

System Erde

Institut für
Geowissenschaften
Universität Heidelberg
Wintersemester 2021/22

Teil 4: Differenzierung der Erde



UNIVERSITÄT
HEIDELBERG
ZUKUNFT
SEIT 1386

Axel K. Schmitt

Themen für heute

Magmenozeane und Differenzierung der Erde

Entstehung des Erde-Mond Paars

Gezeiten

Krustenbildung auf Mond und Erde

Alter der Erde

Nachlesen: Allgemeine Geologie (Die Entwicklung der terrestrischen Planeten)

Die Geschichte der Erde als Film

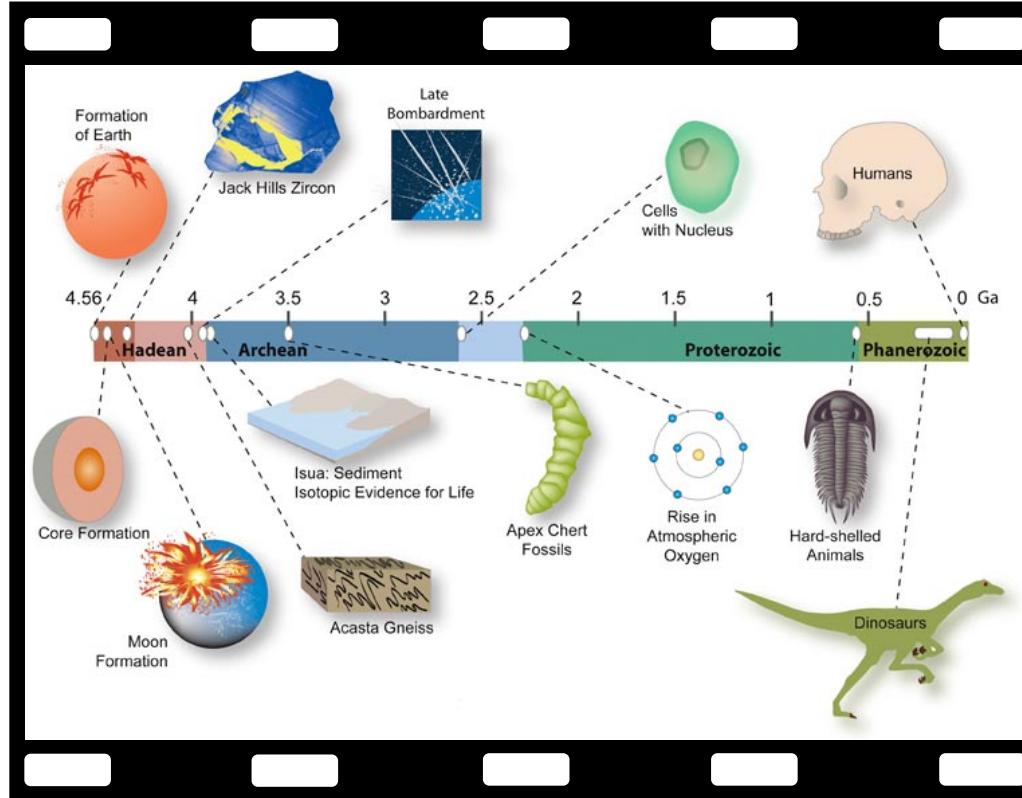
4 Äonen

Hadaikum

Archaikum

Proterozoikum

Phanerozoikum



Differenzierung des Erde nach 500 Ma (8. min).

Erste Lebensspuren nach 800 Ma (13. min)

Sauerstoffhaltige Atmosphäre nach 2,000 Ma (33. Min)

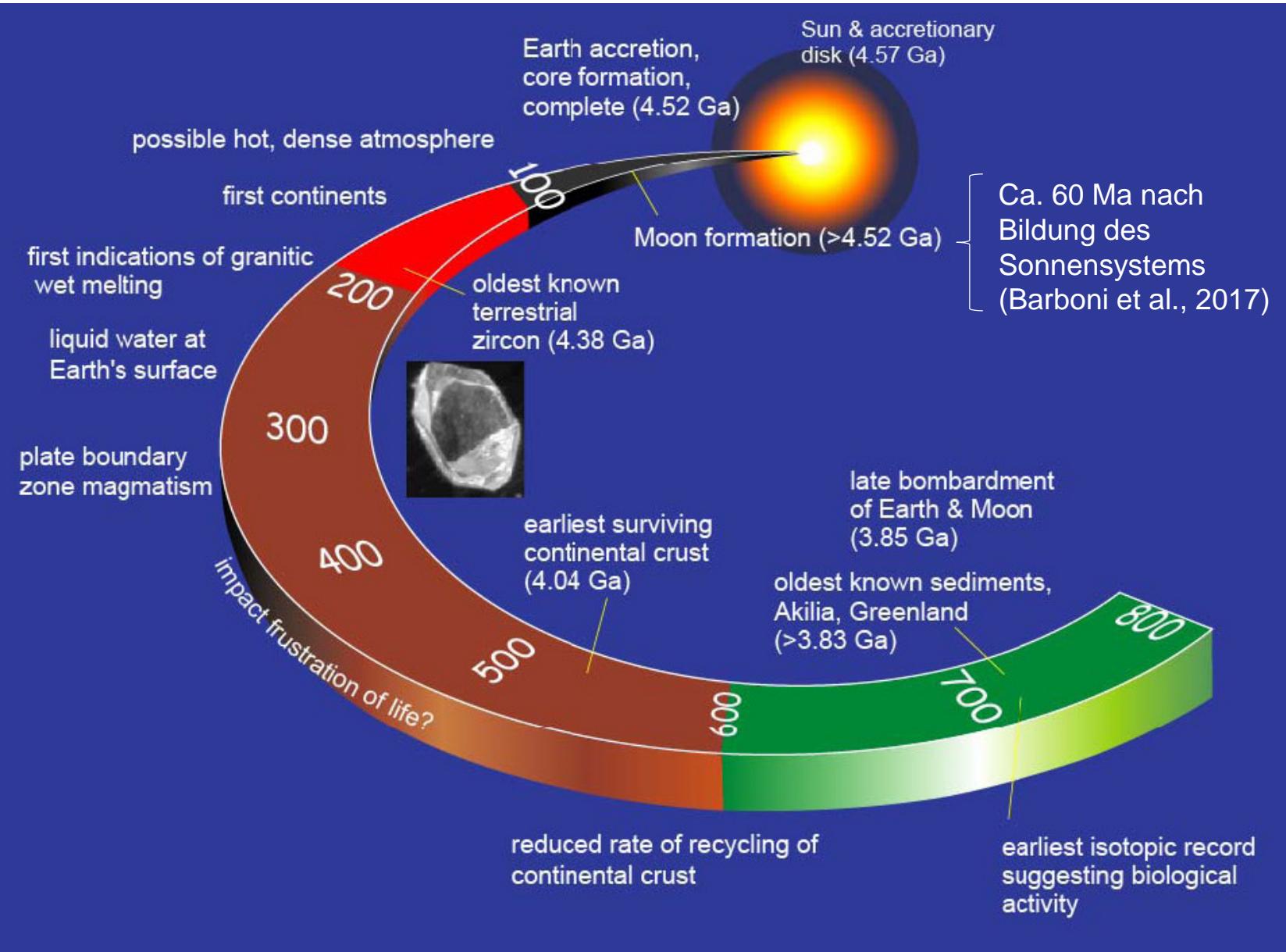
Erste Hominiden vor 4 Ma (4 sec vor Ende)

Homo sapiens vor 500,000 Jahren (0.5 sec vor Ende)

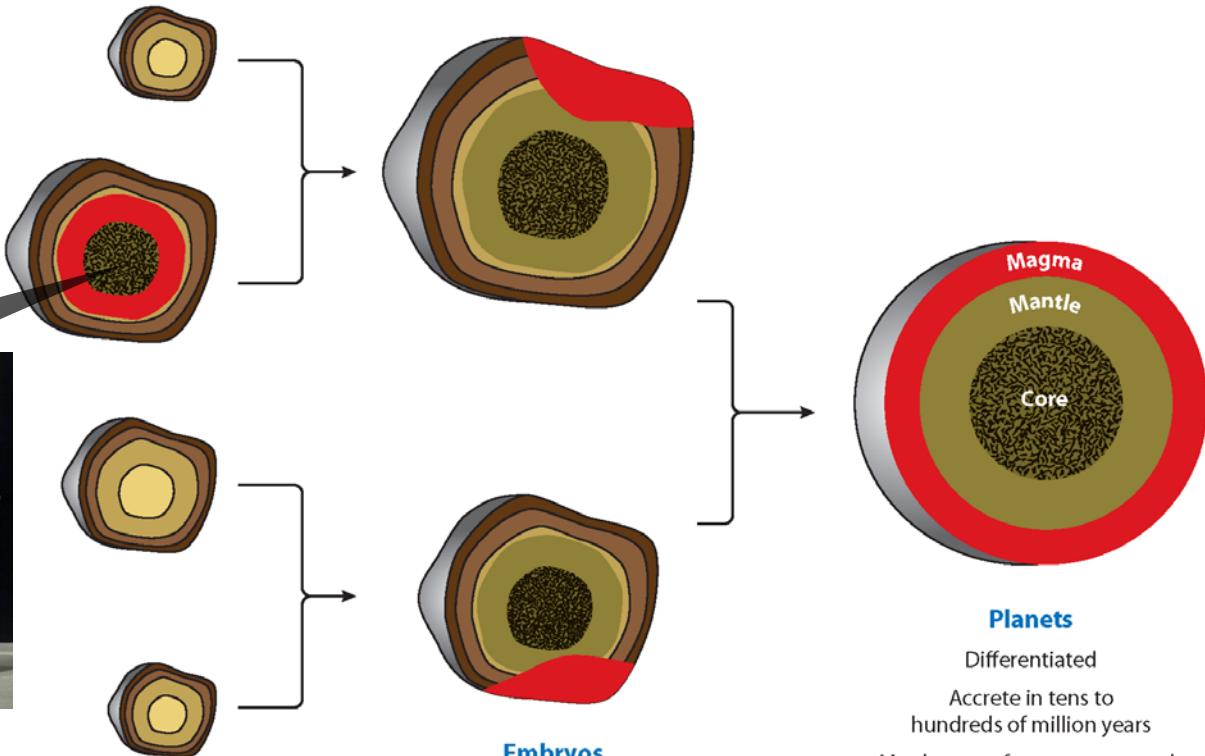
Erste Kunst (Lascaux, France) vor 34,000 Jahren (letztes Einzelbild)

Zeitablauf der Differenzierung der Erde

Wichtige geologische Ereignisse in den ersten 800 Millionen Jahren



Magmoozeane



Eisenmeteorit

<https://cse.umn.edu/mgs/meteorites>

Elkins-Tanton (2012) Ann. Rev. Earth Sci. 40, 114-139

Planetesimale, planetare Embryos und Planeten bilden sich durch Kollision

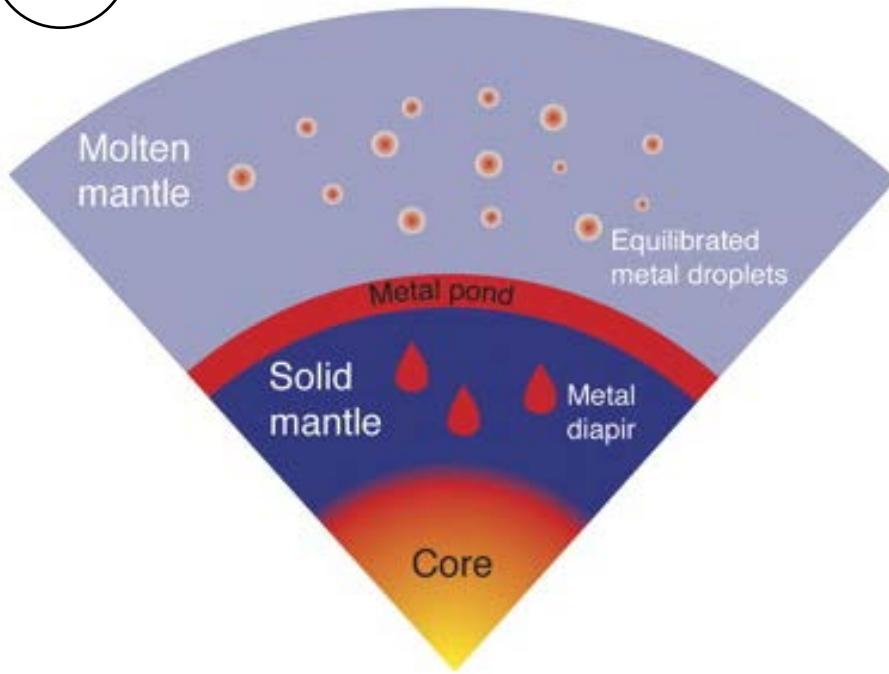
Bei großen Kollisionen wird kinetische Energie in Wärme umgewandelt

Dies und das Vorhandensein von kurzlebigen radioaktiven Isotopen (z.B. ^{26}Al mit einer Halbwertszeit von 720 ka) heizt größere Planetesimale, Embryos und Planeten auf, so dass sich ein **Magmoozean** bildet

Auch die Erde hatte wahrscheinlich in ihrer Frühzeit einen Magmoozean

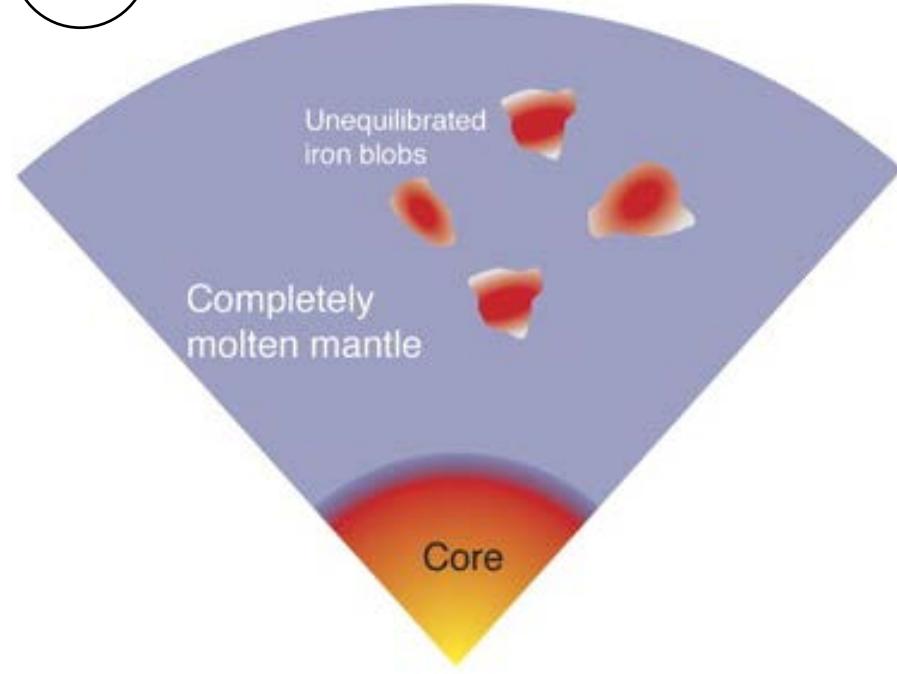
Kernbildung

1



oder

2



Modell 1: Magmoozean mit Bildung kleiner Metalltröpfchen

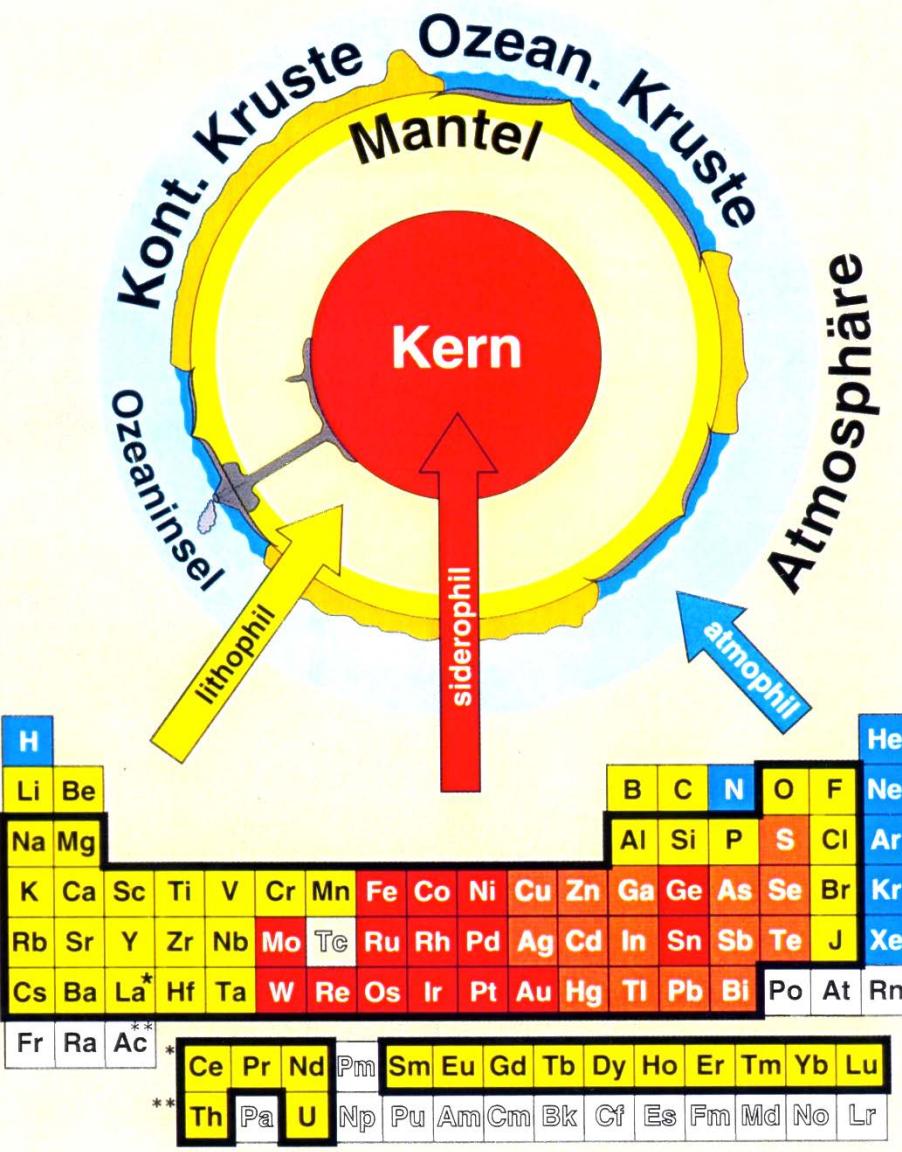
Diapire sinken durch den festen unteren Mantel

Diapir = Intrusion von fließfähigem Material, die durch festes Gestein dringt

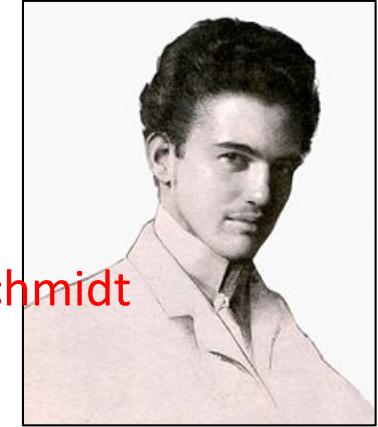
Modell 2: Magmenozean mit großen Eisenbruchstücken von Planetesimalen

Keine Gleichgewichtseinstellung zwischen Silikat und Metall

Geochemisches Periodensystem



Victor Moritz Goldschmidt
(1888-1947):



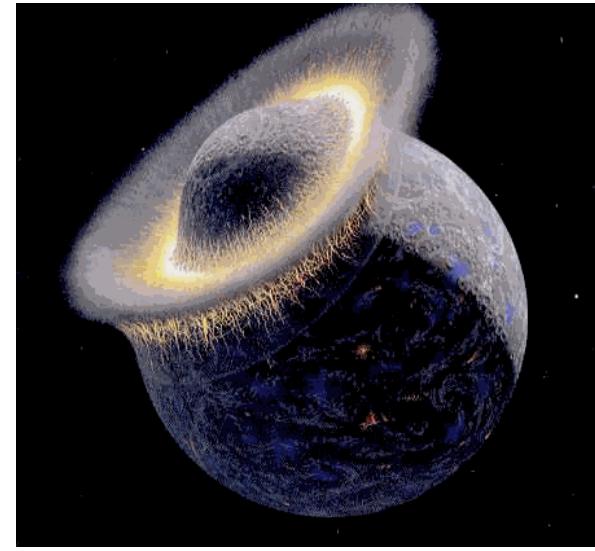
Einteilung der Elemente nach ihren Verteilungsquotienten (Konzentration in Phase A geteilt durch Konzentration in Phase B)

Siderophil = Eisen (Kern)

Lithophil = silikatische Gesteine (Mantel und Kruste)

Atmophil (oder volatil) = gasförmig (Atmosphäre)

Entstehung des Erde-Mond-Paars durch Impakt



Zusammenstoß mit einem Protoplaneten von der Größe des Mars ca. 60 Millionen Jahre nach der Bildung von CAIs

Mond stammt aus herausgeschleudertem Material: überwiegend Mantel des Impaktors und der Proto-Erde

Kinetische Energie reichte aus, um den Mond und die oberen Bereiche der Erde zu schmelzen

Dies war wahrscheinlich das letzte Magmazioean-Stadium der frühen Erde; die Abkühlung des Magmazioans und die Bildung einer ersten Kruste dauerte wahrscheinlich weniger als 1 Million Jahre

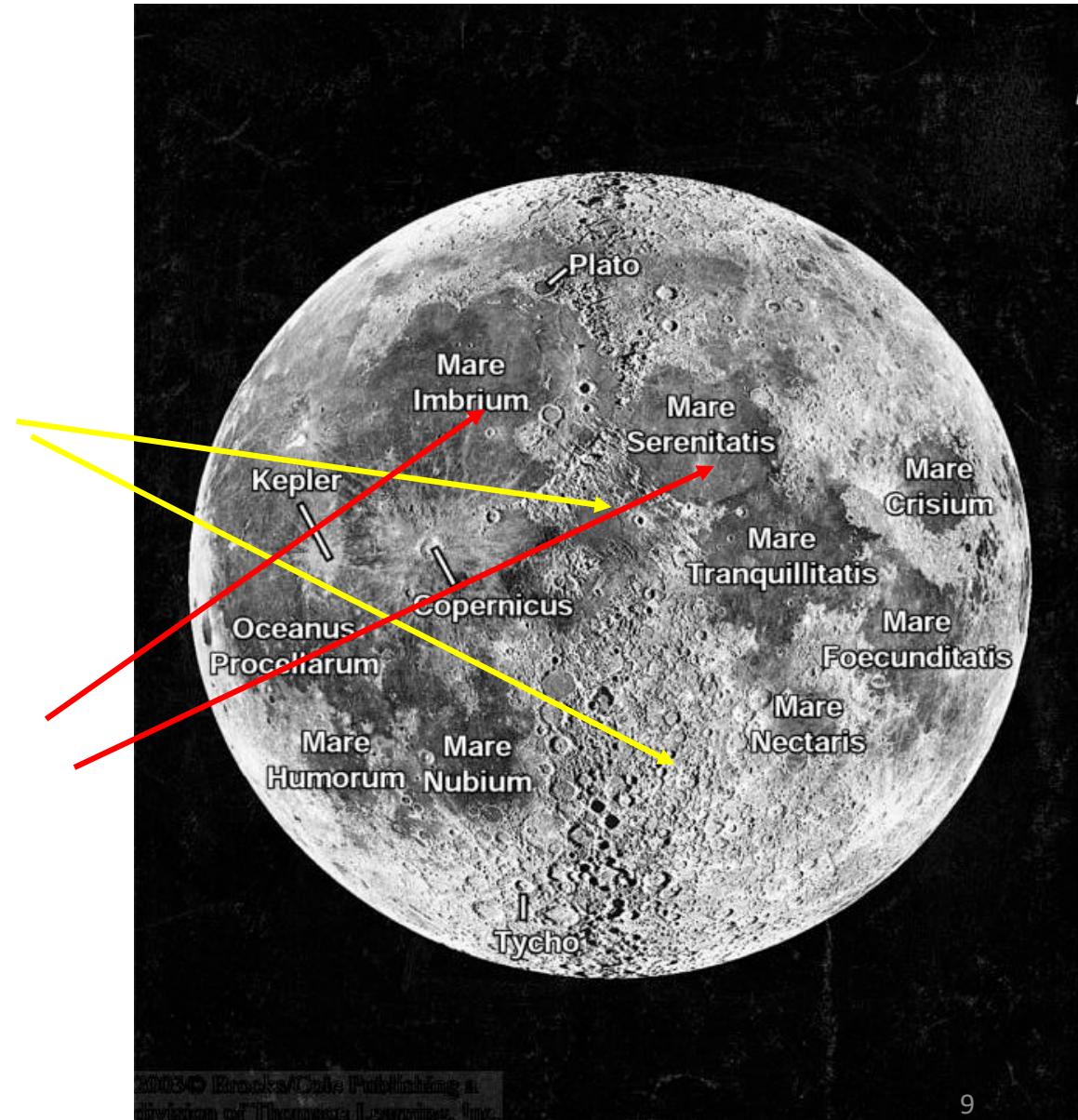


Der Mond: Morphologie der Oberfläche

Zwei unterschiedliche morphologische Einheiten:

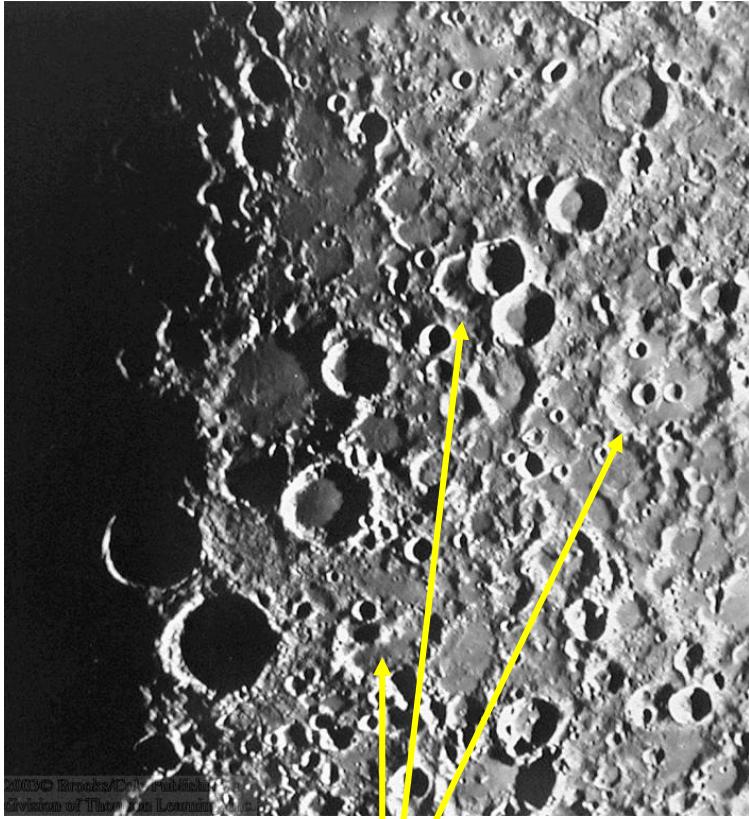
- Hochländer („lunar highlands“) mit zahlreichen Kratern;
 - Alte (4.4 Ga) anorthositische Kruste
-
- ~ 3 km niedriger als die Hochländer;
 - riesige Kraterbecken
 - gefüllt mit relativ jungen (3.2-3.9 Ga) Basalten

Maria (pl. von *Mare*):



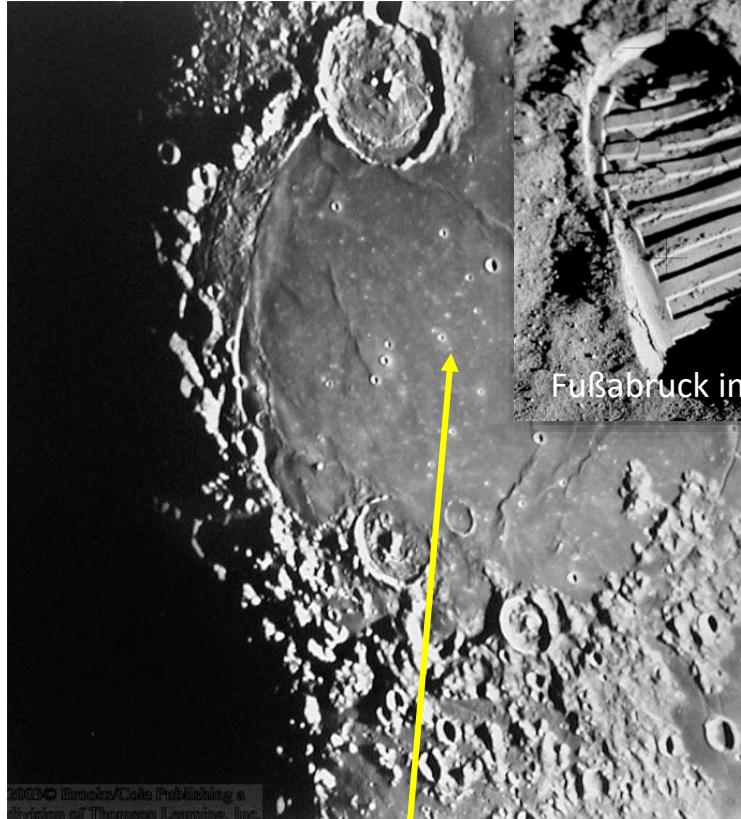
Der Mond: Krater und “Böden” (Regolith)

Kratergesättigte Highlands



Alte Krater teilweise von
jungen Kratern zerstört

Mare



... Becken mit Lavadecken.
Jünger, weniger zerkratert

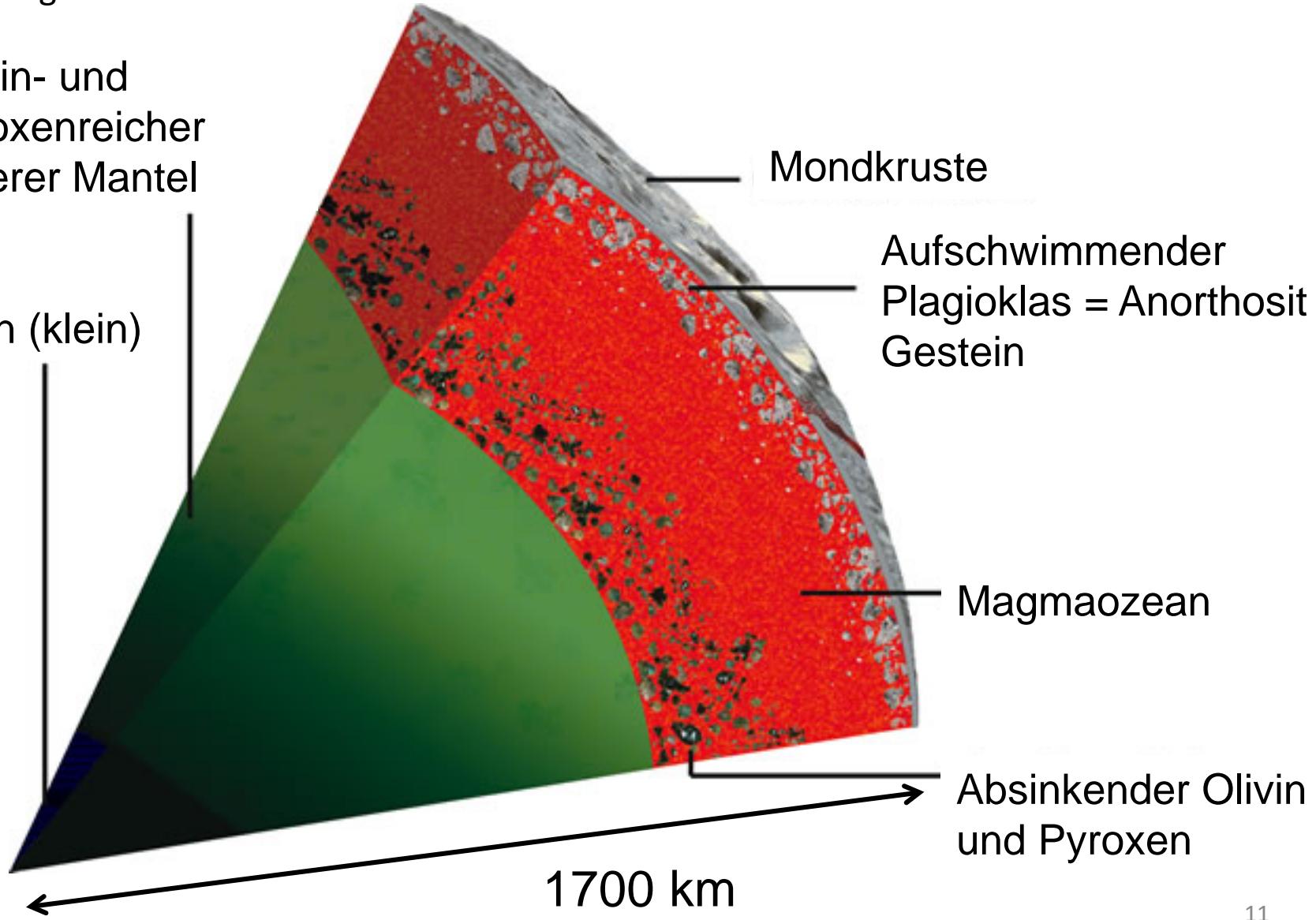
Regolith: zerkleinertes Gestein. Verwitterung auf dem Mond geschieht durch Impakte.

Krustenbildung: Mond

Bildung einer festen Kruste ca. 100 Millionen Jahre nach mondbildendem Impakt abgeschlossen

Olivin- und
pyroxenreicher
unterer Mantel

Kern (klein)



Mondkruste: älteste Gesteine

Apollo 15 anorthosite 15415



Krustengesteine des Mondes: Anorthosite (grobkörnige = >5 mm Kumulate, die fast aus reinem Plagioklas bestehen) sowie Troctolite (grobkörnige = Plagioklas + Olivin Gesteine)

Beide Gesteine entstehen aus der allmählichen Kristallisation basaltischer Schmelzen (Magmatozean)

Mineralalter (Sm-Nd Isochronenalter) von ca. 4.460 Ga, Modellalter (Hf-Isotope) von 4.510 Ga

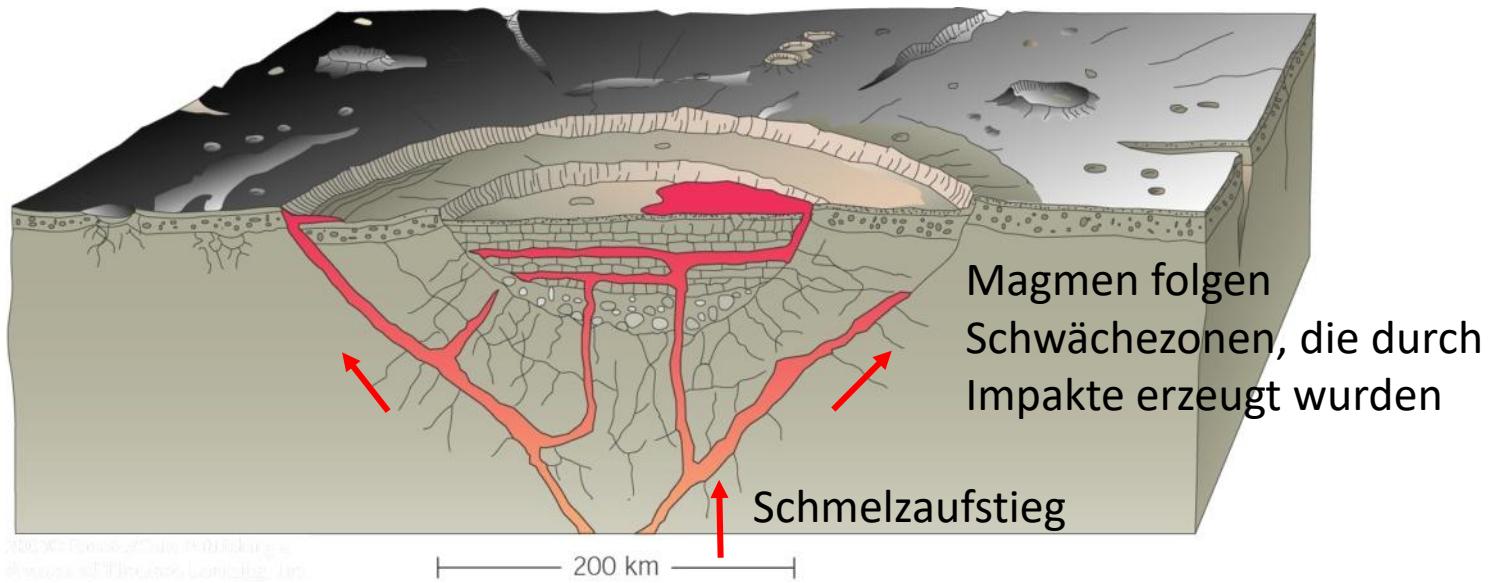
Apollo 17 troctolite 76535



Mondbildender Impakt nicht später als 60 Millionen Jahre nach CAI Bildung

Älteste Gesteine der Erde: Acasta Gneiss (Northwest Territories, Kanada) ca. 4.03 Ga

Entstehung der Mare

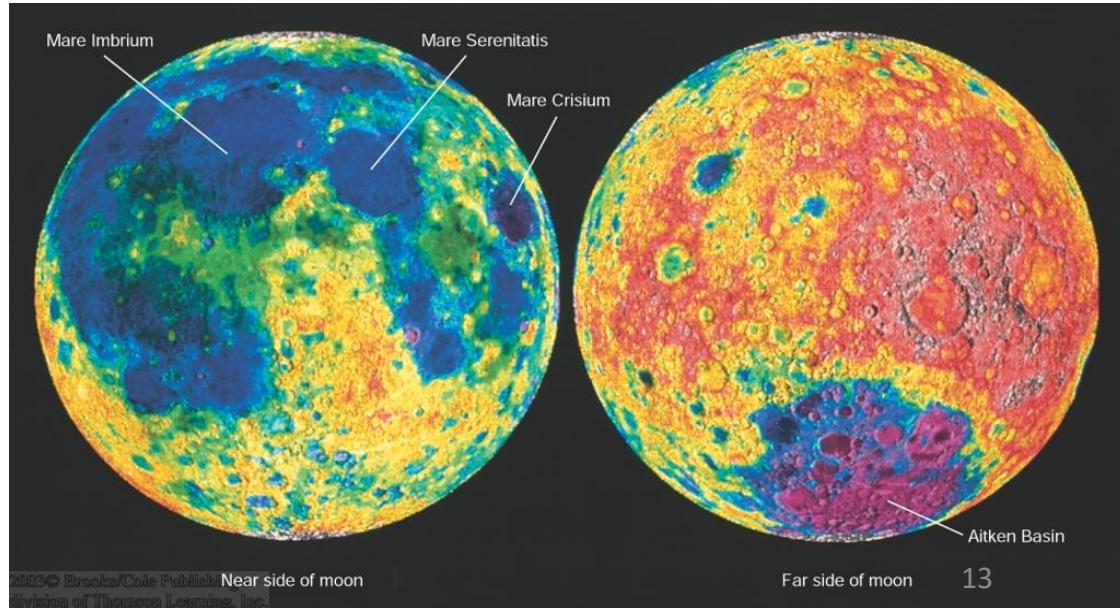


Energetische Einschläge brechen Mondkrust auf

Aufsteigen von Magmen aus tieferen Bereichen

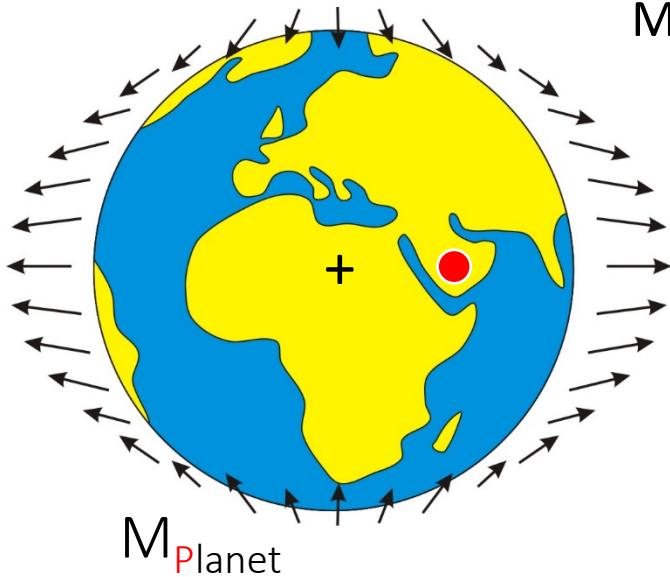
Findet lange nach der Bildung der Impaktkrater statt

Marebasalte zwischen 3,9 und 3,2 Ga alt

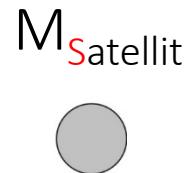


Gezeiten

Definition: "Gezeiten beschreiben die Verformung eines Körpers, die durch die Schwereanziehung eines Nachbarkörpers erzeugt wird"



Morrison and Owen [1966]: *The Planetary System*



$$F_{P-S} = F_{S-P} = G \frac{M_p \times M_s}{r^2}$$

- + Erdmittelpunkt
- Baryzentrum (Massenmittelpunkt des Erd-Mond-Paars)
übertrieben dargestellt

Newton'sches Gravitationsgesetz
 F = Anziehungskraft zwischen zwei Körpern mit Massen M_p und M_s
 G = Universale Gravitationskonstante
 r = Entfernung zwischen den Körpern

Gezeiten und ihre Auswirkungen

Mond und Sonne üben Anziehungskräfte auf die Erde aus; trotz der hohen Masse der Sonne ist diese nur etwa halb so stark wie die des kleineren, aber viel näheren Mondes.

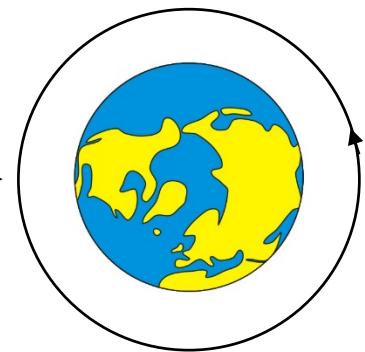
Umdrehung der Erde wird ebenfalls von den Gezeitenkräften beeinflusst. Dadurch wird die Umdrehung der Erde im Laufe der Zeit langsamer, während der Mond sich von der Erde entfernt

Vollmond



Tageslänge
heute 24 h

vor 400 Ma 22 h
(Auszählung von Jahres-
und Tagesringen an
devonischen rugosen
Korallen)

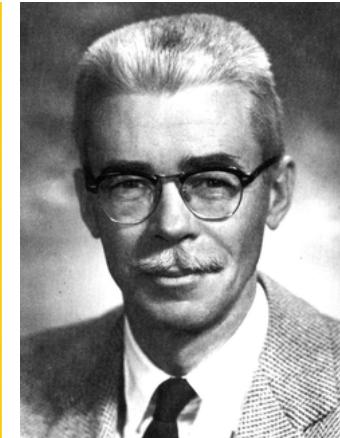
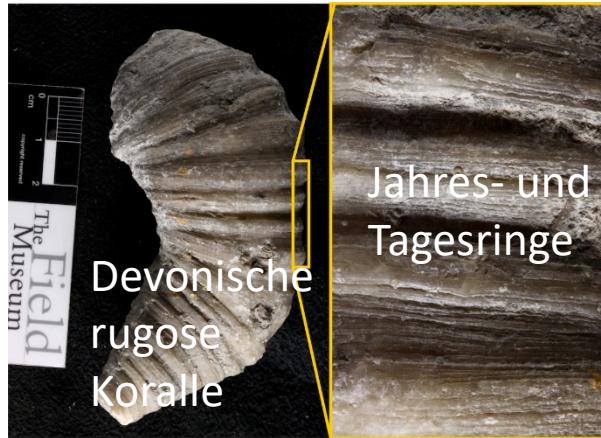


Neumond



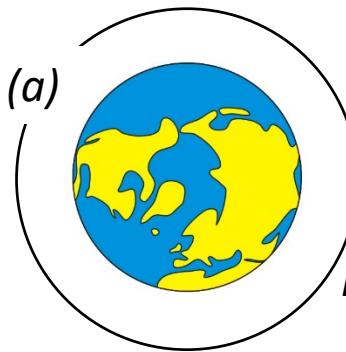
- Gezeitenberge 2x am Tag (wegen Erddrehung)
- maximale Ebbe und Flut jeden Tag ca. 50 min später (wegen des Mondumlaufs)
- 2x im Monat Springtide + 2x im Monat Nipptide

Springtide: Sonne und Mond in
einer Achse



John West Wells
(1907-1994)

Halbmond (a)

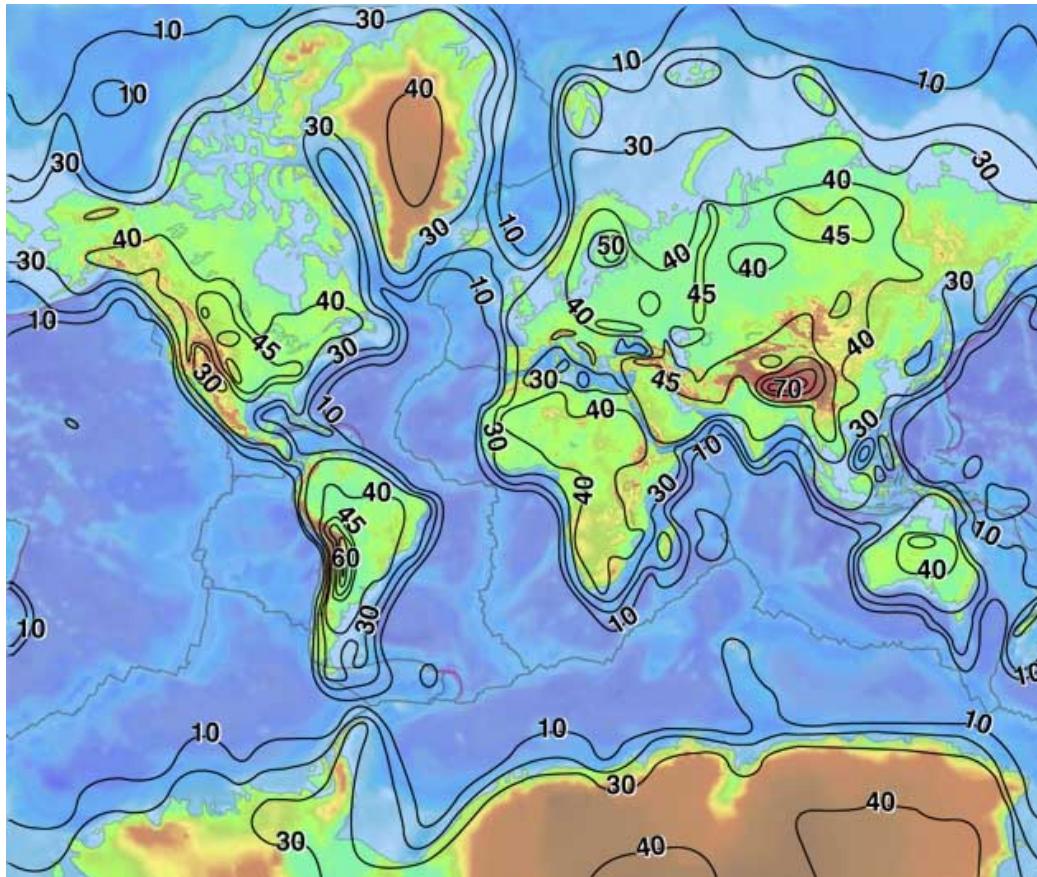


Halbmond (z)

Nipptide: Sonne und Mond 90°



Krustenbildung: Erde



Zwei Arten von Kruste auf der Erde:

Ozeanische Kruste

5-10 km dick

basaltisch

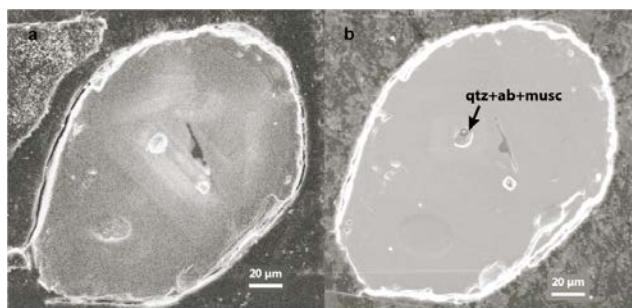
jung (<200 Ma)

Kontinentale Kruste

30-70 km dick

granitisch

enthält alte Gesteine



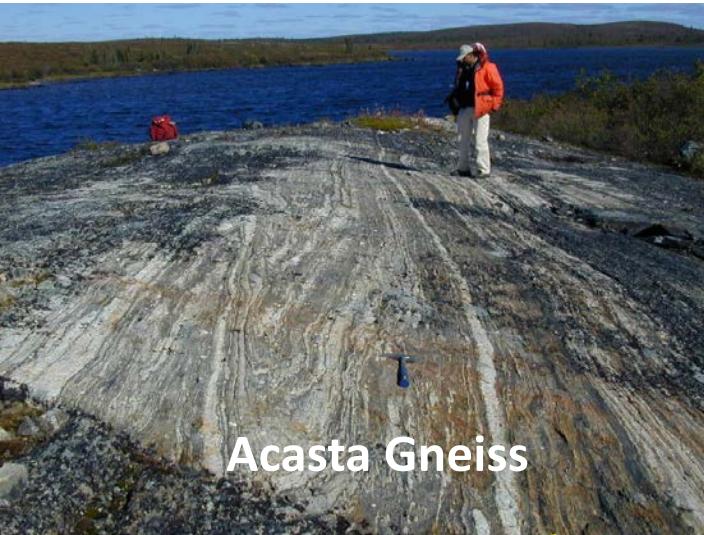
Zirkon aus W-Australien mit Altern von bis zu 4.38 Ga enthalten „granitische“ Mikrogesteinseinschlüsse:

Feldspat = Albit (ab)

Quarz (qtz)

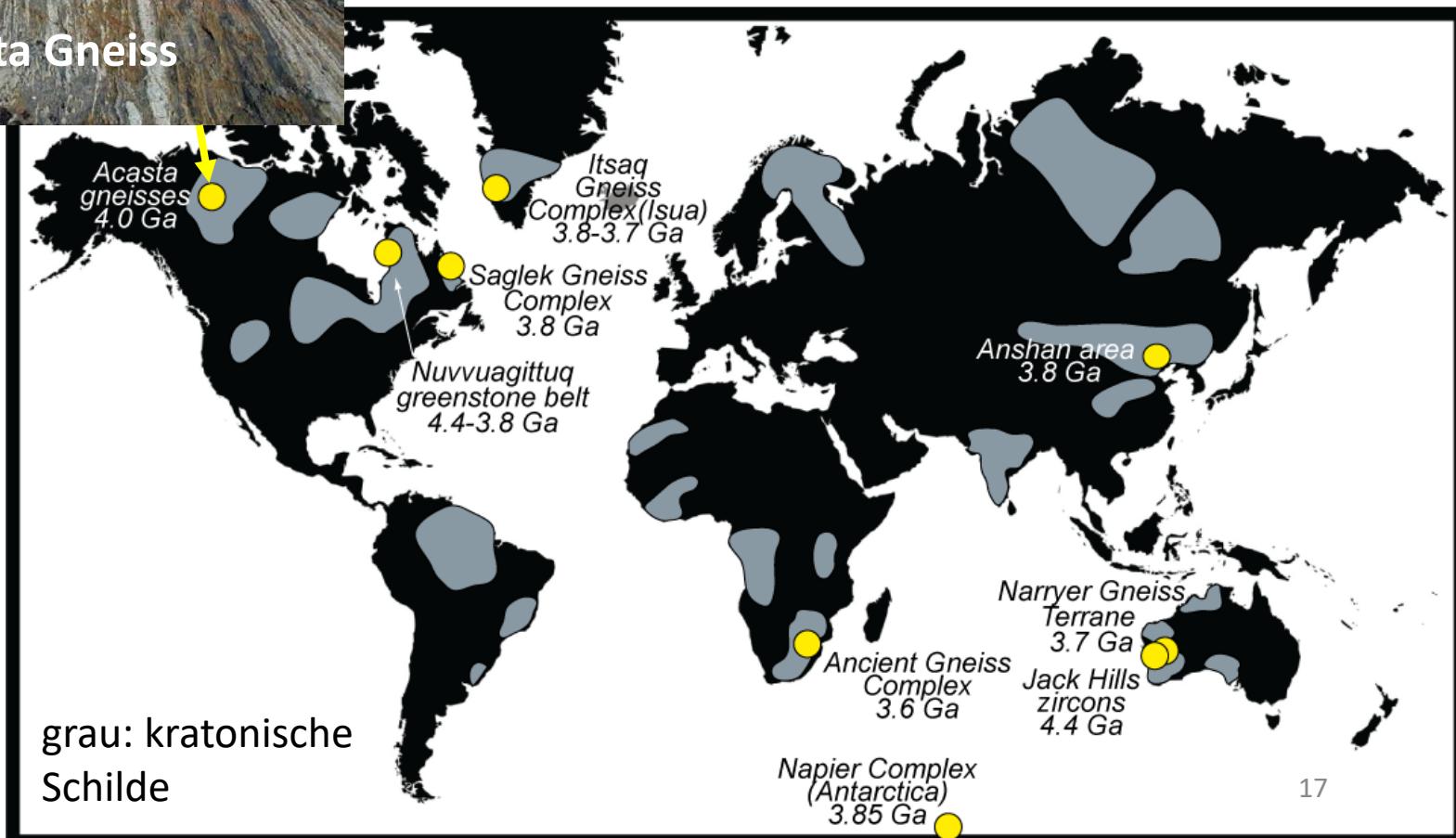
Glimmer = Muskowit (musc)

Die ältesten Gesteine der Erde



Acasta Gneiss

<https://uottawaearlyearth.files.wordpress.com/2014/09/cratons1.png>

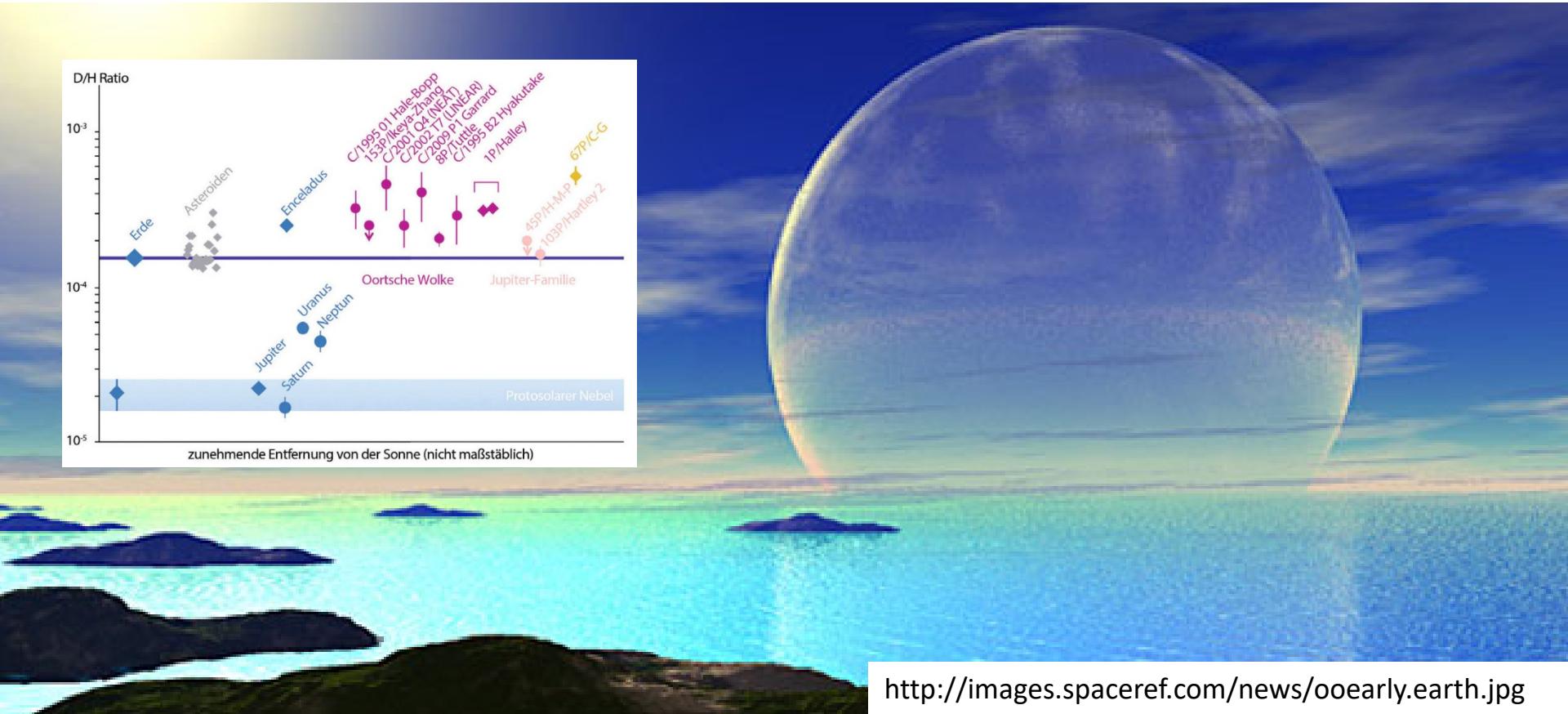


Die Erde im Hadaikum: so?



http://media.npr.org/assets/img/2013/01/10/scisource_3m6697-1_wide-e527344edcf04f87feb3f6f3fe4e11e300a7c065.jpg

Die Erde im Hadaikum: oder so?



<http://images.spaceref.com/news/ooearly.earth.jpg>

Herkunft des Wassers auf der Erde:

- Entgasung aus dem Mantel nach dem mondformenden Impakt?
- Einschläge von Asteroiden ("late veneer")?
- Einschläge von Kometen?

Isotopische Zusammensetzung von Wasserstoff (Deuterium ^2D zu ^1H Verhältnis) spricht für erste oder zweite Option

Fragen

In welcher Reihenfolge spielten sich die folgenden Ereignisse in der Frühzeit des Paars Erde-Mond ab:

Magmaziozean

Kernbildung

Bildung kontinentaler Kruste

Mondbildender Impakt

Mare Vulkanismus

Warum haben wahrscheinlich alle größeren planetaren Gesteinskörper im Sonnensystem ein Magmaziozeanstadium durchlaufen?

Welche Zusammensetzung hat die älteste Kruste des Mondes? Wie ist sie entstanden?

Kontinentale Kruste enthält im Durchschnitt 3 ng/g Au, Chondrite etwa 140 ng/g Au. Wo ist des „fehlende“ Gold?

Themen für heute

Magmenozeane und Differenzierung der Erde

Entstehung des Erde-Mond Paars

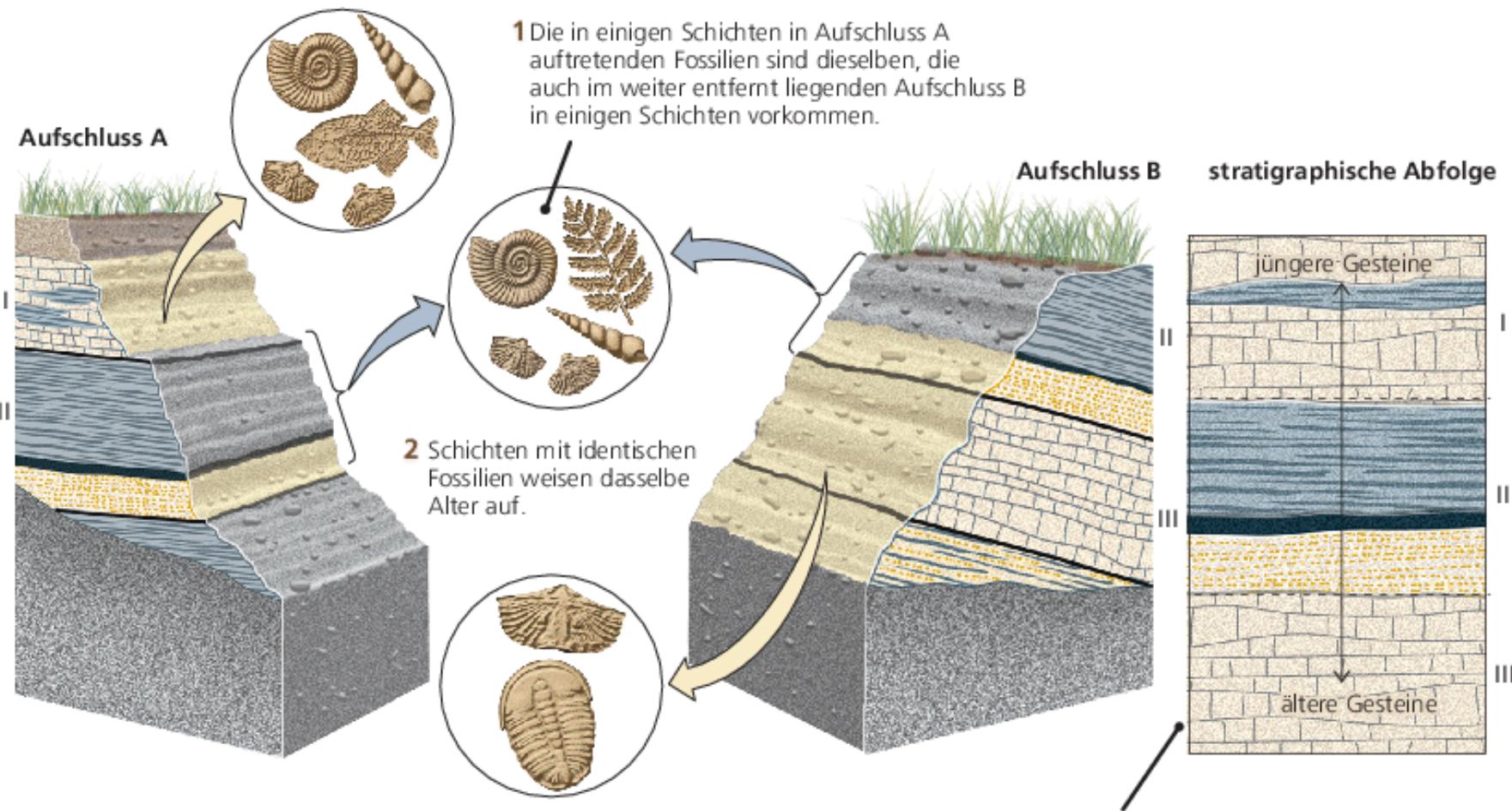
Gezeiten

Krustenbildung auf Mond und Erde

Alter der Erde

Nachlesen: Allgemeine Geologie (Zeitmessung im System Erde)

Rekonstruktion der Erdgeschichte über relative Altersabfolgen



Angewendete Prinzipien:

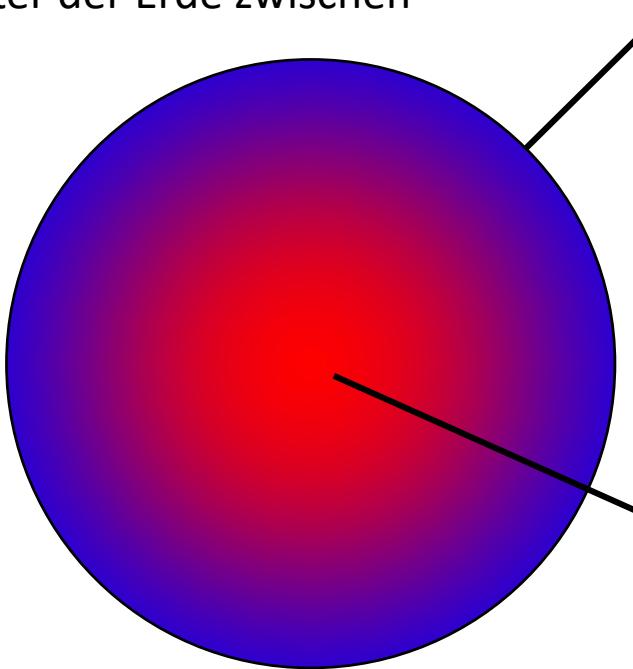
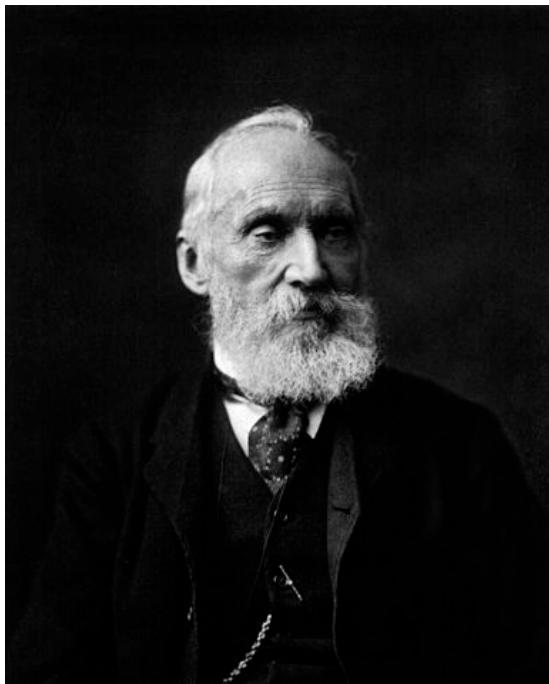
Lagerungsabfolge (jung liegt auf alt)

Faunenabfolge (Fossilien treten in eine Schichtenfolge in einer bestimmten Reihenfolge auf)

Lord Kelvin und das absolute Alter der Erde

James Hutton (1788), Geologe: "No vestige of a beginning, no prospect of an end"

Lord Kelvin (1863), Physiker: Alter der Erde zwischen 24 Ma und 400 Ma



Wärmetransport
durch Konduktion
(Leitung)

Nach Kelvins Vorstellung
hatte die Erde zu Anfang
eine Temperatur von
3900 °C

Der von ihm verwendete
Temperaturgradient war
~36 °C/km

William Thomson, 1st Baron Kelvin (1824 - 1907)

Lord Kelvin und das absolute Alter der Erde

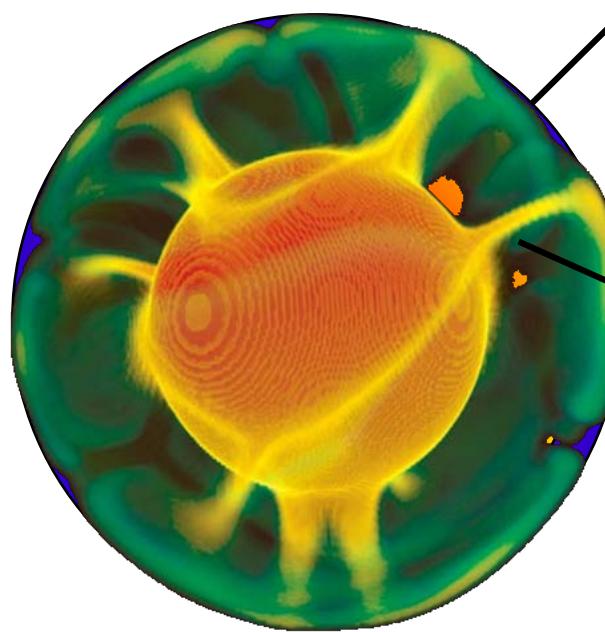
John Perry (1895), Physiker: Konvektion im Inneren der Erde;
Gesteine sind zwar fest, verformen sich aber langsam wie
„Schusterpech“

Dadurch bleibt T direkt unter der Kruste hoch

Alter der Erde bis zu 2 Ga



<https://www.americanscientist.org/article/kelvin-perry-and-the-age-of-the-earth>



Wärmetransport durch Konduktion (Leitung) nur in der äußeren festen Kruste

Wärmetransport durch Konvektion (Materialtransport aufgrund von Dichteunterschieden) in zähflüssigen Gesteinen

John Perry (1850 - 1920)

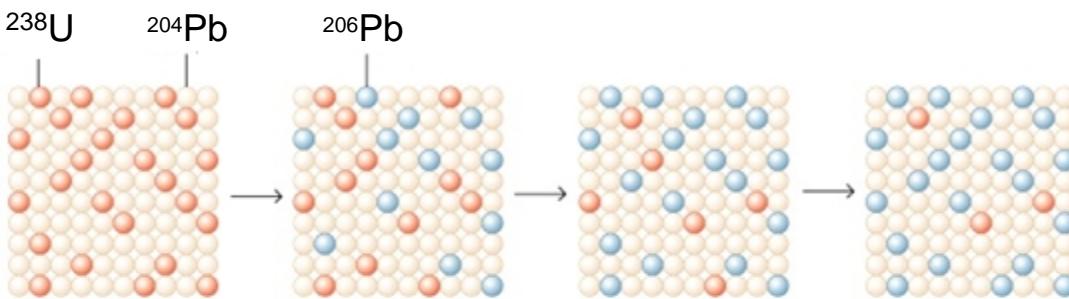
Absolute Alter durch radiometrische Datierung

Beispiel der Altersgleichung für U-Pb:

Zerfallsprodukt $\frac{^{206}Pb^*}{^{238}U} = (e^{\lambda_{238}t} - 1)$

Ausgangsisotop

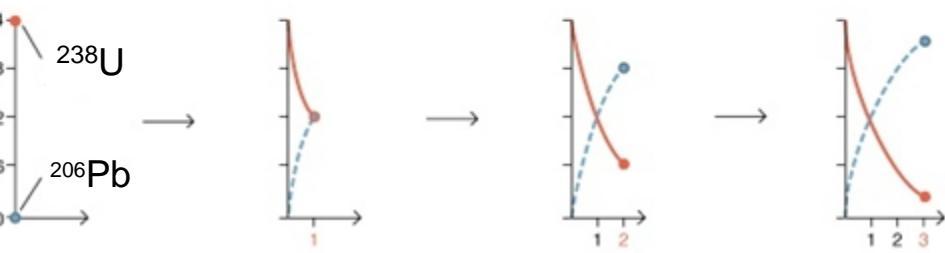
↑
Zerfallskonstante



Zerfallsprodukt $\frac{^{207}Pb^*}{^{235}U} = (e^{\lambda_{235}t} - 1)$

Ausgangsisotop

↑
Zerfallskonstante



Verhältnis heute $\frac{^{238}U}{^{235}U} = 137.88$

$\frac{^{206}Pb^*}{^{238}U}$ nach n Vielfachen der Halbwertszeit

0 1 3 7

oder:

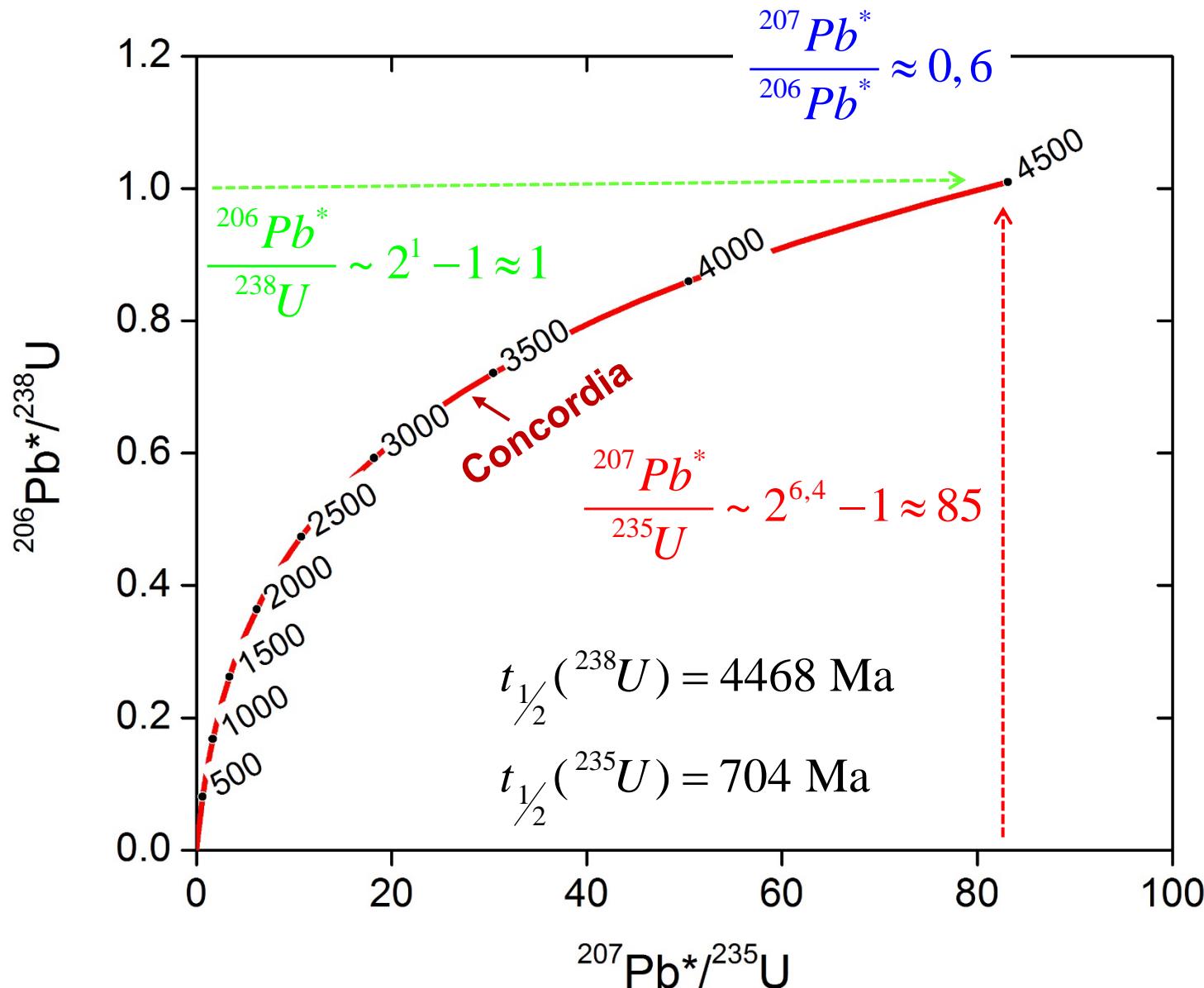
$$\frac{^{206}Pb^*}{^{238}U} = 2^n - 1$$

* = radiogen (durch radioaktiven Zerfall entstanden)

Andere Pb Isotope: ^{208}Pb (durch Zerfall von ^{232}Th) und ^{204}Pb (stabil)

Analog gilt dies auch für ^{235}U

Concordia Diagramm zur Altersbestimmung

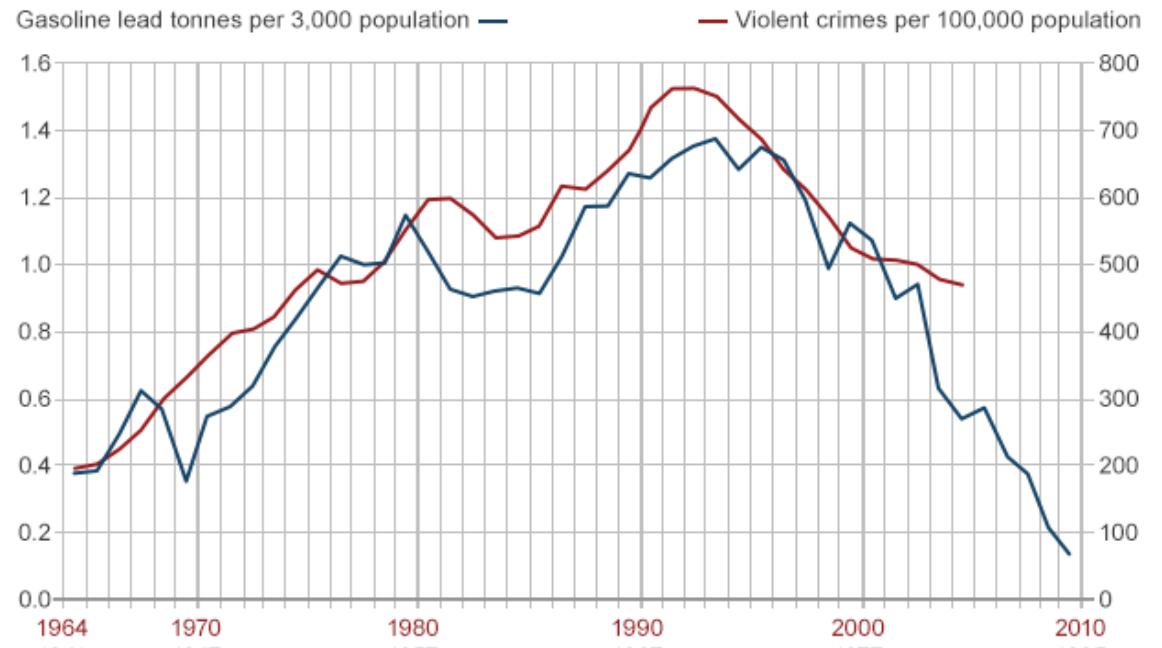


Clair Patterson



1922-1995

Lead exposure and violent crime, USA



Fragen

Welche Prozesse der Wärmetransports spielen für das Innere eines Planeten eine Rolle?

Wie alt die die Erde nach radiometrischen Altersdatierungen? Warum war Kelvins Altersabschätzung aufgrund der Gesetze der Wärmeleitung durch eine feste Erde fehlerhaft?

Wie heißt die Linie, die die U-Pb Isotopenverhältnisse als Funktion der Zeit darstellt, wenn diese nur durch radioaktiven Zerfall geändert werden?

Durch welchen industriellen Prozess gelangte bis in die 1970er Jahre Pb in die Umwelt?