

SATELLITEN UND RINGE UM PLANETEN

DAS SONNENSYSTEM UND SEINE NÄCHSTEN VERWANDTEN FÜR NICHT-PHYSIKER

MARKUS PÖSSEL

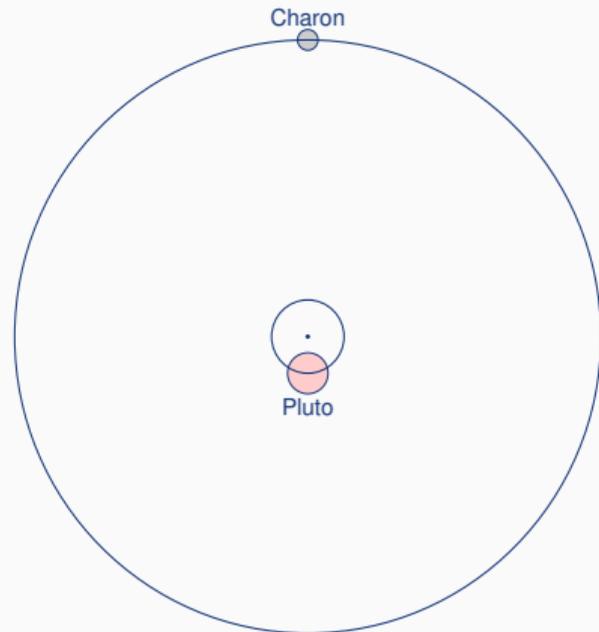
HAUS DER ASTRONOMIE

UNIVERSITÄT HEIDELBERG, WS 2022/2023

DEFINITION: MOND

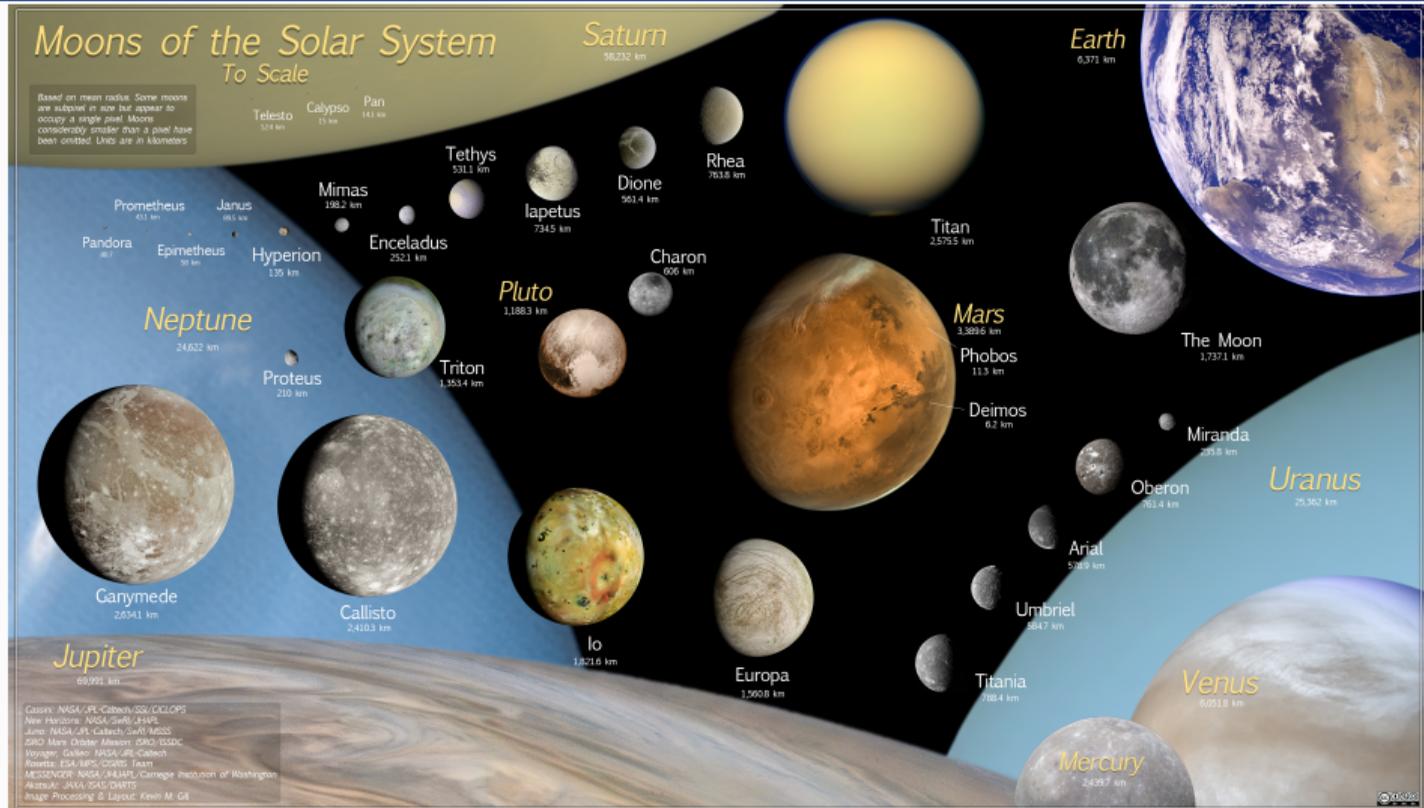
Ein **Mond** (synonym: [natürlicher] Satellit) ist ein Himmelskörper, der einen nicht-Stern (Planet, Asteroid, ...) umkreist welcher einen Stern umkreist, wobei der Massenschwerpunkt der Umkreisung von nicht-Stern und Mond innerhalb des nicht-Sterns liegt.

... so im IAU-Pluto-FAQ, aber leider nicht konsequent angewendet, vgl. Pluto und Charon (=Mond)



Pluto-Charon-System, maßstabsgetreu

MONDE DES SONNENSYSTEMS MASSSTABGETREU („GRÖßER ALS EIN PIXEL“)



Bildverarbeitung und Layout: Kevin Gill, Los Angeles, CA, US. Einzelbilder: Cassini: NASA/JPL-Caltech/SSI/CICLOPS; New Horizons: NASA/SwRI/JHAPL; Juno: NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS ISRO; Mars Orbiter Mission: ISRO/ISSDC; Voyager, Galileo: NASA/JPL-Caltech; Rosetta: ESA/MPS/OSIRIS Team; MESSENGER: NASA/JHUAPL/Carnegie Institution of Washington; Akatsuki: JAXA/ISAS/DARTS, unter Lizenz CC BY 2.0

ERDMOND: MONDPHASEN

Juni 2022						
Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag
30	31	1 	2 	3	4 	5 
6 	7 	8 	9 	10 	11 	12 
13 	14 	15 	16 	17 	18 	19 
20 	21 	22 	23 	24 	25 	26
27	28	29	30	1	2	3

Bild: C. Liefke / HdA

DER MOND (ALS EINZIGER MIT BESTIMMTEM ARTIKEL)

- Radius $1737 \text{ km} = 0.27 R_{\oplus}$
- Masse 1.2% Erdmasse
- Oberfläche:
 - ▶ 80% helles Hochland
 - ▶ 20% dunklere Mare (v.a. Mondvorderseite)
- Entstanden vor rund 4.4 Mia. Jahren durch Kollision Proto-Erde mit Theia



Erdmond am 1. Januar 2023. Bild: C. Liefke/HdA



Bild links: Galileo, NASA/JPL/USGS Bild rechts: Galileo, NASA/JPL



titanhaltig



eisenhaltig



aluminiumhaltig

MONDENTWICKLUNG

- Ausgangspunkt: Magma-Ball
- mafische (Fe, Mg) Minerale sacken ab, werden fest
- leichte Plagioklase \Rightarrow Kruste
- Erste Becken: 3.9 Gyr, Late Heavy Bombardement
- radioaktive Zerfälle \Rightarrow partielles Schmelzen \Rightarrow Vulkanismus
- Megaregolith: zertrümmert bis Tiefe ca. 10 km
- Regolith < 1 cm auf der Oberfläche

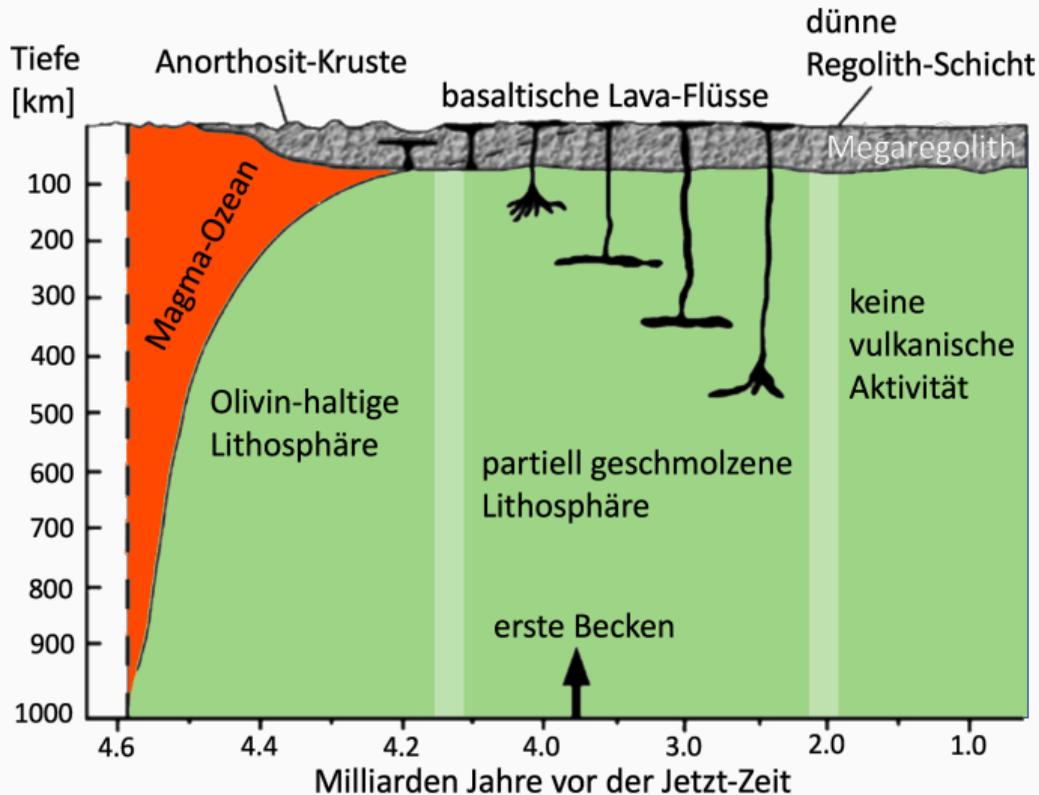
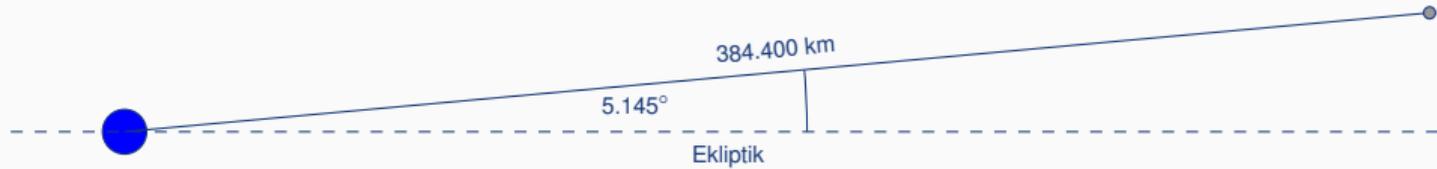


Bild adaptiert von Abb. 8 in Jaumann et al. 2012

WECHSELWIRKUNG MOND-ERDE

Maßstabsgetreu:



Gezeiten:



Taglänge $+23 \mu\text{s}/\text{Jahr}$, Erd-Mond-Abstand $+2.8 \text{ cm}/\text{Jahr} \Rightarrow$ Stabilisierungseffekt

MARS MIT PHOBOS UND DEIMOS: VERMUTLICH EINGEFANGENE ASTEROIDEN



Bild: NASA/JPL-Caltech/U Arizona

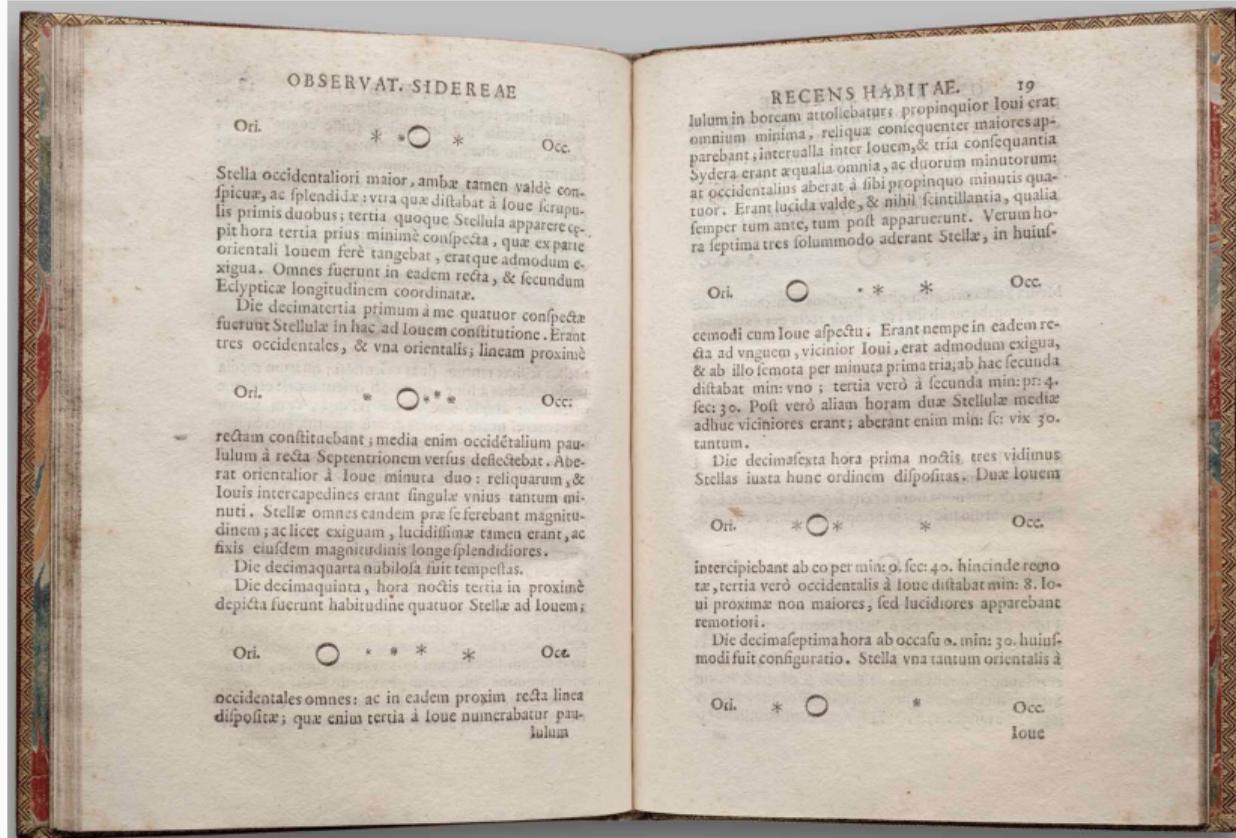
- 27 km × 22 km × 18 km
- Fluchtgeschwindigkeit \approx 40 km/h
- Alter (Kraterzählung) ca. 3 Mia. Jahre



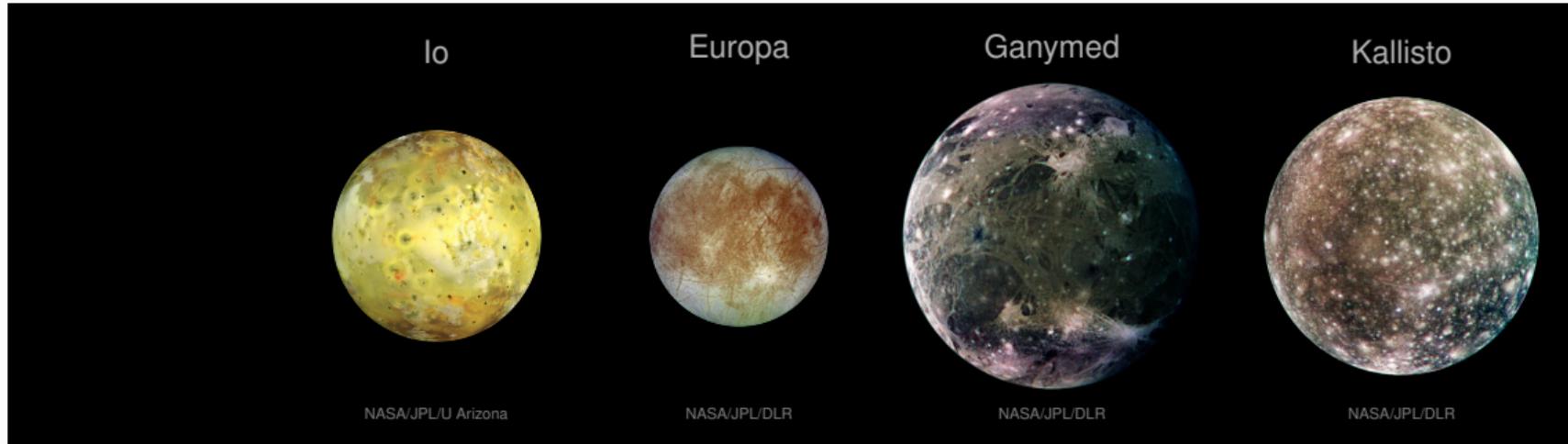
Bild: NASA/JPL-Caltech/UArizona

- 15 km × 12.2 km × 11 km
- Fluchtgeschwindigkeit \approx 20 km/h
- Alter (Kraterzählung) ca. 3 Mia. Jahre

JUPITERMONDE — GALILEIS BEOBACHTUNGEN, SIDEREUS NUNCIUS (1610)



GALILEISCHE MONDE



Radius	3645 km	3122 km	5268 km	4821 km
gr. Halbachse	421 800 km	671 100 km	1 070 400 km	1 882 700 km
Umlaufzeit	1.77 d	3.55 d	7.16 d	16.69
... relativ zu Io	1	2	4	9.4
Masse	1.22 M_{C}	0.62 M_{C}	2.02 M_{C}	1.47 M_{C}

IO: AKTIVER VULKANISMUS (WIE SONST NUR AUF DER ERDE)

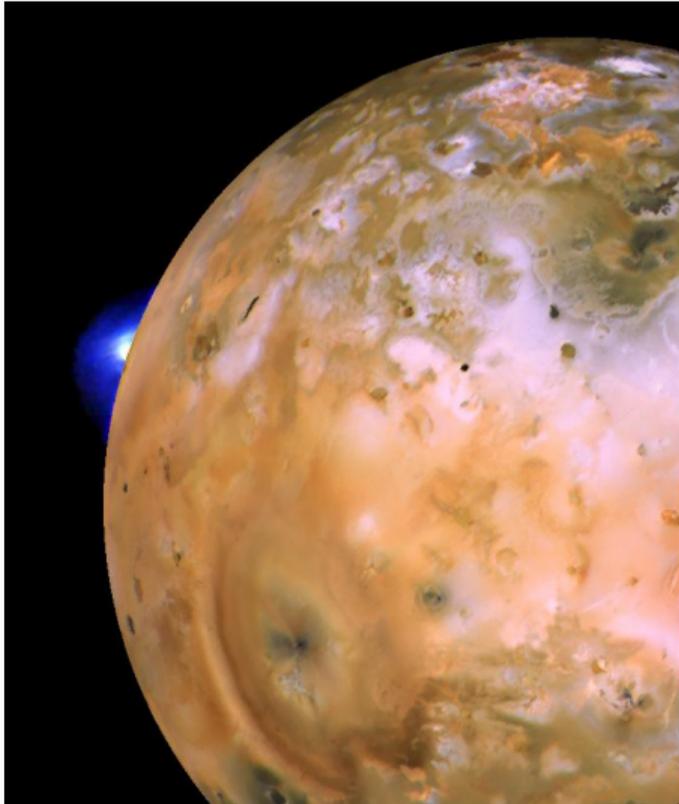
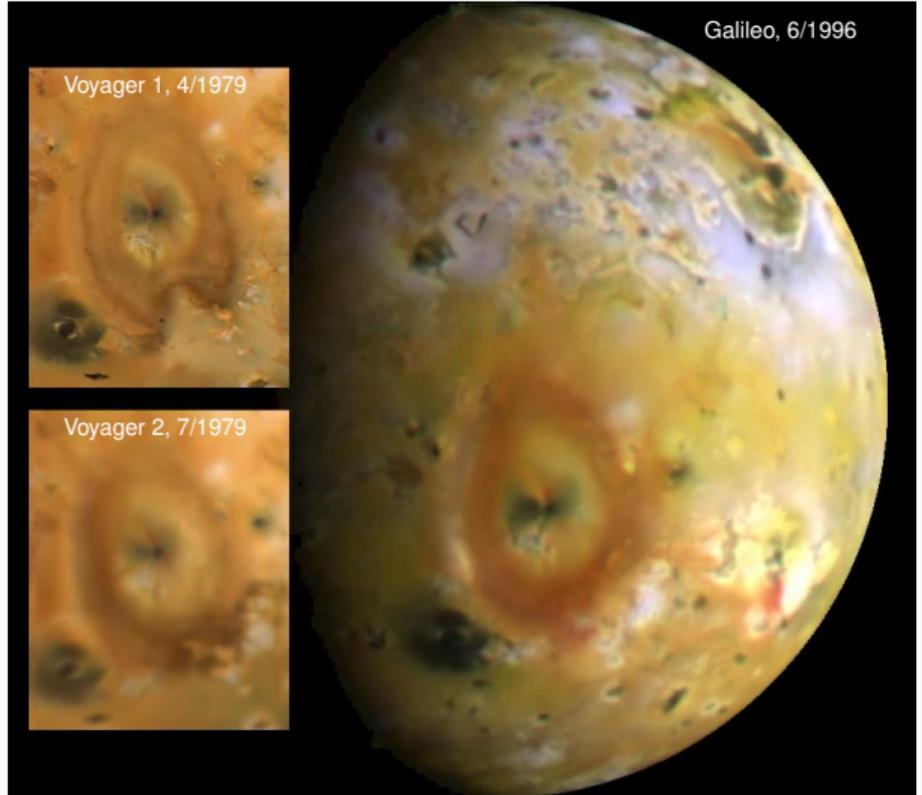
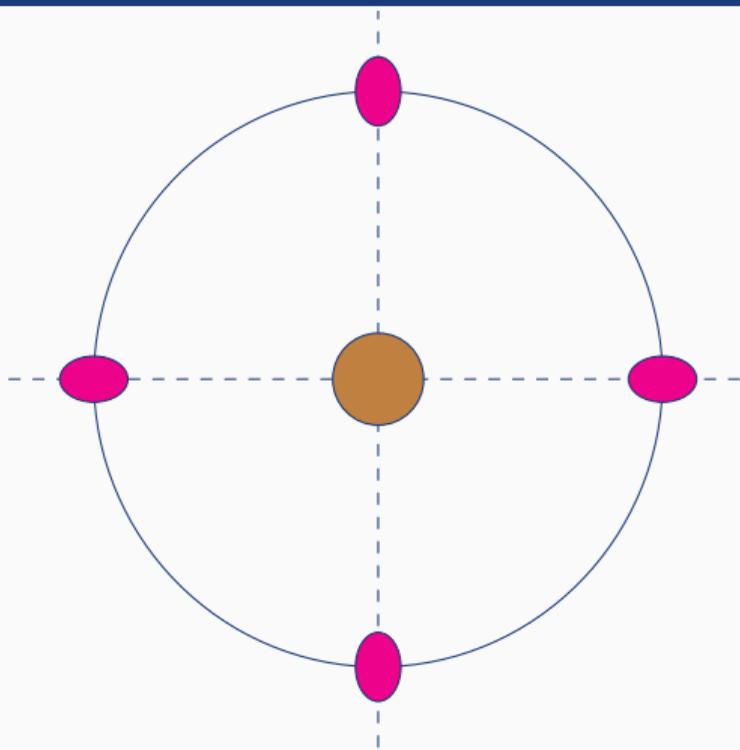


Bild: NASA/JPL/USGS

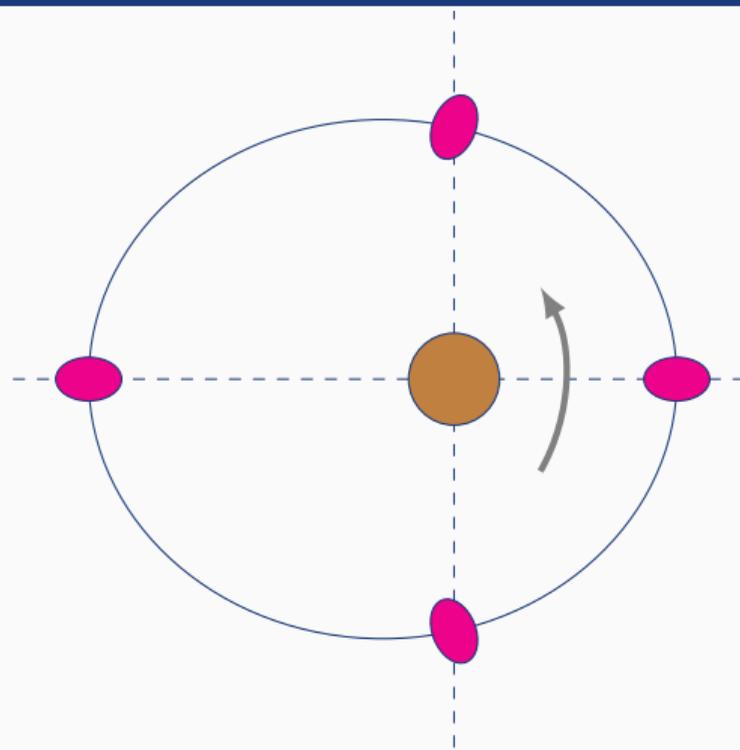


Pele-Formation. Bild: NASA/JPL/Ames Research Center

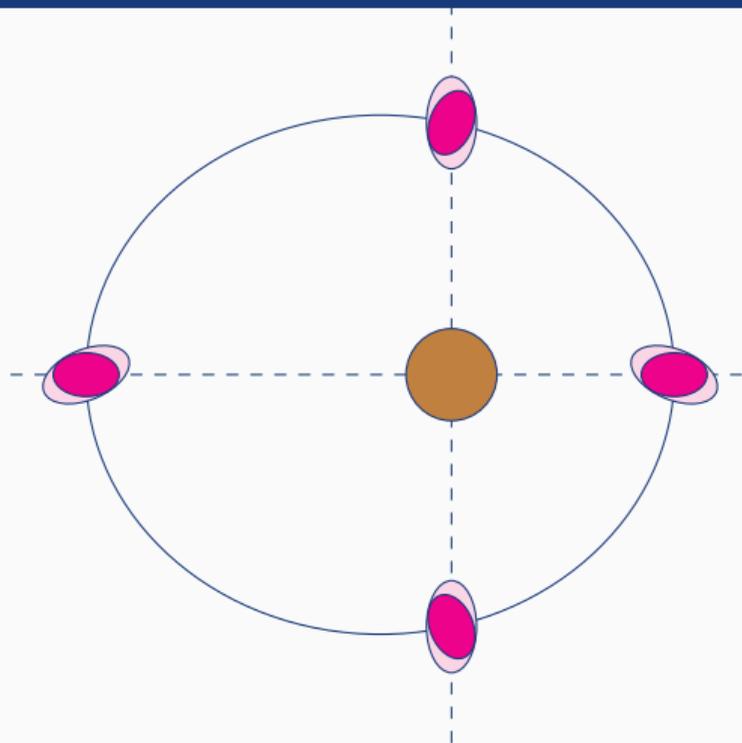
HINTER DEM IO-VULKANISMUS: GEZEITEN-AUFHEIZUNG



Gebundene Rotation verformter Körper



... dasselbe auf Ellipsenbahn



Konstante vs. variable Form

- Ellipsenbahn führt zur Verformung (Io: Hub/Senke ~ 150 m)
- Verformung \Rightarrow Aufheizung (200 \times Radioaktivitäts-Beitrag)
- Resonanz (Io, Europa, Ganymed) verhindert Ellipse \Rightarrow Kreis
- Peale, Cassen, Reynolds 1979: *Vorhersage Io-Vulkanismus*

EUROPA: WASSER-OZEAN UNTER DEM EIS

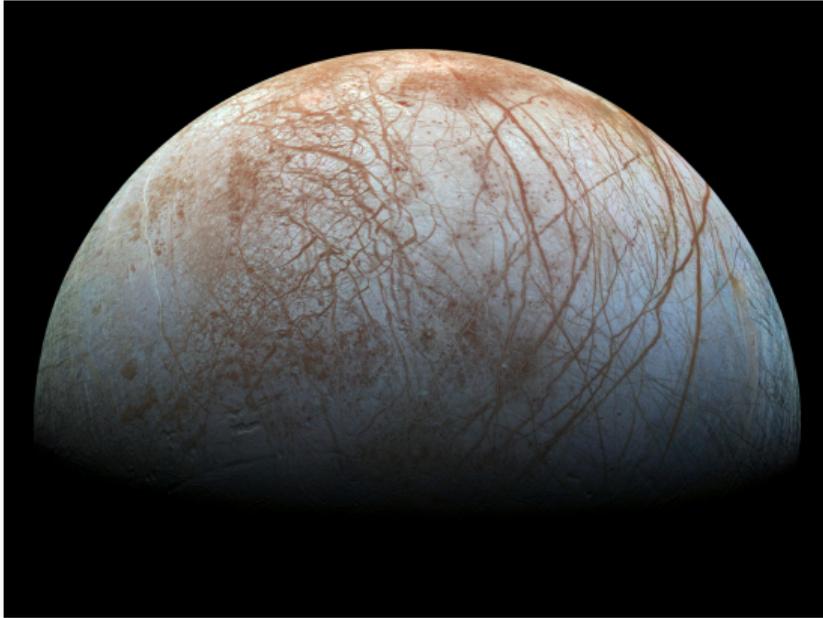


Bild: Galileo, NASA/JPL-Caltech/SETI Institute

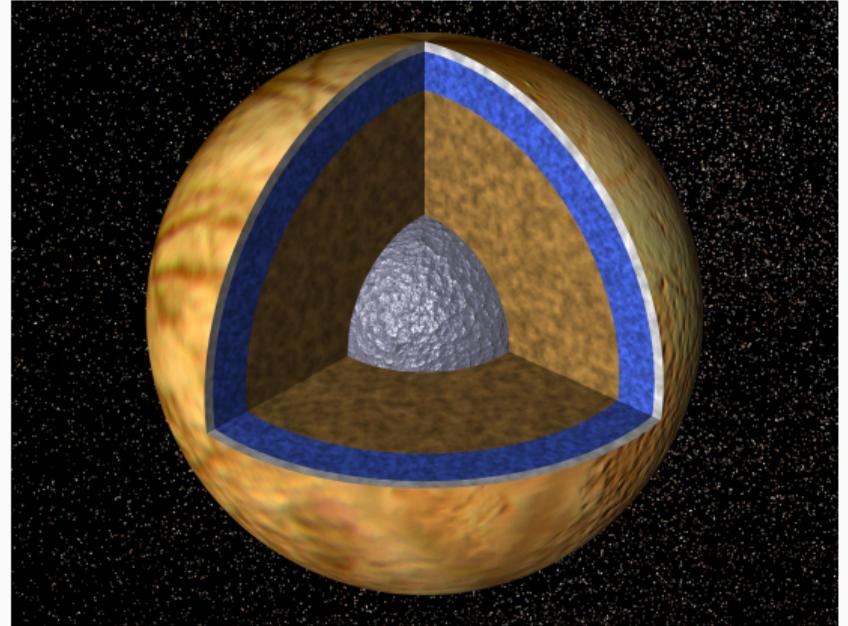


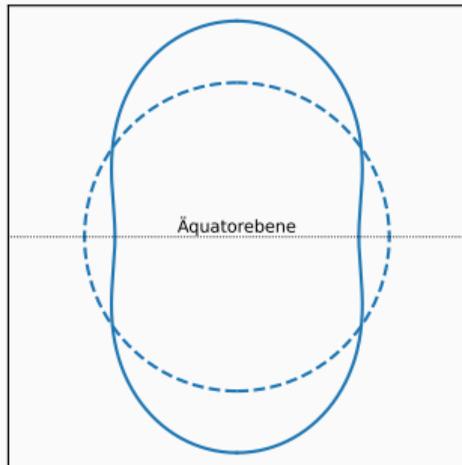
Bild: NASA/JPL

Magnetfeldmessungen \Rightarrow Salzwasser-Ozean; Gezeiten: Heizung und Eisbrüche. Leben?

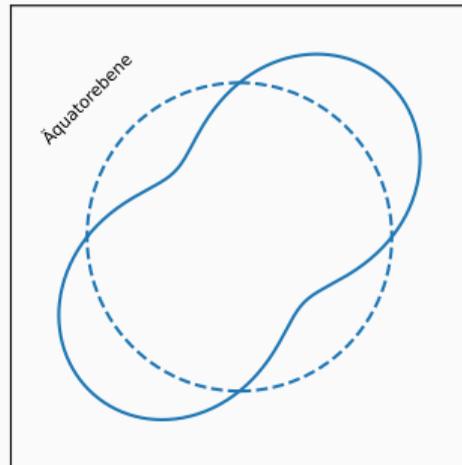
GRAVITATIONSMESSUNGEN AN VERZERRTEN MONDEN

Einfachste Abweichung von der Kugelsymmetrie nach Breite ϕ und Länge λ :

$$V(r) = \frac{GM}{r} \left[1 - \frac{1}{2} J_2 (3 \sin^2 \phi - 1) \left(\frac{R}{r} \right)^2 + C_{22} \cos^2 \phi \sin 2\lambda \left(\frac{R}{r} \right)^2 \right]$$



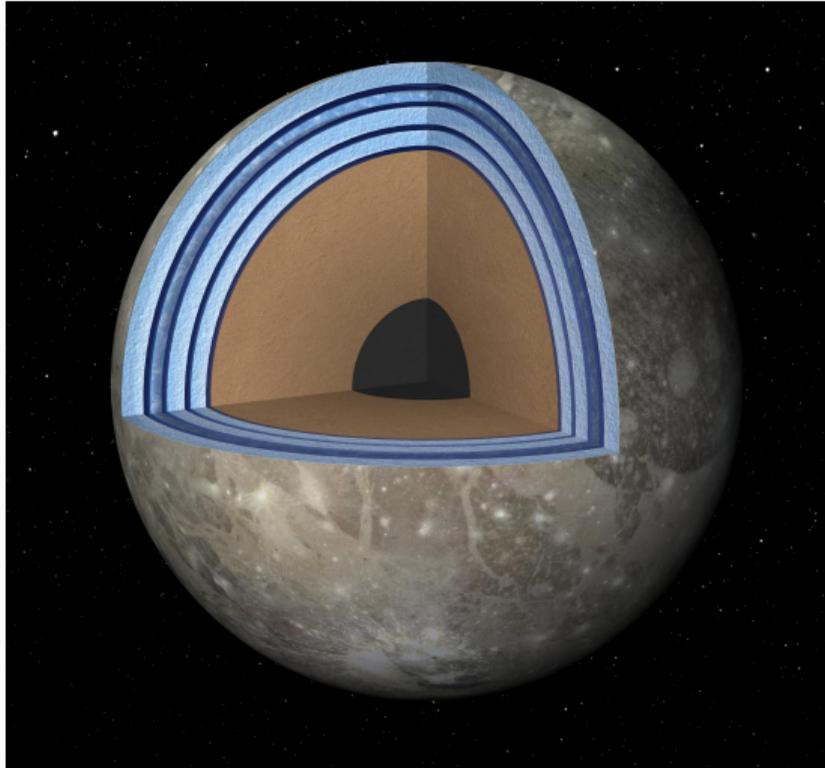
Blick von der Seite



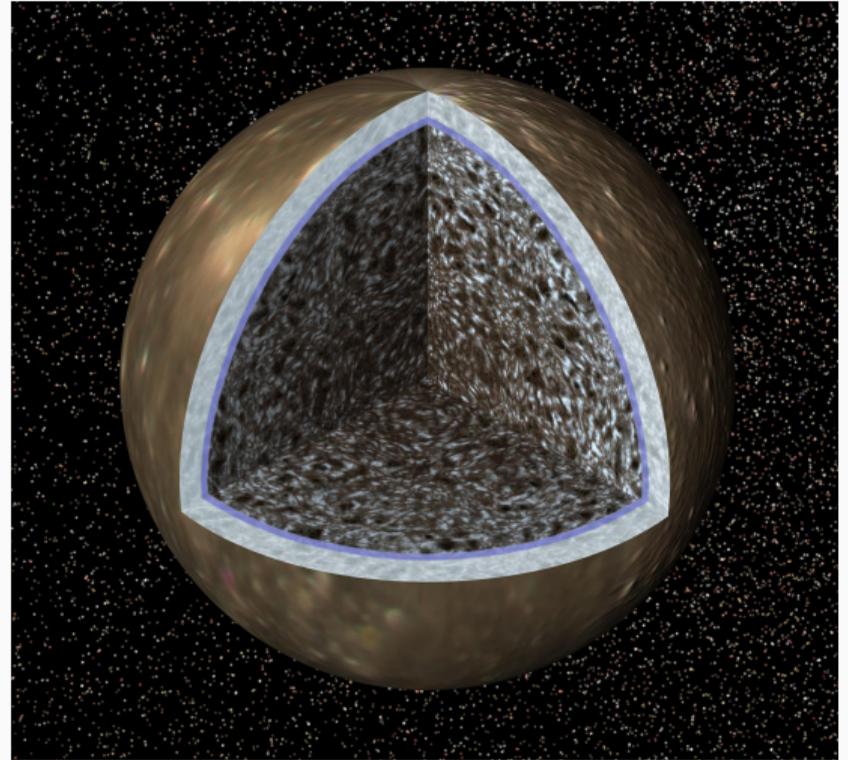
Blick von oben

Bestimmung J_2 , C_{22} durch nahe Vorbeiflüge \Rightarrow Rückschlüsse Massenverteilung

EIS-SANDWICH GANYMED VS UNDIFFERENZIERTER KALLISTO



Ganymed nach Galileo-Daten. Bild: NASA/JPL-Caltech



Kallisto nach Galileo-Daten. Bild: NASA/JPL

WIE (GRÖßERE, PLANETEN-NAHE) MONDE ENTSTEHEN

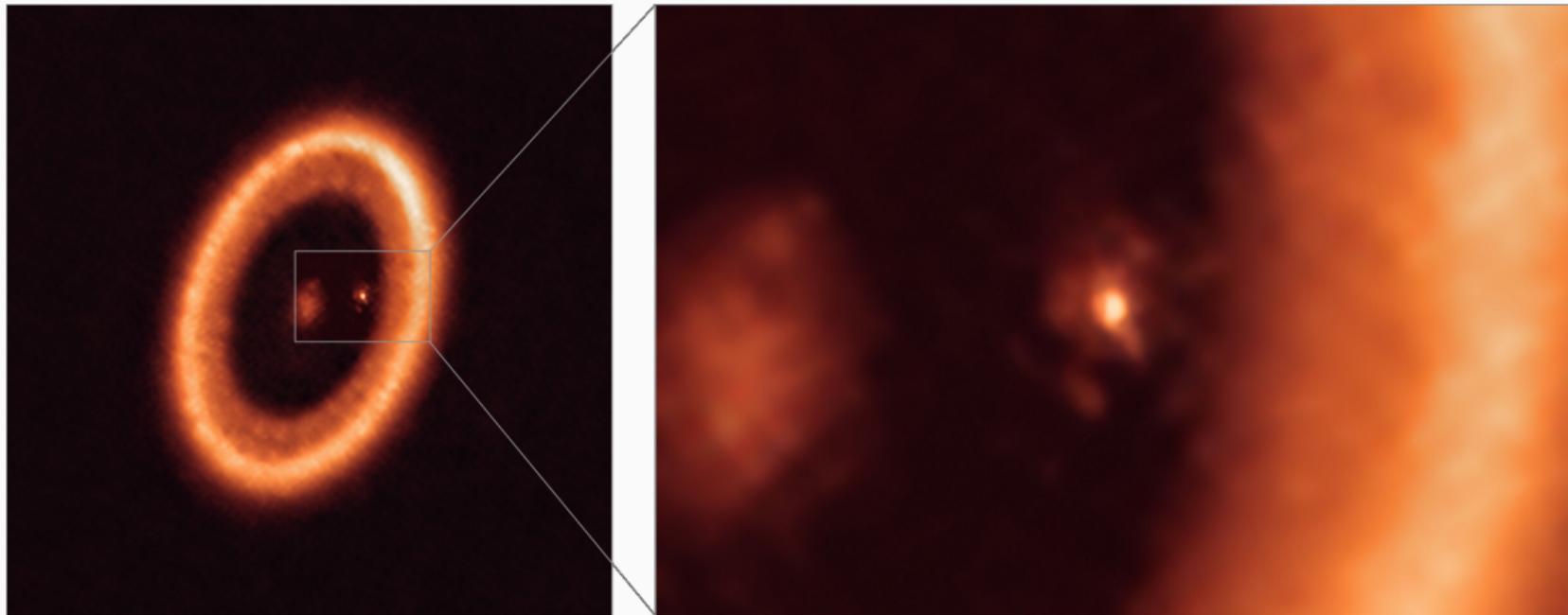


Bild: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/Benisty et al.

ALMA findet 2021 zirkumplanetare Scheibe rund um PDS 70c
(kann potenziell Satelliten mit insges. 3 Erdmondmassen bilden)

ENTSTEHUNG GALILEISCHE MONDE



Bild: NASA/JPL/DLR

- Entstehung in zirkumplanetarer Scheibe
- Größere Satelliten wandern nach innen (keine Lücke)
- Eis erlaubt Rückschlüsse auf Jupiter-Migration

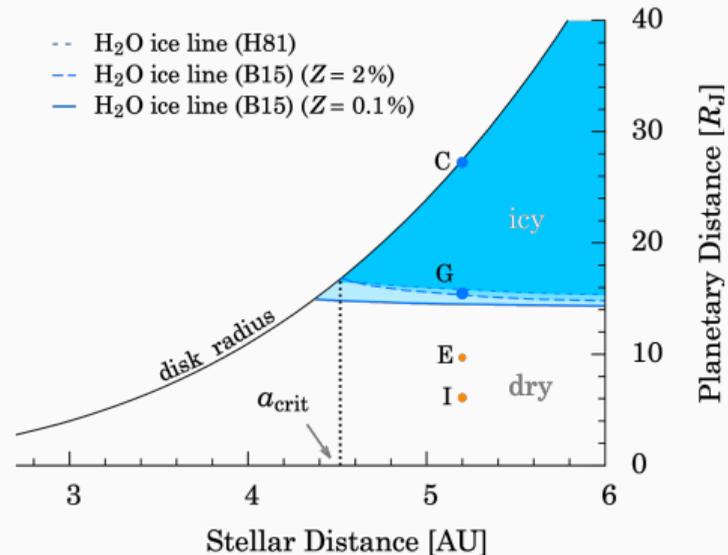


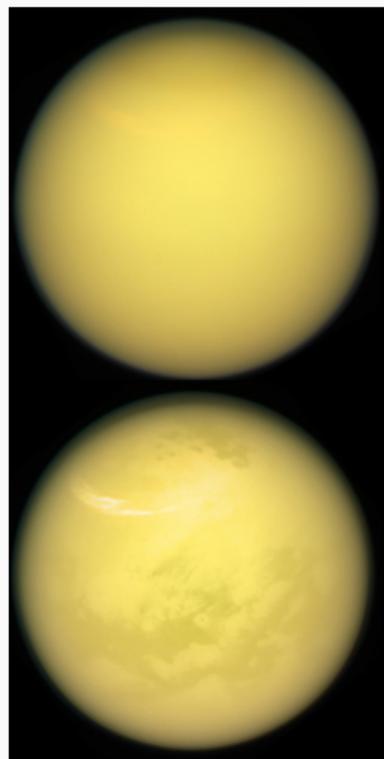
Diagramm: Heller et al. 2015

SATURNMOND TITAN: EINIGERMASSEN ERDÄHNLICHE ATMOSPHERE



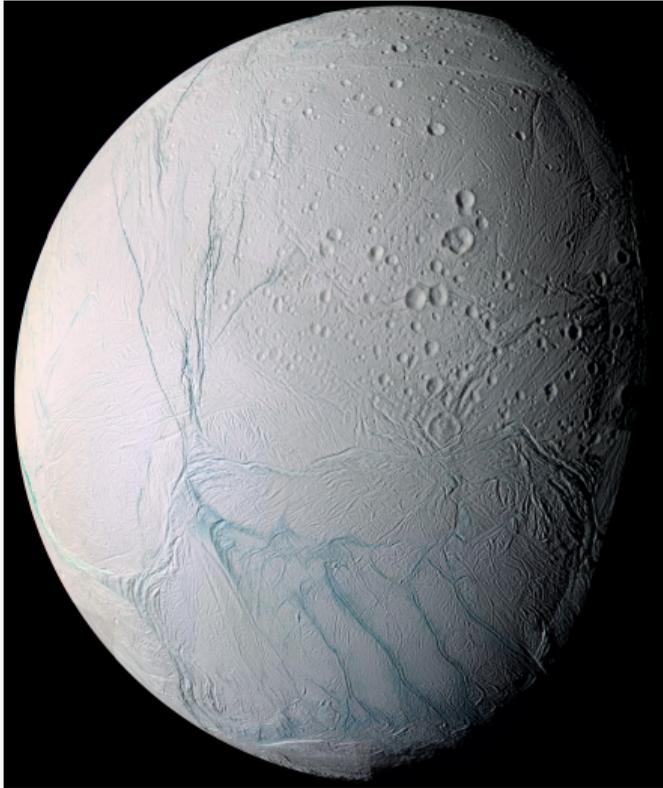
Huygens-Aufnahme. Bild:
NASA/JPL/ESA/U Arizona

- $R = 2574 \text{ km}$ (40% Erdradius)
- 1.8 Erdmondmassen
- Große Halbachse 1 221 870 km
- Erdähnliche Atmosphäre $\sim 95\% \text{ N}_2$
- Dunst, Wolken, Jahreszeiten
- Oberflächentemp.: 90.6 K, $-182.55 \text{ }^\circ\text{C}$
- Oberfläche: Eis, Methan-Matsch, flüssiges Methan
- Vermutlich Kryovulkanismus



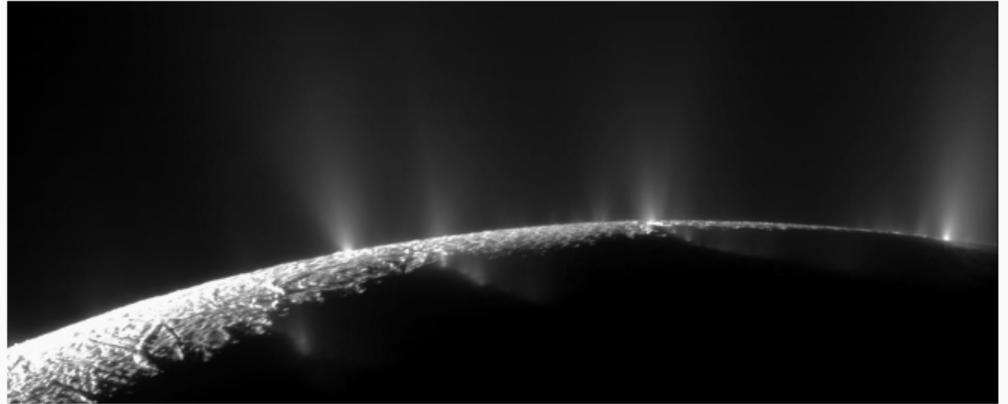
IR zeigt Oberfläche, Wolken. Bild:
NASA/JPL-Caltech/SSI

SATURNMOND ENCELADUS: GEOLOGISCHE EIS-AKTIVITÄT



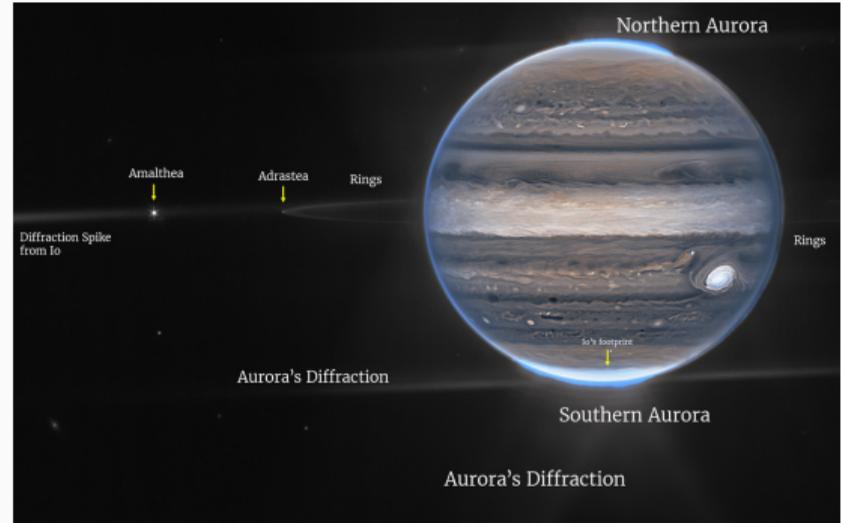
Falschfarbenbild von Cassini. Bild: NASA/JPL/SSI

- Klein: $R = 251 \text{ km}$, 1.5 ‰ Mondmassen
- große Halbachse: $237\,984 \text{ km}$
- Oberfläche feinkörniges Eis plus „Tigerstreifen“
- Kryovulkanismus (Geysire) \Rightarrow Ozean unter Eis



Cassini. Bild: NASA/JPL/SSI

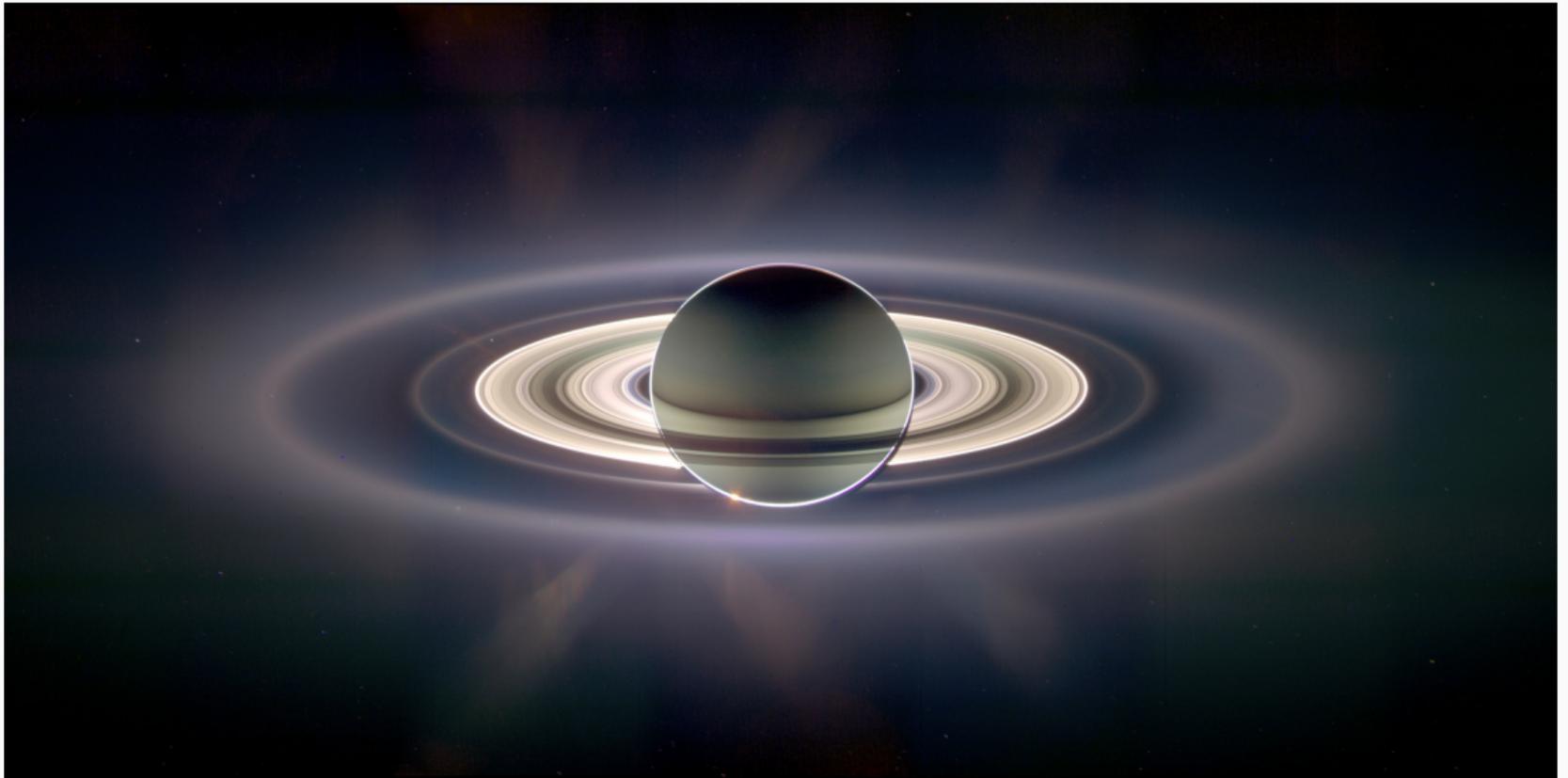
RINGE UM PLANETEN: JUPITER



JWST NIRCam 2022. Bild: CNASA, ESA, CSA, Jupiter ERS Team; image processing by Ricardo Hueso (UPV/EHU) and Judy Schmidt.

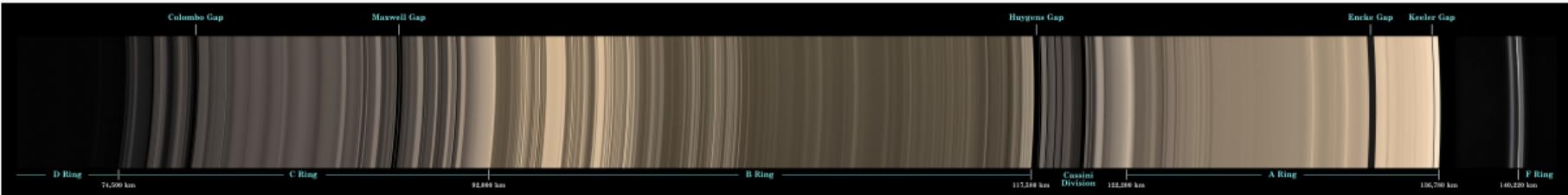
- einfachstes und masseärmstes bekanntes Ringsystem im Sonnensystem
- Staubteilchen, bei Meteoriteneinschlägen auf (je ≥ 1) Quellmonden freigesetzt
- evt. hat Mars mit Phobos/Deimos ein ähnliches Ringsystem?

RINGE UM PLANETEN: SATURN



Cassini 2006. Bild: NASA/JPL/Space Science Institute

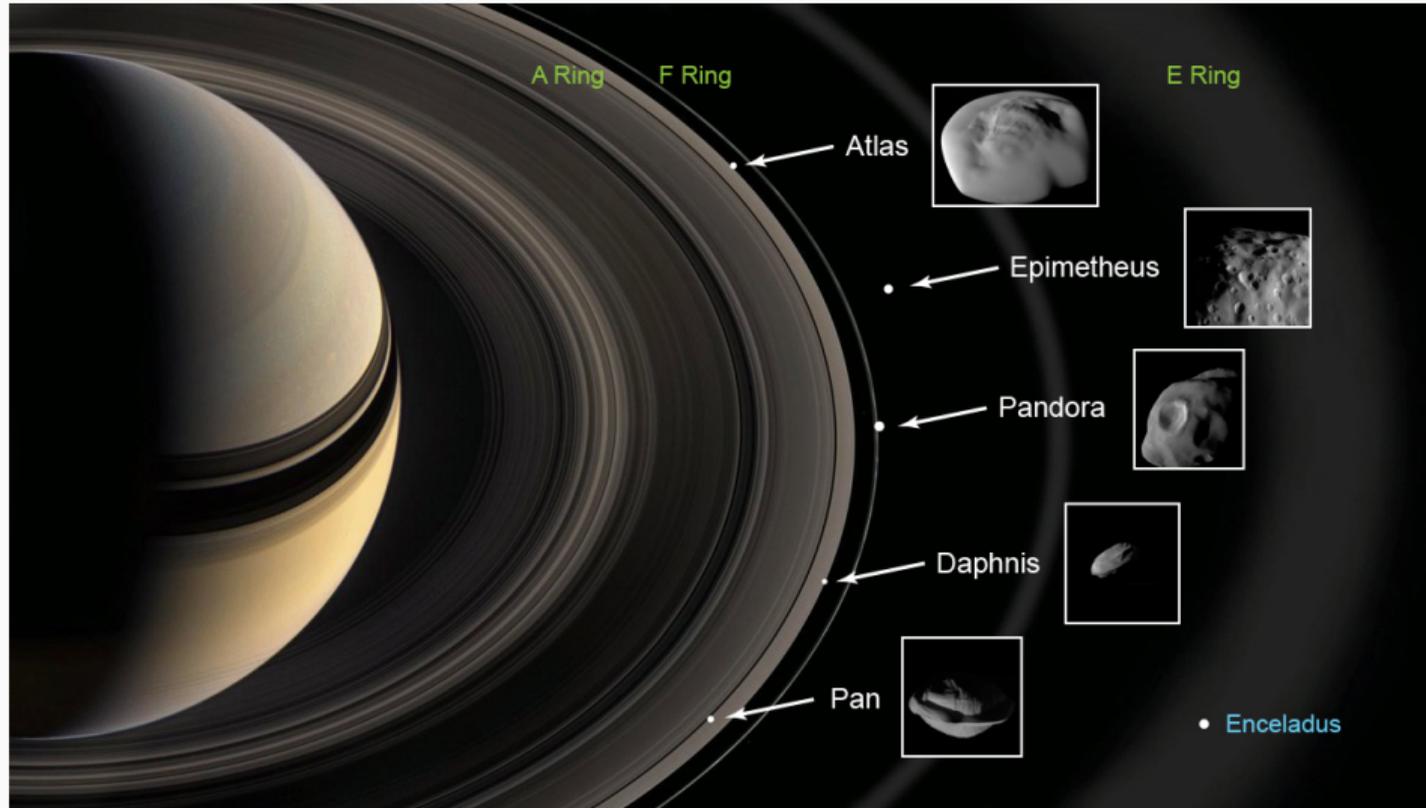
RINGSTRUKTUR SATURN: FLÄCHEN UND LÜCKEN



Mosaik aus Cassini-Bildern: NASA/JPL/Space Science Institute

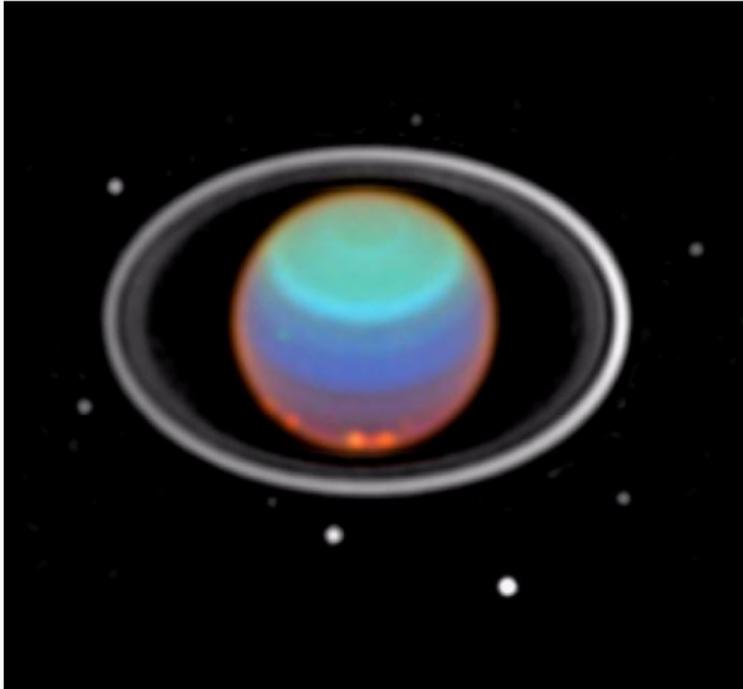
- Ring-Dicke < 10 m (Blatt Papier, 1.4 km lang)
 - 99% des Ringmaterials Eis (\sim Hälfte des antarktischen Schelfeises)
 - Brockengröße cm bis 10 m (Obergrenze Roche-Grenze)
 - in guter Näherung Kepler-Bahnen
 - gravitationsbedingte Wellen (durch äußere Monde; Rückschlüsse auf Dichte)
 - Wechselwirkung Mond mit Ring-Umgebung:
 - ▶ Monde < 1 km: Propeller
 - ▶ Monde > 1 km: Ring-Lücke
- (\rightarrow Vortragsvideo Spahn im Moodle)

MONDE IN RINGEN BEI SATURN: KERN PLUS AKKRETION AUS RINGMATERIAL



Cassini. Bild: NASA/JPL-Caltech

RINGE UM PLANETEN: URANUS UND NEPTUN



Uranus mit HST. Bild: NASA/JPL/STScI

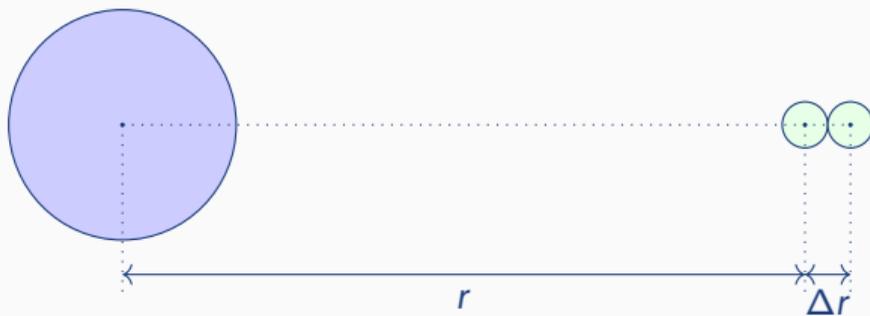


Neptun mit JWST. Bild: NASA, ESA, CSA, STScI

Ringe dünner als bei Saturn. Uranus: weitgehend staubfrei. Neptun staubiger.

ROCHE-GRENZE: GEZEITEN-ZERRISSENES OBJEKT ALS SATURN-RING-QUELLE

Planet mit Masse M und Radius R , Doppelmond mit Masse je m gravitativ gebunden (!):



System stabil, solange $r > r_R$ mit **Roche-Radius** r_R :

$$r_R = R \cdot \left(\frac{16\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3} \approx \left\{ \begin{array}{l} 2.52 \text{ unser Modell} \\ 2.44 \text{ genauere Rechnung} \end{array} \right\} \cdot R \cdot \left(\frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3},$$

Aktuell realistischstes Szenario für Saturn: Komet kollidiert mit Eismond

Nach Entstehung mehrere Klassen von Mond:

- Mond ähnelt terrestrischem Planeten: entsteht zusammen mit (Riesen-)Planet, z.B. Galileische Monde, große Saturnmonde
- Kollisions-Rest: Erdmond
- Eingefangenes Objekt: Phobos, Deimos, kleinere Monde von Jupiter/Saturn/...
- Mond wächst in Planetenring (Saturn) zu gewisser Größe

Verschiedene Arten von Ring:

- breite Ringe mit Struktur: Saturn
- dünnere Ringe mit/ohne Staub: Uranus, Neptun
- Mond-lässt-Staub-Ringe: Jupiter, evt. Mars (?)

Nächste Woche: Asteroiden und Kometen (Hubert Klahr)