

Faszination Mondoberfläche – Erkundungstour auf dem „7. Kontinent“

Ein Gruppenprojekt mit verteilten Aufgaben

In Bezug zu folgenden Inhalten der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 7/2019: die beiliegende Mondhöhenkarte sowie die Beiträge, welche die vergangene und zukünftige Mondraumfahrt beschreiben und dabei auch auf Zielregionen auf dem Mond hinweisen „Ein Zeitzeuge erinnert sich. Apollo 12 bis 17 auf dem Mond“ und „Missionsziel Mond. Vom neuen Wettlauf zum Erdtrabanten“, Zielgruppe: Mittelstufe bis Oberstufe, WIS-ID: 1421026

Olaf Fischer

Die populäre Wendung „Sonne, Mond und Sterne“ könnte in dieser Abfolge wegen der himmlischen Dominanz dieser Objekte entstanden sein. Nicht ohne Grund kommt der Mond gleich nach der Sonne auf Position zwei. Er liefert uns durch sein Phasenspiel ein Zeitmaß, im Finsternis-Geschehen ist er unerlässlich und hinsichtlich der Gezeiten hauptverantwortlich. Doch auch sein Aussehen beeindruckt die Menschen schon immer.

Durch seine kosmische Nähe sind wir in der Lage, schon mit bloßem Auge Details der Mondoberfläche wahrzunehmen und schon beim Blick durch ein einfaches Fernrohr tut sich eine bizarre Landschaft auf. Doch seine relativ geringe Entfernung ist es uns auch möglich, den Mond mit Raumfahrzeugen zu besuchen. Beiträge zur vergangenen und zukünftigen Mondraumfahrt im aktuellen SuW-Heft vermitteln dazu interessante Einblicke.

Im Kern des folgenden WIS-Beitrags steht eine **Gruppentour über die Mondoberfläche** mit den Augen auf einer Karte und im Fernrohrsehfeld. Die Route verläuft über Orte (Stationen) mit verschiedenen Oberflächenmerkmalen, die fächerverknüpfend erschlossen werden. Auch zwei Apollo-Landeorte sind dabei. An jeder Station hat eine andere Teilgruppe (als Spezialisten) die Aufgabe, der Klasse die ersichtliche Mondformation samt Zusammenhangsinformation auf verschiedene Art und Weise nahezubringen ([Lernen durch Lehren](#)).

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Kleinkörper, Raumfahrt, Astropraxis	Formationen der Mondoberfläche , Mondkrater , Impakttheorie , Selenografie , Apollo 14 , Apollo 15 , Mondtour im Fernrohrsehfeld , Mondbeobachtung
Physik	Optik, Mechanik	diffuse Reflexion , Albedo , kinetische Energie
Fächerverknüpfung	Astro – Geo Astro – Ma Astro – Geschichte	Kartenarbeit, Selenografie , Grabenbruch , Mondgebirge , Mondebene Volumenberechnung (Kreiszyylinder) , Steigung (in Grad und Prozent) Alfred Wegener , Wettlauf zum Mond
Lehre allgemein	Kompetenzen (Erkenntnis, Kommunikation), Unterrichtsmittel	Erweitern Wissen zur Reflexion , Idealisieren Oberflächenstrukturen durch einfache Formen , Analogieexperiment zur Kraterentstehung , Berechnung des Verhältnisses von Krateradius zu Radius des Impaktors , Recherchieren, Präsentieren, Anleiten, Lehren, Gruppenprojekt mit verteilten Verantwortlichkeiten , Schüler in Spezialistenrollen, Lernen durch Lehren , Arbeitsblatt , Karten der Mondoberfläche , Bilder der Mondoberfläche

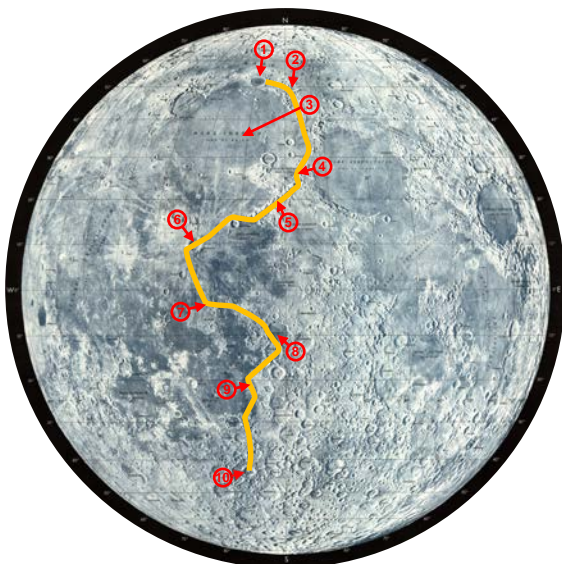


Abbildung 1: Mondkarte mit eingezeichneter Route. Die verwendete Karte wurde aus Aufnahmen von Mondregionen verschiedener Teleskope hergestellt. Die orthografische Kartenprojektion (die Projektionsstrahlen sind parallel zueinander) zeigt den Mond so, wie er am Himmel für das bloße Auge oder im Fernrohr erscheint (d. h., mit größer werdendem Abstand von der Mondscheibenmitte wächst die perspektivische Verzerrung). © USAF (United States Air Force) Lunar Reference Mosaic: Lunar Earthside Hemisphere.

Zum Gruppenprojekt mit verteilten Spezialistenrollen

Warum beobachten wir die Mondoberfläche mit Schülern?

Schon mit bloßem Auge lassen sich auf der Mondoberfläche Details wahrnehmen, die es richtig zu interpretieren gilt. Der Mondanblick im Fernrohr kann dann durchaus überwältigend sein und so eine Motivation für die weitere Entdeckung der Natur in sich bergen.

Die Mondraumfahrt bietet eine weitere **Motivationsquelle**. Insbesondere die bemannten Mondlandungen der Apollo-Missionen, aber auch die Pläne für die Zukunft der Monderkundung und –erschließung geben der Fantasie viel Raum, spornen zur naturwissenschaftlichen Beschäftigung an und können durchaus eine Langzeitwirkung in Sachen Berufswahl haben. Die in den SuW-Beiträgen genannten Landegebiete einiger Mondmissionen bekommen im Zusammenhang mit dem Kennenlernen der Mondoberfläche ein Gesicht.

Das Kennenlernen der Mondoberfläche dient aber auch als „Mittel zum Zweck“ der Anwendung von Wissen und Können aus anderen Fächern bei Anwendung der Methode ‚**Lernen durch Lehren**‘.

Lehren durch Lernen

„Wenn Schüler einen Lernstoffabschnitt selbständig erschließen und ihren Mitschülern vorstellen, wenn sie ferner prüfen, ob die Informationen wirklich angekommen sind und wenn sie schließlich durch geeignete Übungen dafür sorgen, dass der Stoff verinnerlicht wird, dann entspricht dies idealtypisch der Methode Lernen durch Lehren (LdL).“

(Jean-Pol Martin: *Weltverbesserungskompetenz als Lernziel?* In: *Pädagogisches Handeln – Wissenschaft und Praxis im Dialog*. 6. Jahrgang, 2002, Heft 1, S. 71–76; aus Wikipedia)

Homines dum docent discunt

("Die Menschen lernen, indem sie lehren")

Seneca: *Epistulae morales ad Lucilium*. Buch I, Brief 7, Abschnitt 8.

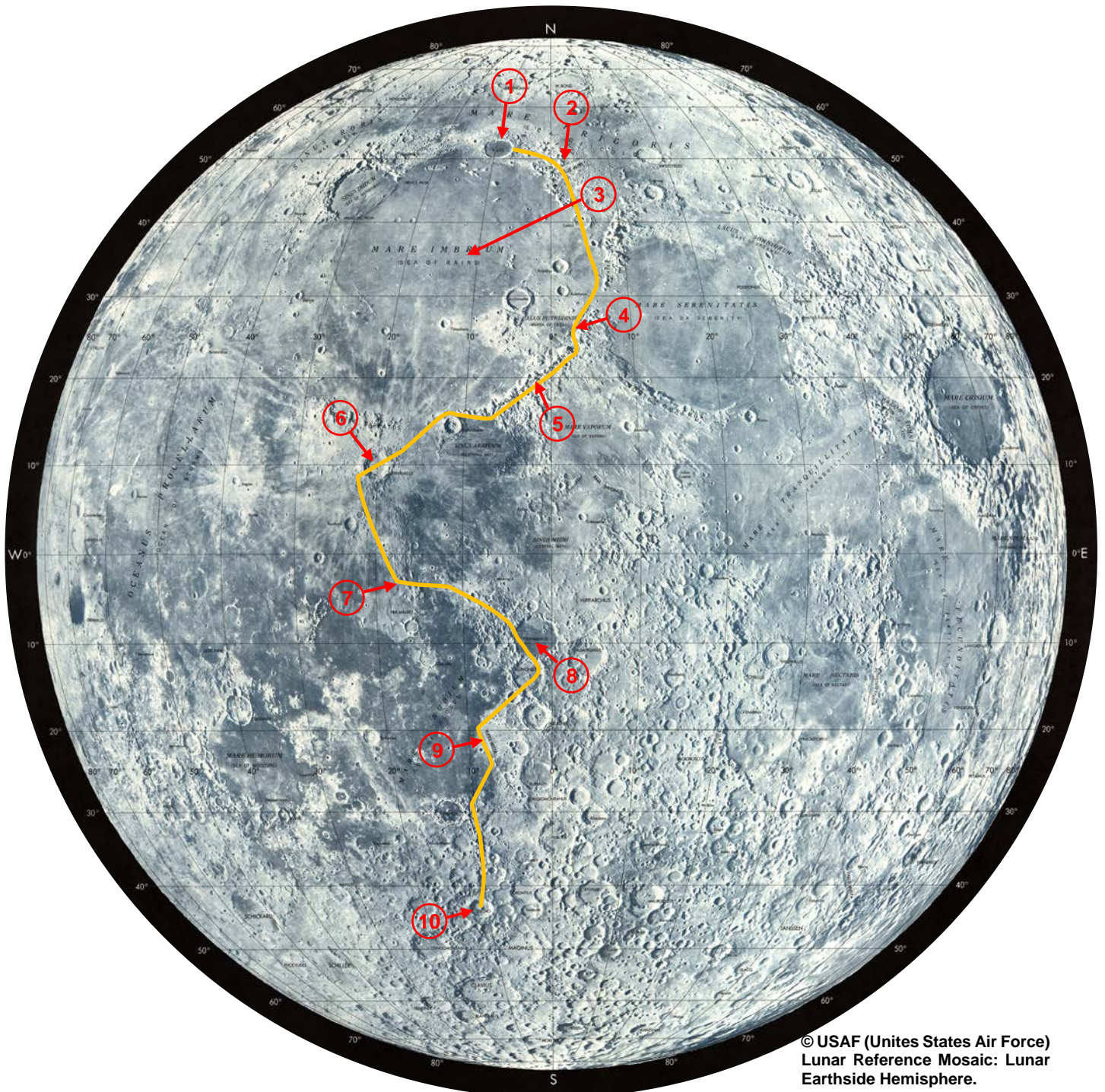


Römischer Philosoph Seneca
etwa 1 - 65). © Von I, Calidius,
CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2456052>

Vorgehensweise zum Gruppenprojekt ‚Erkundungstour auf dem ‚7. Kontinent‘‘ (Lernen durch Lehren)

- **Vorstellung der Methode durch Lehrer:** Einführung in die Selenografie, Ausgabe des Arbeitsblatts, Präsentation der Route samt aller Stationen und der mit diesen im Zusammenhang stehenden speziellen Aufgaben (Rückseite des Arbeitsblatts), Verteilung der Stationen auf Gruppenmitglieder (pro Station 1-3 Schüler), Bereitstellung von Informationsmaterial.
Jede Station erfordert eine Vorstellung des erreichten Mondortes, eine fächerverknüpfende Kennenlern-Aktivität und Hinweise zur Beobachtung.
- **Vorstellung des erreichten Mondortes durch verantwortliche Schüler:**
 - Position der Station (selenografische Koordinaten, auf Mondkarte zeigen!)
 - Vorstellung der Mondformation: Ausdehnung, Höhenprofil, Material; für Apollo-Landeorte: Kurzbeschreibung der Umgebung des Landeortes
 - Entstehung der Mondformation, bei Landeorten: Kurzbeschreibung der Apollo-Mission.
- **Kennenlern-Aktivität, angeleitet durch verantwortliche Schüler:** fächerverknüpfende Aktivitäten w. z. B. Kartenlesen, Rechnungen, Zeichnungen, Experimente, Fotografier-Anleitung, ... (im Folgenden näher aufgeführt)
- **Beobachtungsanleitung durch verantwortliche Schüler:** sollten möglichst auf eigenen Erfahrungen beruhen, nicht alle Formationen sind bei Beleuchtung gleich gut beobachtbar, Wann beobachtbar? ...
- **Materialbasis:** Arbeitsblatt, Karten der Mondoberfläche, Mondaufnahmen (auch eigene Fotos)

ARBEITSBLATT zum Gruppenprojekt Faszination Mondoberfläche – Erkundungstour auf dem „7. Kontinent“



© USAF (United States Air Force)
Lunar Reference Mosaic: Lunar
Earthside Hemisphere.

Wir wollen mit den Augen (und im Geiste) über den Mond wandern. Die Wanderstrecke enthält 10 Stationen und führt beginnend beim Krater Plato anfangs halb um das Meer des Regens (Mare Imbrium) herum. Dabei überqueren wir einige Erhebungen und ein Tal der Mond-Alpen, kommen am Landeplatz von Apollo 15 am Rande der Mond-Apenninen vorbei und erblicken den höchsten Mondberg. Dann passieren wir den Krater Erathostenes und queren den mächtigen Strahlenkrater Copernicus. Von dort geht es weiter in südöstlicher Richtung zum Krater Ptolemäus, vorbei am Landeplatz von Apollo 14. Der weitere Weg führt uns durch die Krater Ptolemaeus und Alphonsus, vorbei an der geraden Furche (Rupes Recta) Wand, die am Rande des Meeres der Wolken (Mare Nubium) gelegen ist, zum Ziel, den markanten Strahlenkrater Tycho.

Du bist der Spezialist für eine Station. Bereite ihre Vorstellung, Beobachtung und einen Kennenlern-Aktivität vor! Auf der Rückseite des Arbeitsblatts findest du dazu Hinweise.

Erkundungstour auf dem „7. Kontinent“

Jede Station erfordert:

- die **Vorstellung** des erreichten Mondortes:
 - Position der Station (selenografische Koordinaten, Position auf Mondkarte zeigen!)
 - Vorstellung der Mondformation: Ausdehnung, Höhenprofil, Material; für Apollo-Landeorte: Kurzbeschreibung der Umgebung des Landeortes
 - Entstehung der Mondformation, bei Landeorten: Kurzbeschreibung der Apollo-Mission.
- eine **Kennlernaktivität**, die meist auf Kenntnisse aus anderen Fächern zurückgreift
- und Hinweise zur **Beobachtung**.

Tour-Stationen mit Themen zu Kennlernaktivitäten

(Aufgaben, Informationen dazu folgen später)

[0] Einführung in die Selenografie

durch Lehrer

[1] Station 1: Krater (Wallebene) Plato

Thema: Unterschiedliche (diffuse) Reflexion der Mondoberfläche

[2] Station 2: (Mond-)Alpen mit Alpental

Thema: Grabenbruch

[3] Station 3: Mare Imbrium

Thema: Asteroideneinschlag, kinetische Energie

[4] Station 4: Landeort Apollo 15

Thema: Landestelle auf dem Mond

[5] Station 5: Apenninen mit höchsten Mondberg (Mons Huygens)

Thema: Mondgebirge – Ort, Höhen und Entstehung

[6] Station 6: Strahlenkrater Kopernikus

Thema: Kraterentstehung und Alfred Wegener

[7] Station 7: Landeort Apollo 14: Fra-Mauro

Thema: Landestelle auf dem Mond

[8] Station 8: Krater Ptolemäus (Wallebene) und Alphonsus

Thema: Kratervolumina

[9] Station 9: Rupes Recta oder gerade Furche

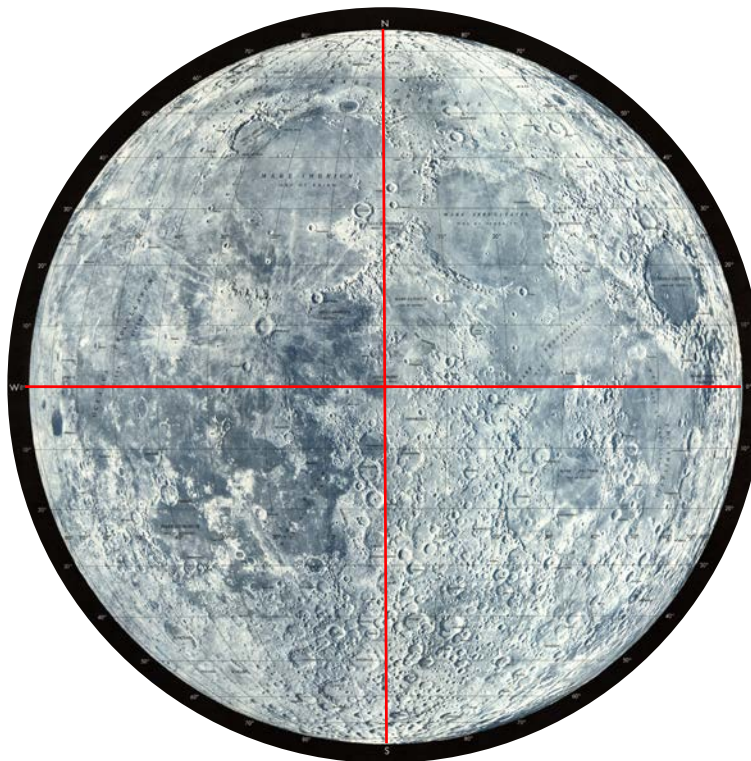
Thema: Steigung zeichnen/berechnen

[10] Station 10: Strahlenkrater Tycho

Thema: Kraterprofil, Verhältnis von Kratergröße zu Impaktorgröße

Einführendes zur Selenografie

Das Schulwissen über das geografische Koordinatensystem lässt sich ganz einfach auf den Mond (und andere Himmelskörper) übertragen. Die (i. A. existierende) Rotationsachse markiert die Pole. Von Pol zu Pol verlaufen beim Mond die selenografischen Längengrade. Der nullte Längengrad (Nullmeridian) des Mondes verläuft genau durch die immer dem Beobachter zugewandte mittlere Mitte der Mondscheibe (die sogenannte Vorderseite des Mondes, siehe Bild unten). (Im Zusammenhang damit muss geklärt werden, warum immer die gleiche Seite des Mondes zum Beobachter zeigt und warum man von einer mittleren Mitte spricht.) Der Kreuzungspunkt zwischen dem Nullmeridian und dem Äquator des Mondes befindet sich in der Bucht der Mitte (Sinus Medii) am rechten (östlichen) Rand des Oceanum Procellarum.



Die Höhenkartierung des Mondes zeigt, dass die Höhenvariation der Oberfläche des Mondes größer ist als man vielleicht denkt (siehe Mondposter in SuW 7/2019).

Bleibt das Problem der Festlegung der Nullhöhe ohne ein flüssiges oder gasförmiges Medium wie auf Erde oder Mars. Anstatt dessen kann man eine Sonde nutzen, die idealisiert auf einer Äquipotentialfläche (entlang derer sich ja das Wasser der Erdozeane oder ein Druckwert in der Marsatmosphäre einstellen) den Mond umrundet. Mit Hilfe des Clementine-Mondorbiters hat man für die Nullhöhe des Mondes einen Abstand von der Mondmitte von 1.737,4 km festgelegt.

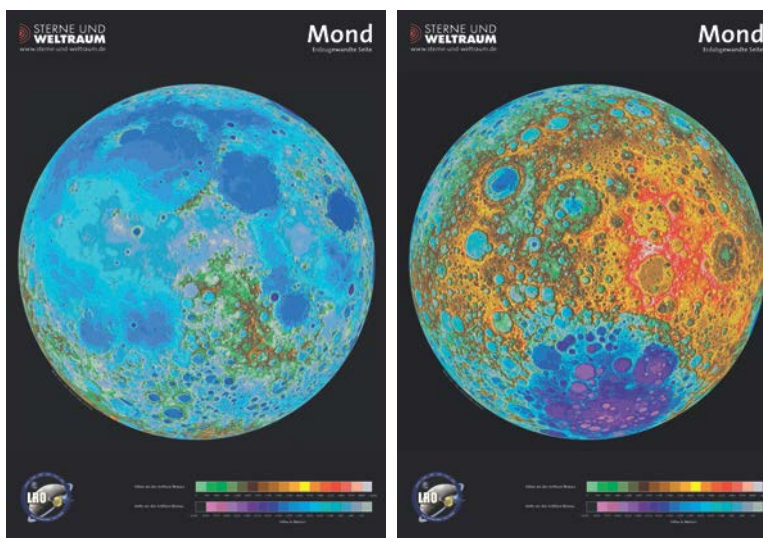


Abbildung 2:

Oben: Mondkarte in orthografischer Projektion zeigt den Mond so, wie er am Himmel für das bloße Auge oder im Fernrohr erscheint. Mit größer werdendem Abstand von der Mondscheibenmitte wächst die perspektivische Verzerrung. Rot hervorgehoben sind die Koordinatenlinien des Nullmeridians und des Äquators.

© USAF (Unites States Air Force) Lunar Reference Mosaic: Lunar Earthside Hemisphere.

Unten: Mondkarte mit Höhenkartierung von Mondvorderseite links und Mondrückseite rechts als Beilage von SuW 7/2019. © SuW.

Kennenlernaktivitäten: Aufgaben und Informationen

[1] Station 1: Krater (Wallebene) Plato

Thema: Unterschiedliche diffuse Reflexion der Mondoberfläche

Aufgabe an Klasse: Vergleiche auf einem Mondfoto die Helligkeit des von der Oberfläche des Kraters Plato diffus reflektierten Lichts mit der Helligkeit anderer Gebiete der Mondoberfläche!

Die sogenannte Albedo gibt an, welcher Anteil (wieviel Prozent) des von der Sonne eingestrahnten Lichts diffus reflektiert wird. Verdeutlicht den Unterschied zwischen spiegelnder und diffuser Reflexion!

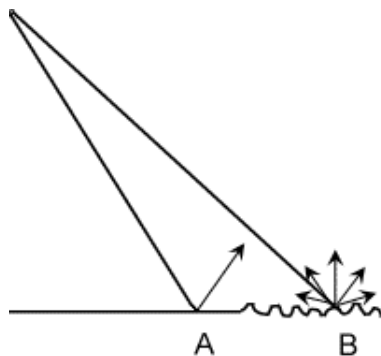
Sucht nun auf der gegebenen Karte ‚Albedoverteilung der Mondoberfläche.jpg‘ (siehe Ahang), welche die Verteilung der visuellen Albedowerte des Mondes zeigt (Lunar Albedo Reference Chart, <https://www.lpi.usra.edu/resources/mapcatalog/AlbedoReferenceChart/>), den Krater Plato auf und bestimme seine Albedo.

Im Folgenden sind Albedos für einige Materialien gegeben: Granit: 0,31, Wüste: 0,3, Rasen: 0,18-0,23, Anorthosit: ca. 0,2 Wasser: 0,05 - 0,22 (Neigungswinkel $>45^\circ$ bis $>10^\circ$), Basalt 0,05. Welches Material kommt für Plato in Frage?

Bringe einige Materialien mit und demonstriere deren unterschiedliche Albedos.

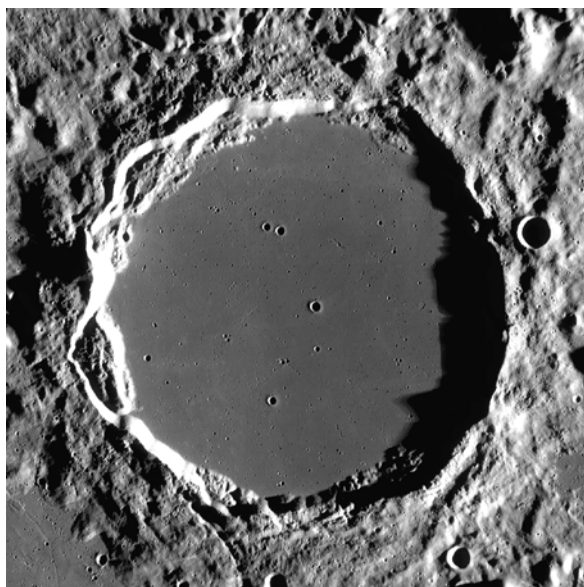
Information: Spiegelnde und diffuse Reflexion – Reflexionsgrad und Albedo

Im Rahmen der Optik hast du die spiegelnde Reflexion kennengelernt. Im Alltag erleben wir diese aber gar nicht so oft. Die meisten Objekte sehen wir, indem sie diffus reflektieren.



Wenn die Rauigkeiten einer Oberfläche klein sind im Vergleich zur Wellenlänge der auftreffenden Strahlung (im Bild: A), so erfolgt die Reflexion spiegelnd und die Fläche erscheint blank. Der Reflexionsgrad bezeichnet das Verhältnis aus dem reflektierten Lichtstrom und dem einfallenden Lichtstrom.

Sind die Unebenheiten einer Oberfläche dagegen größer als die Wellenlänge (im Bild: B), so erscheint sie matt, weil sie diffus (zerstreuend) reflektiert. Die Albedo („Weißheit“) bezeichnet das Verhältnis aus dem diffus nach allen Richtungen reflektierten Lichtstrom und dem senkrecht auf die Fläche gestrahlten Lichtstrom.



Mondkrater Plato.

© By NASA (image by Lunar Reconnaissance Orbiter) - JMARS, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=38542658>.

[2] Station 2: (Mond-)Alpen mit Alpental

Thema: Grabenbruch

Aufgabe an Klasse: Informiert euch in der gegebenen Mondhöhenkarte über die Höhendifferenz zwischen Boden und Umgebung des Alpental auf dem Mond!

Zeige ein Modellexperiment zur Entstehung eines Grabenbruchs.

Siehe dazu: WIS „Phoenicis Lacus - Ein Grabenbruch auf dem Mars“ von Christian Wolff,

<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/zentrales-wis-dokument-ms-1-2011/1063463>



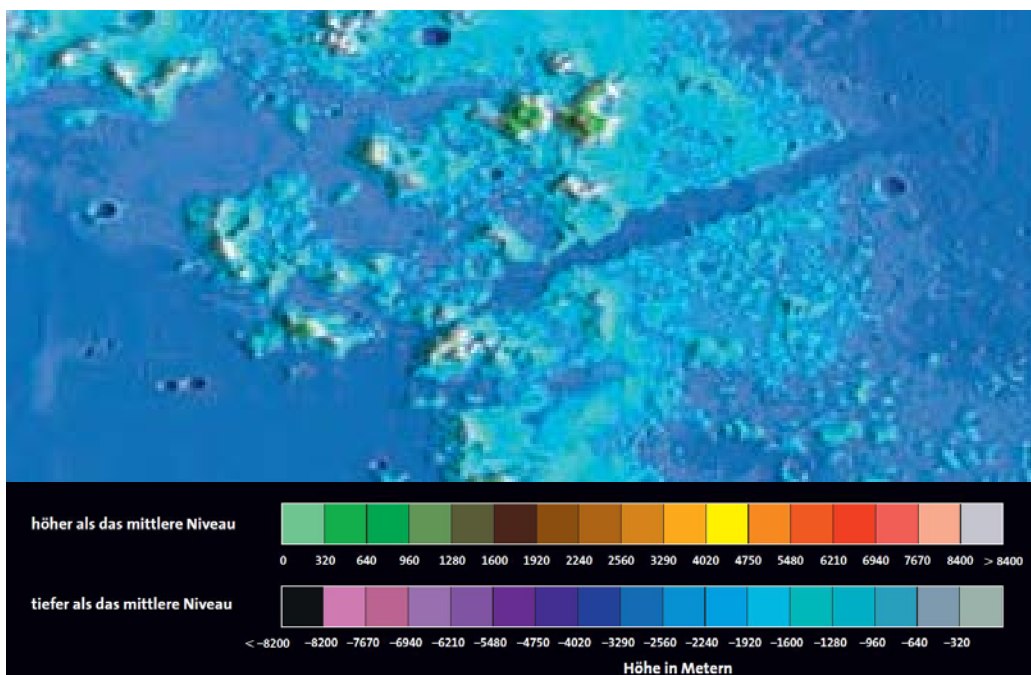
Warum ist das Rheintal (auch ein Grabenbruch) nicht so tief wie das Alpental auf dem Mond?

Oben: Mondalpentel aus dem Orbit fotografiert.

© NASA Lunar Orbiter 4.

Unten: Höhenkartenausschnitt vom Mondalpentel und seiner Umgebung.

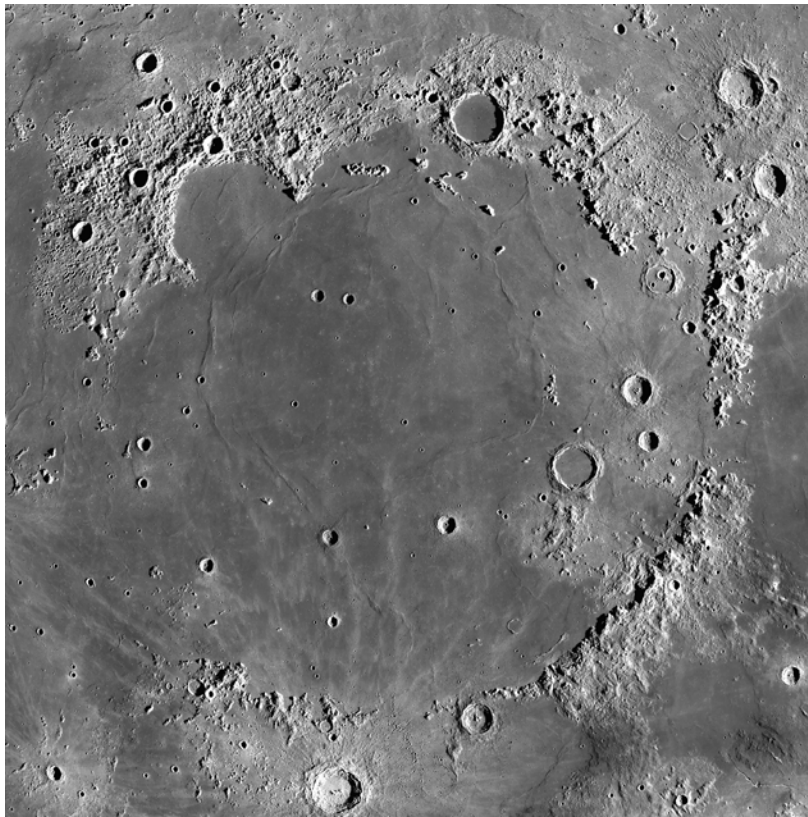
© SuW-Poster 7/2019.



[3] Station 3: Mare Imbrium

Thema: Asteroideneinschlag, kinetische Energie

Der Asteroideneinschlag, der vor 3,8 – 3,9 Milliarden Jahren das Mare Imbrium (Regenmeer) hervorbrachte, war der zweitgrößte in der Geschichte des Mondes. Die kinetische Energie des Asteroiden lag in der Größenordnung von 10^{27} Joule.



vorbrachte, war der zweitgrößte in der Geschichte des Mondes. Die kinetische Energie des Asteroiden lag in der Größenordnung von 10^{27} Joule.

Aufgabe an Klasse:

Welche Größe (Radius) hatte der Asteroid, wenn wir annehmen, dass er kugelförmig war, eine mittlere Dichte von 3 g/cm^3 (wie Basalt) hatte und mit einer Geschwindigkeit von 20 km/s unterwegs war?

Mare Imbrium (Regenmeer).

© NASA (image by Lunar Reconnaissance Orbiter), wms.lroc.asu.edu. The brightness is increased. Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=38257479>

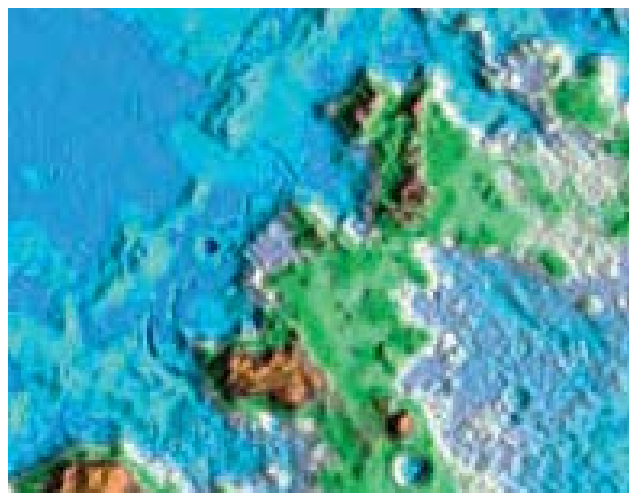
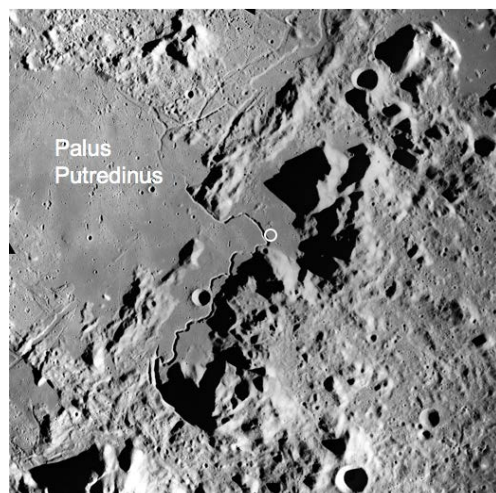
[4] Station 4: Landeort Apollo 15

Thema: Landestelle

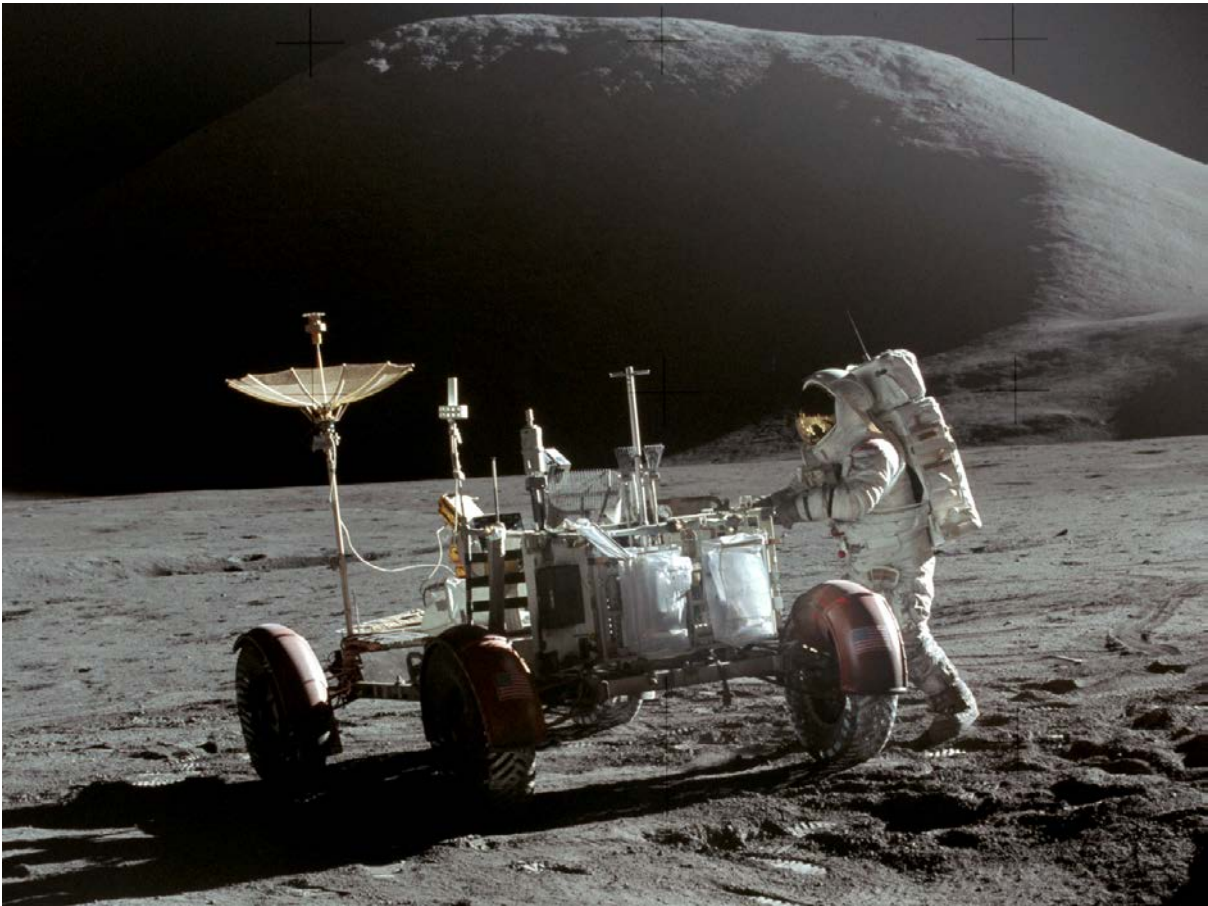
Beschreibe kurz den Verlauf der Apollo 15-Mission!

Aufgabe an Klasse: Identifiziert auf der Höhenkarte der Mondoberfläche die Landestelle von Apollo 15 auf dem Mond! Wie hoch erhebt sich der Mons Hadley über der Landestelle?

Zeige im Überflugbild und in der Höhenkarte die Blickrichtungen zum Mondberg Mons Hadley (im oberen Bild auf Folgeseite im Hintergrund zu sehen) und entlang der Hadley-Rille in Richtung NW (siehe unteres Bild auf Folgeseite).



Links: Landestelle von Apollo 15 (Kreis) aus dem Orbit gesehen. © NASA, <http://apollo.sese.asu.edu/LIW/20071114.html> gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12273603>. Rechts: Höhenkarte des Landegebiets. © Ausschnitt aus SuW-Poster.



Oben: Apollo 15-Astronaut James Irwin neben dem Mondrover. Im Hintergrund ist der Mondberg Mt. Hadley zu sehen. © NASA/David Scott,

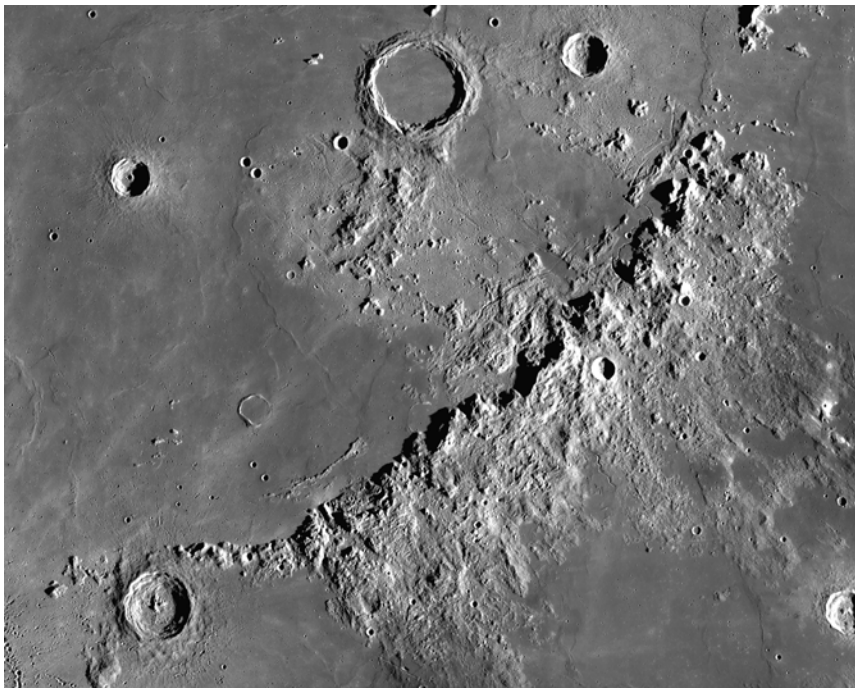
<http://www.hq.nasa.gov/alsj/a15/images15.html> (direct link), gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=447708>

Unten: Dieses Bild zeigt den Apollo 15-Astronauten Dave Scott vor der Hadleyrille, die sich in nordwestlicher Richtung erstreckt. © gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=188241>

[5] Station 5: Apenninen mit höchsten Mondberg (Mons Huygens)

Thema: Mondgebirge – Ort, Höhen und Entstehung

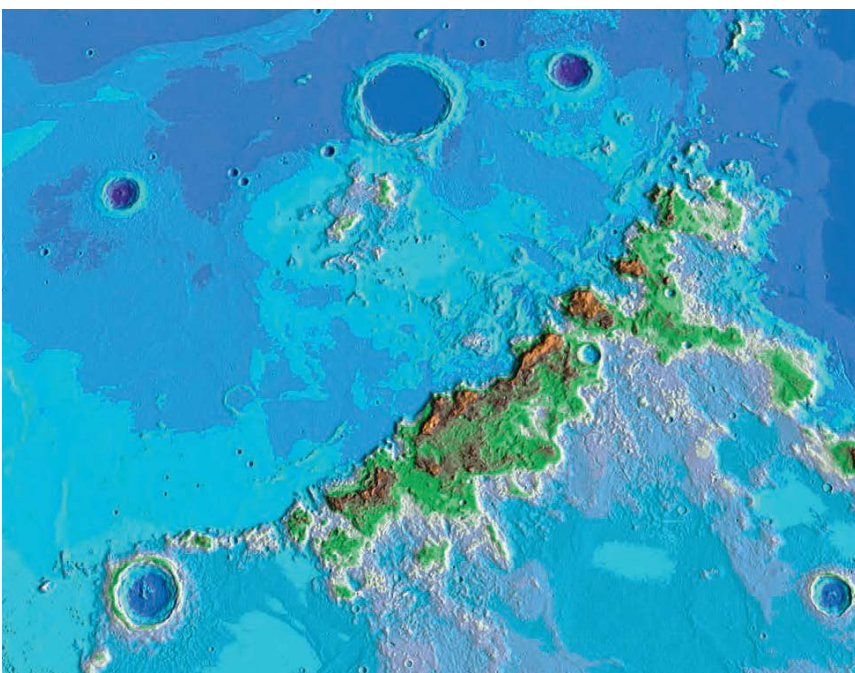
Aufgabe an Klasse: Die Apenninen sind das größte Gebirge des Mondes. Man sagt, der höchste Mondberg sei der Mons Huygens. Suche diesen bei $19,92^\circ$ N und $2,89^\circ$ W liegenden Berg auf dem Foto unten auf und umrahme ihn mit einem Kreis. Informiere dich auf der Höhenkarte von SuW 7/2019, welche Höhe der Berg Mons Huygens über dem Mare Imbrium erreicht! Inwieweit gilt die Aussage, dass Mons Huygens die höchste Erhebung des Mondes ist? Schau dir dazu eingehend die Mondhöhenkarte (,Höhen der Mondoberfläche - erdzugewandt.jpg‘ und ,Höhen der Mondoberfläche - erdabgewandt.jpg‘, Poster in SuW 7/2019) an! Betrachte die Lage der Apenninen und weiterer Mondgebirge in Bezug auf andere Mondformationen. Was lässt sich daraus über die Bildung der Mondgebirge ableiten?



Dieser 750×600 km große Bereich der Mondoberfläche beinhaltet die Apenninen.

Oben: eine Fotografie aus dem Orbit. © NASA (image by Lunar Reconnaissance Orbiter) - JMARS, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=39322679>.

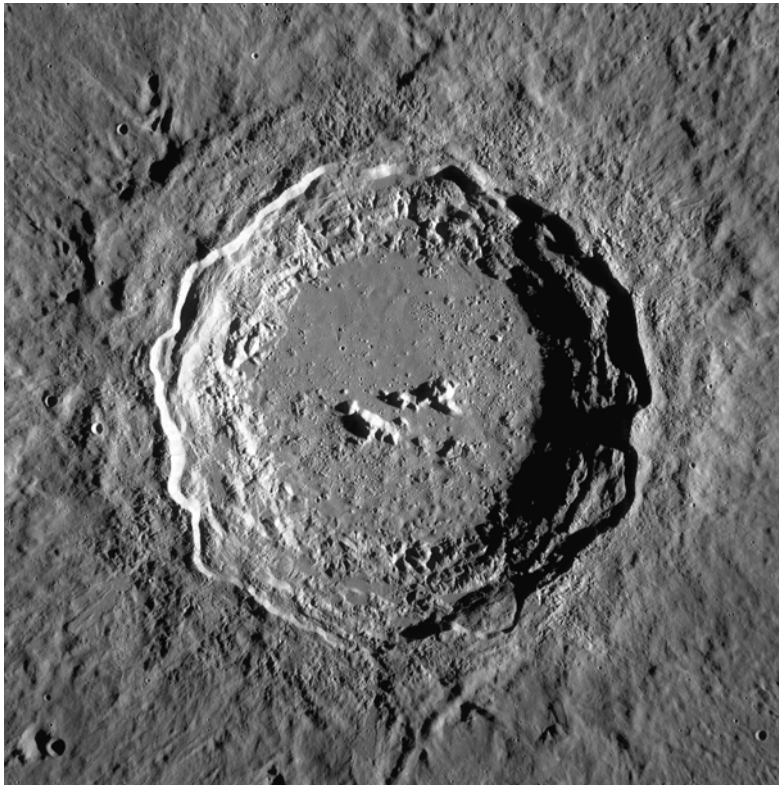
Unten: Höhenkartierung. © SuW-Poster 7/2019.



[6] Station 6: Strahlenkrater Kopernikus

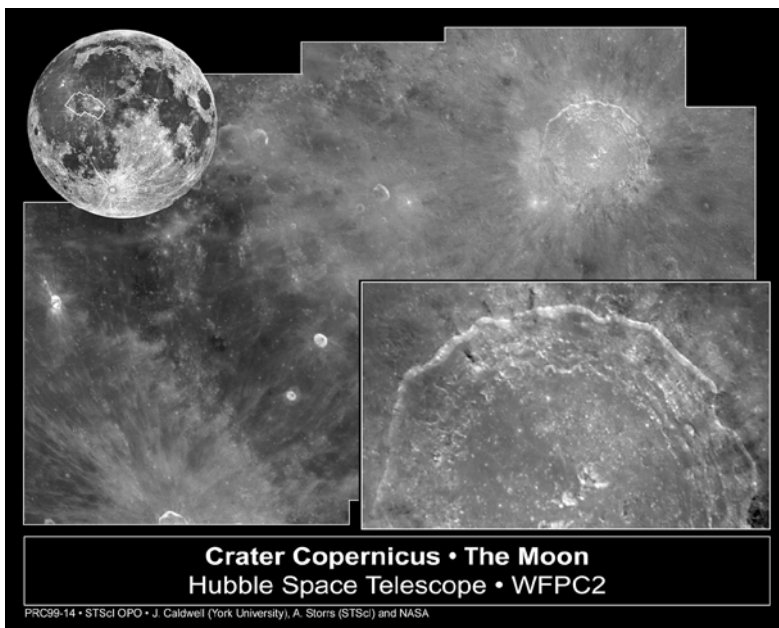
Thema: Kraterentstehung und Alfred Wegener

Alfred Wegener (1880-1930), der Vater der Kontinentaldrifttheorie, gilt auch als Pionier der experimentellen Kraterforschung. Im Winter 1918/19 führte er am physikalischen Institut von Marburg eine systematische Reihe von Experimenten zur Kraterentstehung durch. Er verwendete Zementpulver welches in kompakter Form als Einschlagobjekt auf eine mit Zementpulver bedeckte Unterlage geworfen wurde. Wegener kam zur der damals wenig akzeptierten Ansicht, dass die Mondkrater durch Meteoriteneinfall entstanden sind. Seine Theorie basierte auf Formähnlichkeiten zwischen den beobachteten und den experimentell erzeugten Kratern (siehe Mott T. Greene: Alfred Wegener, John Hopkins University Press, 2015 und Alfred Wegener: 1921, Monographie: „Die Entstehung der Mondkrater“).



Stelle kurz den Wissenschaftler Alfred Wegener vor!

Zeige ein Kratersimulationsexperiment nach dem Vorbild von Alfred Wegener! Variiere dabei die Größe des „Einschlagklumpens“! Variiere das Experiment so, dass nach dem Einschlag ein Strahlenkrater entsteht!



Oben:

Krater Kopernikus auf dem Mond. Mosaik aus Fotos des Lunar Reconnaissance Orbiters. Das dargestellte Gebiet ist 150 x 150 km groß.

© NASA (image by Lunar Reconnaissance Orbiter) - JMARS, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=38171301>.

Unten:

Krater Kopernikus. Bei größerem Geländeausschnitt werden die radial nach außen verlaufenden Streifen aus besser reflektierendem Material sichtbar (insbesondere bei nahezu senkrechter Beleuchtung).

© John Caldwell (York University, Ontario), Alex Storrs (STScI), and NASA/ESA.

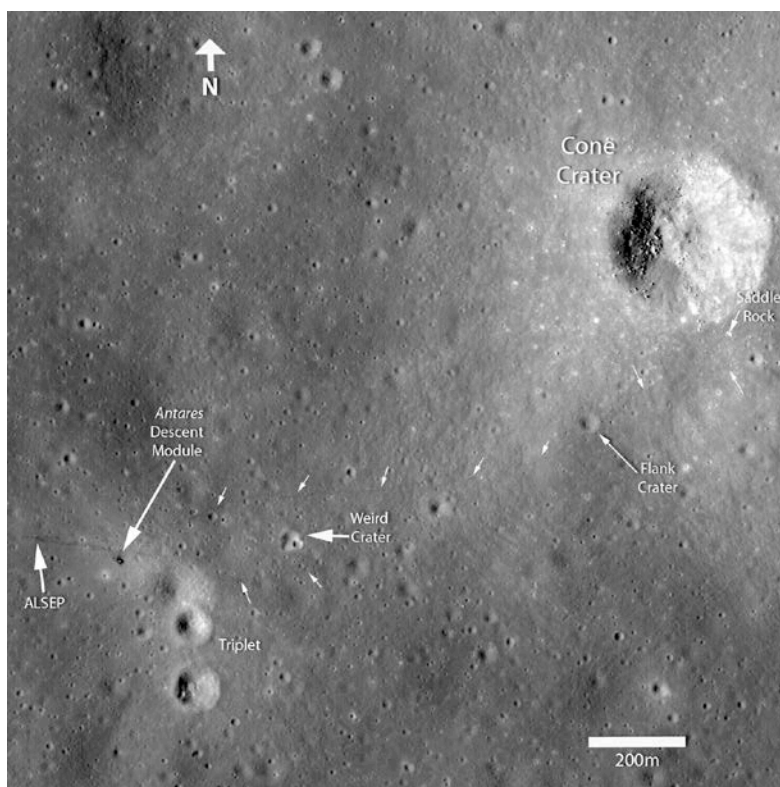
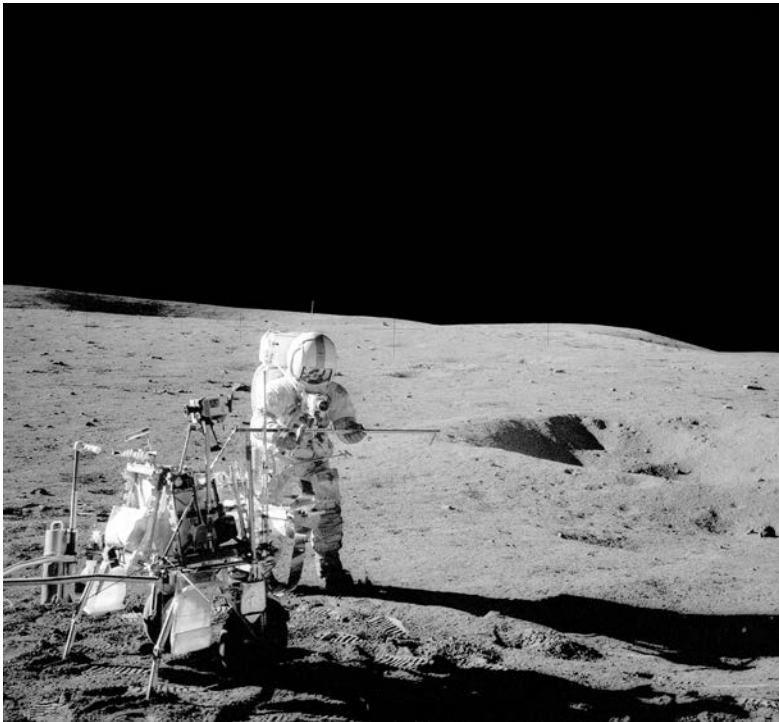
[7] Station 7: Landeort von Apollo 14

Thema: Landestelle auf dem Mond

Beschreibe kurz den Verlauf der Apollo 14-Mission!

Markiere den Landeort von Apollo 14 in der Mondkarte der Fra Mauro-Region. Das unten gezeigte Foto zeigt eine ca. $1,5 \times 1,5$ km große Region mit dem Landeort von Apollo 14. Welche Größe (in Grad) hat diese Region in der Karte von Fra Mauro?

Aufgabe an Klasse: Welche Merkmale der Landestelle lassen sich mittlerweile mittels besser aufgelöster Foto (siehe unten) ausmachen?



Oben:
Apollo 14-Astronaut Alan Shepard neben dem Modular Equipment Transporter (MET). Dieser wurde eingesetzt, um Werkzeug, Kameras und Materialproben der Mondoberfläche zu transportieren.

© NASA Edgar Mitchell - Great Images in NASA Description, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6449845>.

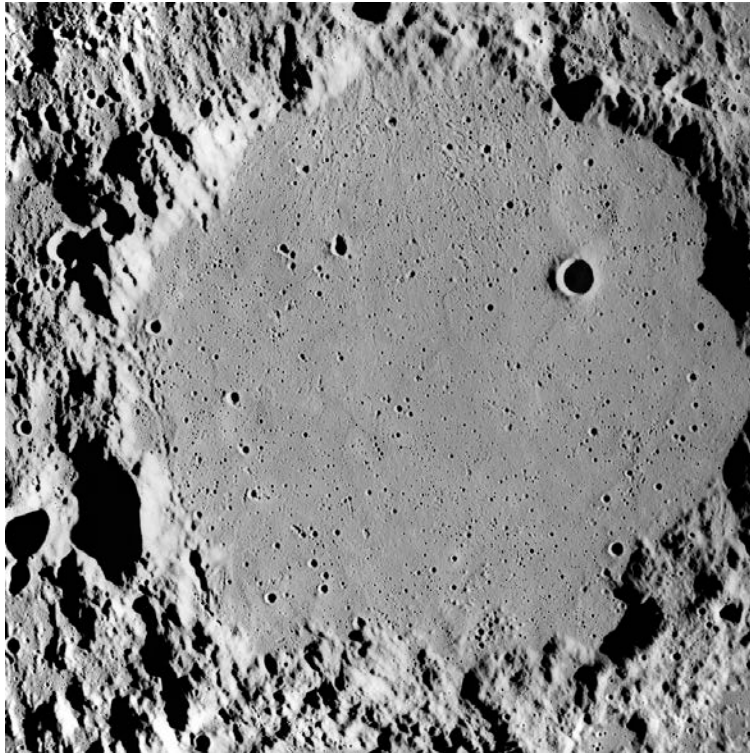
Unten:
Hochauflöstes Bild der Apollo-14-Landeregion, aufgenommen im Jahr 2011 vom Lunar Reconnaissance Orbiter.
© NASA / GSFC / Arizona State University.

[8] Station 8: Krater Ptolemäus (Wallebene) und Alphonsus

Thema: Kratervolumina berechnen

Vergleiche die beiden Mondkrater Ptolemaeus und Alphonsus! Welches Merkmal unterscheidet sie? Welche Details lassen sich in beiden Kratern ausmachen?

Aufgabe an Klasse: Berechne das Kratervolumen aus Durchmesser und Tiefe und vergleiche es mit dem Volumen der Ostsee! (Die Krater werden als Kreiszyylinder betrachtet. Als Höhe wird hier die Höhe der Kraterwände über dem Kraterboden angenommen.)



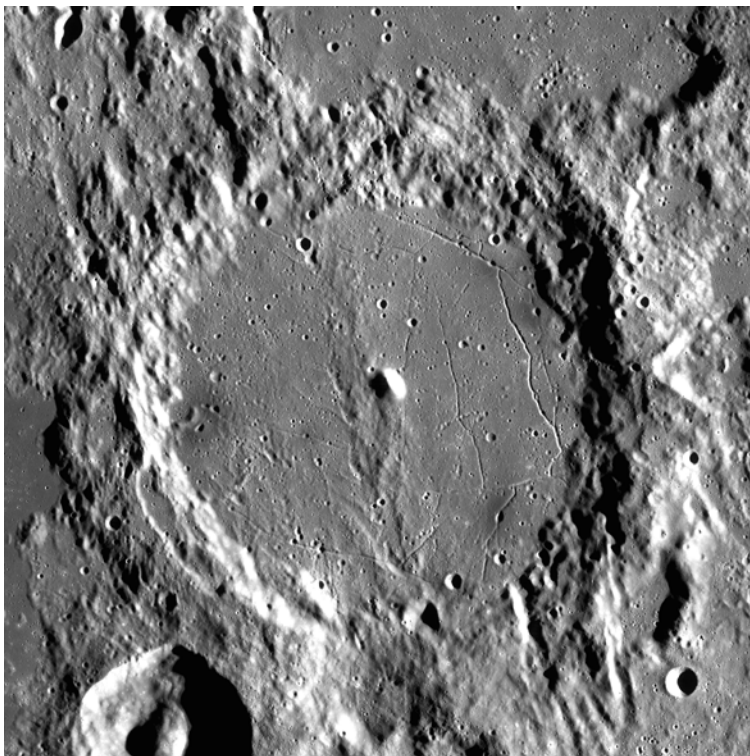
Links oben:

Mondkrater Ptolemaeus, aufgenommen von Apollo 16.

© Lunar & Planetary Institute, <http://www.lpi.usra.edu/re-sources/apollo/frame/?AS16-M-0990>
Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=552100>

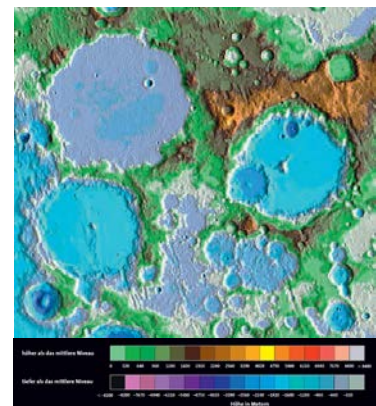
Links unten:

Bild vom Mondkrater Alphonsus als Mosaik aus Aufnahmen des Lunar Reconnaissance Orbiters. Die abgebildete Region ist 170 x 170 km groß. © NASA (image by Lunar Reconnaissance Orbiter) - JMARS, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=45822635>



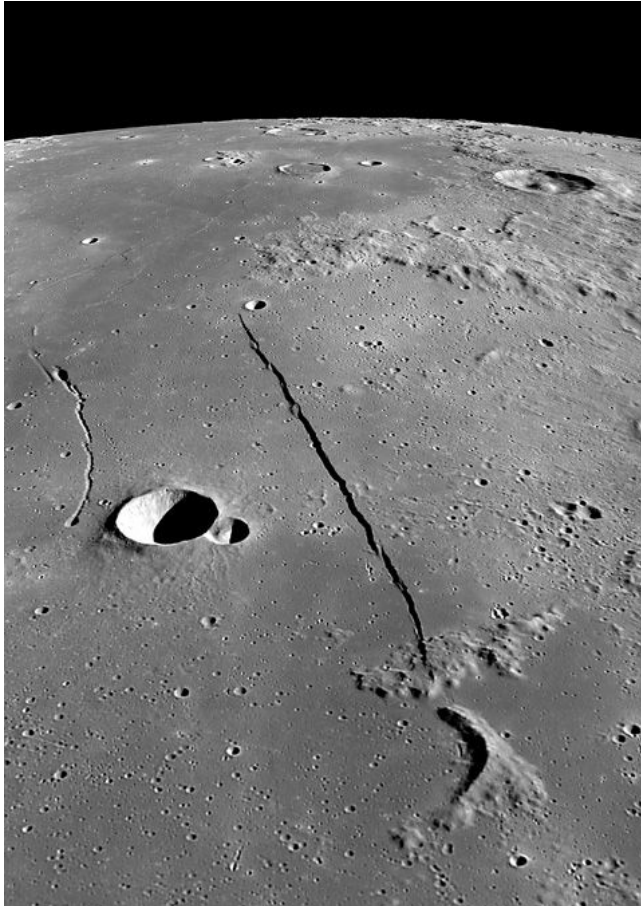
Rechts unten:

Höhenkartenausschnitt der Mondoberflächenregion mit den Kratern Ptolemaeus und Alphonsus. © SuW 7/2019.



[9] Station 9: Rupes Recta oder gerade Furche

Thema: Steigung zeichnen / berechnen



Aufgabe an Klasse:

Die Höhendaten erbrachten, dass die Rupes Recta eine Geländestufe darstellt, die bei einer Breite von 2-3 km von 300 m auf 240 m Höhe abfällt. Wie steil ist diese Geländestufe? Wieviel Prozent macht die Steigung aus? Könnte man die Steigung mit dem Fahrrad erklimmen? Zeichne ein Profilbild! In erster Näherung wird angenommen, dass die Höhe gleichmäßig (linear) abfällt.

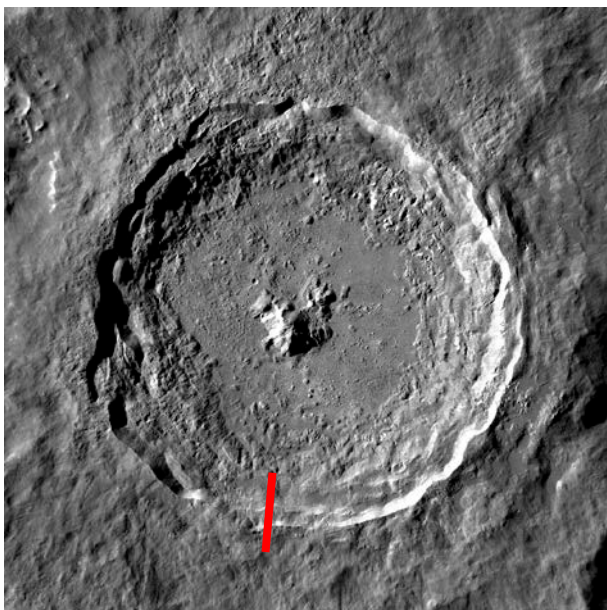
Aufnahme der Rupes Recta durch den japanischen Mondsatelliten Kaguya.

© JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), NHK, <http://jda-strm.tksc.jaxa.jp/archive/photo/P-022-15961/e59c7559c36529a49af3b4e45856ffb9.jpg>

[10] Station 10: Strahlenkrater Tycho

Thema: Kraterprofil, Kratergröße und Impaktorgroße

Aufgabe an Klasse: Der Krater Tycho ist tief und zeigt ein sehr auffallendes (helles) und ausge dehntes Strahlensystem. Die Abbildung auf der Folgeseite zeigt das Höhenprofil entlang der im Bild rot markierten Linie. Bestimmt die Höhen des Kraterbodens und der den Krater umgebenden Mondoberfläche. Bestimmt nun die Masse des beim Einschlag ausgeworfenen Mondmaterials (angenommene Dichte: 3 g/cm^3).

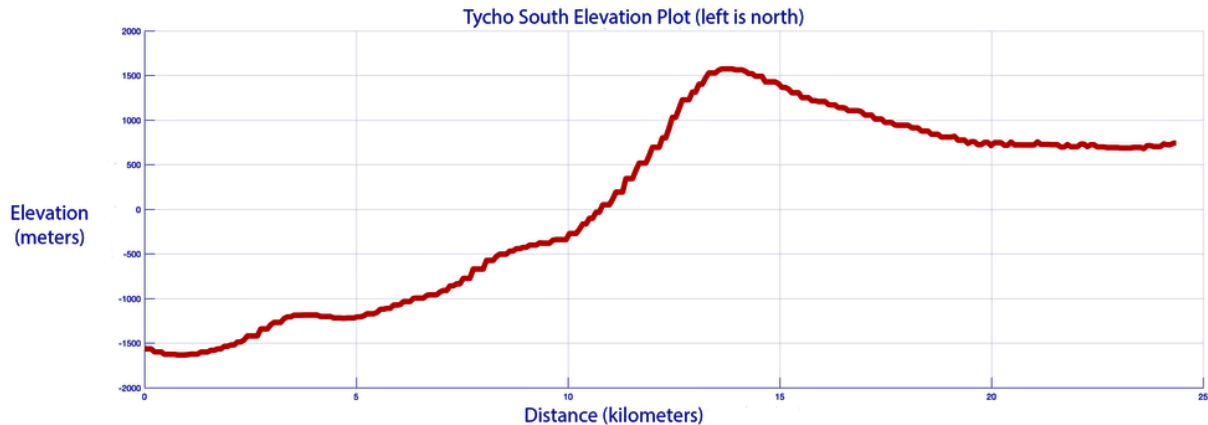


Aus der ausgeworfenen Masse kann auf die Masse bzw. den Radius eines kugelförmig angenommenen Einschlagkörpers (Impaktor) geschlossen werden. Schätze die Größe des Impaktors ab, indem du die nachfolgend beschriebenen Schritte nachvollziehst (Stationsverantwortliche).

Aus der ausgeworfenen Masse kann auf die Masse bzw. den Radius eines kugelförmig angenommenen Einschlagkörpers (Impaktor) geschlossen werden. Schätze die Größe des Impaktors ab, indem du die nachfolgend beschriebenen Schritte nachvollziehst (Stationsverantwortliche).

Mosaikbild des Strahlenkraters Tycho, hergestellt aus Aufnahmen des Lunar Reconnaissance Orbiter. Die Bildgröße beträgt $120 \times 120 \text{ km}$.

© NASA <http://wms.lroc.asu.edu/lroc/>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=35373098>



Höhenprofil entlang der im Bild des Kraters (zuvor gezeigt) rot markierten Linie. © NASA/GSFC/Arizona State University, <http://roc.sese.asu.edu/posts/954>

- Der Impaktor (Einschlagkörper) wird als kugelförmig (Radius r) angenommen.
- Die kinetische Energie des Impaktors mit der Geschwindigkeit v dient zum Teil (der γ -te Teil) der Verdampfung des Mondmaterials und zum anderen Teil (der $(1-\gamma)$ -te Teil) der Zertrümmerung und dem Auswurf des zertrümmerten Materials.
- Annahmen: $\gamma = 0,5$; $v = 20 \text{ km / s}$.
- Zur Zertrümmerung und zum Herausschleudern der Masse M eines bestimmten Gesteins ist eine bestimmte Energie E erforderlich. Diese berechnet sich wie folgt: $E = \varepsilon \cdot M$ (ε ... spezif. Energie).
- Annahme: $\varepsilon = 10^5 \text{ J / kg}$.
- Die herausgeschleuderte Masse M bestimmt sich aus dem Radius R und der Tiefe T des zylindrisch angenommenen Kraterbeckenvolumens. T und R werden als proportional zueinander angenommen: $T = \alpha \cdot R$.
- Annahme: $\alpha = 0,15$.
- Annahme: Die Dichte des Impaktors sei gleich der Dichte des getroffenen Mondbodens.

Die kinetische Energie des Impaktors berechnet sich wie folgt: $E_{\text{kin}} = \frac{m}{2} \cdot v^2 = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$.

Die Energie zum Zertrümmern und Herausschleudern ergibt sich aus:

$$E = \varepsilon \cdot M = \varepsilon \cdot \pi \cdot R^2 \cdot T \cdot \rho = \varepsilon \cdot \pi \cdot \alpha \cdot R^3 \cdot \rho.$$

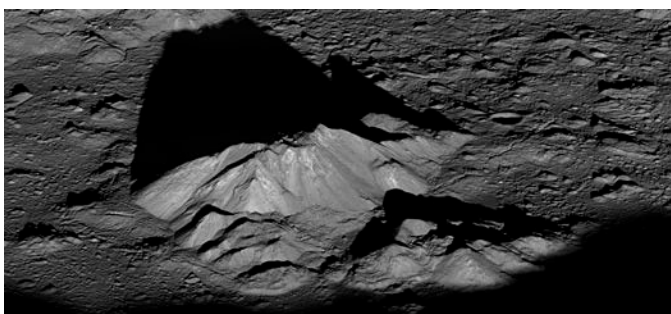
Nun werden alle Annahmen eingesetzt. Ganz am Anfang steht die Gleichsetzung des vom Impaktor eingebrachten Anteils der kinetischen Energie und der zur Zertrümmerung und zum Auswurf des Mondbodens benötigten Energie:

$$E = (1 - \gamma) \cdot E_{\text{kin}},$$

$$\varepsilon \cdot \pi \cdot \alpha \cdot R^3 \cdot \rho = (1 - \gamma) \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2,$$

$$\varepsilon \cdot \alpha \cdot R^3 = (1 - \gamma) \cdot \frac{2}{3} \cdot r^3 \cdot v^2,$$

$$\frac{R}{r} = \sqrt[3]{\frac{(1 - \gamma) \cdot 2 \cdot v^2}{\varepsilon \cdot \alpha \cdot 3}}.$$



Zentralberg des Kraters Tycho, aufgenommen am 10. 6. 2011 durch den Lunar Reconnaissance Orbiter. Der Berg erreicht eine Höhe von etwa 2000 m über dem Kraterboden. Man beachte den langen Schatten.

© NASA / GSFC / Arizona State University - <http://roc.sese.asu.edu/news/?archives/411-Tycho-Central-Peak-Spectacular!.html>, public domain.

Ergebnisse

zur Vorstellung der Stationen und zu den Kennenlernaktivitäten

[1] Station 1: Krater (Wallebene) Plato

51° 40' N und 9° 20' W, Gebiet der Montes Alpes,
Durchmesser: 101 km, Tiefe: ca. 1.000 m, Kraterwall etwa 2.400 m über dem Kraterboden.
Albedo: laut Karte 0,07, was auf Basalt (0,05) schließen lässt.

[2] Station 2: (Mond-)Alpen mit Alpental

Talmitte: 49° 12' N, 3° 37' O,
Länge: 166 km, maximale Breite: ca. 10 km, Talwände sind max. 1 km hoch.
Das Rheintal ist mit Erosionsschutt aufgefüllt.

[3] Station 3: Mare Imbrium

Mittelpunkt: 34,72° N, 14,91° W,
Durchmesser: 1146 km.

Kinetische Energie: $E_{\text{kin}} = \frac{m}{2} \cdot v^2$, Asteroidenmasse: $m = \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r^3$

Kinetische Energie jetzt: $E_{\text{kin}} = \rho \cdot \frac{2}{3} \pi \cdot r^3 \cdot v^2$

$$\text{Asteroidenradius: } r = \sqrt[3]{\frac{E_{\text{kin}}}{\rho \cdot \frac{2}{3} \pi \cdot v^2}} = \sqrt[3]{\frac{10^{27} \text{J}}{3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot \frac{2}{3} \pi \cdot (20 \frac{\text{km}}{\text{s}})^2}} = \sqrt[3]{\frac{10^{27} \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{3 \frac{10^{-3} \text{kg}}{10^{-6} \text{m}^3} \cdot \frac{2}{3} \pi \cdot (20000 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}} = \sqrt[3]{\frac{10^{16} \text{m}^3}{8\pi}} \approx 73551 \text{ m.}$$

Asteroidenradius: ca. 74 km.

[4] Station 4: Landeort von Apollo 15

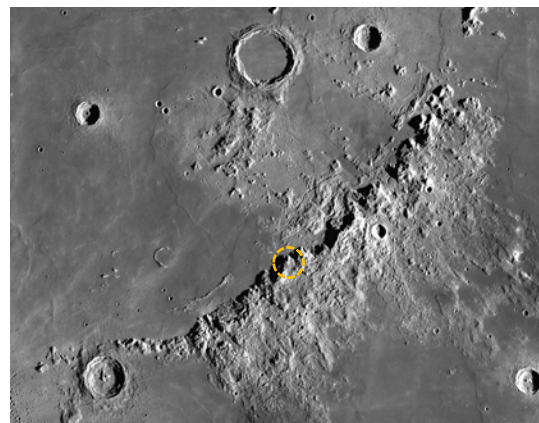
26° 7' 55,99" N, 3° 38' 1,90" O,
neben der Hadley-Rille am Fuße der Apenninen.
Mondlandung am 30. Juli 1971 um 22:16:29 UTC

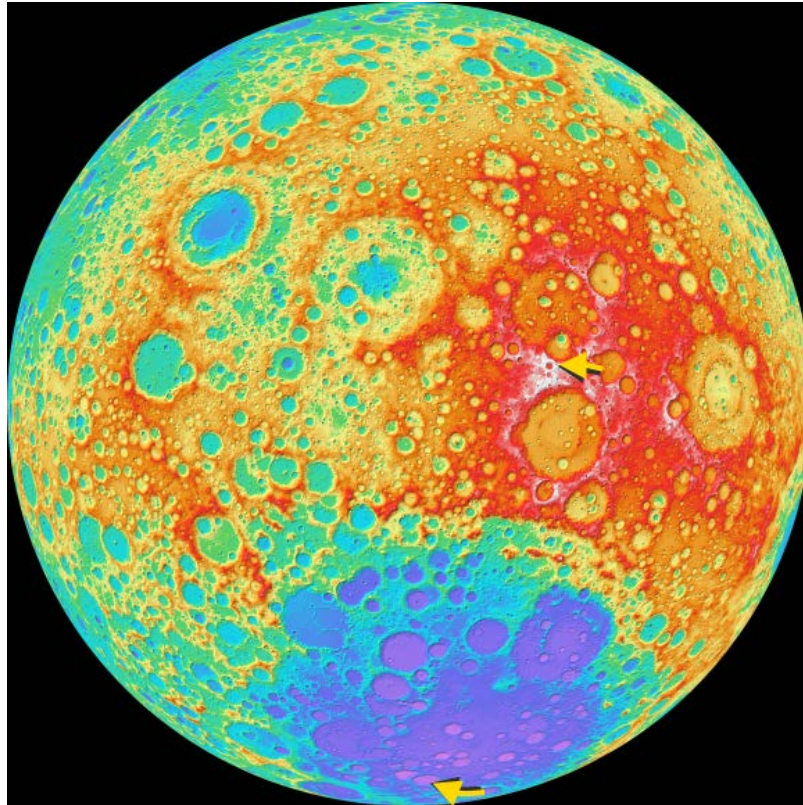
[5] Station 5: Apenninen mit höchsten Mondberg (Mons Huygens)

19,3° N, 0,59° W,
Länge: 600 km, größte Gebirgskette des Mondes.
Mons Huygens (19,92° N, 2,89° W): ca. 5,5 km
über Mare Imbrium.

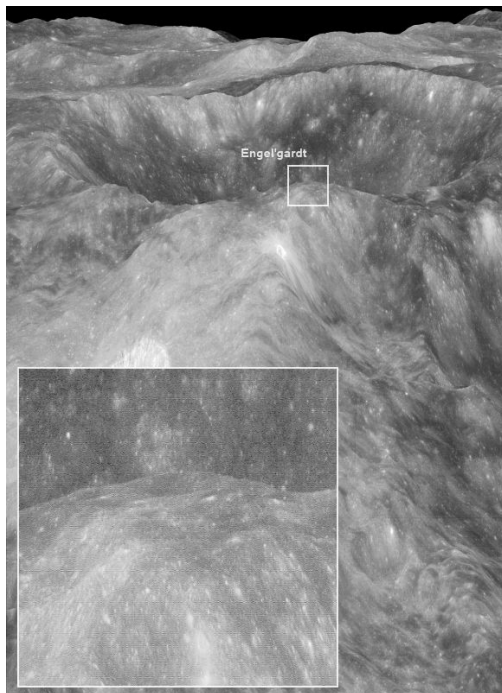
Sowohl der höchste als auch der tiefste Punkt der Mondoberfläche befinden sich auf der Rückseite des Mondes. Der höchste Punkt der Mondoberfläche (+10761 m) befindet sich bei 5,69° N, 200,29° O. Der tiefste Punkt der Mondoberfläche (-9094 m) befindet sich bei 69,2° S, 186,94° O.

Die Mondgebirge sind durch Impakte entstanden. Die Gebirge oder Berge der Erde sind i. d. R. durch Tektonik oder Vulkanismus entstanden.





Sowohl der höchste als auch der tiefste Punkt der Mondoberfläche befinden sich auf der Rückseite des Mondes. Der höchste Punkt (+10761 m) befindet sich bei $5,69^\circ$ N, $200,29^\circ$ O auf dem östlichen Rand des Kraters Engel'gardt nördlich des großen Kraters Korolev (Durchmesser: 420 km). Der tiefste Punkt (-9094 m) liegt bei $69,2^\circ$ S, $186,94^\circ$ O am Grunde eines unbenannten Kraters, der sich im Krater Antoniadi (Durchmesser: 138 km) befindet, welcher sich wiederum im Grunde des größten Einschlagkraters auf dem Mond, dem Einschlagbecken Südpol-Aitken-Becken (Durchmesser: 2240 km) befindet. © NASA / GSFC / Arizona State University.



Links: Höchster Punkt der Mondoberfläche auf dem Rand des Kraters Engel'gardt bei $5,69^\circ$ N, $200,29^\circ$ O (siehe oben). © NASA / GSFC / Arizona State University.
Rechts: Tiefster Punkt der Mondoberfläche bei $69,2^\circ$ S, $186,94^\circ$ O am Boden des größten Kraters innerhalb des großen Kraters Antoniadi (siehe oben). © NASA / GSFC / Arizona State University.

[6] Station 6: Strahlenkrater Kopernikus

9,62° N, 20,08° W,

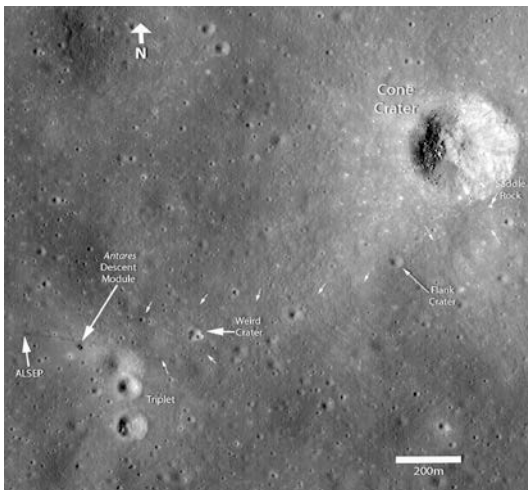
Durchmesser: 93 km, Tiefe: 3,8 km, Kraterwallhöhe bzgl. der umgebenden Ebene: 0,9 km.

Experimentiererergebnisse in Bildern (© O. Fischer).

Die Strahlen werden besser sichtbar, wenn man die graue Zementschicht der Einschlagebene mit einer dünnen Schicht helleren Pulvers (z. B. weißer Kalk) überdeckt.



[7] Station 7: Landeort von Apollo 14



3° 38' 43,08" S, 17° 28' 16,9" W, Hochland Fra Mauro.

Sichtbare Details:

- zurückgebliebenes Landegerüst der Landefähre Antares,
- Zusammenstellung wissenschaftlicher Experimente auf dem Mond für Apollo (Apollo Lunar Surface Experiments Package: ALSEP),
- Mondkrater Cone und mehrere kleine Krater,
- Fußspuren zu verschiedenen Kratern und zum ALSEP,
- Saddle Rock, ein kleiner Felsen nur 30 Meter vom Rand des Cone-Kraters entfernt, hier mussten die Astronauten erschöpft umkehren.

[8] Station 8: Krater Ptolemäus (Wallebene) und Alphonsus

Ptolemaeus: 9,2°S 1,8°W, Durchmesser: 154 km, Tiefe: 2,4 km,

Alphonsus: 13,4°S 2,8°W, Durchmesser: 119 km, Tiefe: 2,7 km,

Alphonsus besitzt einen Zentralberg, Ptolemaeus nicht.

Details: kleine Krater (die später entstanden sind und so eine Aussage zum Alter des Großkraters machen können), Rillen (Rima Alphonsus, ...)

Kratervolumen (Annahme Kreiszyylinder):

Ptolemaeus: $V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot (77 \text{ km})^2 \cdot 2,4 \text{ km} \approx 44.700 \text{ km}^3$.

Alphonsus: $V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot (59,5 \text{ km})^2 \cdot 2,7 \text{ km} \approx 30.000 \text{ km}^3$.

Das Ostseewasser würde den Krater Ptolemaeus halb und Alphonsus zu 2/3 füllen (Ostseevolumen: 21 000 km³).

[9] Station 9: Rupes Recta (gerade Furche)

Furchenmitte: 21° S, 8° W

Länge: etwa 110 km, Breite: 2-3 km, Höhe: 240-300 m



$$\text{Neigung: } \tan \alpha = \frac{250 \text{ m}}{2000 \text{ m}} \rightarrow \alpha \approx 7^\circ$$

Die Rupes Recta hat knapp 7° Neigung. 250 m bei 2000 m sind 12,5 m auf 100 m (also 12,5 %)

[10] Station 10: Strahlenkrater Tycho

43,37° S, 11,32° W,

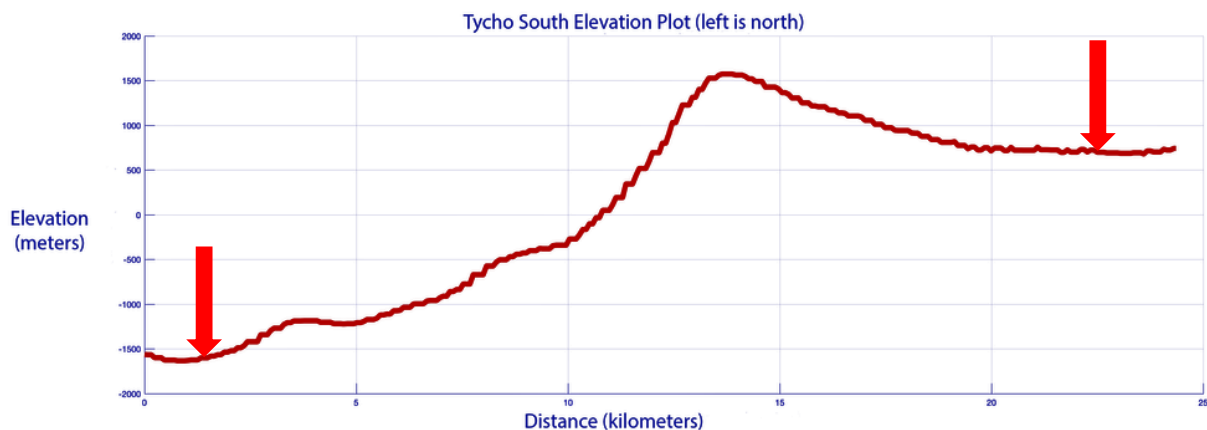
Durchmesser: 82 km, Tiefe: 4800 m.

Masse des beim Einschlag ausgeworfenen Mondmaterials:

„Ausgeworfene Höhe“ h laut Höhenprofil-Diagramm unten: 2,3 km.

$$M = V \cdot \rho = A \cdot h = \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot \rho = \pi \cdot (41 \text{ km})^2 \cdot 2,3 \text{ km} \cdot 3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \approx 12.146 \text{ km}^3 \cdot 3 \cdot \frac{10^{-3} \text{ kg}}{10^{-15} \text{ km}^3} \\ \approx 3,64 \cdot 10^{16} \text{ kg. Das sind 36,4 Billionen Tonnen.}$$

Das Empire State Building in New York hat eine Masse von 370.000 t. Es wären also etwa 100 Mrd. Gebäude dieser Art nötig, um die Auswurfmasse aufzuwiegen.



Höhenprofil entlang der im Bild des Kraters (zuvor gezeigt) rot markierten Linie. Der Kraterboden befindet sich bei etwa -1600 m, die den Krater umgebende Mondoberfläche hat ein Höhenniveau von etwa 700 m.

© NASA/GSFC/Arizona State University, <http://roc.sese.asu.edu/posts/954>

Größe des Einschlagkörpers (Impaktors):

$$\frac{R}{r} = \sqrt[3]{\frac{(1-\gamma) \cdot 2 \cdot v^2}{\epsilon \cdot \alpha \cdot 3}} = \sqrt[3]{\frac{(1-0,5) \cdot 2 \cdot (20 \text{ km/s})^2}{10^5 \text{ J/kg} \cdot 0,15 \cdot 3}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^8 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}}{10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot 0,45 \text{ s}^2}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^3}{0,45}} \approx 21.$$

Der Einschlagkörper, der den Krater Tycho erzeugte, hatte einen Radius von ca. 4 km.

Quellen

- Lutz Clausnitzer: Rückkehr zum Mond und noch viel weiter, Wissenschaft in die Schulen!, <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/rueckkehr-zum-mond-und-noch-viel-weiter/1285887>
- Lutz Clausnitzer: Hätten Jules Vernes Astronauten in den Weltraum gelangen können? Wissenschaft in die Schulen!, <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/haetten-jules-vernes-astronauten-in-den-weltraum-gelangen-koennen/1069364>
- Christian Wolff: Phoenicis Lacus - Ein Grabenbruch auf dem Mars, Wissenschaft in die Schulen! <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/zentrales-wis-dokument-ms-1-2011/1063463>
- Mondkartenkatalog des Lunar and Planetary Institute <https://www.lpi.usra.edu/resources/mapcatalog/>
- USAF Lunar Reference Mosaic: Lunar Earthside Hemisphere (LEM-1) <https://www.lpi.usra.edu/resources/mapcatalog/LEM/>
- Antonín Růkl, Kleiner Mondatlas. Mondkarten für jedes Fernrohr, Oculum-Verlag GmbH Erlangen, 2007
- Wolfgang Planding: Mondatlas, <https://www.mondatlas.de/strukturen/strukturen.html>
- Otto Struve, Beverly T. Lynds, Helen Pillans: Astronomie, Einführung in ihre Grundlagen, Walter De Gruyter Co, Berlin 1967, S. 107-120, <https://books.google.de/books?id=q9BZlmwbp0C&>
- J. Scheiner, K. Graff: Populäre Astrophysik, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 1922, S. 97-99, <https://books.google.de/books?id=-hKpBgAAQBAJ&>
- Mott T. Greene: Alfred Wegener, John Hopkins University Press, 2015
- Alfred Wegener: 1921, Monographie: „Die Entstehung der Mondkrater“

Anlagen

- **Arbeitsblatt** ‚Faszination Mondoberfläche – Erkundungstour auf dem „7. Kontinent“ ‘
- **Karten der Mondoberfläche:** ‚Höhen der Mondoberfläche - erd zugewandt.jpg‘ und ‚Höhen der Mondoberfläche - erd abgewandt.jpg‘ (Mondposter aus SuW 7/2019), ‚Topografie der Mondoberfläche.jpg‘, ‚Albedovertelung der Mondoberfläche.jpg‘
- **Aufnahmen der Mondoberfläche:** ‚Mondkrater Plato.png‘, ‚Mondalpentel.png‘, ‚Mare Imbrium.png‘, ‚Apollo 15 Landeort.png‘, ‚Apollo 15 Lunar Rover und Mount Hadley.jpg‘, ‚Apollo 15 Lunar Rover und Mount Hadley.jpg‘, ‚Mondgebirge Apenninen.png‘, ‚Mondkrater Kopernikus.png‘, ‚Mondkrater Kopernikus mit Strahlensystem.jpg‘, ‚Apollo 14 Fra Mauro.jpg‘, ‚Apollo 14 Landgebiet hochaufgelöst.png‘, ‚Mondkrater Ptolemaeus.jpg‘, ‚Mondkrater Alphonsus.png‘, ‚Geländestufe Rupes Recta‘, ‚Mondkrater Tycho‘, ‚Zentralberg des Mondkraters Tycho.jpg‘.