

Ein mögliches Monddorf beim Mondkrater Shackleton

In Bezug auf den Beitrag „Ein Blick in den Mondkrater Shackleton“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 5/2024, Rubrik „Nachrichten“, Brennpunkt 2308, WIS-ID: 1571242, Zielgruppe: Mittelstufe bis Oberstufe

Olaf Fischer

Der folgende WIS-Beitrag wendet sich einem Thema zu, welches die Schüler sehr begeistern kann und sie ihr Schulleben lang und darüber hinaus begleiten wird – der bevorstehende Aufbau von Stationen auf dem Mond. Es werden verschiedene Aspekte dieser sehr komplexen Unternehmung schülernah und fächerverknüpfend vorgestellt. Dabei geht es hier um die Auswahl möglicher Standorte in der Nähe des Südpols des Mondes und das Kennenlernen dieser Umgebung, wobei das Vorhandensein von Wasser und eine dauerhafte Energieversorgung eine wichtige Rolle spielen. Auch werden einige weitere Notwendigkeiten für das Leben und Arbeiten auf dem Mond angesprochen, wobei bauliche Aspekte thematisiert werden. In [Anregungen zu Aufgaben und Projekten](#) werden Bezüge zu Geografie, Mathematik, Physik und Technik hergestellt.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Kleinkörper, Raumfahrt	Mond, Mondkrater , Kraterbemessung , Shackleton , Mondstation , Regolith
Physik	Quantenphysik, Optik	Kosmische Strahlung , Strahlenschutz , Fresnellinse
Fächer- verknüpfung	Astronomie - Geografie Astronomie - Mathematik Astronomie - Technik	Mondkarten , Selenografie , Karten mit Höhenangaben , Grand Canyon Neigungswinkel , Volumenberechnung , Logarithmus Weltraumarchitektur , Sintern , Solarmodul , Bauaktivitäten auf dem Mond
Lehre Allgemein	Kompetenzen (Wissen, Erkenntnis und Kommunikation), Unterrichtsmittel	Schüler lösen Aufgaben und bearbeiten Projekte , Schüler recherchieren , Schüler präsentieren , Schüler experimentieren , Reliefmodell , Modell Mondstation , Vergleich zur Größenvorstellung , Karten und Bilder der Südpolregion des Mondes

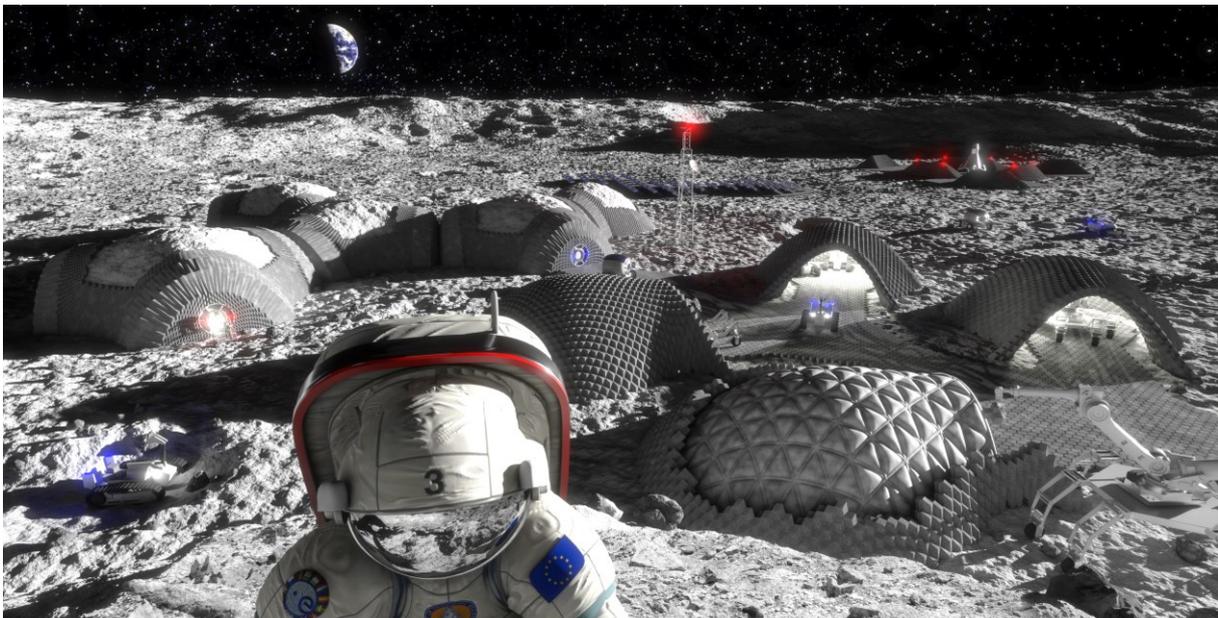


Abbildung 1: Vision von einer Mondstation, deren Aufbau in den nächsten zehn Jahren in Angriff genommen werden soll. Ein möglicher Ort für diese Station ist die Südpolregion des Mondes, wo es sowohl Orte mit ewigem Schatten und Wassereisresten als auch Orte mit fast durchgehender Sonnenbestrahlung, die für die Aufstellung von Solarzellen wichtig sind, gibt. Zum Schutz der Bewohner der Mondstation, muss diese mit einer dicken Schicht Mondmaterial bedeckt werden. Das Bauwerk selbst soll durch 3-D-Druck mit „Mondbeton“ hergestellt werden. ©: ESA, RegoLight, visualisation: Liquifer Systems Group, 2018 - https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/Off-Earth_manufacturing_using_local_resources_to_build_a_new_home, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=93982732>.

Einführung

Nach vielen Jahren der Ruhe ist der Mond wieder in den Fokus von bemannten Raumfahrtprogrammen gerückt. Grund dafür ist sicher auch die Einsicht, dass der favorisierte Mars zurzeit einen zu großen Schritt mit vielen Unwägbarkeiten darstellt und man mit einer Mondstation viele Erfahrungen sammeln kann, die für einen längeren Aufenthalt fernab der Erde grundlegend wichtig sind.

Zu diesen Erfahrungen kommt diejenige mit einem außerirdischen Weltraumbahnhof hinzu. Zudem gibt es auf dem Mond Bodenschätze, deren Gewinnung lohnen würde. Genannt sei hier nur Helium 3. Und schließlich eignet sich der Mond als Forschungsstandort, z. B. um ungestört den Radiohimmel zu beobachten. Wer mehr über Gründe für die Raumfahrt wissen will, dem sei Quelle [5] empfohlen.

Eine bemannte Station auf einem anderen Himmelskörper muss etliche Anforderungen erfüllen. Man braucht eine sichere Unterkunft zum Wohnen und Arbeiten, die zu großen Teilen mit Mondmaterial hergestellt werden sollte. Vor Ort sollten die Erzeugung/Aufbereitung von Atemluft, Trink- und Brauchwasser, Nahrungsmitteln, Energie und Treibstoff gewährleistet sein. Bewegung und Transport von Materialien und Personen müssen einfach und gefahrlos möglich sein.

Bemannte Mondprogramme gibt es mittlerweile verschiedene. Die USA (NASA) startete 2019 das Artemis-Programm, das mit internationalen Partnern, die schrittweise dazukamen (auch D), durchgeführt wird. 2021 verlautbarte China eine Initiative zum Aufbau einer Internationalen Mondforschungsstation, der sich mittlerweile auch etliche internationale Partner (auch Russland) angeschlossen haben. Zudem kündigte Russland 2023 auch den Bau einer eigenen Mondbasis an.

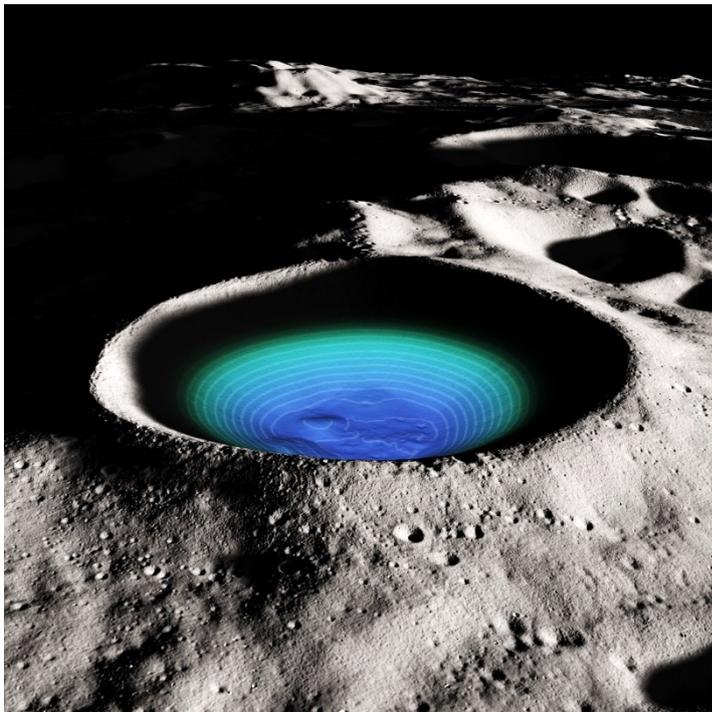


Abbildung 2: Schrägblick auf und in den Shackleton-Krater (Durchmesser: ca. 21 km, Tiefe: ca. 4,2 km ab Kraterrand). Die Höhenlinien (Blau bis violett: -2,5 bis -2,8 km, Grün: -2,2 bis -2,5 km) deuten die große Tiefe des Kraters an. Ein großer Teil des Kraterinnenraums wird niemals von der Sonne beschienen. ©: NASA's Scientific Visualization Studio, <https://svs.gsfc.nasa.gov/4716>.

Als ein möglicher Standort für eine Mondstation bietet sich aus wichtigen logistischen Gründen (siehe dazu weiter oben) das Umfeld des am Mondsüdpol befindlichen **Shackleton-Kraters** an. Dieser Einschlagkrater wurde 1994 von der IAU zur Erinnerung an den britischen Südpol-Forscher **Ernest Shackleton** (1874-1922) benannt.

Der Aufbau einer Mondstation ist für Kinder und Jugendliche (und auch für Erwachsene) meist ein unheimlich spannendes Thema, insbesondere wenn dieser in ihrer „Jetzt-Zeit“ geschieht. Science-Fiction wird auf einmal zur Realität.

Für die Schule ergeben sich viele motivierende Anknüpfungspunkte, die für den Unterricht eingesetzt werden können.

Übersicht zu Aufgaben- und Projektideen im WIS-Beitrag

Aufgaben

- [Kleine selenografische Erkundungsaufgaben](#)
- [Aufgabe: Hangneigung des Shackleton-Kraters](#)
- [Aufgabe: Mögliche Wassermenge im Kraterboden](#)
- [Aufgabe: Dauerschatten](#)
- [Aufgabe: Licht am Südpol des Mondes](#)
- [Aufgabe: Strahlenschutz*](#)
- [Aufgabe: Sinter-Produkte](#)

Projekte

- [Projektaufgabe: Reliefmodell](#)
- [Projekt: Projektierung Monddorf](#)
- [Projekt: Fresnellinse und Straßenbau auf dem Mond](#)

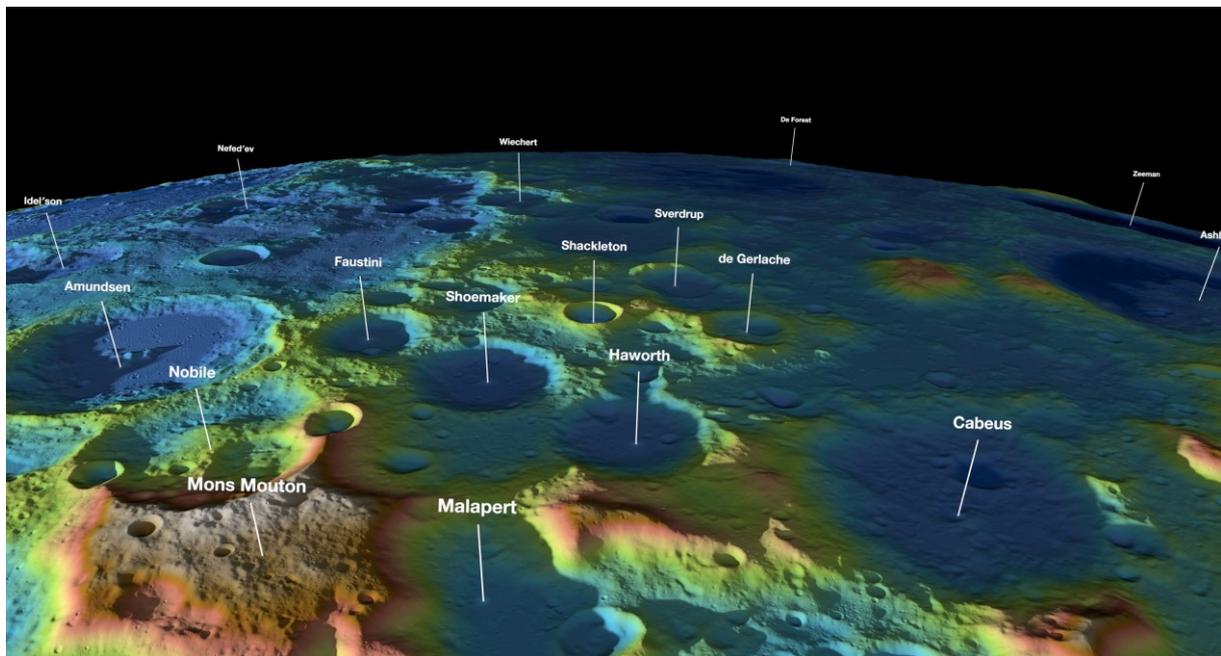


Abbildung 3: Schrägansicht auf die Umgebung des Südpols des Mondes mit Farbcodierung der Höhen und der Benennung von 29 Kratern und eines Berges (Mons Mouton). ©: NASA's Scientific Visualization Studio - Ernie Wright, Alex Kekesi, Noah Petro, David Ladd, Ian Jones, Laurence Schuler - Lunar South Pole Terrain in Coded Color, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=137009685>.

[zurück zum Anfang](#)

Mit Karten und Bildern die Südpol-Gegend des Mondes erkunden und modellieren

So wie die Erdoberfläche durch die Geografie erfasst, beschrieben und erklärt wird, so tut dies die Selenografie für den Mond. Im Folgenden sollen **Karten der Südpolregion des Mondes** ausgewertet und als Grundlage für eine Relief-Modellierung, die zur Vorbereitung einer Mondmission nützlich sein kann, dienen.

Kleine selenografische Erkundungsaufgaben

- Bei welcher Höhe befindet sich der Südpol des Mondes? Siehe dazu in Abb. 8.
- Welche selenografischen Koordinaten und welche Ausmaße hat der bei 135° West in Abb. 8 sichtbare etwa 1900 m hohe Gipfelbereich des Berges nahe dem Shackleton-Krater. Siehe dazu auch in Abb. 6.

Projektaufgabe: Reliefmodell

Modelliere auf Grundlage einer Höhenlinienkarte (im Abb. 8) mit Hilfe von dünnen Platten (Styropor, Sperrholz, Pappe, ...) das Oberflächenrelief der in Abb. 7 ersichtlichen Südpolregion des Mondes (siehe Beispiel in Abb. 5). Die Dicke der Platten hängt vom gewählten Maßstab ab. So z. B. müsste beim Maßstab 1:50.000 (20 km in Realität → 40 cm im Modell) für einen Höhenzuwachs von 200 m die Plattendicke 4 mm sein. Markiere auf dem Relief die Position des Südpols und die in Abb. 7 gezeigten Orte für eine mögliche Mondlandung im Rahmen der Artemis-Mission. Da die **topografische Karte mit Höhenangaben** in Abb. 8 den Shackleton-Krater nicht komplett erfasst, müssten die Höhen extrapoliert werden. Dazu kann Abb. 6 herangezogen werden.



Abbildung 4: Mondgloбус im Museum für Naturgeschichte der Universität von Porto. Der Südpol des Mondes ist unten ersichtlich. Er liegt am Rande eines großen Einschlagbeckens (Südpol-Aitken-Becken, Durchmesser: 2500 km).
©: CC BY-SA 2.0, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20200130_PortoUni_3322_\(49650928986\).jpg#/media/File:20200130_PortoUni_3322_\(49650928986\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20200130_PortoUni_3322_(49650928986).jpg#/media/File:20200130_PortoUni_3322_(49650928986).jpg).

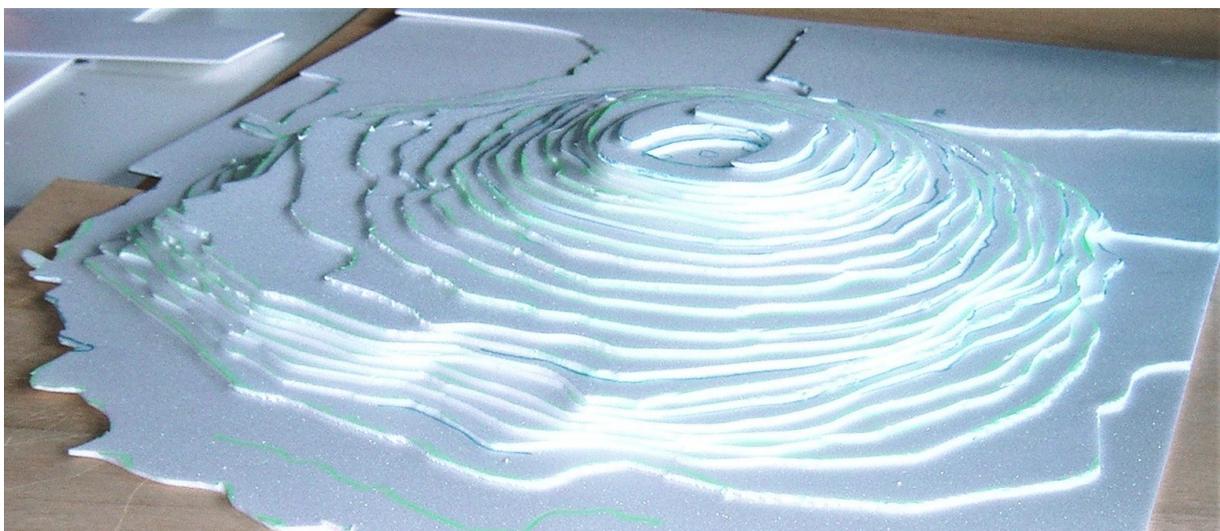


Abbildung 5: Reliefmodell des Marsvulkans Olympus Mons, hergestellt aus dünnen gestapelten Styropor-Platten, die auf Grundlage eines Höhenlinienbildes ausgeschnitten wurden. Das Modell wurde von Schülern der Klassenstufen 8 bis 10 im Rahmen der Junior-Akademie Baden-Württemberg 2011 hergestellt. ©: O. Fischer.

[zurück zum Anfang](#)

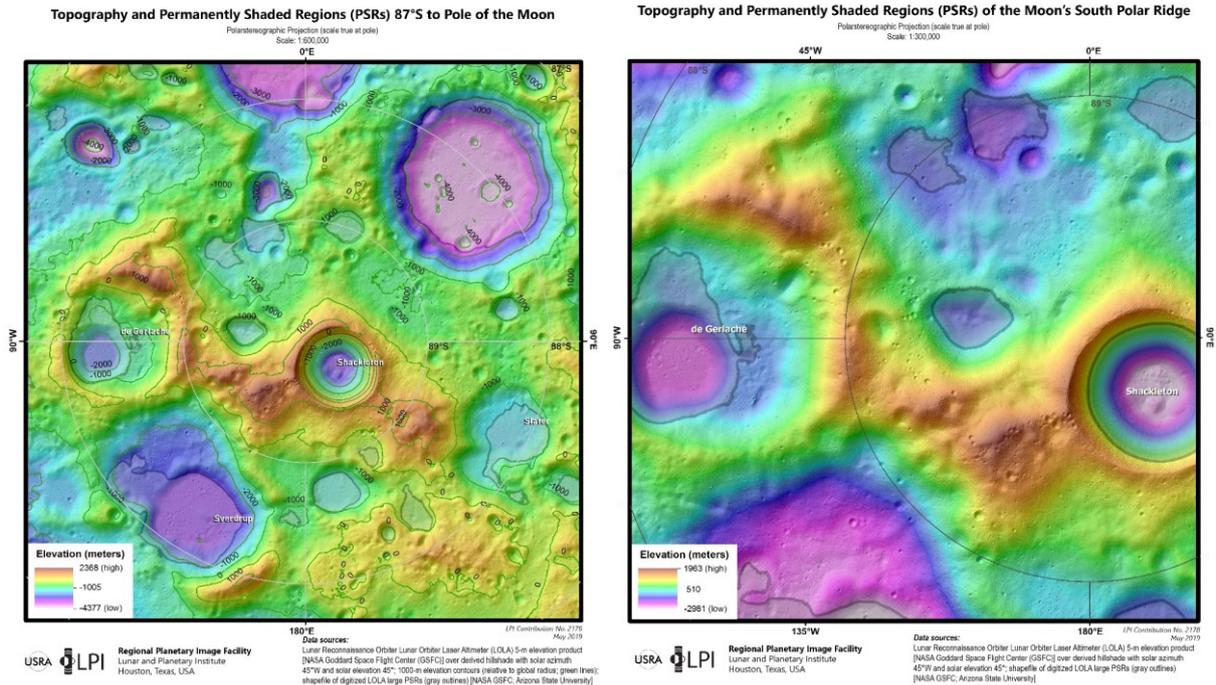


Abbildung 6: Auf Grundlage von Daten der Lunar Reconnaissance Orbiter-Kameras und der Höhendaten des Lunar Orbiter Laser Altimeters wurden die beiden topografischen Karten der Südpolregion des Mondes erzeugt. Karte links bis zur lunaren Breite von 87° Süd ©: Stopar J. and Meyer H. (2019) Topography and Permanently Shaded Regions (PSRs) 87°S to Pole of the Moon, Lunar and Planetary Institute Regional Planetary Image Facility, LPI Contribution 2176, <https://repository.hou.usra.edu/handle/20.500.11753/1261>. Karte rechts: bis zur lunaren Breite von 88° Süd in West-Richtung) mit Höhenlinien. ©: Stopar J. and Meyer H. (2019) Topographic Map of the Moon's South Polar Ridge, Lunar and Planetary Institute Regional Planetary Image Facility, LPI Contribution 2177, <https://repository.hou.usra.edu/handle/20.500.11753/1262>. Die dauerhaft im Schatten liegenden Gebiete sind grau umrandet. ©: Lunar South Pole Atlas, foreword by Julie D. Stopar and David A. Kring, <https://www.lpi.usra.edu/lunar/lunar-south-pole-atlas/>.

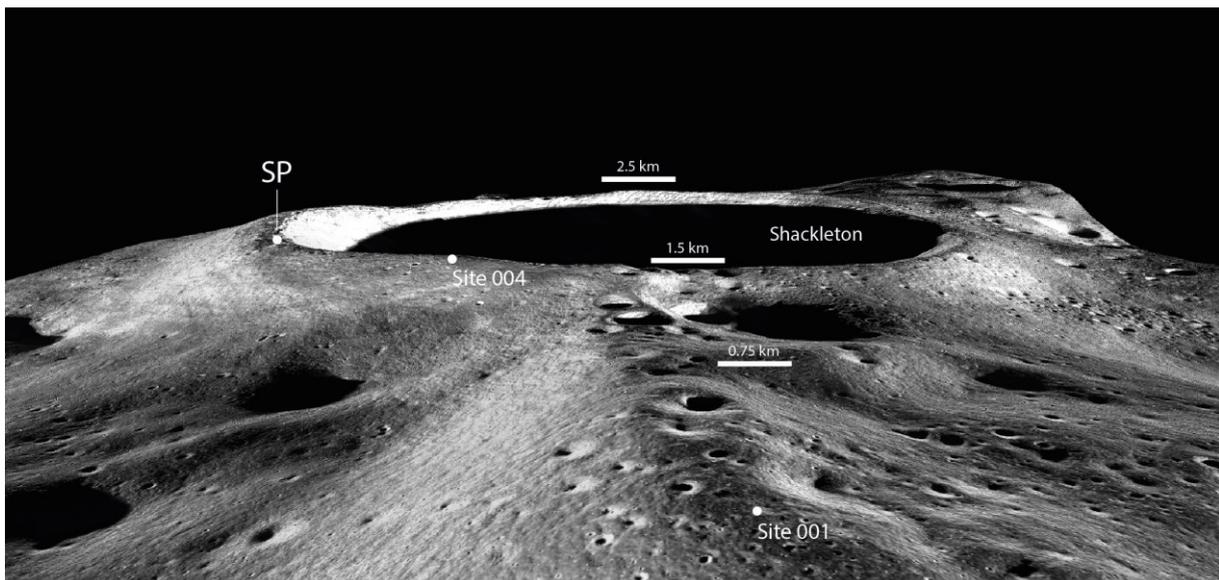
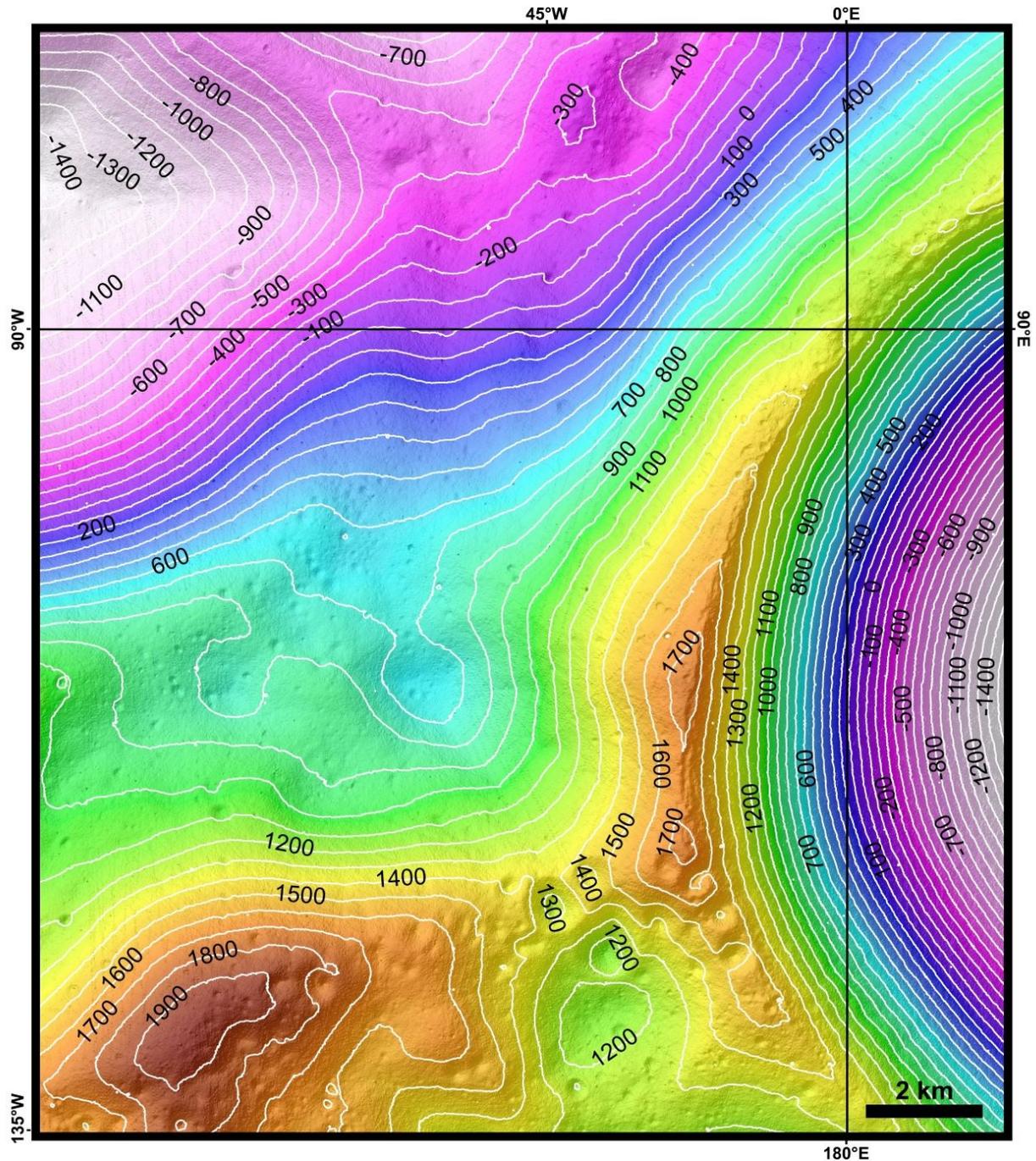


Abbildung 7: Auf Grundlage von Daten der Lunar Reconnaissance Orbiter-Kamera und der Höhendaten des Lunar Orbiter Laser Altimeters wurden die folgenden, einen räumlichen Eindruck vermittelnden „Schrägansichten“ des Mondkraters Shackleton erzeugt. Der Rand des Shackleton-Kraters befindet sich auf dem Südpol des Mondes (SP). Der Krater liegt auf dem Grat einer Bergkette (im Vordergrund des Bildes unten), die sich am Rande des riesigen Südpol-Aitken-Beckens (Durchmesser: 2500 km) befindet (vergleiche auch mit Abb. 2). ©: Lunar South Pole Atlas, foreword by Julie D. Stopar and David A. Kring, <https://www.lpi.usra.edu/lunar/lunar-south-pole-atlas/>.

Topographic Contour Map of the Moon's South Pole Ridge

Polarstereographic Projection
Contours: 100 m



Data Sources:

Lunar Reconnaissance Orbiter Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA)
5-m elevation product [NASA Goddard Space Flight Center] over
derived hillshade with solar azimuth 45°W and solar elevation 45°.
High elevation: red and orange; Low elevation: purple and white.

Abbildung 8: Topografische Karte der Westregion des Shackleton-Kraters mit Colorierung und Konturlinien zur Verdeutlichung der Höhen. ©: A product of the Exploration Science Summer Intern Program: Kathryn McCanaan, Venkata Satya Kumar Animireddi, Natasha Barrett, Sarah Boazman, Aleksandra Gawronska, Cosette Gilmour, Samuel Halim, Harish, Jahnavi Shah, and David Kring. LPI Contribution No. 2213, <https://repository.hou.usra.edu/handle/20.500.11753/1326>, <https://www.lpi.usra.edu/lunar/lunar-south-pole-atlas/>.

Geometrie des Shackleton-Kraters

Der Shackleton-Krater gehört zu den tiefsten Kratern in der Südpol-Region des Mondes. Er ist deutlich tiefer als der Grand Canyon (siehe Abb. 11).

Sein Krater hat einen Durchmesser von $D \approx 21$ km und eine Tiefe von $H \approx 4,2$ km. In Bezug zum Oberflächenniveau vor dem Einschlag ist er nur ca. 2 km tief (siehe auch Abbildungen 9 und 10).

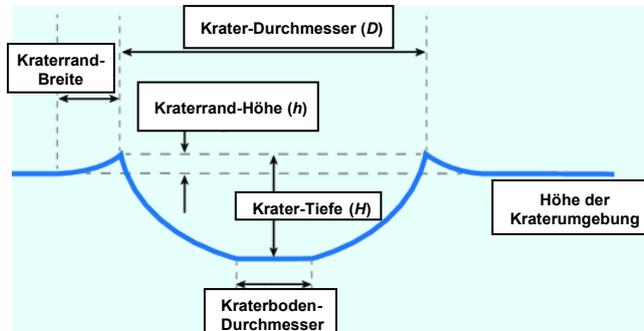


Abbildung 9: Verschiedene Kraterabmessungen. ©: Robert Scott, Physics Education 48(4):512, übersetzt.

Aufgabe: Hangneigung des Shackleton-Kraters

Abb. 10 zeigt einen vereinfachten schematischen Querschnitt durch den Shackleton-Krater. Um ins Kraterinnere zu kommen, muss man den inneren Kraterhang überwinden. Um größere Strecken zurückzulegen und große Massen zu transportieren, benötigt man dazu die passende Technik. Zudem könnte die Gefahr von rollenden Steinen bestehen.

Als Beispiel: Von der Bergwaldbewirtschaftung her weiß man, dass ab einer Hangneigung von 35 Prozent Radfahrzeuge kaum noch einsetzbar sind. Bis zu einer maximalen Neigung von 65 % können dann spezielle Raupenharvester eingesetzt werden. Die Gefahr der Mobilisierung von Steinen aus dem Boden besteht, wenn die Hangneigung $> 35^\circ$ ist.

Bestimme (Winkelmessung oder Berechnung auf Grundlage der Messungen von Hanghöhe und Hangbreite) den **Neigungswinkel** und daraus die Neigung in Prozent für den inneren Hang des Shackleton-Kraters.

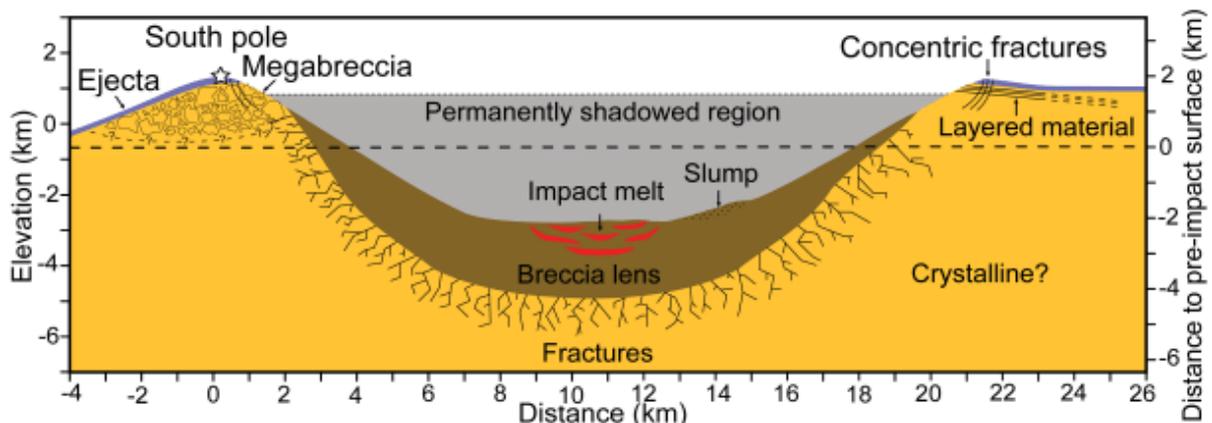


Abbildung 10: Schematischer Querschnitt des Shackleton-Kraters. ©: Harish und Mitarbeiter: "TWO TYPES OF TERRAIN EXPOSED IN THE UPPER CRATER WALL OF SHACKLETON CRATER, LUNAR SOUTH POLE: IMPLICATIONS FOR FUTURE LANDINGS", 51st Lunar and Planetary Science Conference (2020).

[zurück zum Anfang](#)

Um die Ausmaße und Besonderheiten von Oberflächenmerkmalen auf anderen Himmelskörpern in erster Näherung zu erahnen, bieten sich **Größenvergleiche** mit irdischen Objekten (die zum möglichen Erfahrungsraum der Menschen gehören) an. Abb. 11 zeigt einen **Vergleich des Shackleton-Kraters mit dem Grand Canyon**.

SHACKLETON CRATER vs. GRAND CANYON

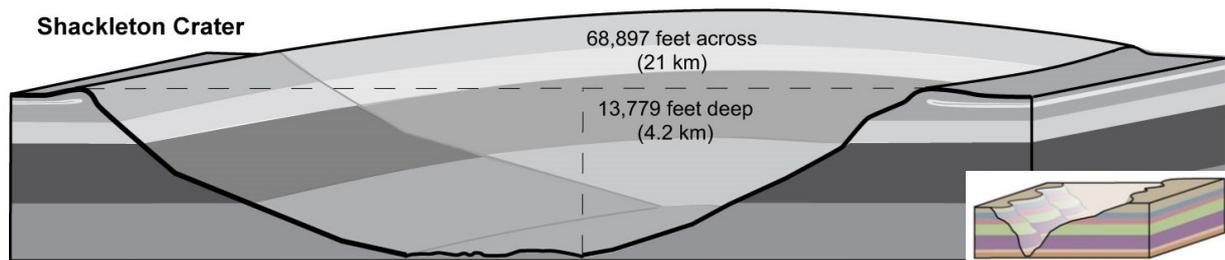
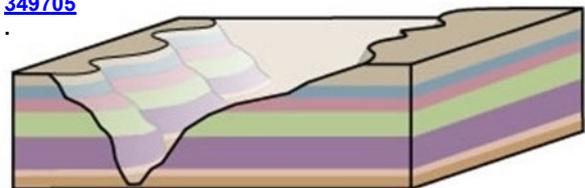


Abbildung 11:
Oben: Querschnitt des Shackleton-Kraters im Größenvergleich zum Grand Canyon. ©: LPI/CLSE, <https://www.lpi.usra.edu/lunar/lunar-south-pole-atlas/images/150dpi/shackleton-crater.jpg>.
Unten: Grand Canyon – das bis zu 1,3 km tiefe Tal des Flusses ‚Colorado‘. ©: By Mferbfriske - Grand Canyon National Park Arizona, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=109349705>



Aufgabe: Mögliche Wassermenge im Kraterboden

Die Suche nach Wasservorkommen und nach technischen Möglichkeiten zu deren „Abbau“ (man spricht von „water mining“) ist eine der planerischen Aufgaben, die die gegenwärtige Vorbereitungsphase zur Errichtung der Mondstationen durch die verschiedenen Akteure (siehe Einleitung) bestimmt.

Berechne aus folgenden groben Angaben das im Shackleton-Krater möglicherweise vorhandene **Wasservolumen!**

Der Shackleton-Krater hat einen relativ glatten Rand und eine einfache Wallwölbung, wobei im Zentrum ein etwa flacher Boden mit ca. 7 km Durchmesser erkennbar ist (siehe Abb. 10). Es wird hier angenommen, dass der Kraterboden 0,05 % Wasser bis in eine Tiefe von 2 km enthält

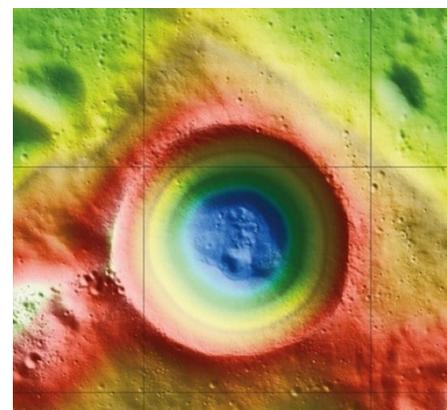


Abbildung 12: Shackleton-Krater mit farbcodierter Höheninformation. Der flache Kraterboden ist blau eingefärbt.
©: NASA / Zuber, M.T. et al., Nature, 2012.

Licht und Schatten am Südpol des Mondes

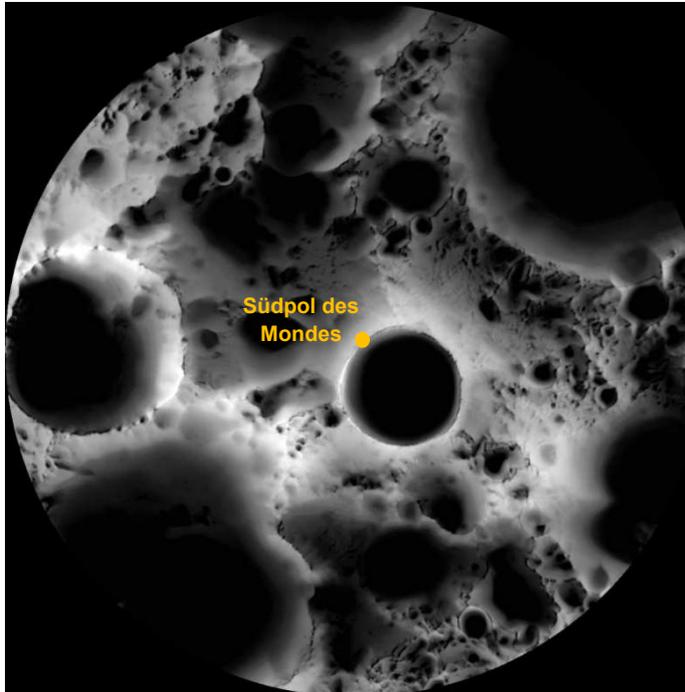


Abbildung 13: Licht-/Schattenverhältnisse am Südpol des Mondes. Das Bild entstand als Summe von 1700 Einzelbildern, die im Laufe von 6 Monaten aufgenommen wurden. Je schwärzer ein Gebiet erscheint, desto schattiger ist es dort. Der im Zentrum befindliche Shackleton-Krater erscheint deutlich am „finstersten“.

©: NASA / GSFC / Arizona State Univ. / Lunar Reconnaissance Orbiter, [https:// apod.nasa.gov/apod/ap110423.html](https://apod.nasa.gov/apod/ap110423.html).

Schatten

An den Polen des Mondes beleuchtet die Sonne die Oberfläche unter einem sehr kleinen Winkel (max. ca. 6° : 5° Neigungswinkel der Mondbahn + 1° Neigungswinkel der Rotationsachse des Mondes zu seiner Bahnebene), so dass ihr direktes Licht den Grund vieler Krater nicht erreichen kann (siehe dazu Abb. 13).

Diese dauerhaft im Schatten befindlichen Regionen gelten als potentielle Reservoirs von Wasser, welches vermutlich noch aus der Zeit des großen Bombardements in der Frühzeit des Sonnensystems stammt.

Bei der spektroskopischen Untersuchung von durch den gezielten Absturz eines Satelliten aufgewirbelten Mondstaub konnte man darin enthaltenes gefrorenes Wasser entdecken. Auf Grundlage der dabei gefundenen Wassermenge wurde für die Krater des Mondesüdpols insgesamt eine Gesamtwassermenge von 50 Mrd m^3 abgeschätzt [4].

Aufgabe: Dauerschatten

Im italienischen Bergdorf Viganella steigt die Sonne zwischen dem 12. November und 1. Februar für 83 Tage nicht über die Berggipfel. Daher galt das Dorf als der dunkelste Ort Italiens

Finde in deinem Heimatort im Umfeld eines Gebäudes einen Platz, der das ganze Jahr hinweg nicht oder nur für kurze Zeit von der Sonne beschienen wird! Beschreibe diesen Ort. Diskutiere Gebäudeorientierungen und -grundrisse, die Dauerschatten (phasenweise oder immer) zur Folge haben. Wie könnte trotzdem Sonnenlicht an diese Orte gelangen?

Licht

Ein polnaher Ort der Mondstation hat neben dem Dauerschatten im Inneren der Krater auch die Konsequenz, dass es Orte auf höher gelegenen Kraterrändern oder Hochebenen gibt, die beinahe durchgängig von der Sonne beschienen werden. Diese Orte eignen sich sowohl für den Aufbau der Mondstation als auch für die Aufstellung von Solarkraftwerken. Der tiefe Sonnenstand ermöglicht die senkrechte Installation der Solar-Paneele (siehe Abb. 14 und 15).



Abbildung 14: Argonaut-Lander der ESA. ©: ESA, https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/10/What_is_Argonaut.

Aufgabe: Licht am Südpol des Mondes

Für eine Mondstation ist eine zuverlässige lückenlose Energieversorgung ganz wesentlich.

Im Gegensatz zur Erde, wird der Mond ohne atmosphärische Beeinflussung von der Sonne beschienen. Doch auch auf dem Mond gibt es Tag und Nacht. Eine beinahe lückenlose Energieversorgung aus dem Nahfeld einer Mondstation ist aber an den Mondpolen möglich.

- Skizziere die Situation, bei der der Gipfel eines Mondbergs in der Nähe des gerade von der Sonne abgewandten Mondsüdpols trotzdem von der Sonne beschienen wird!
- Angenommen, die Mondstation hat einen Bedarf an elektrischer Leistung wie die ISS ($P=110\text{ kW}$). Welche Fläche an **Solarmodulen** wird bei senkrechter Bestrahlung der Module benötigt? Die neuesten Solarzellen haben einen Wirkungsgrad von $\eta = 26\%$. Die Solarkonstante hat auf dem Mond im Mittel etwa den Wert wie an der oberen Kante der Erdatmosphäre ($S_0 = 1361\text{ W/m}^2$).
- In Abb. 16 wird die mittlere Temperatur der Mondoberfläche an der Südpolregion des Mondes, die aus der Bestrahlung oder fehlenden Bestrahlung resultiert, in einer farbcodierten topografischen Karte angezeigt. Markiere in der Karte aus Abb. 7 gezeigten möglichen Orte für eine Mondstation des Artemis-Programms und lese die Temperatur ab. Im Einschubbild werden die sogenannten Sublimationstemperaturen für bestimmte Stoffe angezeigt. Um welche Stoffe handelt es sich und wie ließen sie sich nutzen? Informiere dich über die Bedeutung des Begriffs ‚Sublimation‘! An welcher Stelle bist du diesem Vorgang schon einmal begegnet?

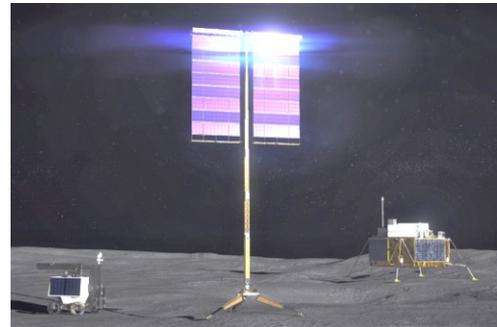


Abbildung 15: In Polnähe können die Solarmodule senkrecht aufgestellt oder angebracht werden. ©: NASA

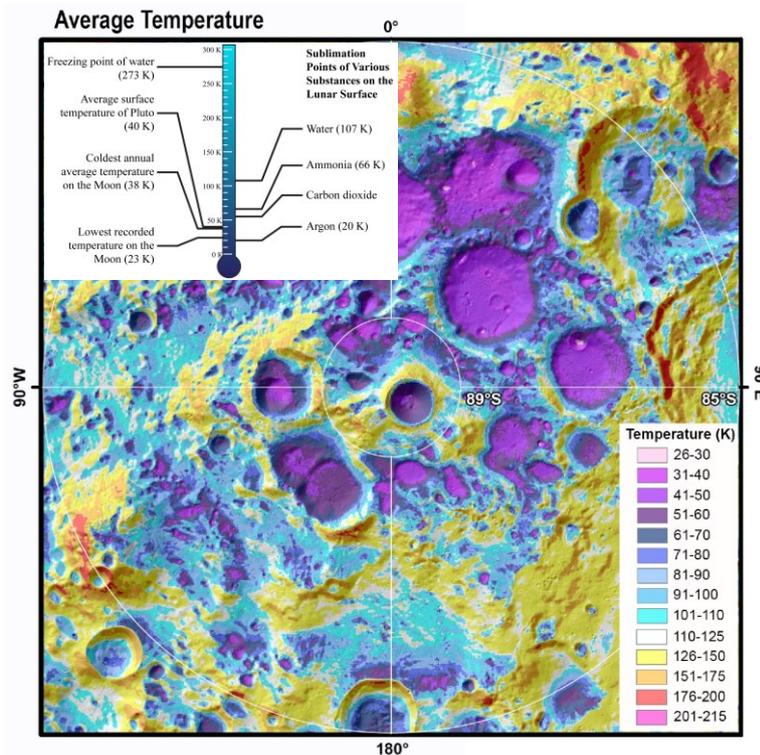


Abbildung 16: Temperaturverteilung (mittlere Temperatur) im Umfeld des Mondsüdpols gemessen mit einem Radiometer an Bord des Lunar Reconnaissance Orbiters. ©: Stopar J. (2019) Near-Surface Temperatures Modeled at the Moon's South Pole (85°S to Pole), Lunar and Planetary Institute Regional Planetary Image Facility, LPI Contribution 2216, <https://repository.hou.usra.edu/handle/20.500.11753/1336>.
Einschubbild: Sublimationstemperaturen für verschiedene flüchtige Stoffe. ©: LPI/CLSE.

Anforderungen an ein Monddorf und dessen Aufbau

Die Idee einer dauerhaft von Menschen betriebenen **Mondstation** (die man auch als Mondbasis, lunaren Außenposten oder Monddorf bezeichnen kann) geistert schon lange durch die Köpfe der Menschen. Ihren Anfang nahm sie wohl in Literatur und Kunst. Mittlerweile ist diese Idee aber bei Wissenschaftlern und Ingenieuren angekommen und der Start ihrer Realisierung steht kurz bevor.

Ein wichtiger Grundsatz für den Aufbau des Monddorfs und die Beschaffung aller Ausrüstungsgegenstände ist, dies soweit es geht mit Mondmaterial zu tun.

Unterkünfte zum Leben und Arbeiten auf dem Mond

Im WIS -Beitrag "Mondhöhlen? Die Idee von Plätzen zum Leben auf dem Mond" von Stephan Edinger [2] klingen schon erste Ideen zu Räumlichkeiten für ein Monddorf an. Eine Höhle in der Mondkruste könnte hilfreich sein, wenn ihr Ort auch andere logistische Notwendigkeiten erfüllt. Ansonsten gilt es, die Räume selbst zu schaffen. An erster Stelle steht dabei immer die Sicherheit der Astronauten, Kosmonauten und Taikonauten.

Die größte Gefahr für die Menschen auf dem Mond besteht darin, dass sie dort dauerhaft der **kosmischen Strahlung** wie auch dem Sonnenwind ausgesetzt sind. Diese Strahlung ist im Prinzip sehr energiereiche radioaktive Strahlung, die von fernen kosmischen Explosionsereignissen oder Eruptionsereignissen in der Sonnenatmosphäre ausgeht. Die biologisch gewichtete Strahlendosis pro Zeiteinheit beträgt etwa 60 Mikrosievert pro Stunde. Damit ist die Strahlenbelastung auf der Mondoberfläche ca. 200-mal höher als auf der Erde. Zudem gelangen Meteoroiden ungebremst auf die Mondoberfläche.

Die Habitate (Wohn- und Arbeitsräume) auf dem Mond müssen also dicke Ummantelungen z. B. aus „Mondbeton“ + Mondmaterial (Regolith) wie in Abb. 17 gezeigt erhalten.

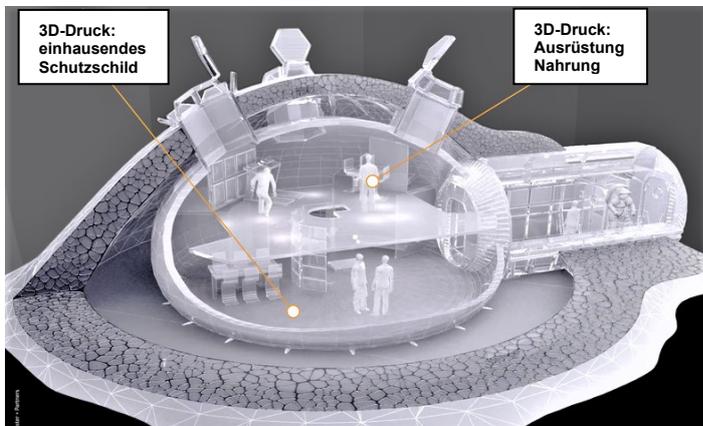


Abbildung 17: Ein neues Projekt der ESA untersucht die Möglichkeiten mittels 3D-Druck sowohl ein Habitat mit einhausendem Schutzschild als auch die nötigen Ausrüstungsgegenstände und selbst die Nahrung herzustellen.

©: ESA, CC BY-SA IGO 3.0, CC BY-SA 3.0 Igo, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=72699768>.

Aufgabe: Strahlenschutz*

- Für Menschen, die beruflich radioaktiver (ionisierender, den Körper schädigender) Strahlung ausgesetzt sind, gilt zur Zeit in Europa ein Grenzwert von 20 mSv pro Jahr (https://www.bfs.de/DE/themen/ion/strahlenschutz/beruf/grenzwerte/grenzwerte_node.html). Auf dem Mond beträgt die biologisch gewichtete Strahlendosis pro Zeiteinheit etwa 60 Mikrosievert pro Stunde. Wie lange darf sich ein auf dem Mond tätiger Mensch innerhalb eines Jahres (möglichst gut verteilt über das Jahr) dort im Freien aufhalten?
- Zur Schwächung von Gamma-Strahlung mit einer Energie von 5 MeV genügt eine 10 cm dicke Betonschicht, um ihre Intensität zu halbieren (<https://de.wikipedia.org/wiki/Halbwertsschicht>). Welche Wanddicke wäre nötig, um die Strahlungsintensität auf ein Hundertstel zu reduzieren?

* Der Mondstaub selbst ist ein sehr ernst zu nehmendes Problem für Mensch und Technik. So bezeichnete Apollo-17-Astronaut Eugene Cernan den Mondstaub als „wahrscheinlich einen unserer größten Hemmfaktoren für eine nominelle Operation auf dem Mond.“

Projekt: Projektierung Monddorf

Betätige dich als **Weltraum-Architekt** und projettierte ein Monddorf mit all seinen im Folgenden genannten Notwendigkeiten, über deren spezielle Anforderungen du dich gut informieren musst. Es gilt der Grundsatz, dass soweit möglich alle nötigen Materialien vom Mond selbst stammen müssen. Notwendigkeiten an das Monddorf sind: den Umweltbedingungen angepasste sichere Unterkünfte und Arbeitsstätten, Verfügbarkeit von Wasser, dauerhafte Energieerzeugung, Erzeugung von Atemluft, Selbstversorgung mit Nahrungsmitteln, Anlegen von Wegen und Straßen, Absicherung der Kommunikation, Herstellung von Raketentreibstoff, Herstellung fast aller Hilfsmittel mit den Rohstoffen vor Ort, Die Projektplanung sollte auf jeden Fall in einer technischen Zeichnung, die durch ein Begleitheft mit ausführlichen Erläuterungen ergänzt wird, vorliegen. Eine praktische Ergänzung durch ein Modell kann erfolgen (siehe Abb. 18). Die **Projektidee** ist abschließend zu **verteidigen**.

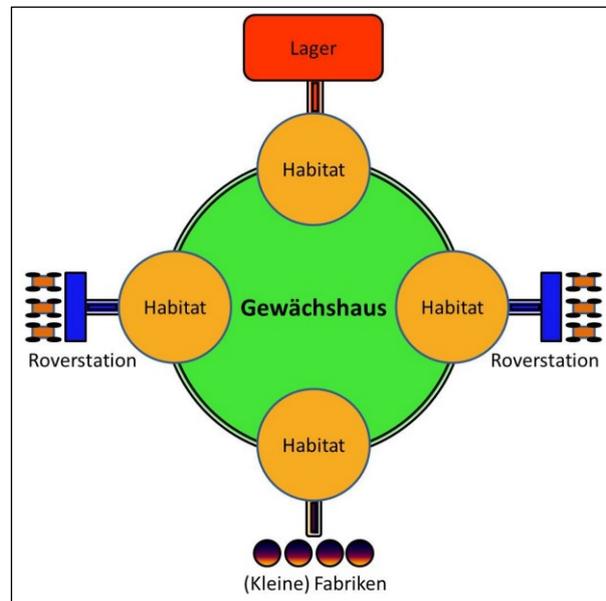


Abbildung 18: Entwürfe von Stationen für den Mars, die bei Astronomiekursen der Juniorakademie Adelsheim 2011 (links) und der Deutschen Schülerakademie Rostock 2012 (rechts) durch teilnehmende Schüler in der Rolle als „Weltraumarchitekten“ entworfen wurden. ©: DSA.

Baustoffe auf dem Mond

Eine Idee, bei der zumindest ein Großteil der Materialien vom Mond stammt, ist die Nutzung von Polymerbeton, der als Hauptbestandteil das Material des Mondbodens (Regolith) und als Bindemittel Polyesterharz oder Epoxidharz nutzt. Auf der Erde verwendet man z. B. eine absolut trockene Quarzsandmischung und lösemittelfreies Epoxidharz im Verhältnis 10:1.

Doch die Baustoffe zum Bau der Habitate auf dem Mond sollten möglichst vollständig vom Mond selbst stammen, um den äußerst teuren Transport von der Erde zu vermeiden. Deshalb wurde und wird nach Methoden gesucht, um den Regolith zu Bauteilen zu verfestigen. Dafür hat man entweder das Aufschmelzen oder das weniger Energie benötigende Sintern im Auge (siehe [7] und Abb. 19).

[zurück zum Anfang](#)



Abbildung 19: Links: Stein, der nach Erstarrung des Regoliths, welches durch einen Laser aufgeschmolzen wurde, entstanden ist. Rechts: "Ziegel", der durch Mikrowellen-Sinterung von Regolith entstanden ist.

©: NASA

Sintern:

Beim Sintern verfestigt man feinkörnige oder pulverige Stoffe (denen man zuvor schon eine Form gegeben hat) durch Wärmebehandlung, wobei bei einem Teilchengemisch nur Komponenten aufgeschmolzen werden. Voraussetzung ist, dass man zuvor einen guten Teilchenkontakt hergestellt hat. (siehe auch <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/sintern/8523>).

Aufgabe: Sinter-Produkte

Informiere dich über Objekte des Alltags, die durch Sintern entstanden sind und stelle diese vor!

Straßenbau auf dem Mond

Ein Monddorf erfordert vielerlei Transportaufgaben, für die sichere Wege und Straßen angelegt werden müssen, bei deren Nutzung das Aufwirbeln des für Mensch und Technik äußerst gefährlichen **Regolith-Staubs** vermieden wird. Neben Wegen geht es auch um Plätze für Starts und Landungen von Raumschiffen.

Für diesen Straßenbau werden mondaugliche Baumaschinen benötigt, die autonom (vollautomatisch) arbeiten können (siehe Abb. 20). Ihre Energie sollten diese Maschinen aus dem Sonnenlicht beziehen, welches in elektrische Energie umgewandelt wird, um die Antriebe und auch die Aggregate zur Regolith-Verfestigung (Laser, Mikrowelle) zu versorgen. Eine andere Idee zur Regolith-Verfestigung basiert auf einer sehr großen Fresnel-Linse, die das Sonnenlicht stark bündelt und im Brennggebiet der Linse den Regolith zumindest teilweise aufschmilzt.

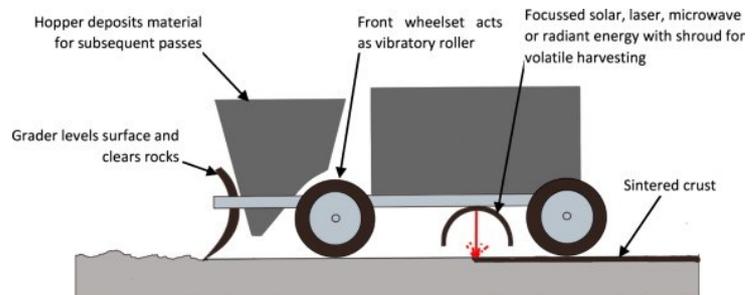


Abbildung 20: Links: Universelles Fahrzeug (Space Exploration Vehicle SEV) der NASA zur Baugrundvorbereitung (hier zur Einebnung). ©: NASA. Rechts: Autonomes Fahrzeugkonzept für den Straßenbau auf dem Mond durch das direkte Aufschmelzen oder Sintern von Regolith, ©: aus [7], Abb. 25.

[zurück zum Anfang](#)

Projekt: Fresnellinse und Straßenbau auf dem Mond

Ingenieure arbeiten u. a. an der Idee, um mit Hilfe einer sehr großen Fresnellinse den sehr staubigen Mondboden (man nennt ihn Regolith) aufzuschmelzen und so zu verfestigen und damit den gefährlichen Mondstaub zu binden (siehe <https://prophysik.de/nachrichten/stressen-aus-mondstaub-per-3d-druck>).

Informiere dich über verschiedene Anwendungen von Fresnellinsen.

Experiment:

Zeige mittels einer Fresnellinse die starke Bündelung des Sonnenlichts, die zum Aufschmelzen bestimmter Test-Materialien führen kann. **Variere** dabei auch die freie Öffnung der Fresnellinse.

Achtung: Bei diesem Versuch besteht die Gefahr der Verbrennung bzw. der Auslösung eines Brandes. Treffe alle Vorsichtsmaßnahmen.

Information:

Eine preiswerte Fresnellinse im XXL-Format lässt sich z. B. beim AstroMedia beschaffen. (<https://www.astromedia.de>)



Abbildung 21: Vergrößerter Ausschnitt von der Oberfläche einer Fresnellinse, die als Plastikfolie hergestellt wurde. ©: Almazi - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=25007060>.

Skizziere anknüpfend an Abb. 20 den veränderten und ergänzten Aufbau der Straßenbaumaschine für den Mond, wenn eine Fresnellinse zum Einsatz kommt.

Rechnung:

Berechne die Größe einer Fresnellinse, wenn die Bedingung erfüllt werden soll, dass in der Brennfläche der Fresnellinse die gleiche Leistungsdichte (auch bekannt als Bestrahlungsstärke mit der Einheit W/cm^2) erzeugt wird, wie in der „Brennfläche“ eines Lasers, der das bestrahlte Material aufschmilzt. Die erforderliche Leistungsdichte eines derartigen zum Schmelzschnneiden geeigneten Lasers beträgt im Allgemeinen $10^7 W/cm^2$. Berechne nun die Fläche einer Fresnellinse, die eine Brennfläche von $10 cm^2$ ermöglicht.

Quellenverzeichnis

- [1] Harish und Mitarbeiter: "TWO TYPES OF TERRAIN EXPOSED IN THE UPPER CRATER WALL OF SHACKLETON CRATER, LUNAR SOUTH POLE: IMPLICATIONS FOR FUTURE LANDINGS", 51st Lunar and Planetary Science Conference (2020)
- [2] Stephan Edinger: "Mondhöhlen? Die Idee von Plätzen zum Leben auf dem Mond", <https://www.spektrum.de/alias/material/mondhoehlen-die-idee-von-plaetzen-zum-leben-auf-dem-mond/1571202>
- [3] Lunar South Pole Atlas, foreword by Julie D. Stopar and David A. Kring <https://www.lpi.usra.edu/lunar/lunar-south-pole-atlas/>
- [4] <https://www.ardalpha.de/wissen/weltall/astronomie/mond/mond-wasser-h2o-geologie-104.html>
- [5] Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e.V.: "7 Gründe - Warum Deutschland Raumfahrt braucht", https://www.bdli.de/sites/default/files/2016-04/Sieben_Gruende_Warum_Deutschland_Raumfahrt_braucht.pdf.
- [6] Peter Skalfist: "Besiedlung des erdnahem Weltraums", Band 2 von Die Eroberung des Weltraums, Cambridge Stanford Books.
- [7] Kevin W. Farries et al.: "Sintered or melted regolith for lunar construction: state-of-the-art. Review and future research directions", in: Construction and Building Materials 296 (2021). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821013878>, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123627>.
- [8] Olaf Fischer: "Die Bestimmung der Solarkonstante - ein ‚Low cost‘-Versuch mit ‚Know how‘", WIS 6-2008, <https://www.spektrum.de/sixcms/media.php/1308/WIS-2008-06-OS-Solarkonstante.pdf>.

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 (fischer@hda-hd.de) senden könnten.

LÖSUNGEN

Kleine selenografische Erkundungsaufgaben

- Bei welcher Höhe befindet sich der Südpol des Mondes? Siehe dazu in Abb. 8.
→ ca. 1300 m
- Welche selenografische Koordinaten und welche Ausmaße hat der in Abb. 8 sichtbare etwa 1900 m hohe Gipfelbereich des Berges nahe dem Shackleton-Krater. Siehe dazu auch in Abb. 6.
→ ca. 89,5° S, ca. 135° W
→ ca. 2 km × 1 km

Aufgabe: Hangneigung des Shackleton-Kraters

Abb. 10 zeigt einen vereinfachten schematischen Querschnitt durch den Shackleton-Krater. Um ins Kraterinnere zu kommen, muss man den inneren Kraterhang überwinden. Um größere Strecken zurückzulegen und große Massen zu transportieren, benötigt man dazu die passende Technik. Zudem könnte die Gefahr von rollenden Steinen bestehen.

Als Beispiel: Von der Bergwaldbewirtschaftung weiß man, dass ab einer Hangneigung von 35 Prozent Radfahrzeuge kaum noch einsetzbar sind. Bis zu einer maximalen Neigung von 65 % können dann spezielle Raupenharvester eingesetzt werden. Die Gefahr der Mobilisierung von Steinen aus

den Boden besteht, wenn die Hangneigung $> 35^\circ$ ist.

Bestimme (Winkelmessung oder Berechnung auf Grundlage der Messungen von Hanghöhe und Hangbreite) den Neigungswinkel und daraus die Neigung in Prozent für den inneren Hang des Shackleton-Kraters.



→ Neigungswinkelberechnung:

$$\tan \alpha = \frac{g}{a} = \frac{4,6}{7,8} \approx 0,59 \rightarrow \alpha \approx 30,5^\circ$$

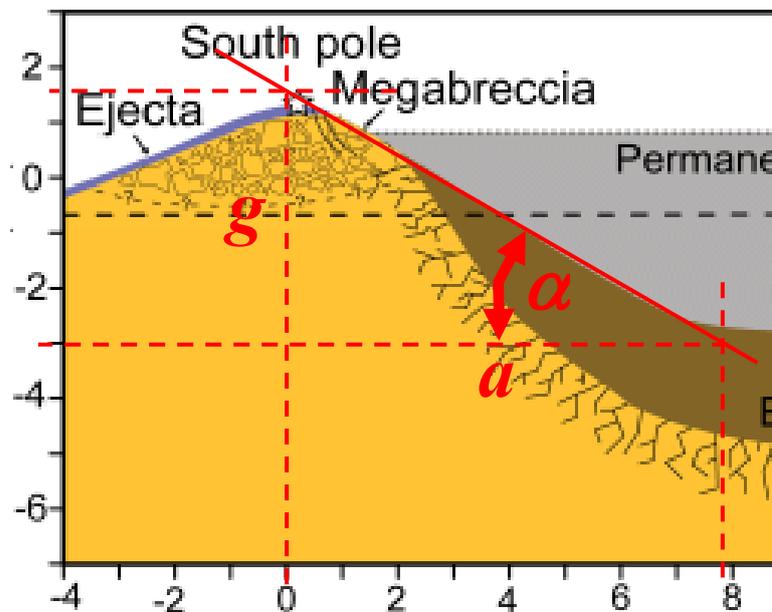
Hangneigung:

Auf 7,8 m in waagerechter Richtung wird eine Höhe von 4,6 m überwunden.

Damit werden auf 1 m in waagerechter Richtung

$$\frac{x}{1\text{m}} = \frac{4,6\text{ m}}{7,8\text{ m}} \rightarrow x \approx 0,59 \rightarrow 59\%$$

Um den Hang des Shackleton-Kraters zu befahren, sind also Raupenfahrzeuge nötig.



Aufgabe: Mögliches Wasser im Kraterboden

Die Suche nach Wasservorkommen und nach technischen Möglichkeiten zu deren „Abbau“ (man spricht von „water mining“) ist eine der planerischen Aufgaben, die die gegenwärtige Vorbereitungsphase zur Errichtung der Mondstationen durch die verschiedenen Akteure (siehe Einleitung) bestimmt.

Der Shackleton-Krater hat einen relativ glatten Rand und eine einfache Wallwölbung, wobei im Zentrum ein etwa flacher Boden mit ca. 7 km Durchmesser erkennbar ist.

Angenommen, dieser Kraterboden enthält 0,05 % Wasser bis in eine Tiefe von 2 km (siehe Abb. 10).

Berechne aus den groben Angaben die im Shackleton-Krater vorhandene Wassermenge!

- Die Wasser enthaltende Schicht wird als **Kreiszylinder** mit $d = 7$ km und $h = 2$ km betrachtet.

Ihr Volumen beträgt dann: $V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot (3,5 \text{ km})^2 \cdot 2 \text{ km} \approx 77 \text{ km}^3$.

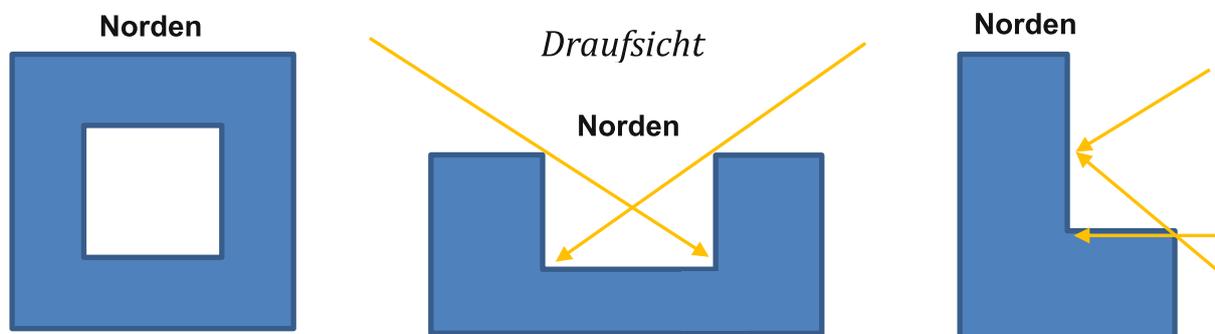
Der Wassergehalt würde dann $77 \text{ km}^3 \cdot 0,0005 \approx 0,038 \text{ km}^3$ betragen.

Das wäre immerhin 1/20-tel des Wasserinhalts des Müritzsees.

Aufgabe: Dauerschatten

Im italienischen Bergdorf Viganella steigt die Sonne zwischen dem 12. November und 1. Februar für 83 Tage nicht über die Berggipfel. Daher galt das Dorf als der dunkelste Ort Italiens

Finde in deinem Heimatort im Umfeld eines Gebäudes einen Platz, der das ganze Jahr hinweg nicht oder nur für kurze Zeit von der Sonne beschienen wird! Beschreibe diesen Ort. Diskutiere Gebäudeorientierungen und -grundrisse, die Dauerschatten (phasenweise oder immer) zur Folge haben. Wie könnte trotzdem Sonnenlicht an diese Orte gelangen?



Diese Aufgabe orientiert die Aufmerksamkeit der Schüler auf ihr Lebensumfeld.

- Der Boden von Innenhöfen und evt. auch die unteren Etagen ringförmiger Wohnblocks bekommen bei größerer Höhe der Häuser ganzjährig kein direktes Sonnenlicht. Insbesondere sind davon die hofseitigen Nordseitenwohnungen betroffen.

Der Boden eines nach Norden hin offenen Innenhofs wird bei höheren Gebäuden nur dann von der Sonne (teilweise) beschienen, wenn die Sonne im Bereich im Nordwesten (später Nachmittag im Sommer) bis Nordosten (früher Vormittag im Sommer) steht.

Bei einem Gebäude in L-Form bekommen bei der gezeigten Ausrichtung der Hof und die lange Seite ein halbes Jahr lang (Frühling und Sommer) im ersten Teil des Vormittags Sonne ab.

Ein z. B. auf dem Dach des Gebäudes angebrachter motorbetriebener Spiegel (evt. konvex zur Strahlaufweitung) könnte das Sonnenlicht in den Hof lenken.

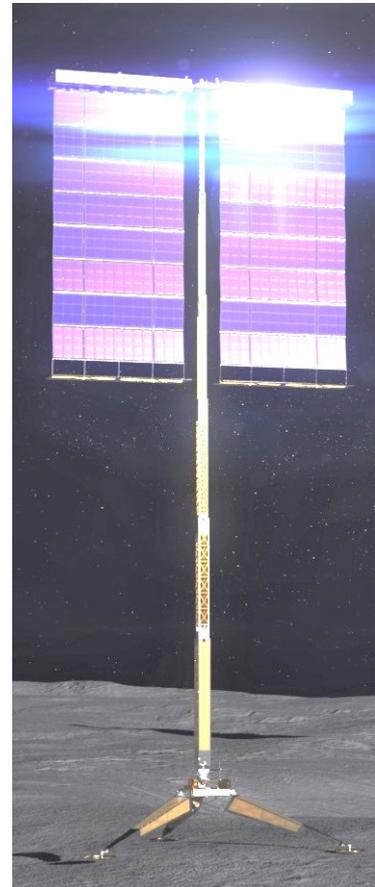
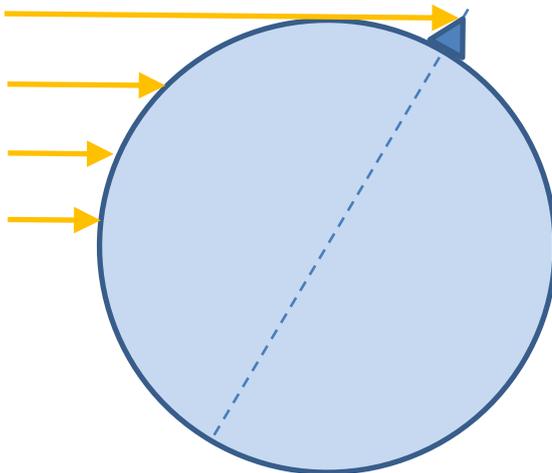
Aufgabe: Licht am Südpol des Mondes

Für eine Mondstation ist eine zuverlässige lückenlose Energieversorgung ganz wesentlich.

Im Gegensatz zur Erde wird der Mond ohne atmosphärische Beeinflussung von der Sonne beschienen. Doch auch auf dem Mond gibt es Tag und Nacht. Eine beinahe lückenlose Energieversorgung aus dem Nahfeld einer Mondstation ist aber an den Mondpolen möglich.

- a.) Skizziere die Situation, in der der Gipfel eines Mondbergs in der Nähe des gerade von der Sonne abgewandten Mondsüdpols trotzdem von der Sonne beschienen wird!

Selbst bei geringer Achsneigung gelangt das Licht noch zum Pol des Mondes.



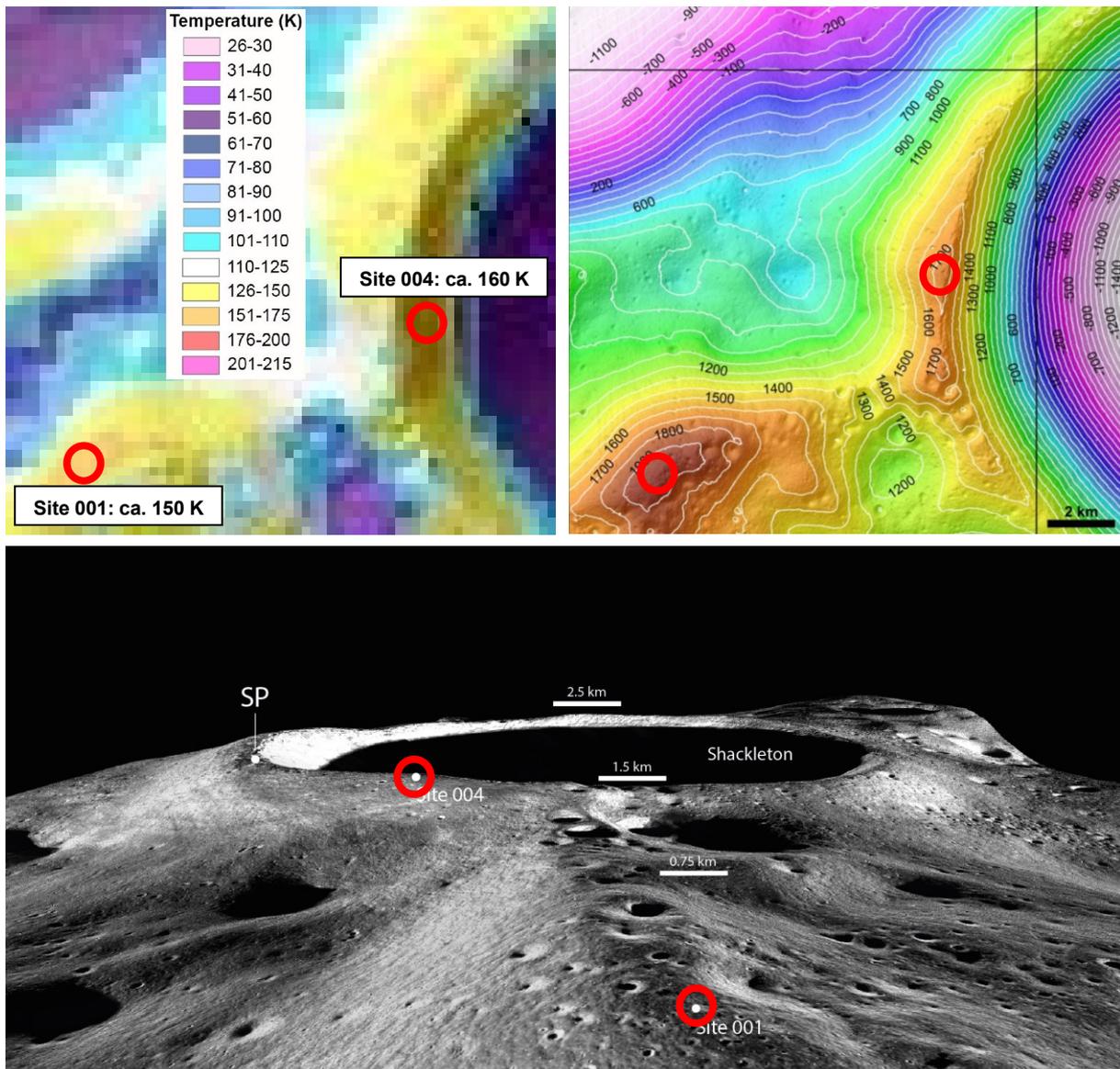
- b.) Angenommen, die Mondstation hat einen Bedarf an elektrischer Leistung wie die ISS ($P = 110 \text{ kW}$). Welche Fläche muss an Solarmodulen bei senkrechter Bestrahlung der Module benötigt? Die neuesten Solarzellen haben einen Wirkungsgrad von $\eta = 26 \%$. Die Solarkonstante hat auf dem Mond im Mittel etwa den Wert wie an der oberen Kante der Erdatmosphäre ($S_0 = 1361 \text{ W/m}^2$).

$$\rightarrow P = S_0 \cdot A \cdot \eta \rightarrow A = \frac{P}{S_0 \cdot \eta} = \frac{110.000 \text{ W m}^2}{1361 \text{ W} \cdot 0,26} \approx 311 \text{ m}^2.$$

- c.) In Abb. 16 wird die mittlere Temperatur der Mondoberfläche an der Südpolregion des Mondes, die aus der Bestrahlung oder fehlenden Bestrahlung resultiert, in einer farbcodierten topografischen Karte angezeigt. Markiere in der Karte aus Abb. 16 die in Abb. 7 gezeigten möglichen Orte für eine Mondstation des Artemis-Programms und lese die Temperatur ab. Im Einschubbild werden die sogenannten Sublimationstemperaturen für bestimmte Stoffe angezeigt. Um welche Stoffe handelt es sich und wie ließen sie sich nutzen? Informiere dich über die Bedeutung des Begriffs ‚Sublimation‘! An welcher Stelle bist du diesem Vorgang schon einmal begegnet?

[zurück zum Anfang](#)

- ➔ Abb. 16 und Abb. 8 wurden so beschnitten, dass sie in etwa die gleiche Mondregion zeigen, welche die möglichen Positionen 001 und 004 für eine Mondstation enthalten (siehe Bild unten). Die mittleren Temperaturen liegen unter -100°C . Damit liegt die Temperatur deutlich über den Sublimationstemperaturen von Wasser (H_2O), Ammoniak (NH_3), Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Argon. Sauerstoff und Stickstoff sind für die Erzeugung von Atemluft nötig. Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Kohlenstoff können zur Herstellung von Raketentreibstoff verwendet werden. Argon könnte zur Herstellung von Fotozellen Verwendung finden. Die Sublimation kann man im Winter beobachten, wenn ein Stück Eis bei Dauerfrost trotzdem nach und nach kleiner wird.



Aufgabe: Strahlenschutz

- a.) Für Menschen, die beruflich radioaktiver (ionisierender, den Körper schädigender) Strahlung ausgesetzt sind, gilt zur Zeit in Europa ein Grenzwert von $H_G = 20 \text{ mSv}$ (Sv ... Sievert) pro Jahr (https://www.bfs.de/DE/themen/ion/strahlenschutz/beruf/grenzwerte/grenzwerte_node.html). Auf dem Mond beträgt die biologisch gewichtete Strahlendosis pro Zeiteinheit etwa $\dot{H} = 60$ Mikrosievert pro Stunde. Wie lange darf sich ein auf dem Mond tätiger Mensch innerhalb eines Jahres (möglichst gut verteilt über das Jahr) dort im Freien aufhalten?

$$\rightarrow t = \frac{H_G}{\dot{H}} = \frac{20 \text{ mSv}}{60 \mu\text{Sv/h}} \approx 333 \text{ h.}$$

Ein Mondorbiter darf also max. 42 Tage zu je 8 Stunden im Freien auf dem Mond arbeiten. Diese Zahl verringert sich noch deutlich, weil auch im Inneren der gut abgeschirmten Mondbasis noch hohe Strahlungswerte vorliegen.

- b.) Zur Schwächung von Gamma-Strahlung mit einer Energie von 5 MeV genügt eine 10 cm dicke Betonschicht, um ihre Intensität zu halbieren (<https://de.wikipedia.org/wiki/Halbwertsschicht>). Die Halbwertsschichtdicke beträgt also $d = 10 \text{ cm}$. Welche Wanddicke d wäre nötig, um die Strahlungsintensität auf ein Viertel, ein Achtel, ... ein Hundertstel zu reduzieren?

→ Erst „herleitender Weg“ – Wann wird eine Reduktion auf 1/100 erreicht?:

$$10 \text{ cm: } \frac{1}{2} \rightarrow d \cdot 1 \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^1$$

$$20 \text{ cm: } \frac{1}{4} \rightarrow d \cdot 2 \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^2$$

$$30 \text{ cm: } \frac{1}{8} \rightarrow d \cdot 3 \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^3$$

$$40 \text{ cm: } \frac{1}{16} \rightarrow d \cdot 4 \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^4$$

$$50 \text{ cm: } \frac{1}{32} \rightarrow d \cdot 5 \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^5$$

$$60 \text{ cm: } \frac{1}{64} \rightarrow d \cdot 6 \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^6$$

$$70 \text{ cm: } \frac{1}{128} \rightarrow d \cdot 7 \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^7$$

Es wird eine Wanddicke zwischen 60 cm und 70 cm benötigt.

Jetzt mit Hilfe der **Logarithmusfunktion**:

$$1/100 \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^x \rightarrow x = \log_{\frac{1}{2}}(1/100)$$

Umrechnung auf Basis 10:

$$\log_{\frac{1}{2}}(1/100) = \frac{\log_{10}(1/100)}{\log_{10}\left(\frac{1}{2}\right)} = \frac{-2}{-0.301} \approx 6,6$$

Mit einer Wanddicke von $d = 66 \text{ cm}$ kann die Strahlungsintensität auf ein Hundertstel reduziert werden.

Aufgabe: Sinter-Produkte

Informiere dich über Objekte des Alltags, die durch Sintern entstanden sind!

- ➔ Durch Sintern werden viele sehr alltägliche Dinge hergestellt: Ziegel, Fliesen, Kacheln, Waschbecken aus Porzellan, Geschirr, ...

Projekt:

Fresnellinse und Straßenbau auf dem Mond

Ingenieure haben ein Projekt entwickelt, um mit Hilfe einer sehr großen Fresnellinse den sehr staubigen Mondboden (man nennt ihn Regolith) aufzuschmelzen und so zu verfestigen (und damit den gefährlichen Mondstaub zu binden).

Informiere dich über verschiedene Anwendungen von Fresnellinsen.

- ➔ bei Scheinwerfern zur Bündelung, bei Leuchtturmoptiken zur Bündelung, bei Spiegelreflexkameras zur Aufhellung des Mattscheibenbildes, bei Solarzellen zur Fokussierung des Sonnenlichts, bei Overhead-Projektoren zur großflächigen Ausleuchtung der Folie.

Experiment:

Zeige mittels einer Fresnellinse die starke Bündelung des Sonnenlichts, die zum Aufschmelzen bestimmter Test-Materialien führen kann. Variiere dabei auch die freie Öffnung der Fresnellinse.

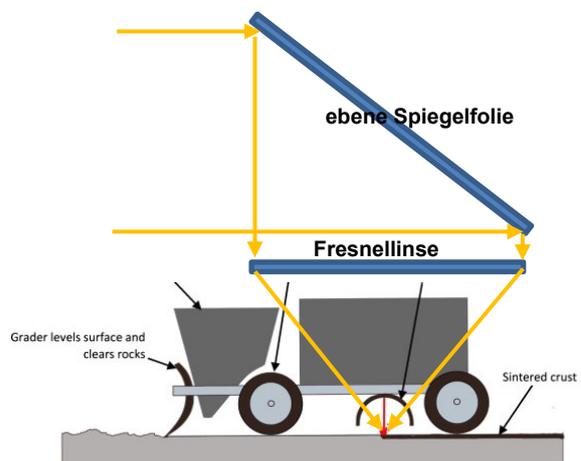
Achtung: Bei diesem Versuch besteht die Gefahr der Verbrennung bzw. der Auslösung eines Brandes. Treffe alle Vorsichtsmaßnahmen.

Skizziere anknüpfend an Abb. 20 den veränderten und ergänzten Aufbau der Straßenbaumaschine für den Mond, wenn eine Fresnellinse zum Einsatz kommt. Erläutere deine Änderungen und Ergänzungen.

- ➔ Der Laser wird durch eine Fresnellinse ersetzt, welche die gleiche Leistungsdichte wie ein Laserstrahl, der das Material aufschmelzen kann, besitzt.
- ➔ Um die Sonnenstrahlung maximal zu nutzen, muss diese senkrecht auf die Linse treffen.
- ➔ Ein ebener Spiegel sorgt dafür, dass die tief stehende Sonne (insbesondere an den Mondpolen) senkrecht auf die Fresnellinse trifft. Der Spiegel muss drehbar sein, um die Sonne aus verschiedenen Richtungen „einzufangen“.



Im Tageslicht-Projektor befindet sich eine Fresnellinse. ©: Ben Skála, Benfoto – Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=71795427>.



Rechnung:

Berechne die Größe einer Fresnellinse, wenn die Bedingung erfüllt werden soll, dass in der Brennfläche der Fresnellinse die gleiche Leistungsdichte (auch bekannt als Bestrahlungsstärke mit der Einheit W/cm^2) erzeugt wird, wie in der „Brennfläche“ eines Lasers, der das bestrahlte Material aufschmilzt. Die erforderliche Leistungsdichte eines derartigen zum Schmelzschneiden geeigneten Lasers beträgt im Allgemeinen $10^7 \text{ W}/\text{cm}^2$. Berechne nun die Fläche einer Fresnellinse, die eine Brennfläche von 10 cm^2 ermöglicht.

- ➔ Die Solarkonstante ($S_0 = 1361 \text{ W}/\text{m}^2 = 1,361 \cdot 10^3 \text{ W}/\text{m}^2$) könnte auch als Leistungsdichte, mit welcher die Sonnenstrahlung eine definierte Oberfläche (Oberkante Atmosphäre) bezeichnet werden
- ➔ Konzentriert man das Strahlenbündel ($1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) durch eine Fresnellinse, so erhöht man Leistungsdichte um den Faktor, der die Verkleinerung der Auftrefffläche beschreibt. Bei einer Verringerung von 1 m^2 auf 1 cm^2 beträgt dieser Faktor 10.000.
- ➔ Bei Einengung des Strahlenbündels von 1 m^2 auf ein 1 cm^2 erhöht sich die Leistungsdichte der Sonnenstrahlung auf $1,361 \cdot 10^7 \text{ W}/\text{cm}^2$.
- ➔ Damit Straßenbaumaschine so schnell wie möglich arbeitet, sollte die Auftrefffläche (Brennfläche) möglichst groß sein. Eine Vergrößerung der Brennfläche wird möglich, wenn man die Fresnellinse vergrößert und die Leistungsdichte auf den Mindestwert von $10^7 \text{ W}/\text{cm}^2$ verringert.

Die Fläche der Fresnellinse, die für den Mindestwert ausreicht, bestimmt man aus dem Verhältnis $1 \cdot 10^7 \text{ W}/\text{cm}^2 / 1,361 \cdot 10^7 \text{ W}/\text{cm}^2 \approx 0,735$, d. h. anstatt von 1 m^2 wären $0,735 \text{ m}^2$ ausreichend.

Um die Brennfläche von 1 cm^2 auf 10 cm^2 zu vergrößern, wäre eine Fresnellinse mit der Fläche von $10 \cdot 0,735 \text{ m}^2 = 7,35 \text{ m}^2$ erforderlich. Eine quadratische Linse (man denke z. B. an den Overheadprojektor) hätte dann eine Seitenlänge von ca. 2,7 m.

