



# Die Erde und der Mond – ein unzertrennliches Paar?

Dr. Thomas Klügel  
Geodätisches Observatorium Wettzell



Förderverein Geodätisches Informationszentrum Wettzell e.V.



# Erforschung des Mondes (1)



- Optische Beobachtung mit bloßem Auge
  - Land und Meere
  - Mondbahn
- Optische Beobachtung mit Teleskopen (seit 1609)
  - kraterreiche Hochländer (Terraes) und kraterarme Tiefebenen (Maria)
  - Topographie aus Schattenwürfen
  - Fließstrukturen in den Maria
  - tektonische Brüche

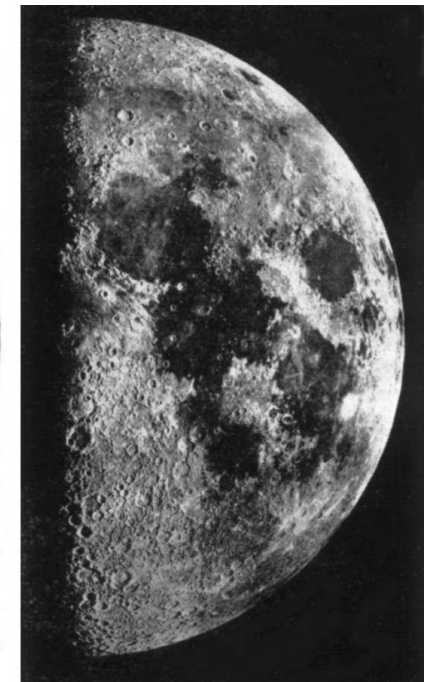
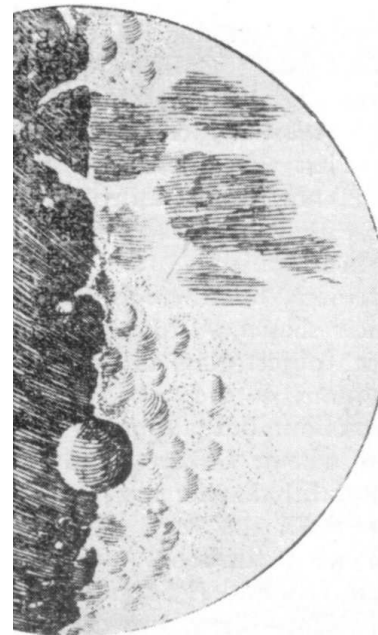


Bild: Wikipedia



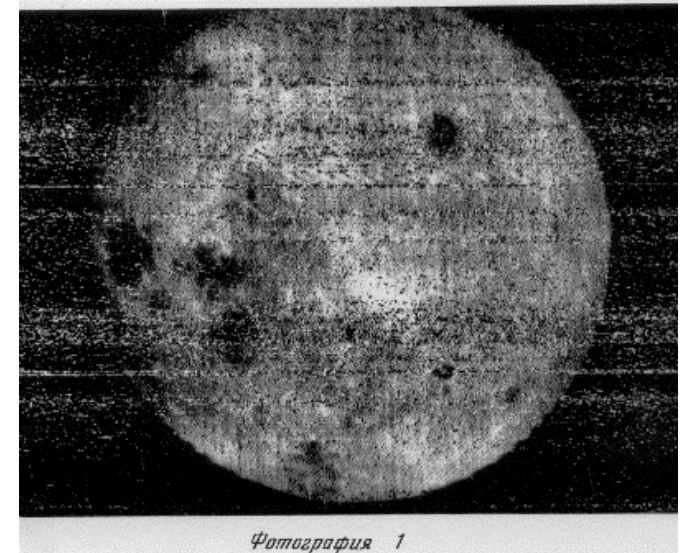
## Erforschung des Mondes (2)



- Fernerkundung durch Mond-Orbiter (seit 1959)
  - Topographie (Stereofotografie, Altimetrie)
  - Schwerefeld (Gesteinsdichte, Krustendicke)
  - Magnetfeld (Kernaufbau, Sonnenwind)
  - Elektrische Leitfähigkeit (Mineralogie)
  - Spektroskopie (Gase, mineralog. Zusammensetzung, Wassereis,...)
  - Neutronenaktivität (Wasserstoff)

Wichtige Mondsonden  
seit 1976:

Clementine (1994)  
Lunar Prospector (1998)  
SMART-1 (2003)  
Selene/Kaguya (2007)  
Chang'e (2007, 2010)  
Chandryaan (2008)  
LRO (seit 2009)  
GRAIL (2012)



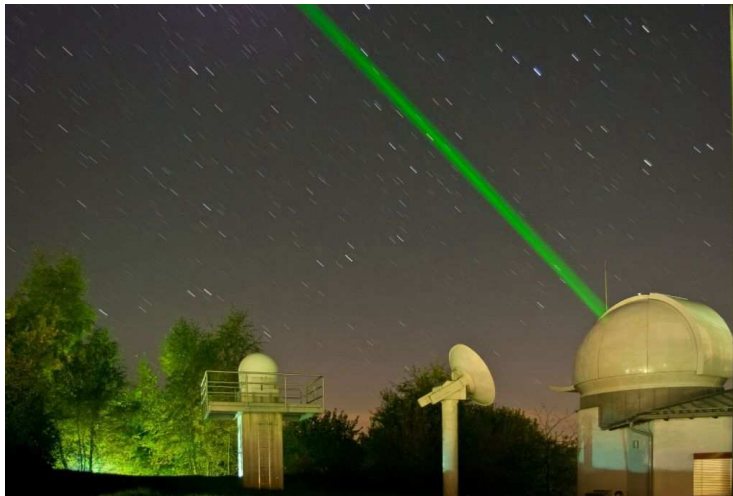
Lunik 3 (Roskosmos)



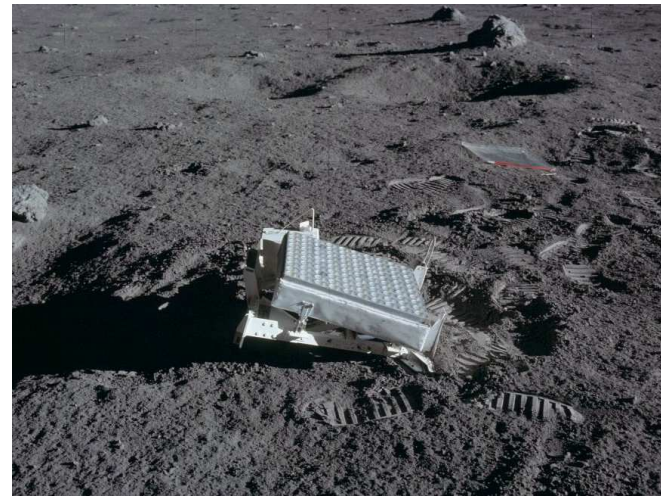
## Erforschung des Mondes (3)



- Distanzmessung von der Erde aus (Laser Ranging, seit 1969)
  - Mondorbit (Erde-Mond System)
  - Physikalische Librationen (Masse, Trägheitsmoment → Dichteprofile, CMB-Abplattung → flüssiger Kern)
  - Gezeitendeformationen (elastische Eigenschaften)



Wettzell Laser Ranging System



Apollo-14 Retroreflektor (NASA)



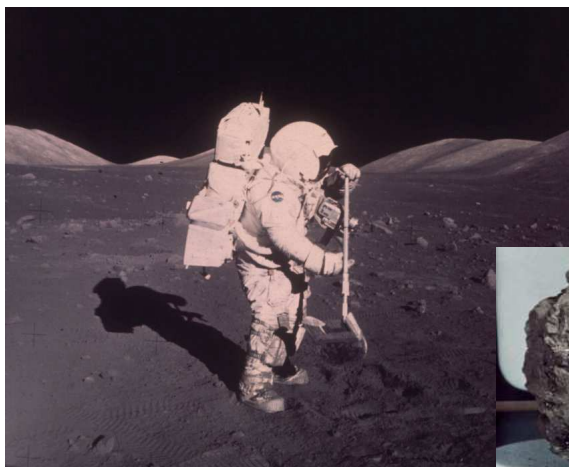


# Erforschung des Mondes (4)



## Landungen auf dem Mond (seit 1969)

- Geophysikalische Messungen an der Mond-Oberfläche
  - Seismologie
  - Wärmefluss
- Entnahme von Gesteinsproben (Mondgestein, Mondmeteoriten)
  - Geochemie, Mineralogie, Geochronologie, Paläomagnetik



Bilder: NASA



Mond-Mission	Mitgebrachte Probenmengen
Apollo 11	22 kg
Apollo 12	34 kg
Apollo 14	43 kg
Apollo 15	77 kg
Apollo 16	95 kg
Apollo 17	111 kg
Luna 16	101 g
Luna 20	55 g
Luna 24	170 g

Wikipedia



# Oberflächen von Erde und Mond



NASA/Blue Marble

- Kontinente (junge Faltengebirge, Kratone bis 4,28 Mrd Jahre alt)
- Ozeanbecken (bis 200 Mio Jahre alt)
- Landoberfläche: Böden, verw. Gesteine
- Max. Höhendifferenz 20 km
- Praktisch keine Krater
- Permanentes Recycling der Erdkruste durch endogene (Plattentektonik) und exogene Prozesse (Erosion, Sedimentation)



Luc Viatour

- Highlands (bis 4,53 Mrd Jahre alt)
- Maria (mit erstarrter Lava gefüllte Asteroidenkrater)
- Oberfläche: Mondstaub („Regolith“)
- Max. Höhendifferenz 12 km
- Highlands mit Kratern „gesättigt“, Maria deutlich weniger Krater
- Veränderung ausschließlich durch Asteroideneinschläge

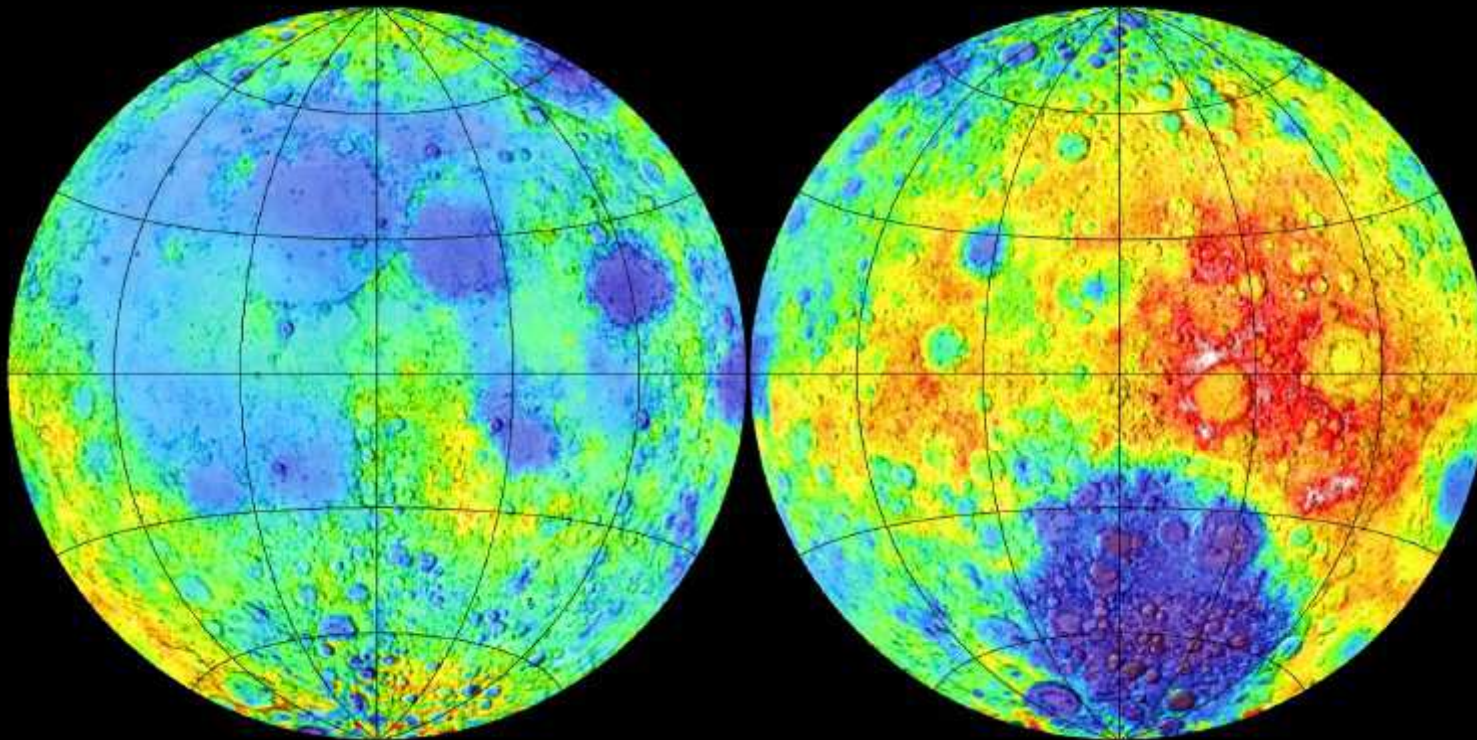


# Topographie des Mondes



Near side

Far side



Topography (km)





# Atmosphäre / Hydrosphäre



- Oberflächendruck: 100 000 Pa
- Zusammensetzung: 78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff, 1 % Argon, 0.04 % CO<sub>2</sub>
- Wasser: 1,4 Mrd Kubikkilometer
- Oberflächendruck:  $3 \times 10^{-10}$  Pa
- Zusammensetzung: Spuren von He, Ne, H<sub>2</sub> und Ar
- Wasser: Spuren im Gestein/Regolith, vermutlich größere Mengen an den Polen (< 1 Kubikkilometer)

## Herkunft des Wassers?

- Ausgasen aus dem Erdinnern
- Asteroiden/Protoplaneten
- Kometen (Wasserstoff-Isotopenverhältnis)





# Mondgesteine



**Basalt**  
vulkanischer Ursprung, feinkörnig bis glasig, reich an Eisen und Magnesium.



**Anorthosit**  
helle, praktisch ausschliesslich aus Ca-Plagioklas bestehende Gesteine.



**Mg-reiche Gesteine**  
Neben Plagioklas reich an Olivin und Pyroxen.



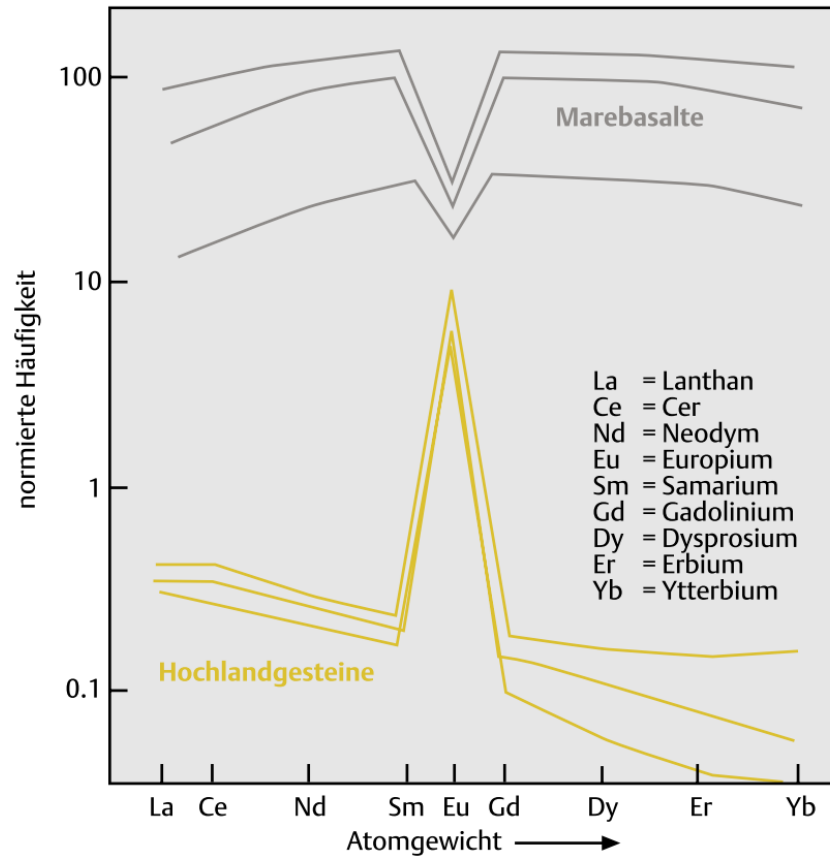
**KREEP-Basalt**  
Gestein aus Kalium, SEE- und Phosphor-angereicherter Restschmelze.



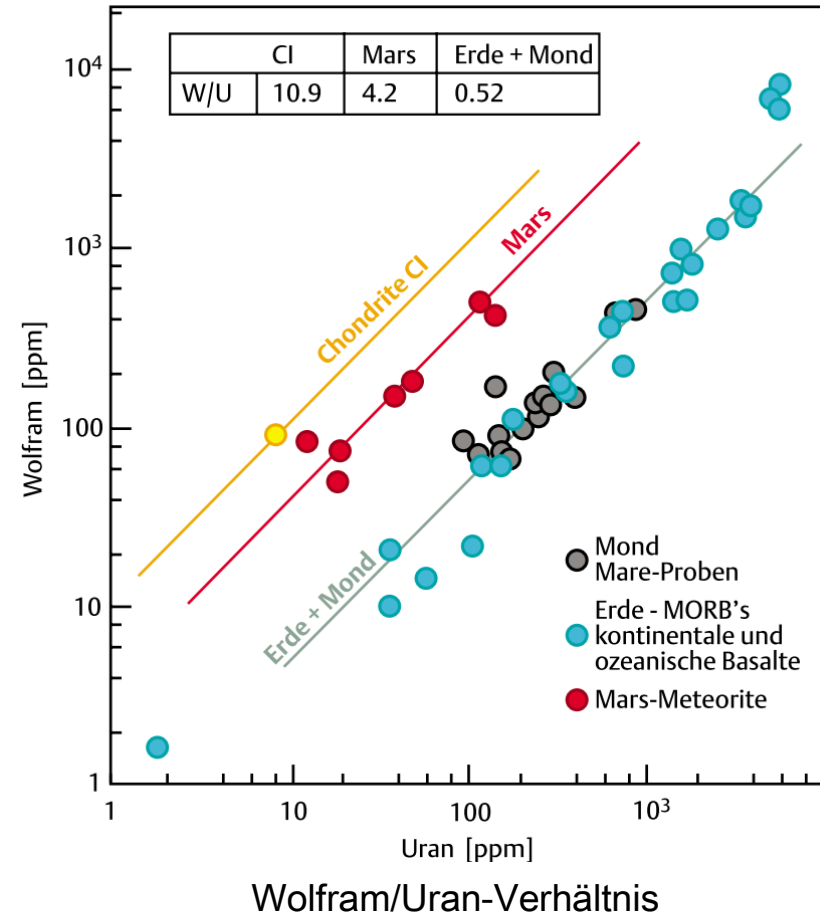
**Impakt-Brekzie**  
Durch Einschläge ausgeworfene u. zementierte Gesteinbruchstücke



# Geochemie (1)



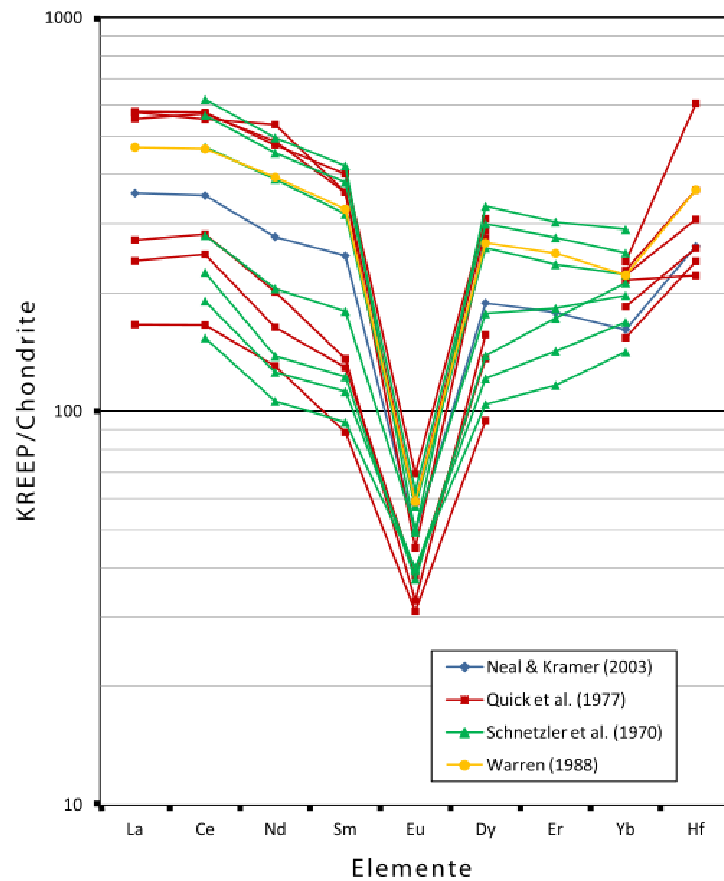
Konzentration der Seltenen-Erden-Elemente, Europium-Anomalie



Auch:  $^{50}\text{Ti}/^{47}\text{Ti}$  Verhältnis identisch  
 Aber:  $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$  leicht unterschiedlich



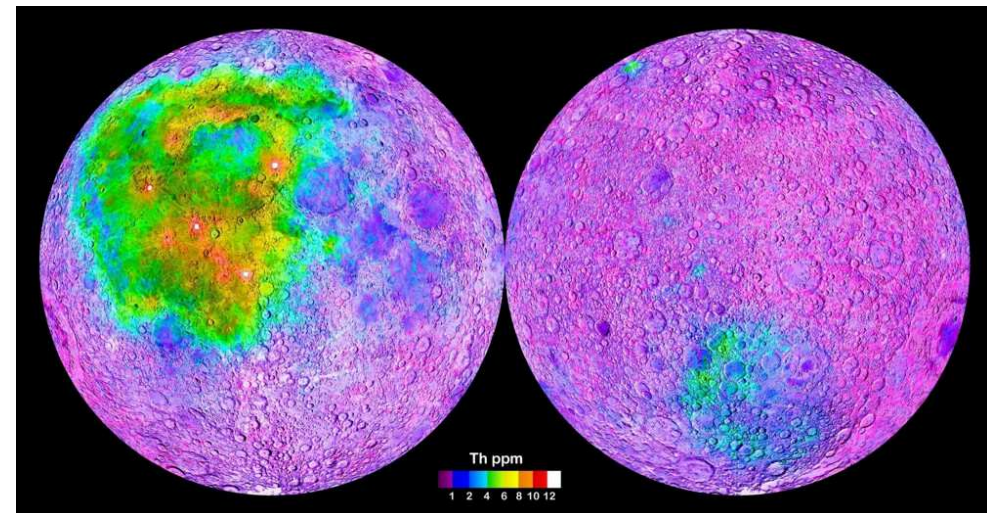
## Geochemie (2)



Verteilung von Seltenen-Erden-Elementen in KREEP-Basalten (Bild: Gretarsson)

### KREEP

- reich an inkompatiblen Elementen (K, P, SEE, U, Th)
- Wärme durch radioaktiven Zerfall → junger Vulkanismus (bis vor 1.2 Mrd Jahren)



Thorium-Verteilung, Procellarum-KREEP Terrane (Gamma-Spektrometer, Lunar Prospector, NASA)

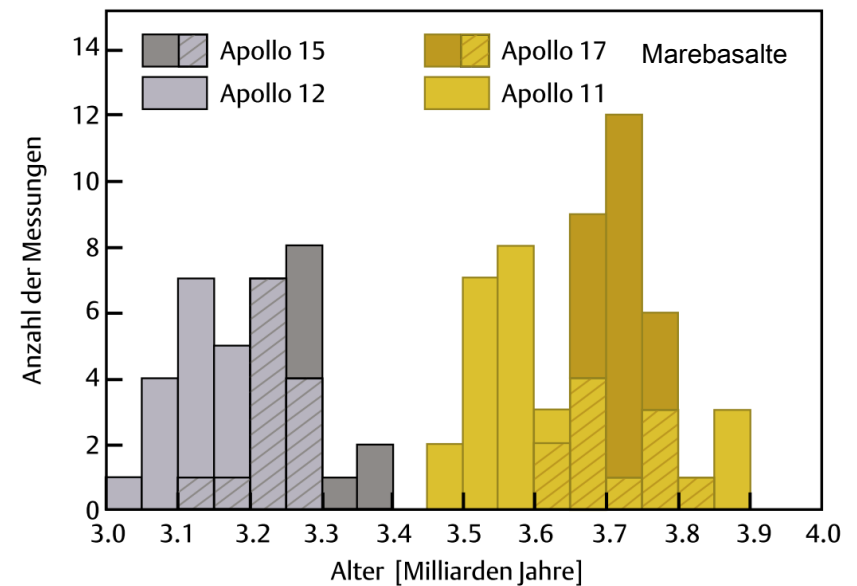
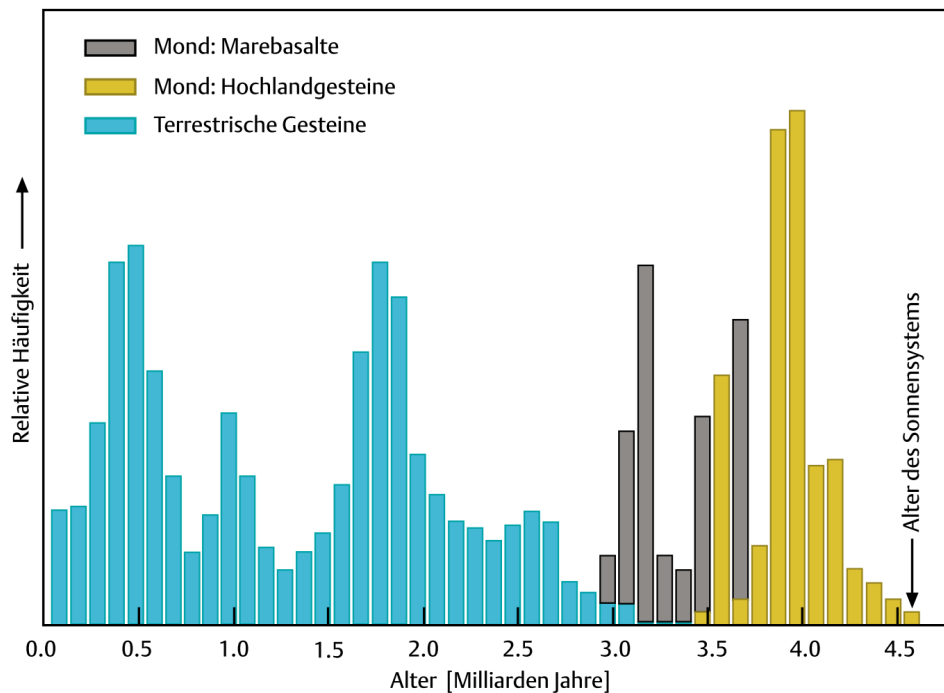


# Alter der Mondgesteine

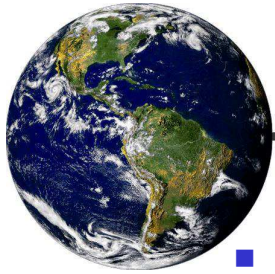


## Radiometrische Altersdatierung

- Relative Zunahme in der Konzentration eines Tochterisotops nach Ende der Durchmischung (z.B. durch Kristallisation)
- $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$  (Hz: 48 Mrd. Jahre)
- $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$  (Hz: 1,25 Mrd Jahre)
- $^{146}\text{Sm} \rightarrow ^{142}\text{Nd}$  (Hz: 106 Mrd Jahre)



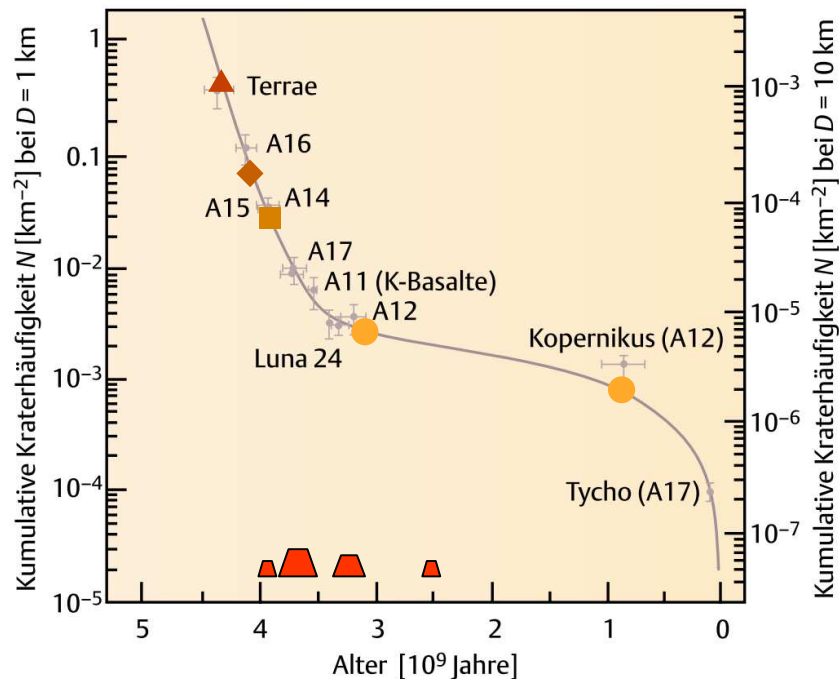




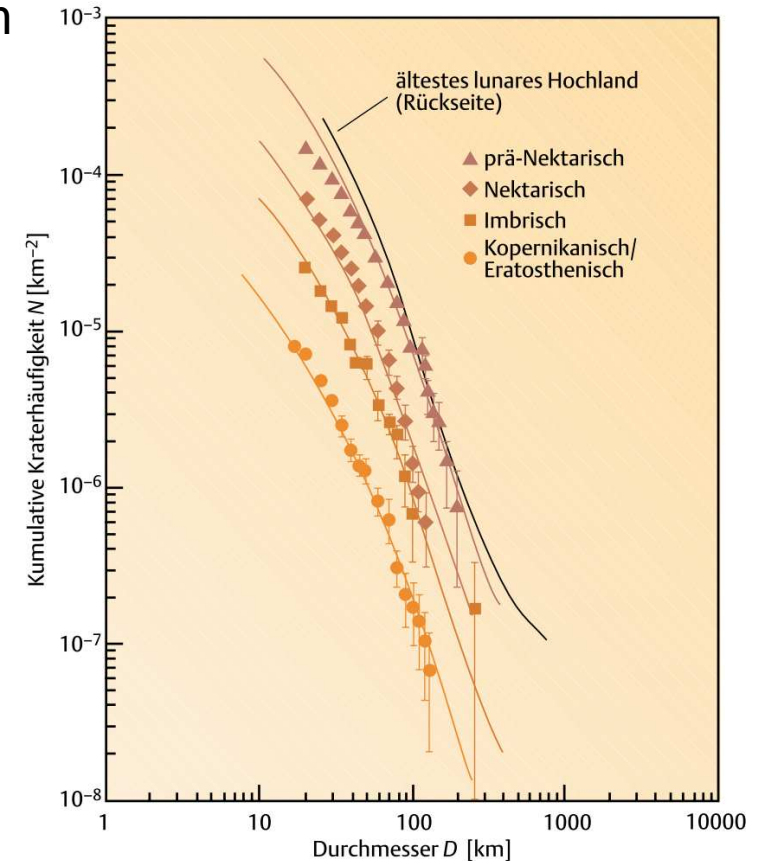
# Altersbestimmung durch Kraterzählung



- Junge Strukturen zeigen weniger Krater
- „Eichung“ der Häufigkeitsverteilungen mit radiometrischen Datierungen
- 5 „Leithorizonte“ der Entwicklungsgeschichte des Mondes



Impaktchronologie des Mondes



Kumulative Häufigkeitsverteilung von Kratern der fünf Hauptepochen der Mondgeschichte



# Verwitterung



## Erde:

- Lockerung und Zersetzung der Gesteine durch chemische und physikalische Prozesse
- Erosion, Transport und Sedimentation (→ Wasser!)
- Erosions- und Sedimentationsraten bis zu 1000 m/Mio a
- Teil 1 des Kreislaufs der Gesteine



## Mond:

- Kosmische Verwitterung: allmähliche Zerstörung der Gesteinsoberfläche durch Einschlag von Mikrometeoriten → Pulverisierung („Regolith“)
- Veränderung der Kristallstruktur durch Sonnenwind-Partikel → Nachdunklung (Expositionsalter)
- Akkumulationsrate  $\sim 1,5$  mm/Mio a

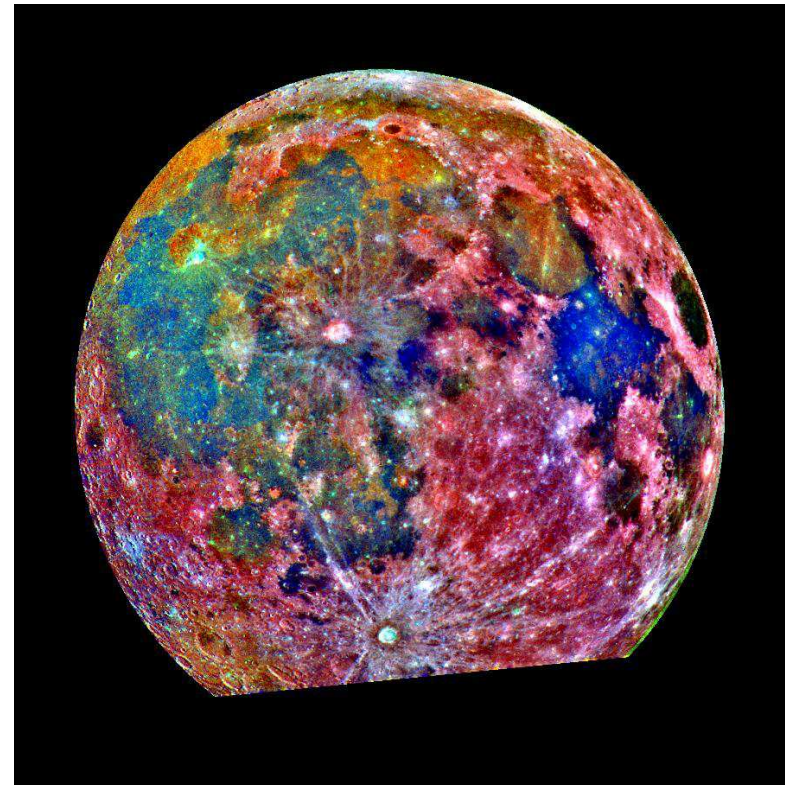
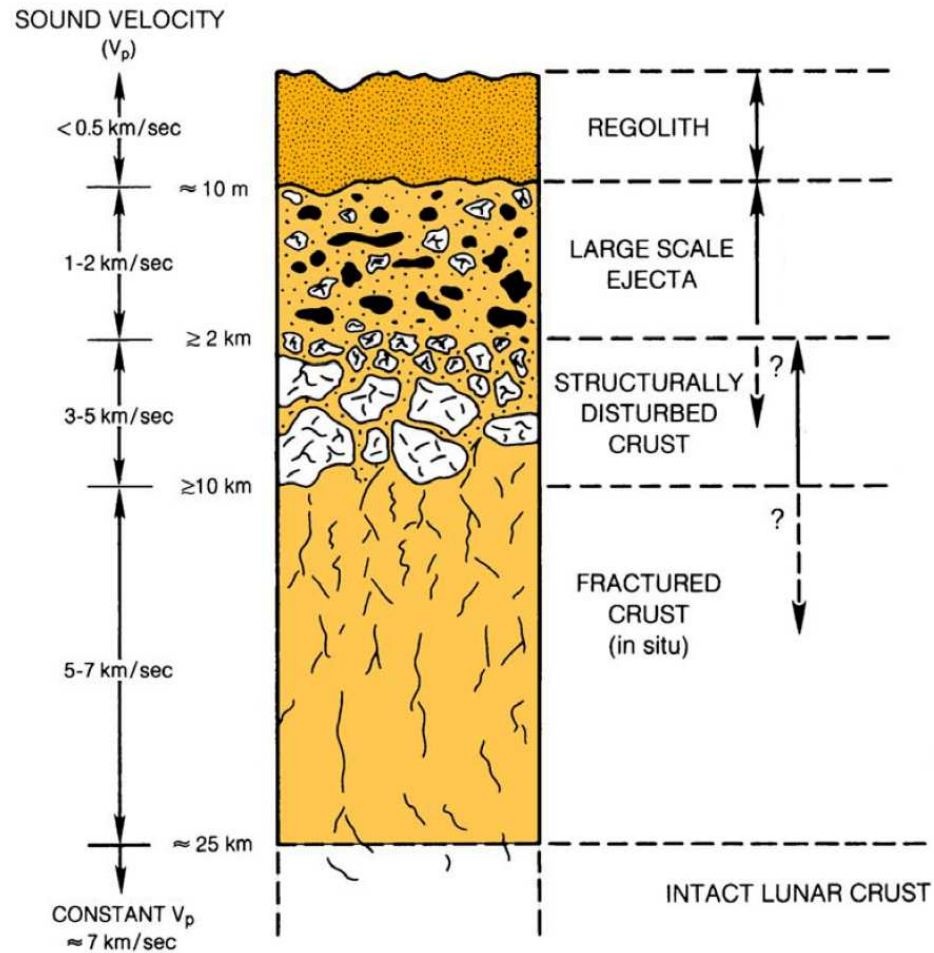


Bilder: NASA

# Oberflächengeologie des Mondes



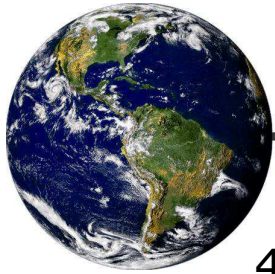
Schnitt durch die Mondoberfläche



Falschfarbenaufnahme des Mondes, 1992 aufgenommen von der Galileo-Sonde auf dem Weg zum Jupiter

Nach Hörz et al. (1991)



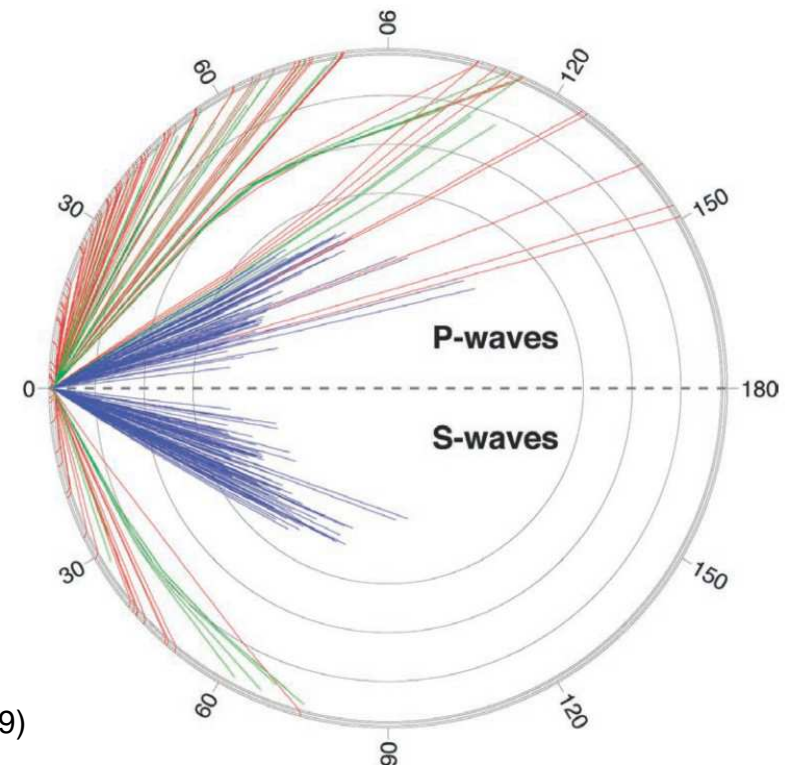
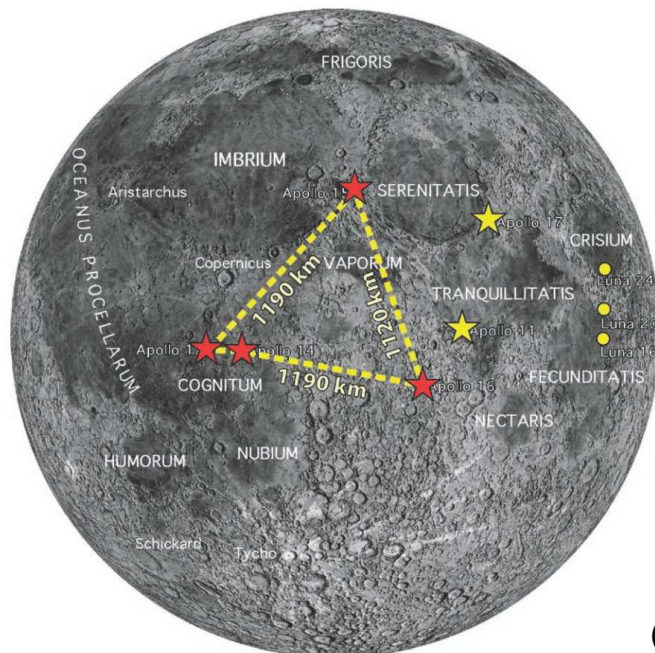


# Seismizität



## 4 Seismologische Stationen (Apollo 12, 14, 15, 16), bis 1977

- Oberflächennahe Beben
  - Thermische Beben, bei Sonnenauf- und Untergängen
  - Meteoriteneinschläge (rot)
- flache Mondbeben (grün), unterhalb der Kruste (tektonisch?)
- tiefe Mondbeben (blau), 700-1200 km (Gezeiten-induziert?)
- Max. Magnitude 5,5



(Wieczorek 2009)



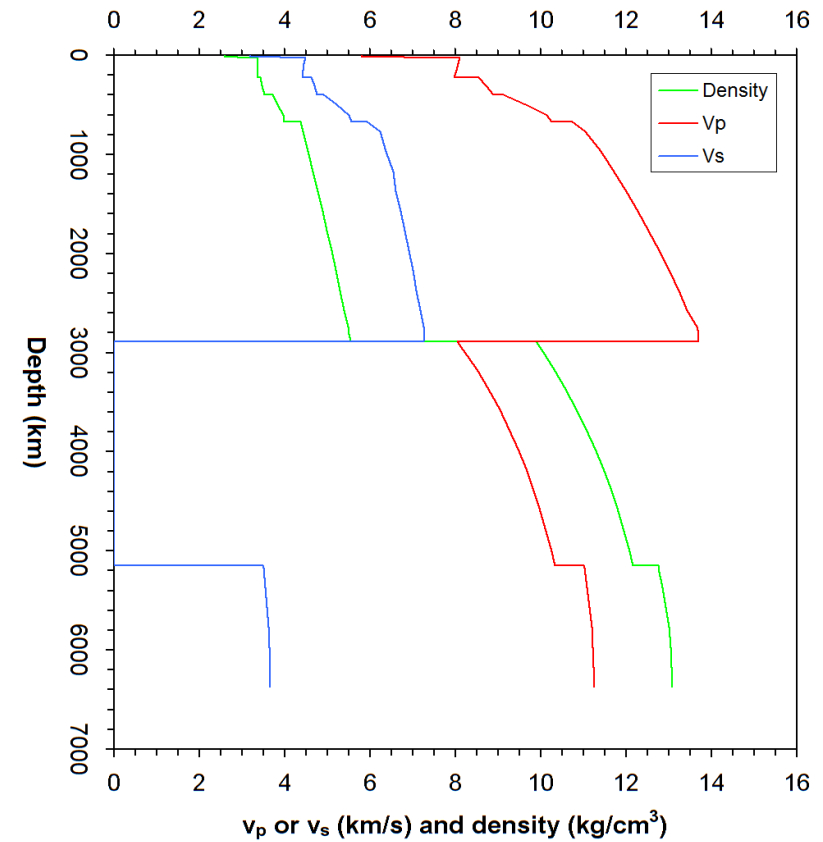
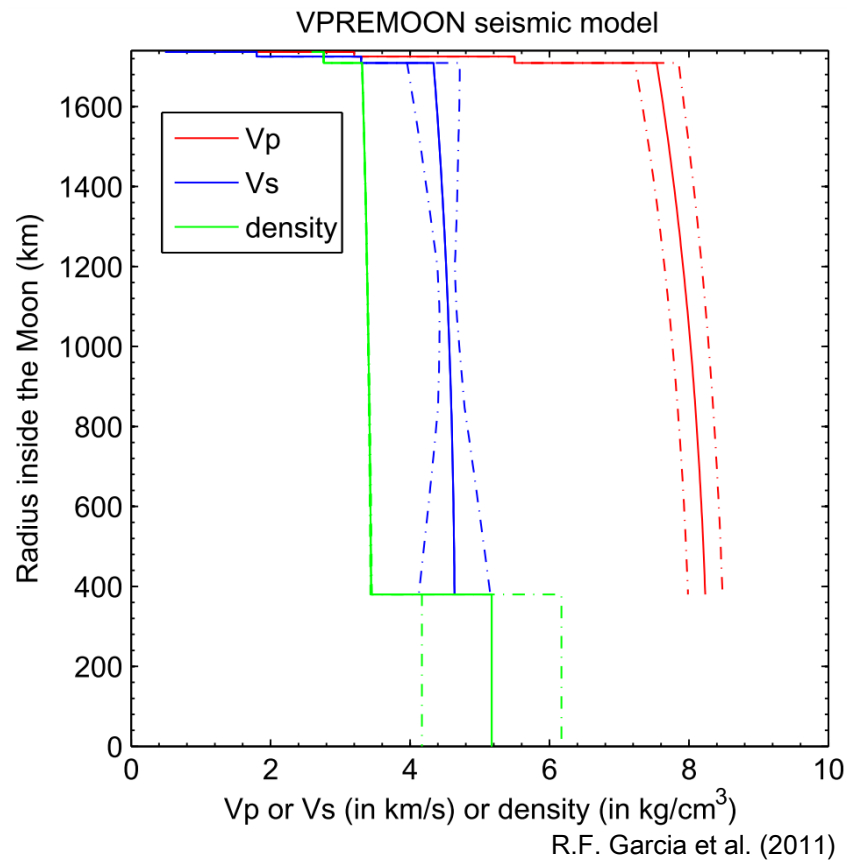


# Dichtemodell



VPREMOON (Mond)

PREM (Erde)



Volumenanteil des Kerns: 0,8 %  
Gewichtsanteil des Kerns: 1,3 %

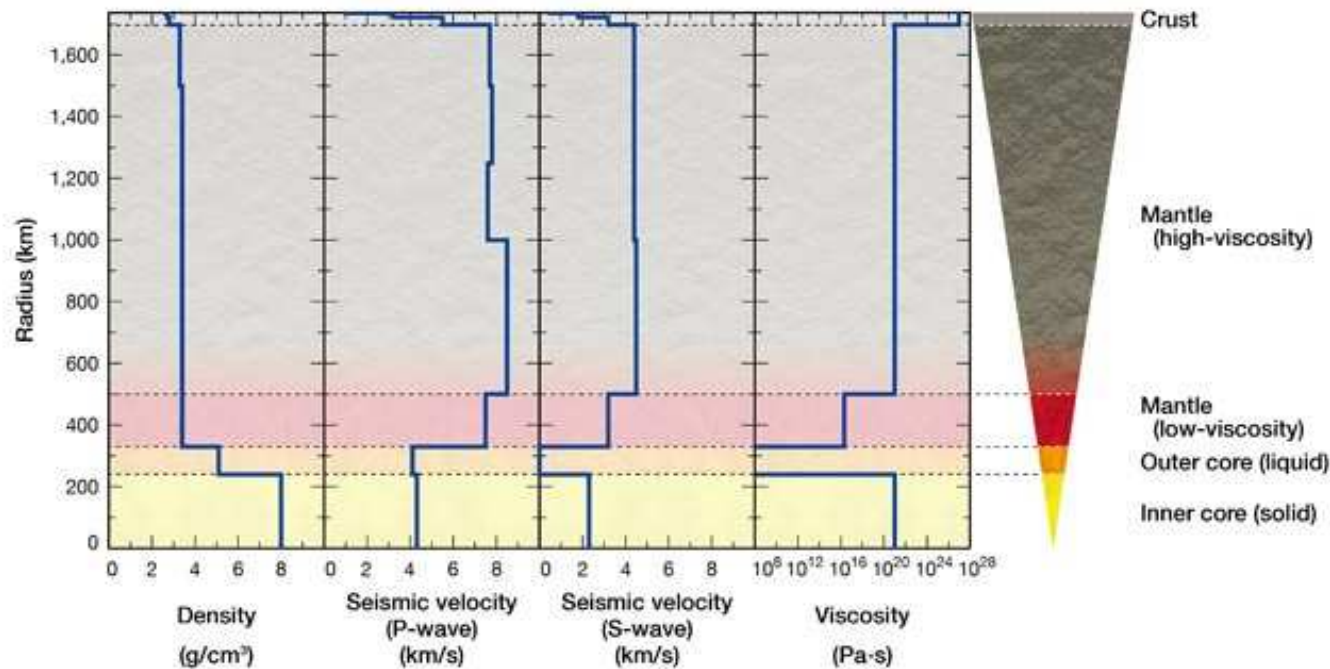
Volumenanteil des Kerns: 16,2 %  
Gewichtsanteil des Kerns: 32,4 %

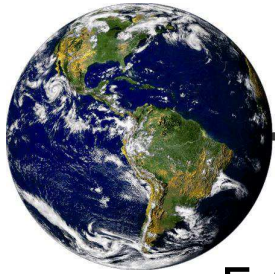


# Neues Dichtemodell



- Basierend auf geophysikalischen Daten und numerischer Modellierung
- Niedrigviskose Zone an der Basis des Mantels
- Wärmezufuhr durch „tidal friction“



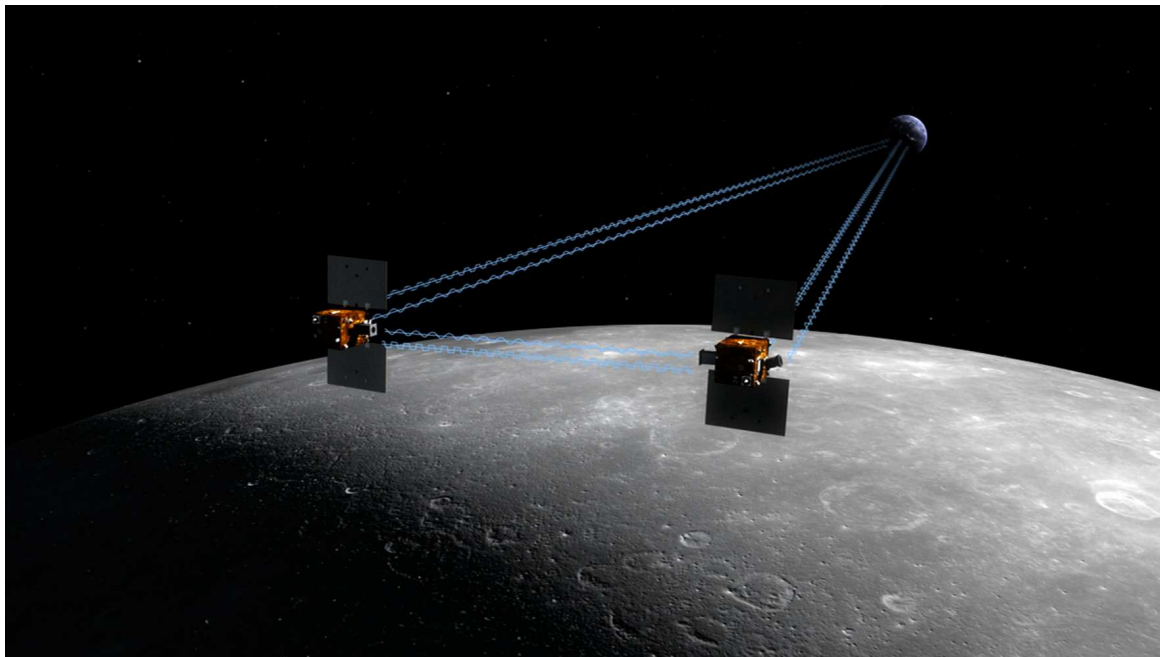


# Schwerefeld des Mondes (1)



## Erforschung

- Tracking von Mond-Orbitern (nur „near side“)
- Doppler Gravity Experiment
- Abstandsmessung zwischen 2 Orbitern (GRAIL - Gravity Recovery and Interior Laboratory, vgl. GRACE)



GRAIL Doppelsatellit  
(NASA)

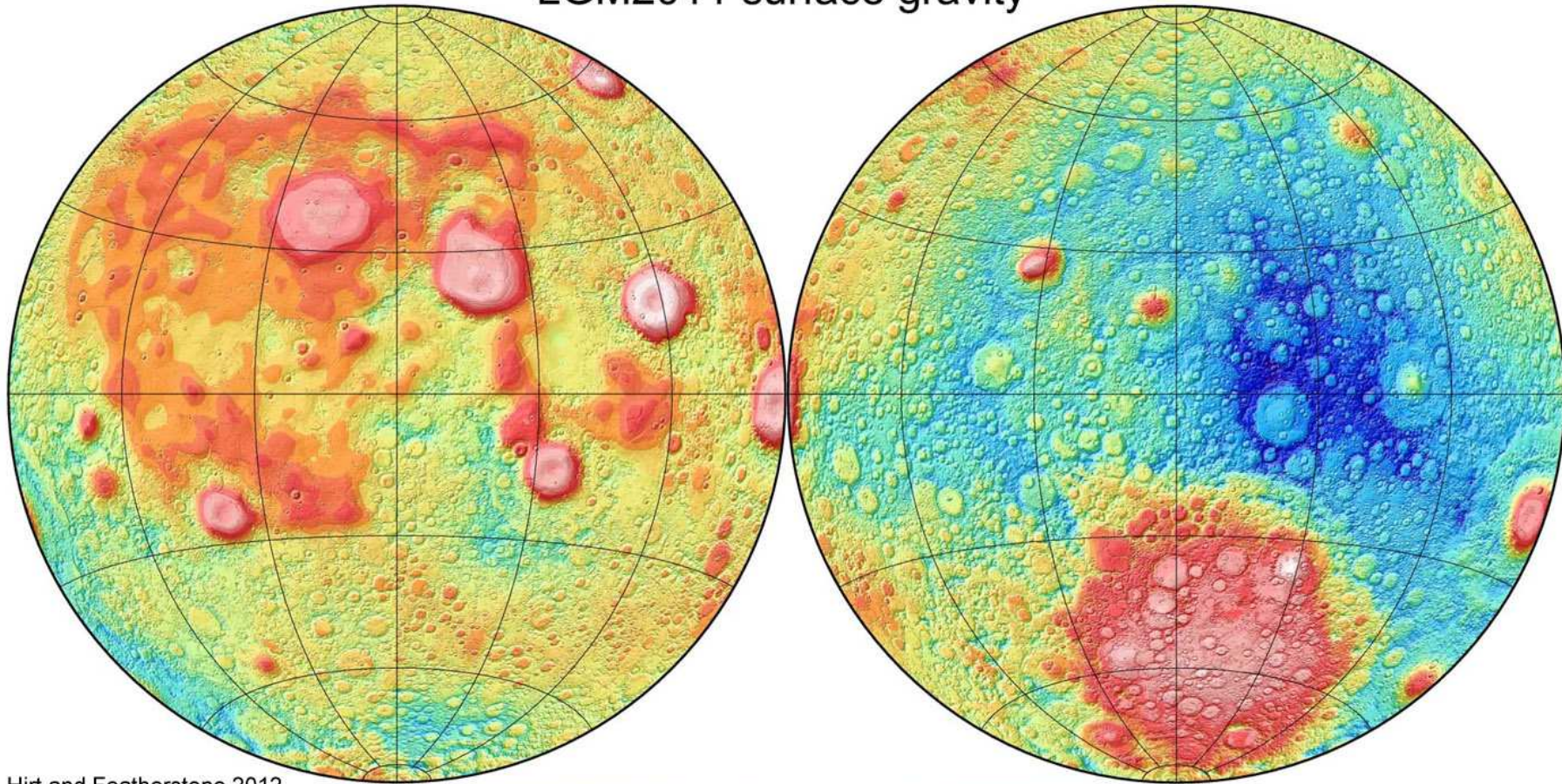




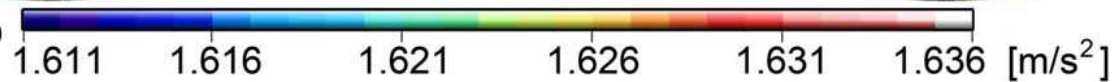
# Schwerefeld des Mondes (2)



LGM2011 surface gravity



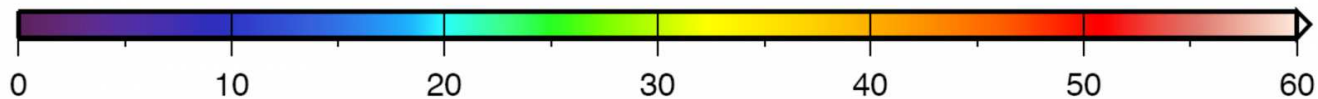
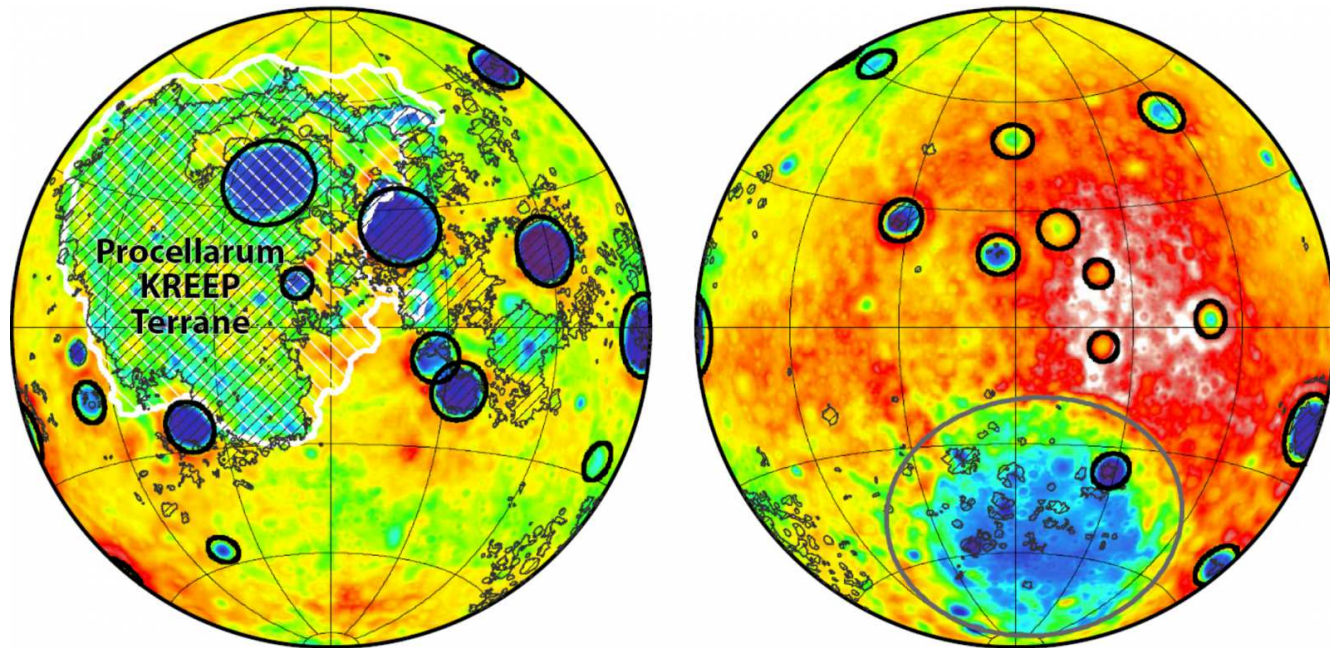
Hirt and Featherstone 2012  
Earth Plan Sci Lett 329-330, 22-30  
doi:10.1016/j.epsl.2012.02.012







# Krustendicke



Crustal thickness, km

(NASA/JPL-Caltech/S. Miljkovic)

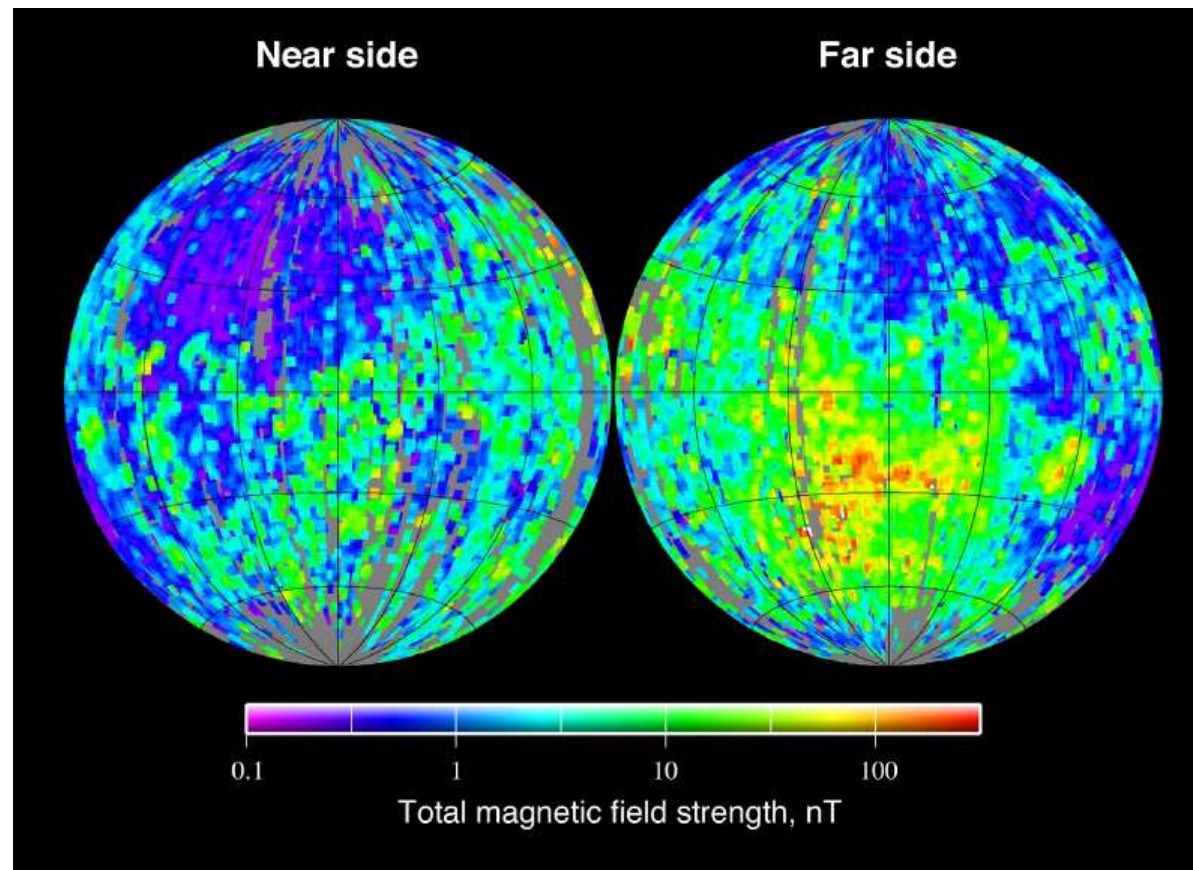
- Krustendicke: 30-40 km auf der Vorderseite, bis 60 km auf der Rückseite
- Dadurch mehr lavagefüllte Becken auf der Vorderseite
  - Auf jeder Hemisphäre 12 große Krater mit reduzierter Krustenmächtigkeit
  - Massenschwerpunkt gegen Figurenmittelpunkt um 2 km versetzt



# Magnetfeld



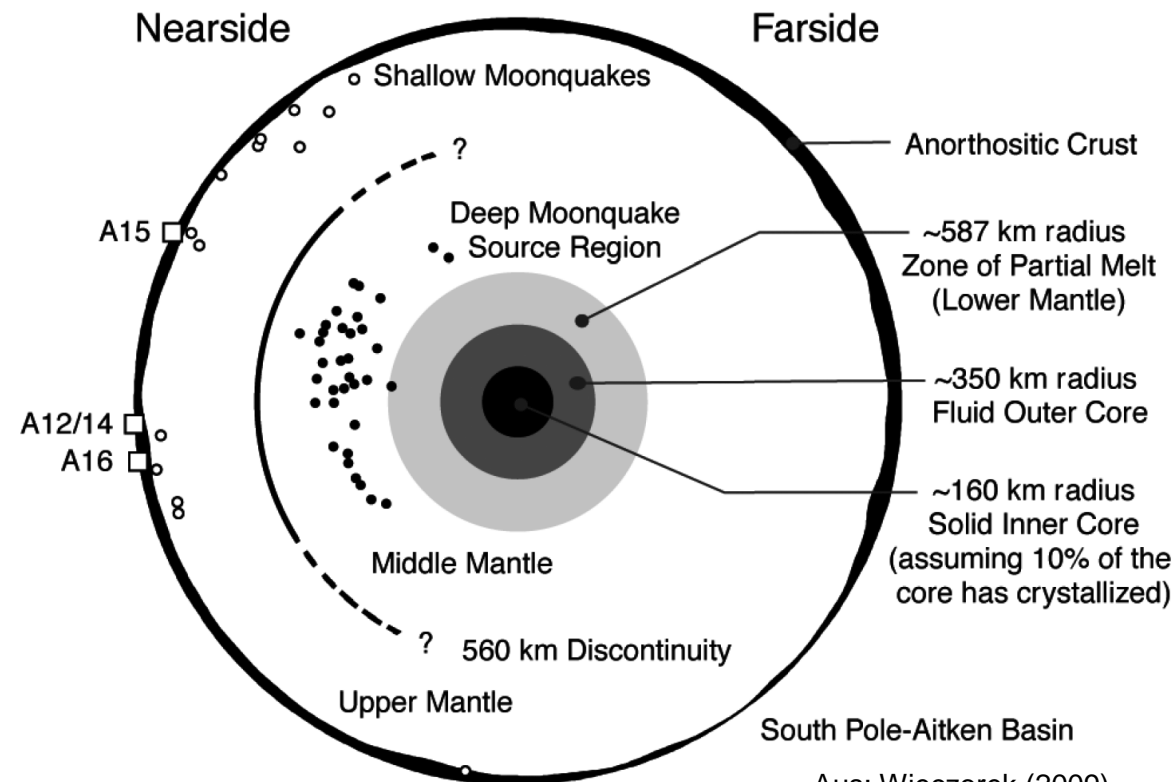
- Kein Dipolfeld
- Lokale Magnetisierungen (Sonnenwind, Plasmawolken)
- 1 Mondprobe (Troctolite 76535) deutet auf früheres Dipolfeld



(Bild: M.A. Wieczorek)



# Innerer Aufbau des Mondes



Aus: Wieczorek (2009)

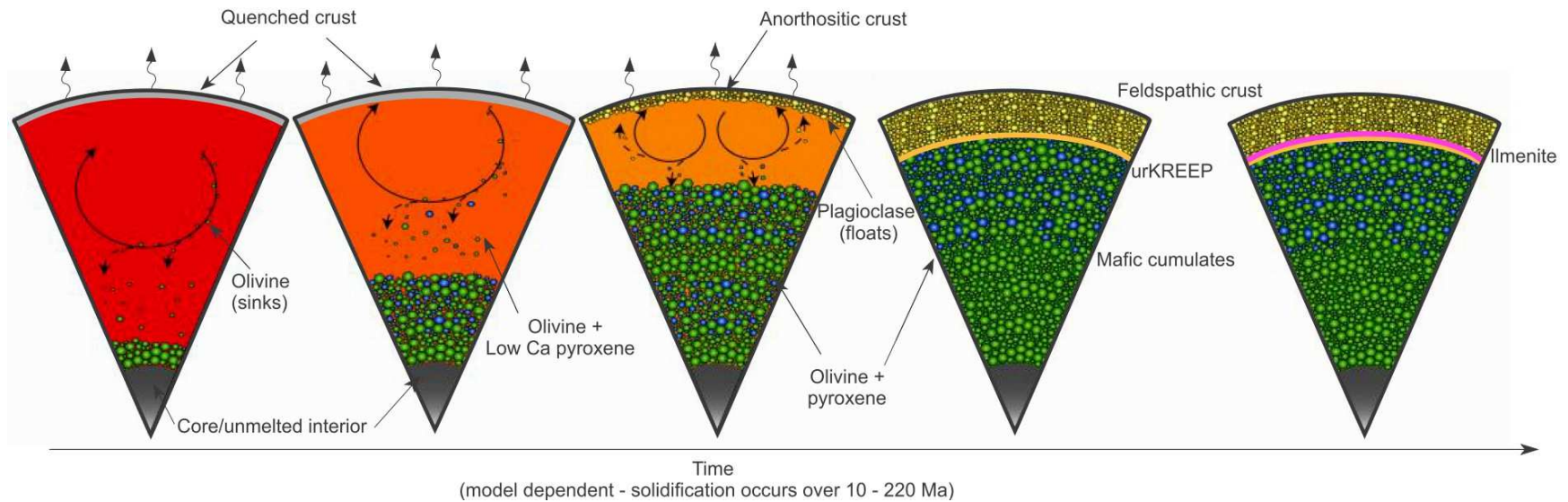
Evidenzen für einen metallischen Kern:

- Gesamtmasse vs. Massenträgheitsmoment
- Induziertes Magnetfeld beim Durchlaufen des magnetischen Schweifs der Erde
- Physikalische Librationen aus LLR → flüssiger (äußerer) Kern





# Differenzierung des Mondes



(Nach J. Rapp/LPI)

- Früher lunarer Magmaozean (LMO) (Impakt- und Gravitationsenergie)
- Fraktionierte Kristallisation (Mg/Fe-reicher Mantel, Ca-reiche Kruste)
- Restschmelze reich an inkompatiblen Elementen (SEE, K, P, Ti, U, Th,...)  
→ Bildung der KREEP- und Ilmenit-reichen Gesteine



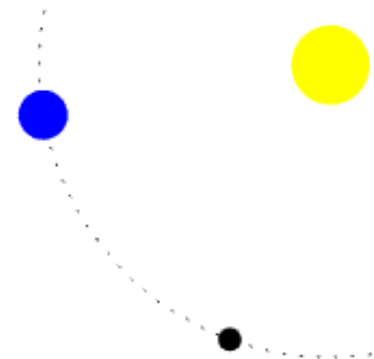
# Theorien zur Mondentstehung



1. Einfang eines unabhängig von der Erde gebildeten Körpers durch das Gravitationsfeld der Erde
2. Abspaltung des Mondes aus einer schnell rotierenden Erde
3. Gleichzeitige Bildung von Erde und Mond als Doppelplanet
4. Bildung durch den Einschlag eines großen Körpers auf die Proto-Erde (»Giant Impact«)

## „Giant Impact“

- Kollision der Protoerde mit einem Mars-großen Planet (Theia)
- Trümmer rotierten um die Erde, dann Akkretion
- Simulationen: Bildung in 20.000 – 30.000 km Höhe
- Letztes Ereignis im Wachstum der Erde („Geburtsstunde“)
- Unterschiede im <sup>182</sup>Wo Gehalt belegen Entstehungsalter höchstens 60 Mio Jahre nach Entstehung des Sonnensystems (<sup>182</sup>Wo durch Zerfall aus kurzlebigen <sup>182</sup>Hf, danach ist alles Hf zerfallen und keine Unterschiede mehr durch Durchmischung)

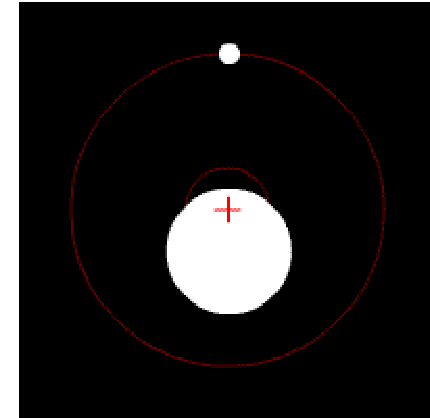




# Die Bewegung des Mondes um die Erde



- Gemeinsamer Schwerpunkt (innerhalb der Erde)
- Umlaufzeit
  - Siderisch: 27,32 Tage
  - Synodisch: 29,53 Tage
- Mondbahn
  - Elliptisch, Abstand zur Erde: 363.300 km (Perigäum) bzw. 405.500 km (Apogäum)
  - 5,2 ° gegen die Ekliptik geneigt
  - Umlauf des Perigäums: 8,85 Jahre
  - Umlauf des Mondknotens: 18,6 Jahre
    - Knotendurchgang + Neumond → Sonnenfinsternis
    - Knotendurchgang + Vollmond → Mondfinsternis



Wikipedia



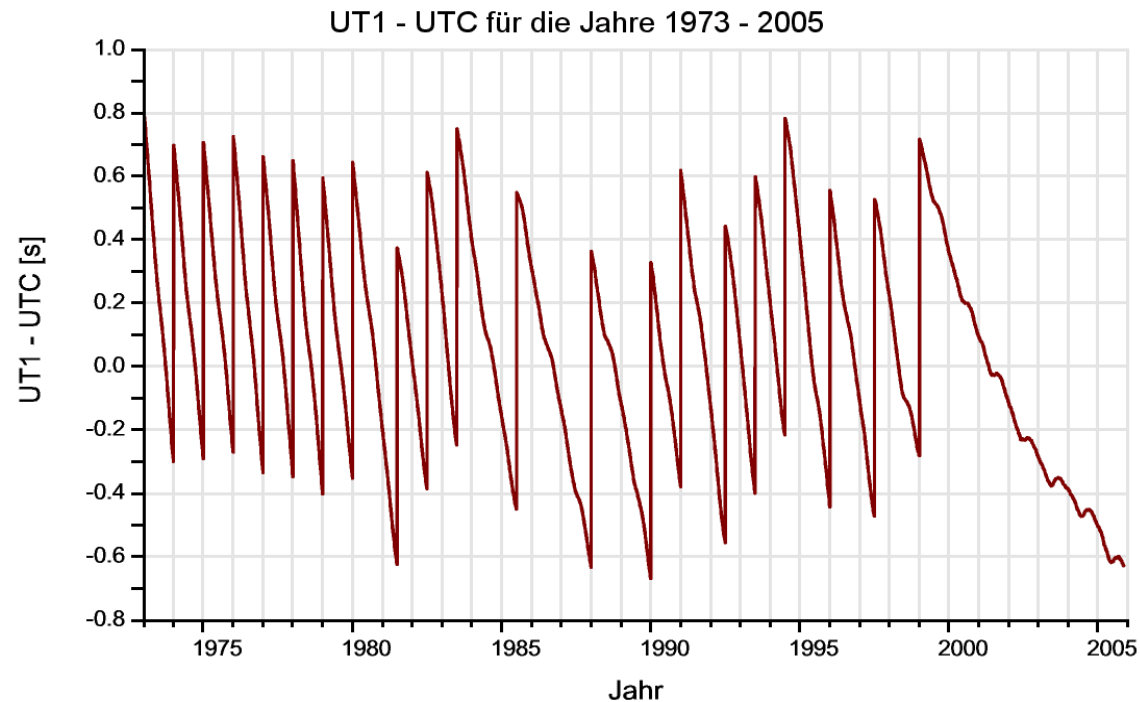


# Zunahme der Erde-Mond Entfernung



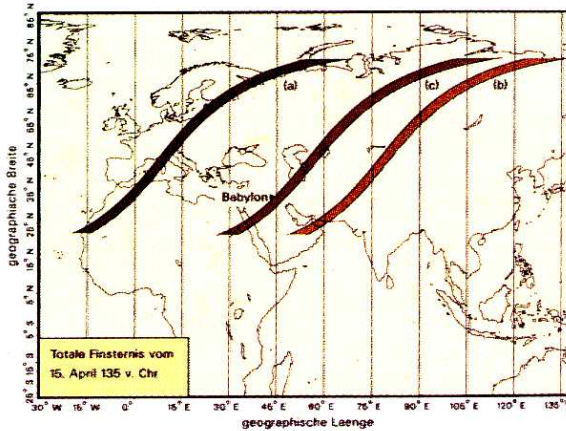
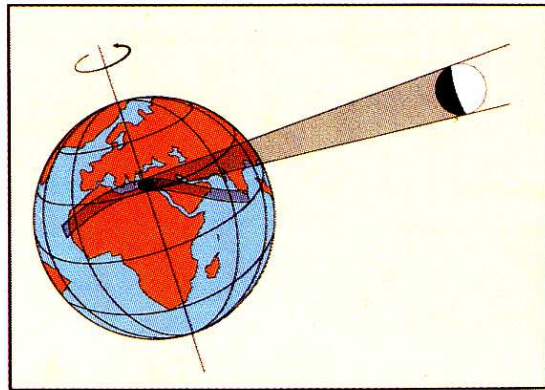
LLR-Messungen zeigen: der Mond entfernt sich mit 3,8 cm/Jahr von der Erde

- Übertragung von Drehimpuls von der Erde auf die Mondbahn
- Gleichzeitig Verlangsamung der Erdrotation
- Ursache: Gezeitenreibung

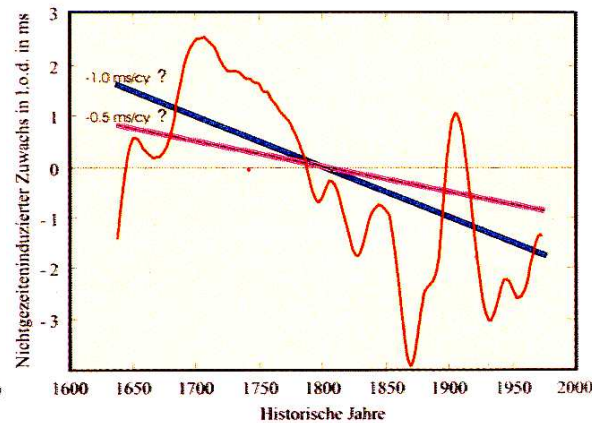
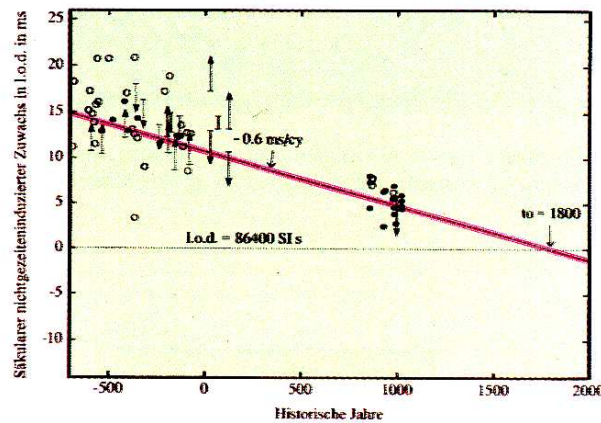




# Beobachtungen der Tageslänge



- Bsp: Sonnenfinsternis in Babylon (135 v.Chr.)
- konstante Tageslänge (86400 s)
  - konstante Zunahme der Tageslänge
  - tatsächlicher Ort

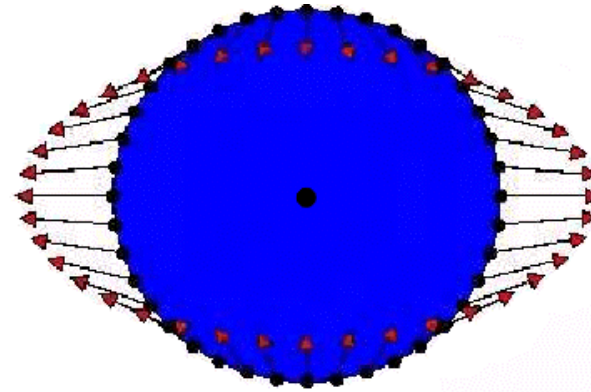


- Tageslängenänderungen
- aus historischen Sonnenfinsternissen, 700 v.Chr. – 1000 n.Chr. (links)
  - aus astronomischen Beobachtungen, 1640 – 1980 (rechts)

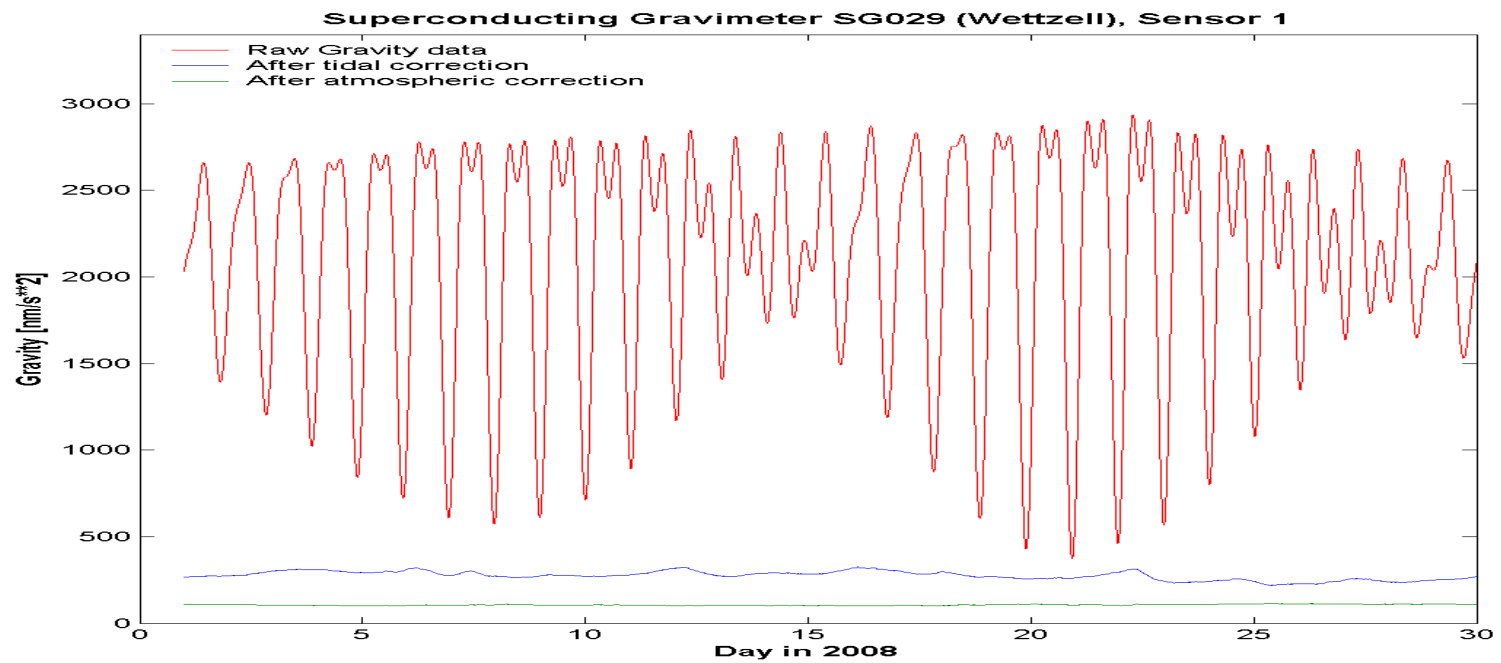
aus: Beiträge der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie zur Rotation der Erde, 1996



# Gezeiten



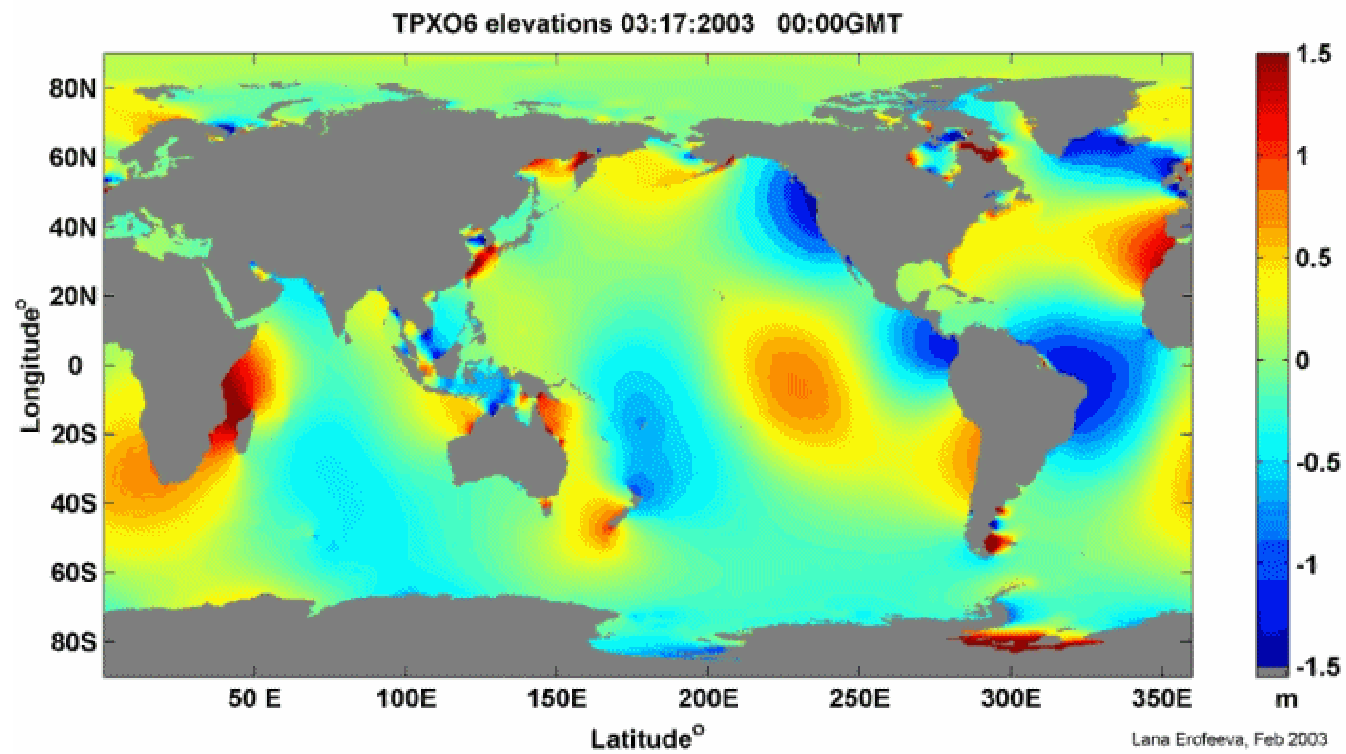
Gezeiten der Erde:







# Gezeiten des Meeres





# Gezeitenkraftwerke



Gezeitenkraftwerk Rance, Bretagne (Wikipedia)



Woher stammt die Energie?

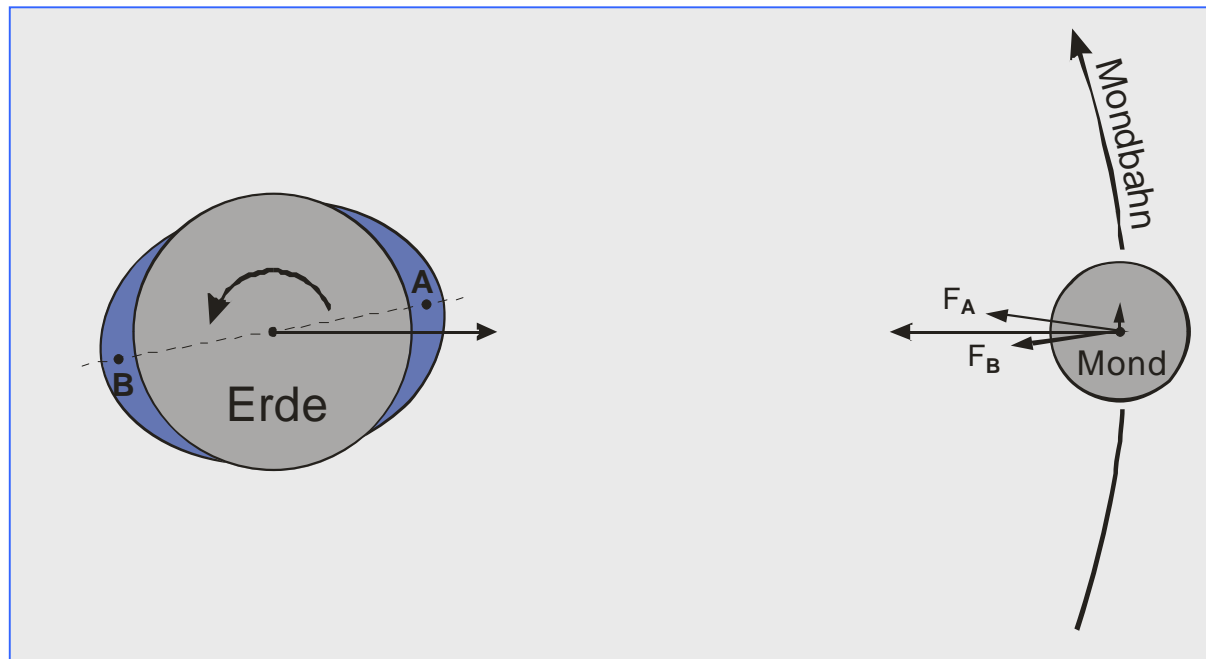
→ Rotationsenergie der Erde



# Mechanismus der Drehimpulsübertragung



- Gezeitenberge hinken dem Maximum der Gezeitenkraft hinterher
- Dadurch übt der Mond ein Drehmoment auf die Erde aus, das der Erddrehung entgegengerichtet ist
- Der Mond erhält zusätzlichen Bahndrehimpuls







# Blick in die Zukunft



**Drehimpuls-Anteile des Erde-Mond-Systems**

Art des Drehimpulses	Wert / $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$	Anteil
Erde-Mond-System gesamt	$3,49 \times 10^{34}$	100,0 %
Mond – Eigendrehimpuls	$2,33 \times 10^{29}$	—
Mond – Bahndrehimpuls	$2,87 \times 10^{34}$	82,2 %
Erde – Eigendrehimpuls	$5,85 \times 10^{33}$	16,8 %
Erde – Bahndrehimpuls	$3,53 \times 10^{32}$	1,0 %

Tabelle: Wikipedia

Vollständige Übernahme des Eigendrehimpulses der Erde durch den Mond:

- Endzustand: doppelt gebundene Rotation
- Resultierende Monddistanz: 560.000 km
- Umlaufperiode: 48 Tage
- Bei 3,8 cm/Jahr → 5 Mrd. Jahre



# Schlußwort



- Erde und Mond weisen große Unterschiede in ihren Erscheinungsbild auf (Oberflächenformen, Hydrosphäre, Atmosphäre, Magnetfeld)
- Die Unterschiede sind im wesentlichen auf die verschiedene Größe zurückzuführen (keine Plattentektonik, keine flüchtigen Verbindungen, kein Kerndynamo)
- Geologisch ist der Mond der Erde sehr ähnlich (geochemischer Fingerabdruck)
- Die Geschichte von Erde und Mond ist untrennbar miteinander verknüpft, die Geburtsstunde des Mondes ist auch die Geburtsstunde der Erde
- Sie werden auch in Zukunft ein „unzertrennliches Paar“ bleiben





# Referenzen



- G. Dreibus-Kapp und L. Schultz: Chemismus und Bildung des Erdmondes. *Sterne und Weltraum*, 9/1999: 742-752.
- R.F. Garcia et al.: Very preliminary reference Moon model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 188: 96–113, 2011.
- J. Oberst, R. Jaumann und H. Hoffmann: Von den Apollo-Landungen bis heute - Was wir über die Mondoberfläche gelernt haben. *Sterne und Weltraum*, 8/1999: 648-656.
- D. A. Kring and D. D. Durda: A Global Lunar Landing Site Study to Provide the Scientific Context for Exploration of the Moon. Lunar and Planetary Institute Contribution No. 1694, 2012.
- M.A. Wieczorek: The Interior Structure of the Moon: What Does Geophysics Have to Say? *Elements*, 5: 35-40, 2009

## **Weblinks:**

- <http://www.nasa.gov/>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Mond>
- <http://lexikon.astronomie.info/mond/index.html>
- <http://www.bernd-leitenberger.de/mond-missionen2.shtml>
- <http://www.lpi.usra.edu/decadal/leag/>