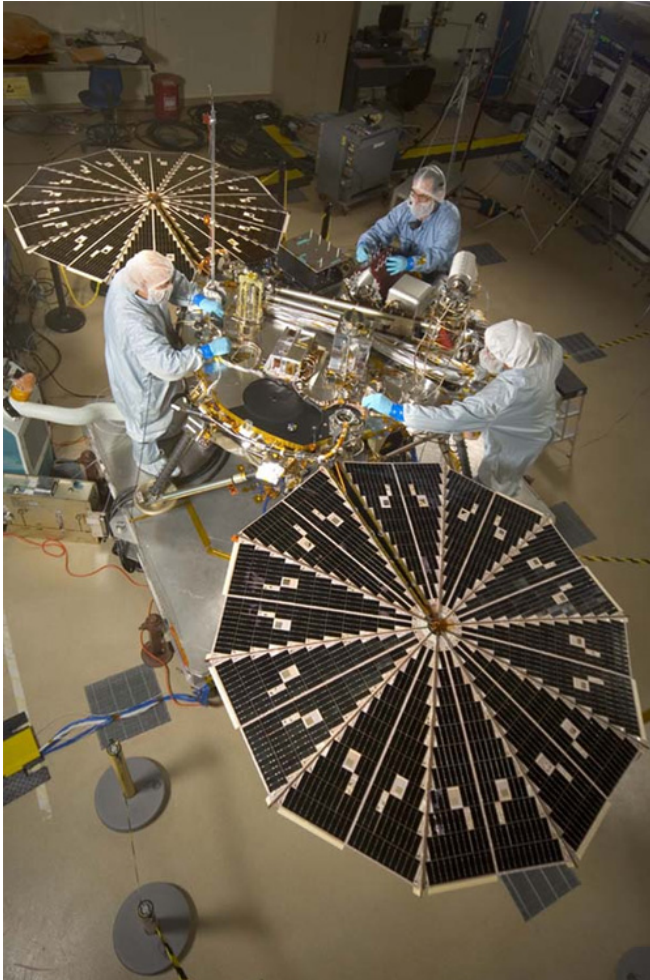
Im Bild unten ist zu erkennen, dass sich mit zunehmender Sandfeuchte ein abnehmender Widerstand ergibt. Der Widerstand wird dabei in Megaohm angezeigt.



Für eine quantitative Auswertung muss die Menge des stromdurchflossenen feuchten Sandes in Betracht gezogen werden. Dabei spielen auch der Abstand zwischen den Elektroden und die Größe ihrer Kontaktfläche mit dem Sand eine Rolle. Derartige Untersuchungen könnten Gegenstand einer kleinen Schülerforschungsarbeit sein.

Die Sonnenpanele von Phoenix

[\(→zurück zum Anfang\)](#)



Die Phoenix-Sonde in der Montagehalle. ©: NASA / JPL / UA / Lockheed Martin, <https://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA01886.jpg>.

Aufgaben

- 1.) Man schätze Ausmaß und Fläche der Sonnenpanele anhand des gegebenen Bildes.
- 2.) Die Sonnenpanele haben eine Fläche von $4,2 \text{ m}^2$. In SuW 8/2009 findet man auf S. 50 rechts unten die Aussage, dass auf Phoenix während der Polarnacht eine 10-20 cm dicke Trockeneisschicht niederschlägt. Man bestimme die Trockeneismasse auf den Sonnenpanelen, wenn sich eine 20 cm dicke Schicht bildet. Die Dichte von Trockeneis beträgt ungefähr $1,56 \text{ g/cm}^3$.
- 3.) Die geografische Breite des Landeorts von Phoenix beträgt ca. 68° (siehe SuW 8/2009, S. 41 links). Man berechne die maximale elektrische Leistung, die Phoenix durch seine Sonnenpanele am Landeort aufnehmen kann. (Die Neigung der Rotationsachse von Mars beträgt etwa 25° .) Für die Solarzellen wird ein Wirkungsgrad von 25% angenommen.

Lösungen zu den Aufgaben

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Zur globalen Marstopografie

Zu 1.) Die Asymmetrie zwischen Nord- und Südhalbkugel des Mars ist wahrscheinlich auf einen gigantischen Zusammenstoß mit einem Asteroiden zurückzuführen.

Zu 2.)

Region	Breite [°]	Länge [°]
Tharsis	+45 bis -20	210 bis 270
Valles Marineris	0 bis 15	270 bis 360
Hellas Planitias	-25 bis -50	50 bis 100

Zur lokalen Marstopografie

Zu 1.) Der Durchmesser von Olympus Mons ist ungefähr 600 km. Er würde in kein Bundesland passen, sondern nur in ganz Deutschland! Der Skalenstrich in der MOLA-Karte hat eine Länge von 160 km.

Zu 2.) Die Höhe des Olympus Mons beträgt schätzungsweise 24.000 m. Er ist damit dreimal höher als der Mount Everest!

Zu 4.) Der Olympus Mons konnte auf dem Mars so groß werden wegen der geringeren Anziehungskraft des Mars und auch wegen des niedrigeren atmosphärischen Drucks.

Zur Sublimationsrate von Eisbrocken auf dem Mars

Die Sublimationsrate beträgt 200 µm pro Stunde (2 cm / 4 Tage)

Warum sinkt der Marsatmosphärendruck in den Polarregionen während des Winters?

Zu 1.) Am Marstag 286 ist der Luftdruck am stärksten gesunken. In Vergleich zum Tag 515, an dem der Luftdruck 8,9 mbar erreichte, sind es 22 % weniger. Dies ist auf die hohe Sublimationsrate von CO₂ während des Winters (bei T = -75 °C) zurückzuführen.

Zu 2.) Nur sehr tief unter dem Boden!

Zu den Sonnenpanelen von Phoenix

Zu 1.) Das Bild zeigt Techniker, die mit Phoenix beschäftigt sind. Die Armlänge eines der Techniker kann als Maßstab dienen: ca. 0,8 m.

Damit ergeben sich für die Panele ein Durchmesser von 1,6 m und eine Fläche von jeweils ca. 2 m².

Zu 2.) Mit 4,2 m² Fläche sind die Panele von einem Volumen von 0,84 m³ Trockeneis bedeckt. Dieses hat eine Masse von rund 1,3 t, was durchaus bedenklich für die Stabilität der Panele von Phoenix ist.

Zu 3.) Das Sonnenlicht fällt zu Beginn des Marssommers zur Mittagszeit am steilsten auf die Panele, was die größte Leistungsaufnahme ermöglicht. Bei einer Breite von 68° und einer Achsneigung des Mars von 25° ergibt sich eine Mittagshöhe der Sommeranfangssonne von $(90^\circ - 68^\circ) + 25^\circ = 47^\circ$.

Die marsianische Solarkonstante ist um den Faktor $(1/1,5^2) \approx 0,44$ geringer als die Solarkonstante am Ort der Erde. (Für die Marsentfernung von der Sonne wird dabei 1,5 AE angenommen). Sie beträgt also $1367 \text{ W/m}^2 \cdot 0,44 \approx 600 \text{ W/m}^2$. Die Sonnenpanele von Phoenix können also bei einem Einfallswinkel in Bezug zur Senkrechten von $90^\circ - 47^\circ = 43^\circ$ maximal eine Leistung von rund 460 W ($\cos(43^\circ) \cdot 600 \text{ W/m}^2 \cdot 4,2 \text{ m}^2 \cdot 0,25$) aufnehmen.