

# TERRESTRISCHE PLANETEN

DAS SONNENSYSTEM UND SEINE NÄCHSTEN VERWANDTEN FÜR NICHT-PHYSIKER

MARKUS PÖSSEL

HAUS DER ASTRONOMIE

UNIVERSITÄT HEIDELBERG, WS 2022/2023

# STERNE VS. PLANETEN, SONNENSYSTEM-EDITION



Bild: NASA



Bild: NASA, ESA, A. Simon (GSFC)

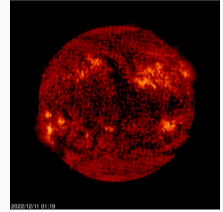


Bild: SOHO (ESA & NASA)

	Erde	Jupiter	Sonne
Radius:	1	11	109
Masse:	1	320	333000
Dichte:	1	0.24	0.26
Effektivtemperatur:	255 K	88 K	5777 K
Leuchtkraft:	$10^{-10}$	$10^{-9}$	1

# TERRESTRISCHE PLANETEN

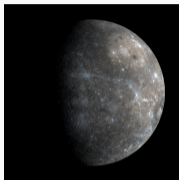


Bild: NASA/JPL

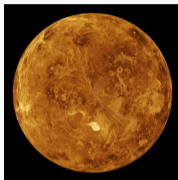


Bild: NASA/JPL



Bild: NASA

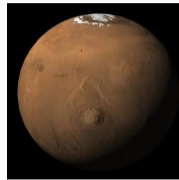


Bild: NASA/JPL-Caltech/  
University of Arizona

	Merkur	Venus	Erde	Mars
rel. Radius:	0.38	0.95	1	0.53
rel. Masse:	0.06	0.82	1	0.11
rel. Dichte:	0.99	0.95	1	0.71
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	5.4	5.2	5.5	3.9
unkomprimierte Dichte:	5.3	4.4	4.4	3.8
Sonnenabstand:	0.39	0.72	1	1.52

Unkomprimierte Dichte: Kompression durch Gravitation herausrechnen

- Energiebilanz incl. Strahlungsbilanz, Treibhauseffekt
- Innenleben incl. seismische Wellen
- Magnetfeld und Sonnenwind/Sternwind
- Vulkanismus, Tektonik
- Kraterbildung und Erosion
- Atmosphäre, Ozeane

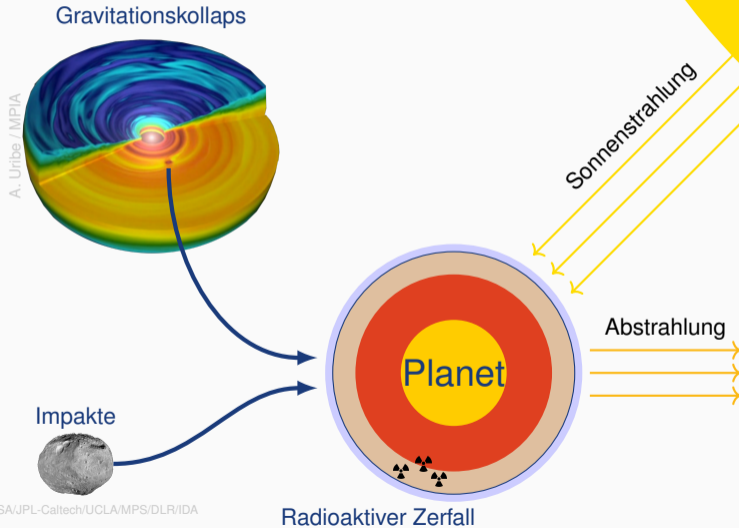


Bild: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA

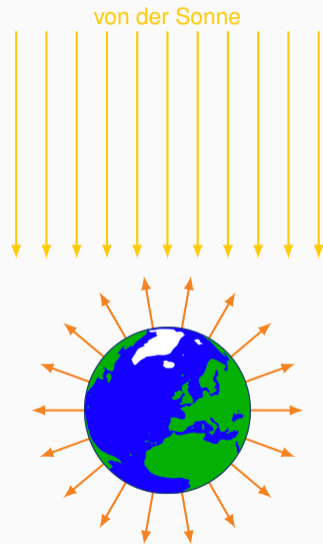
Einfache Rechnung: Sonne und Planet als thermische Strahler jeweils mit Effektivtemperatur  $T_{\text{eff}}$ :

$$L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \cdot \sigma_{SB} T_{\text{eff},\odot}^4$$

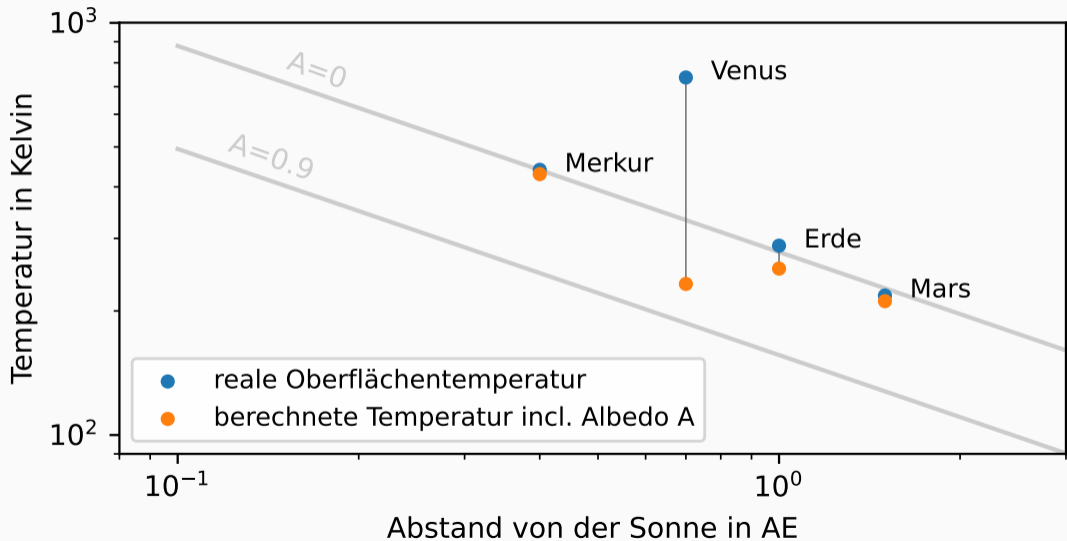
- Geometrie (Auffangfläche = Querschnittfläche, Abstrahlungsfläche = Oberfläche)
- Albedo  $A$  gibt reflektierten Bruchteil an

$$T_{\text{eff},P} = T_{\text{eff},\odot} \frac{(1 - A)^{1/4}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{R_{\odot}}{a_P}} = 278 \text{ K} (1 - A)^{1/4} \sqrt{\frac{1 \text{ AE}}{a_P}}$$

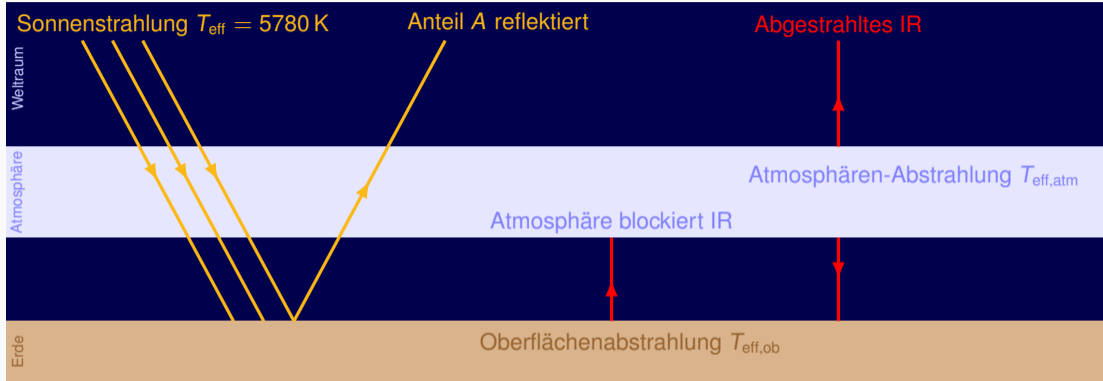
Details und Rechnung siehe Handout



# TEMPERATUREN VON PLANETEN



# TREIBHAUSEFFEKT, VEREINFACHTES MODELL



Neue Strahlungsbilanz:  $T_{\text{eff,ob}} = 2^{1/4} T_{\text{eff,atm}} \approx 1.19 T_{\text{eff,atm}}$

Für Erde wäre das 302 K [29°C] vs. 254 K [-19°C] ohne Treibhaus. Real: 287 K [14°C]

[Realität komplizierter: Schichten, Energieaustausch durch Konvektion in Troposphäre]



# SELEKTIVE DURCHLÄSSIGKEIT DER ERDATMOSPHÄRE

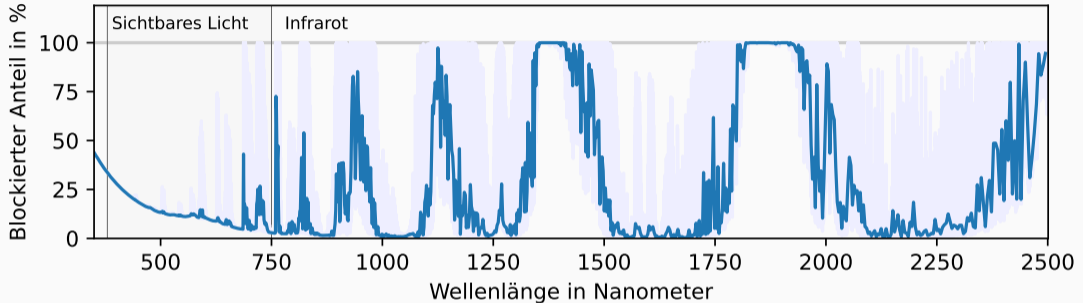


Diagramm nach Daten des TAPAS-Web Service <http://cds-espri.ipsl.fr/tapas/>, Bertaux et al. 2014

Grundlegende Einschränkung für Astronomen:

- UV, Röntgen direkt nur mit Weltraumteleskopen
- Bestimmte Infrarotbereiche nur in großer Höhe/Weltraum/Flugzeug
- Sichtbares Licht, Nahinfrarot, Radio gut vom Boden aus

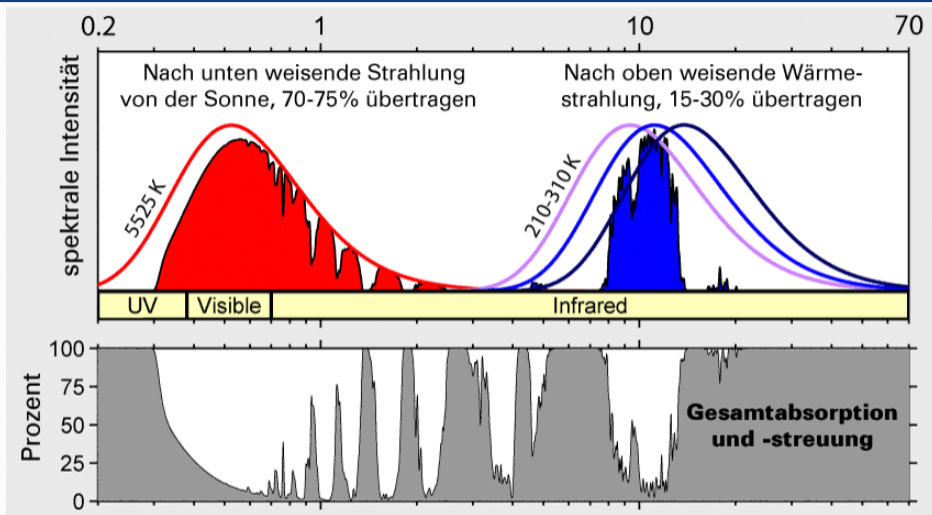


Bild: "Von der Atmosphäre übertragene Strahlung" von Robert A. Rohde via Wikimedia Commons. Wellenlänge in  $\mu\text{m}$ .  
Eigene Veränderungen: nur obere Hälfte gezeigt, ohne Überschrift. Lizenz: CC BY-SA 3.0

# ENERGIE AUS ENTSTEHUNGSPROZESS

Energie aus Kollaps aus protoplanetarer Scheibe:  
Potenzielle Energie umgewandelt in Wärme

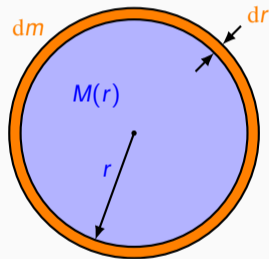
Auf bereits vorhandene Kugel mit Dichte  $\rho$  und Radius  $r$  eine weitere Schicht der Dicke  $dr$  und gleicher Dichte auftragen:

$$dE_K = dm \cdot \frac{GM(r)}{r} = 4\pi r^2 \rho dr \cdot \frac{4}{3}\pi \rho r^2 = \frac{16\pi^2 G}{3} \rho^2 r^4 dr$$

Aufintegrieren von 0 bis  $R$ :

$$E_K = \int_0^R dr \frac{16\pi^2 G}{3} \rho^2 r^4 = \frac{16}{15} \pi^2 G \rho^2 R^5 = \frac{3GM^2}{5R}$$

– bei konstanter Dichte  $\rho$  (Vereinfachung)



Für terrestrische Planeten:

Kollapsenergie  $E_K$ , einfallende Sonnenstrahlung über ein Jahr  $E_{S1a}$

	Merkur	Venus	Erde	Mars
$E_K$ [J]	$2 \cdot 10^{30}$	$2 \cdot 10^{32}$	$2 \cdot 10^{32}$	$5 \cdot 10^{30}$
$E_{S1a}$ [J]	$5 \cdot 10^{24}$	$2 \cdot 10^{24}$	$4 \cdot 10^{24}$	$5 \cdot 10^{23}$
$E_K/E_{S1a}$	$4 \cdot 10^5$	$10^8$	$5 \cdot 10^7$	$10^7$

Vergleiche  $E_K/E_{S1a}$  mit Alter des Sonnensystems:  $4.5 \cdot 10^9$  Jahre

Tatsächliche Wärmeflüsse (Dye 2012):

$(11 \dots 39) \cdot 10^{12}$  W (Radioaktivität) +  $(5 \dots 38) \cdot 10^{12}$  W (Kollaps) =  $(43 \dots 49) \cdot 10^{12}$  W (gesamt)

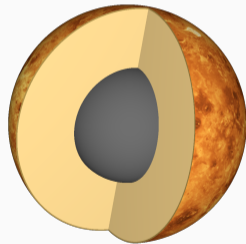
Allgemein drei Dichtezonen:

- **Kern** (am dichtesten, oft Eisen — ggf. äußerer Kern flüssig, innerer Kern fest)
- **Mantel** (weniger dicht, Silikate/Magnesium, Festkörper aber formbar/fließend)
- **Kruste** (am leichtesten)



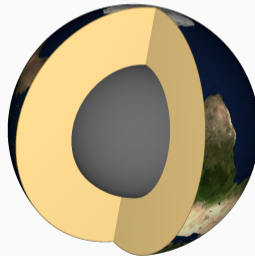
Merkur

vergleichsweise großer Kern — Folge einer Kollision, Mantel abgestreift?



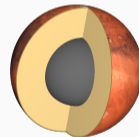
Venus

vergleichsweise dicke Kruste (ca. 70 km)



Erde

Plattentektonik  
7 große, ~ 45 kleine



Mars

Zwei-Plattentektonik?

# INNENLEBEN — WOHER WEISS MAN DAVON ÜBERHAUPT?

- Seismische Wellen:  
Ausbreitungsgeschwindigkeiten,  
Beugung/Brechung an Grenzen
  - ▶ P-Wellen: longitudinal (in flüssigem und festem Medium)
  - ▶ S-Wellen: Schwerwellen, nur in festem Medium
  - ▶ K in der Abb.: Kompressionswellen im Kern

Weitere Info: Vortrag zu Mars InSight

- Gravitationsfeld vermessen:  
Umlauf der Sonde oder Sonden (GRACE),  
Radio-Abstandsmessung
- Merkur: Leichte Variationen der gebundenen  
3:2 Rotation/Libration um die Sonne

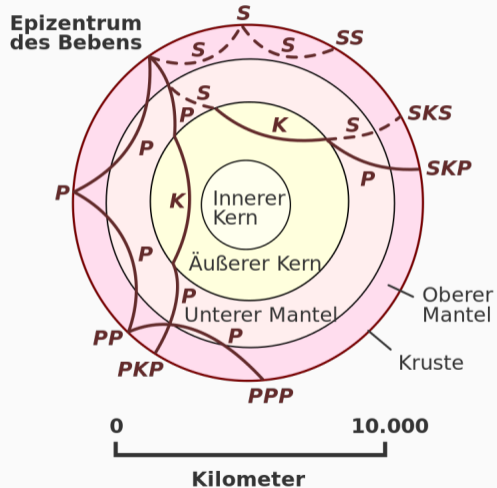


Bild: USGS via Wikimedia Commons

- Im Mantel ggf. Konvektion
- Kruste: Wärmeleitung
- Vulkanausbrüche/austretende Lava

Schlüssel: Größe des Himmelskörpers!

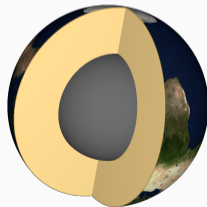
Vorhandene Energie (Kollaps, Radioaktivität)

$$\sim V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

Abstrahlung ins All

$$\sim F = 4\pi R^2.$$

Auskühl-Zeitskala  $\sim 1/R$  (vgl. Babies)



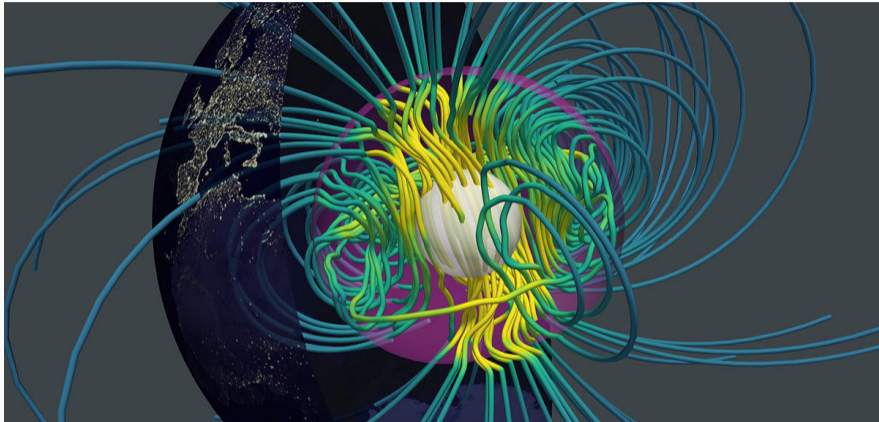


Bild: N. Schaeffer/ISTERRE (Schaeffer et al. 2017)

Dynamo: Selbstverstärkendes Magnetfeld durch hinreichend schnell rotierendes, elektrisch leitendes Inneres (äußerer Kern) und Konvektion (Wärmetransport durch Massentransport)



# MAGNETFELD UND SONNENWIND

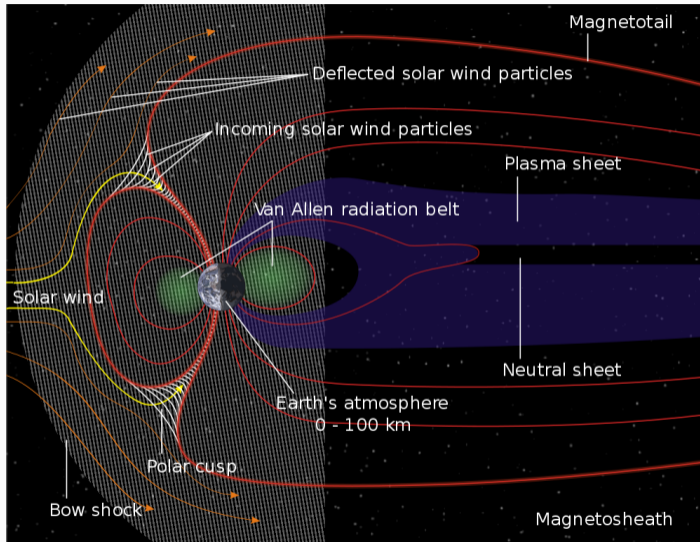


Bild: NASA via Wikimedia Commons, SVG-Version: Aaron Kaase

# TERRESTRISCHE PLANETEN: MAGNETFELDER

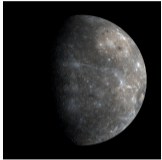


Bild: NASA/JPL

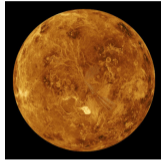


Bild: NASA/JPL



Bild: NASA



Bild: NASA/JPL-Caltech/  
University of Arizona

- **Merkur:** Schwaches Dipol-Magnetfeld, Magnetosphäre: Flüssiger Kern mit Dynamo? Oder “eingefrorener” Rest?
- **Venus:** Kein Kern-Magnetfeld — fehlende Konvektion und/oder zu langsame Rotation
- **Erde:** äußerer Kern geschmolzen, vergleichsweise rasche Rotation (Mondentstehung!), Konvektion
- **Mars:** frühes Magnetfeld, jetzt nicht mehr – fehlender Dynamo: fehlende Konvektion, komplett flüssiger Kern; Kruste stärker magnetisiert als gedacht

# VULKANISMUS UND TEKTONIK

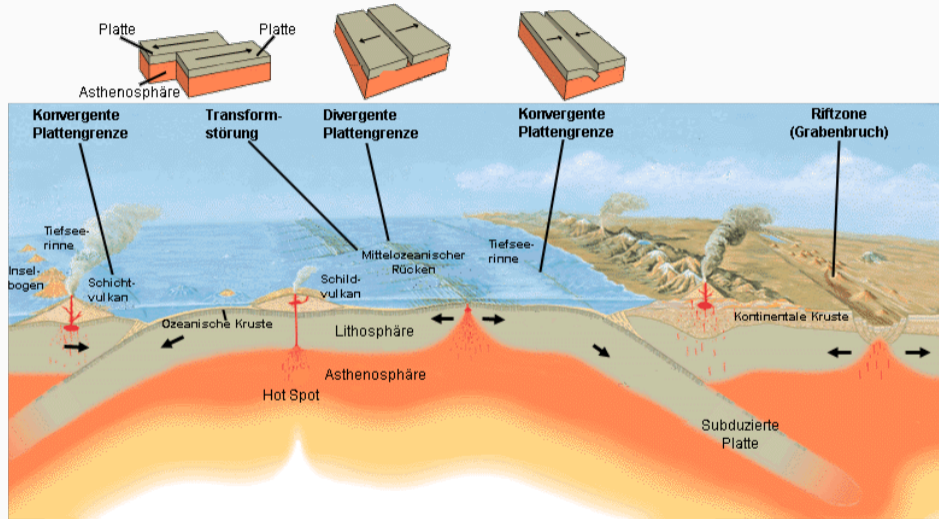
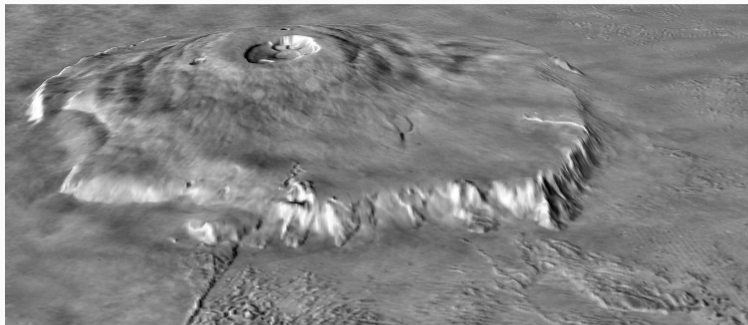


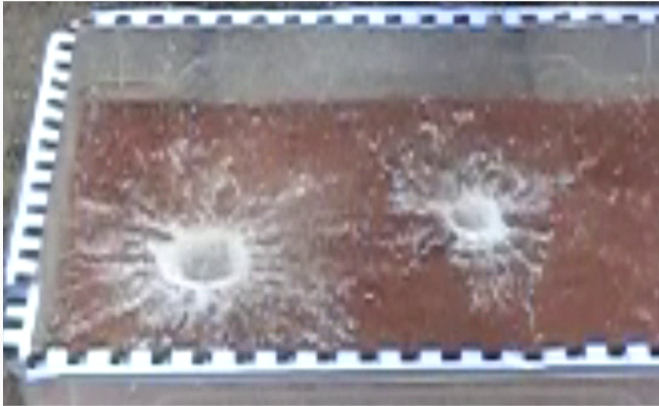
Bild: USGS/USGov, modified by Eurico Zimbres and User TomCatX, via Wikimedia Commons



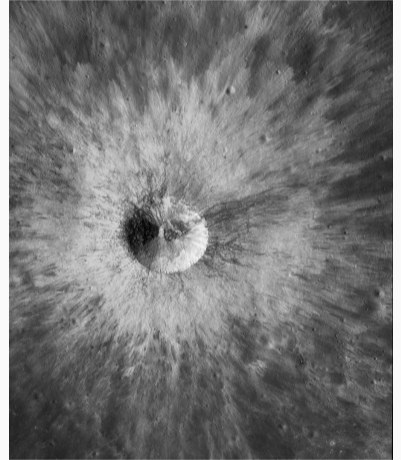
Schildvulkan Mons Olympus auf dem Mars. Bild: NASA/MOLA Science Team

- Abhängig von Krustendicke
- Lava-“Flutung” kann Oberflächen erneuern (z.B. Mare auf dem Mond)
- Eintrag von Gasen in die Atmosphäre (z.B. ursprüngliches CO<sub>2</sub>)
- Klima-Beeinflussung durch Aerosole  
(z.B. Temperaturreduktion  $> 0.5^{\circ}\text{C}$  durch Krakatau-Ausbruch 1883)

# KRATERBILDUNG MIT EJEKTA

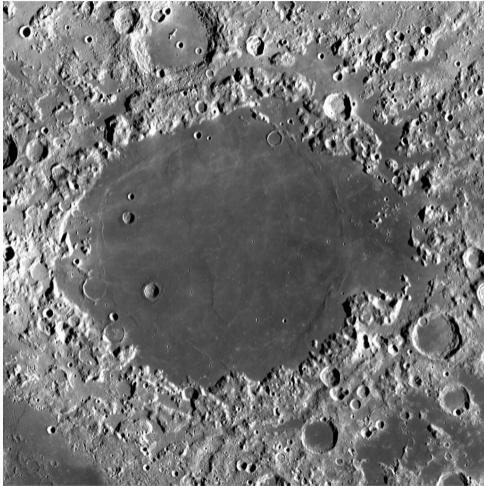


Film: Astronomiekurs Science Academy BW 2012



Namenloser Krater, Durchmesser 1.8 km.  
LRO-Aufnahme vom 3.11.2018. Bild:  
NASA/GSFC/Arizona State University

# KRATER UND OBERFLÄCHENERNEUERUNG



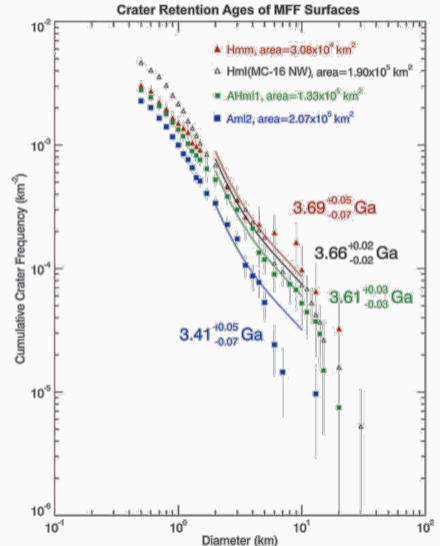
Mare Crisium auf dem Mond, Durchmesser 560 km.  
Bild: NASA's Lunar Reconnaissance Orbiter via Wikimedia Commons



Manicouagan Impact Structure, Quebec. 5 km-Meteorit vor ca. 214 Millionen Jahren.  
Bild: NASA/GSFC/LaRC/JPL, MISR Team

- Krater sammeln sich mit der Zeit an
- Kumulative Statistik ermöglicht Abschätzung des Zeitpunkts der letzten Erneuerung
- Kalibration der Relation durch Mondregionen mit radioaktiver Altersbestimmung
- Extrapolation auf innere Planeten bis Mars
- Verallgemeinerung auf äußeres Sonnensystem schwierig — Zusatzannahmen nötig

Bild rechts: Kraterstatistik Medusae Fossae Formation, Mars. Zimbelman & Scheidt 2012



Minimal-Oberflächenveränderungen:

Mechanische Einwirkung und  
Wärmeeinwirkung von Einschlägen sowie  
hochenergetische Sonnenstrahlung  
erzeugen **Regolith** als nicht-irdisches  
Lockermaterial



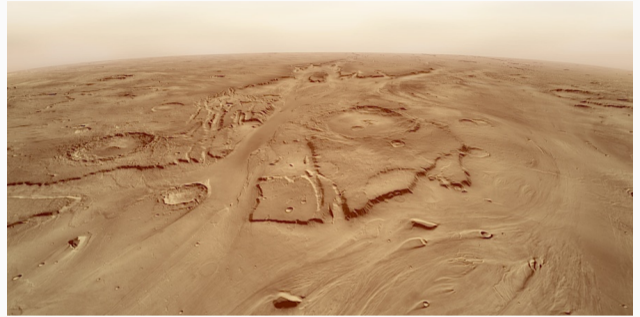
Apollo 17-Mission der NASA, Taurus-Littrow-Region des Mondes



# EROSION: ZERSETZUNG DURCH WASSER, EIS, WIND



Red Rock Canyon State Park, CA. Bild: Alluvial Plain von Matt Affolter via Wikimedia Commons unter CC BY-SA 3.0



Strömungsmuster im Kasei Valles, Mars, als Spuren früheren fließenden Wassers. Bild: NASA/JPL-Caltech/Arizona State University

Charakteristische Formen und Muster: Abbruchkanten, Strömungsmuster, Dünenketten

Auf der Erde zusätzlich: Spuren von Leben (Pflanzen, Moose, ...)

Siehe Video zur Ergänzung von Solmaz Adeli (DLR) zu Wasser auf dem Mars

- Haltbarkeit abhängig von Größe, Sonnennähe, Magnetfeld (Teilchenstrom)
- Chemische Zusammensetzung beeinflusst durch Vulkanismus
- Kreisläufe und Gleichgewichte (z.B.  $\text{CO}_2$  auf der Erde im Wasser gelöst)
- Erde: Einfluss von Leben (Sauerstoff-Atmosphäre: Blaualgen vor 3.5 Mia. Jahren, Bindung von Kohlenstoff in Skeletten/Schalen)  
(wichtig für Nachweis von Leben auf Exoplaneten!)



# ERDÄHNLICHE EXOPLANETEN?

Vergleichbare Prozesse bei erdähnlichen Planeten — oder doch noch etwas ganz Neues?  
Detailaufnahmen fehlen — Modellierung wichtig, angefangen bei Atmosphären

Skalierung jenseits des Sonnensystems, Beispiel Wasserplaneten:

Bei konstantem Volumenanteil  $f_W$  des  
Wassers skaliert mittlere Wassertiefe wie

$$d = R_P [1 - (1 - f_W)^{1/3}]$$

mit  $R_P$  Planetenradius  
(Erde  $f_W = 0.001$  und  $d = 2$  km)



Bild: ESA/Alexander Gerst

- Terrestrische Planeten: Solide Oberfläche, ggf. dünne Atmosphäre
- Energiebeiträge
  - ▶ Entstehung
  - ▶ Impakte
  - ▶ Radioaktivität
  - ▶ Einstrahlung
- Wenige Grundprozesse am Werke:
  - ▶ Tektonik
  - ▶ Einschläge
  - ▶ Vulkanismus
  - ▶ Erosion
- Größe als Schlüsselfaktor: thermische Entwicklung, Magnetfeld
- Atmosphäre abhängig von Chemie, Sternabstand, Größe