



**Von Pionieren, Kundschaftern und Kurieren –  
was uns Satellitenmissionen über die  
Physik von Planeten erzählen**

Roland Pail

TU München

Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie

## Warum sind Planeten für uns so interessant?

Sonne

Merkur

Venus

Erde

Mars

Jupiter

Saturn

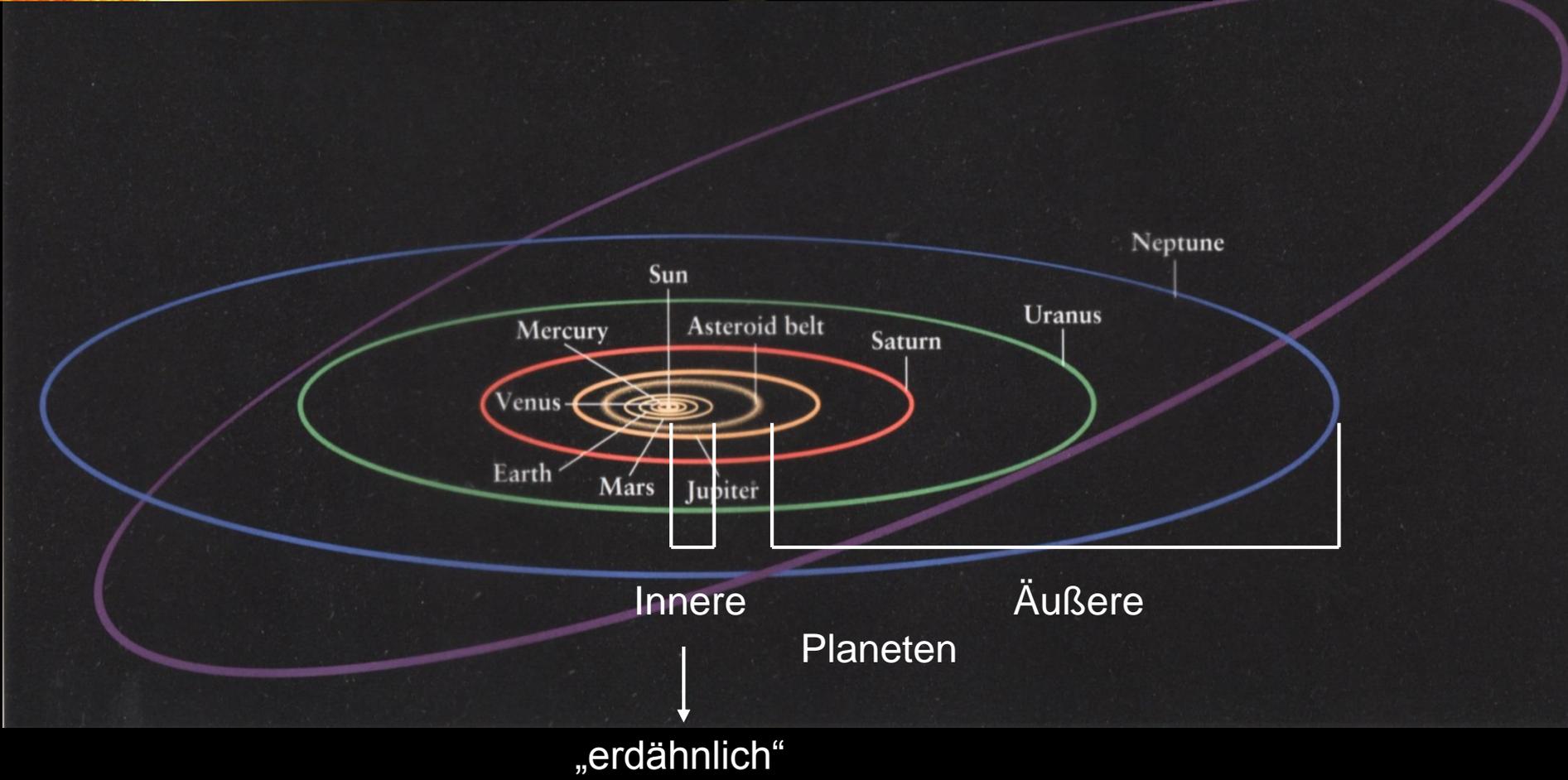
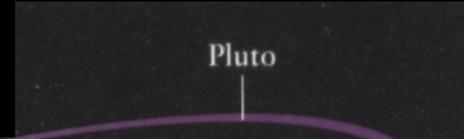
Uranus

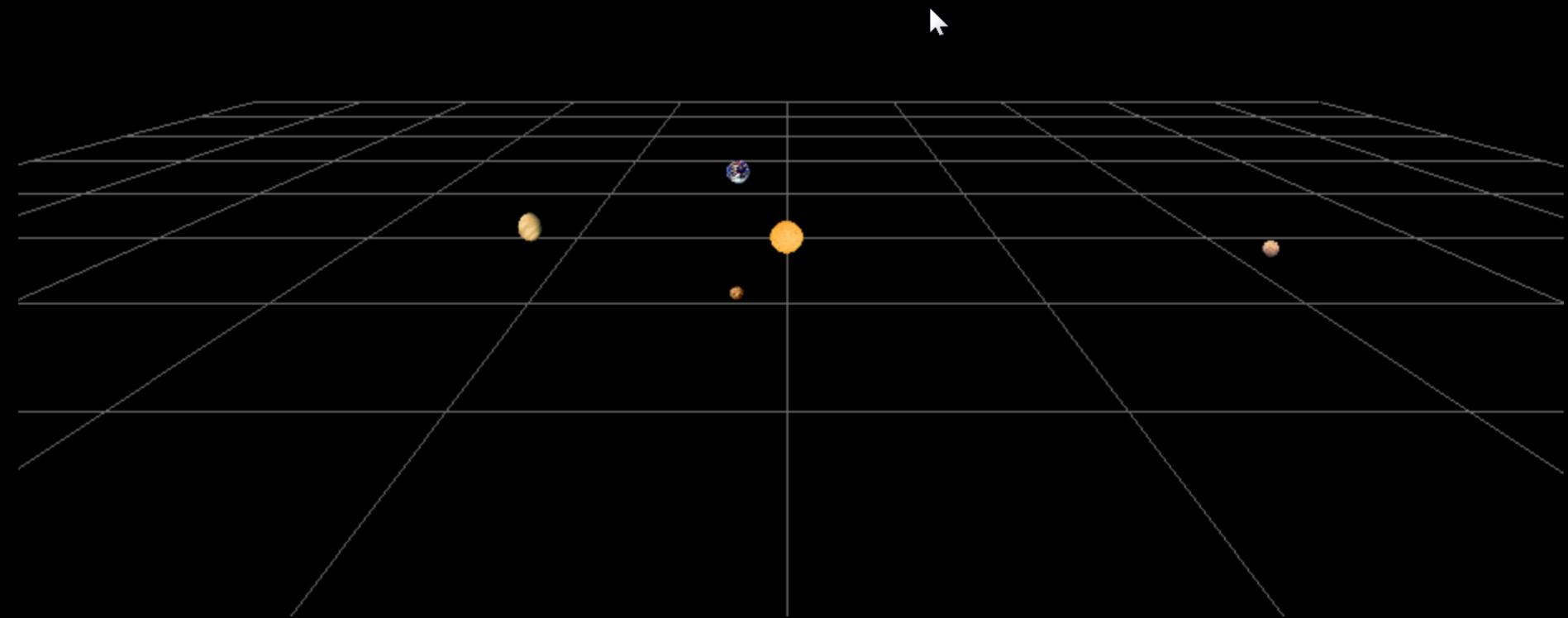


- Lernen, wie unsere Sonnensystem und damit unsere Erde entstanden ist
- Ist Leben außerhalb unserer Erde möglich, unter welchen Bedingungen?



Unser Sonnensystem





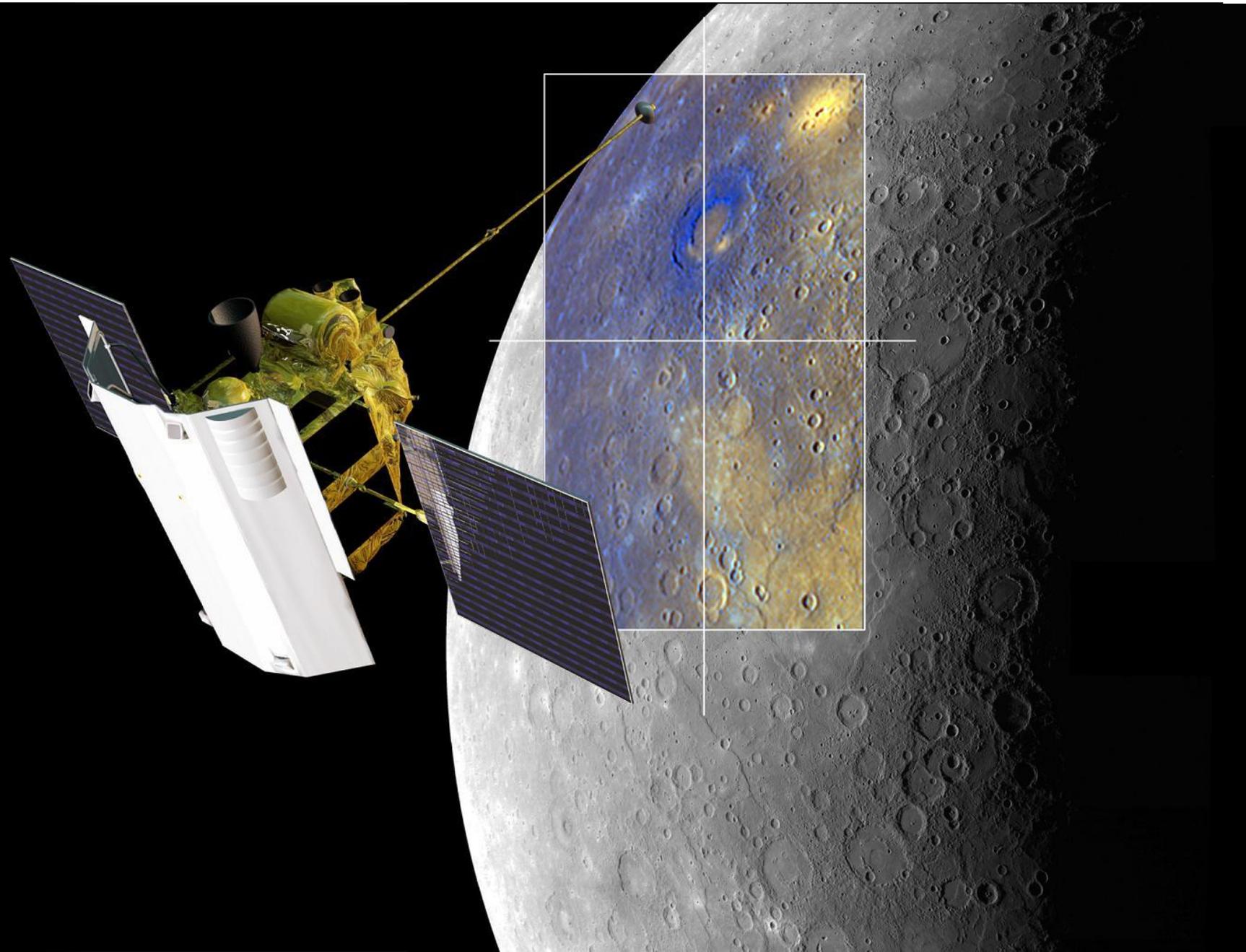


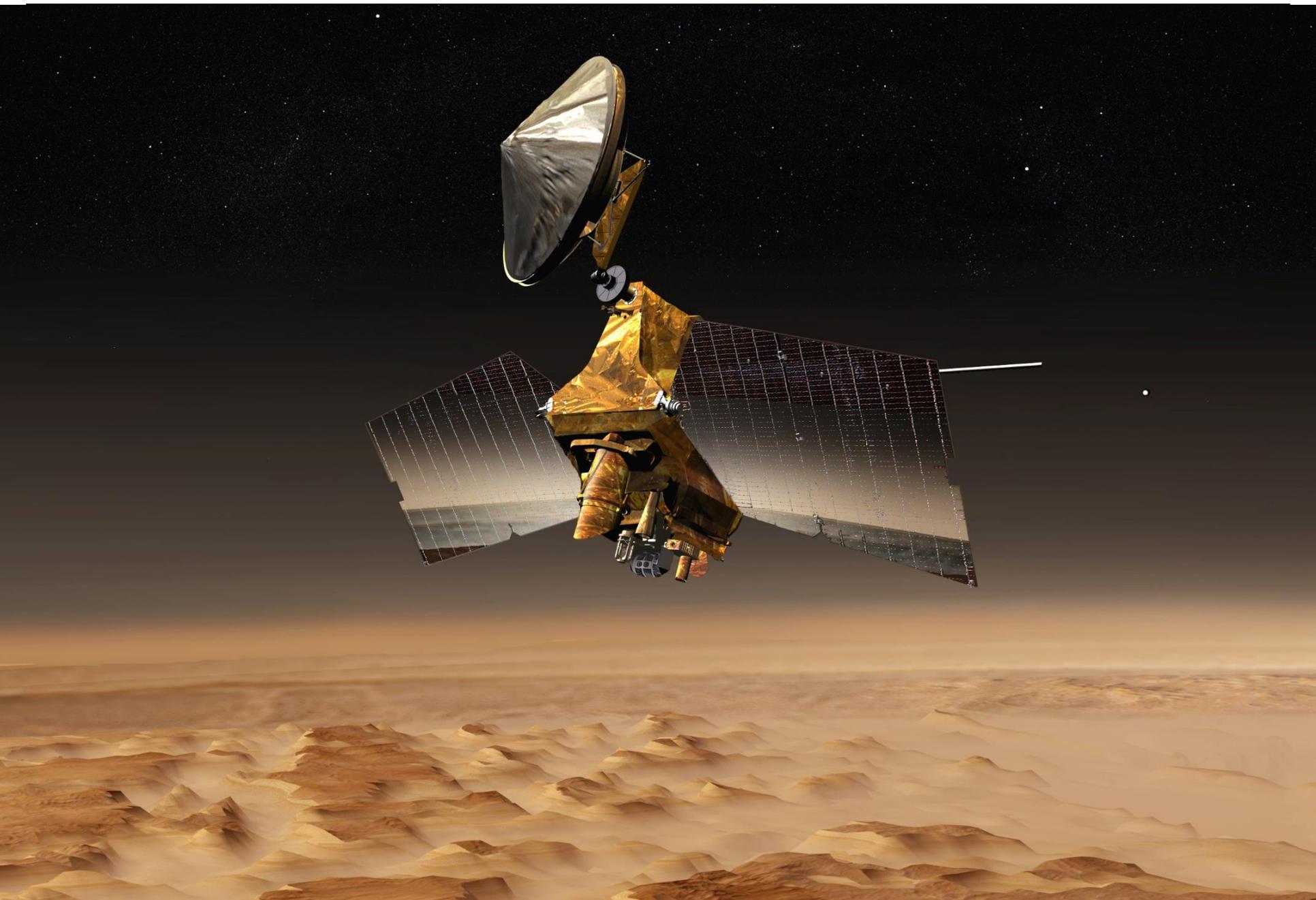
	<b>Merkur</b>	<b>Venus</b>	<b>Erde</b>	<b>Mond</b>	<b>Mars</b>
Radius [km]	2.440	6.052	6.371	1.737	3.390
Masse (rel. Erde)	5,5 %	81,7 %	$5,98 \cdot 10^{24}$ kg	1,3 %	10,7 %
Schwerebesch.	3,70 m/s <sup>2</sup>	8,87 m/s <sup>2</sup>	9,81 m/s <sup>2</sup>	1,63 m/s <sup>2</sup>	3,71 m/s <sup>2</sup>

## Von Pionieren, Kundschaftern und Kurieren ...

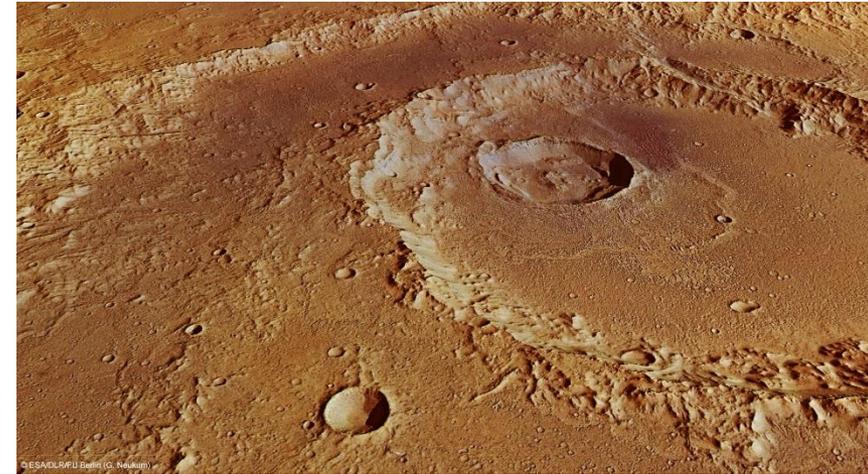
- Kategorien der Beobachtung:
- Vorbeiflug
  - Orbiter (vielfache Umkreisung)
  - Lander (Landung auf der Oberfläche)

	<b>Merkur</b>	<b>Venus</b>	<b>Mond</b>	<b>Mars</b>
Anzahl Missionen	2	ca. 40	ca. 80	ca. 50
davon erfolgreich	2	20	30	19
davon Lander	0	13	19	7

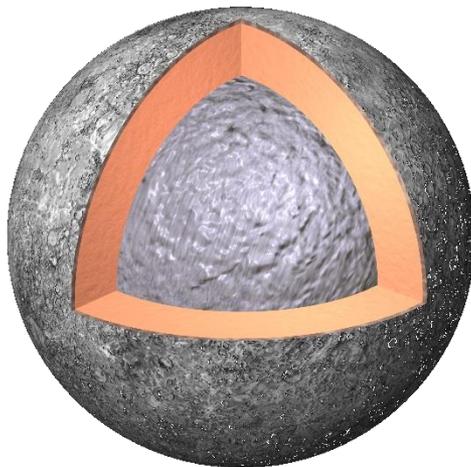




- Fotografische Aufnahmen
- Oberflächenabtastung mit Radar
- Landefahrzeuge



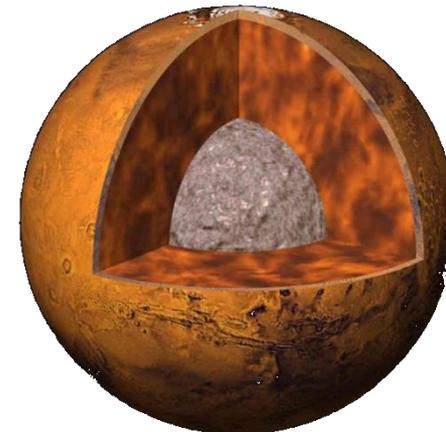
Wie erhalten wir Informationen über Aufbau und innere Strukturen?



Merkur



Venus

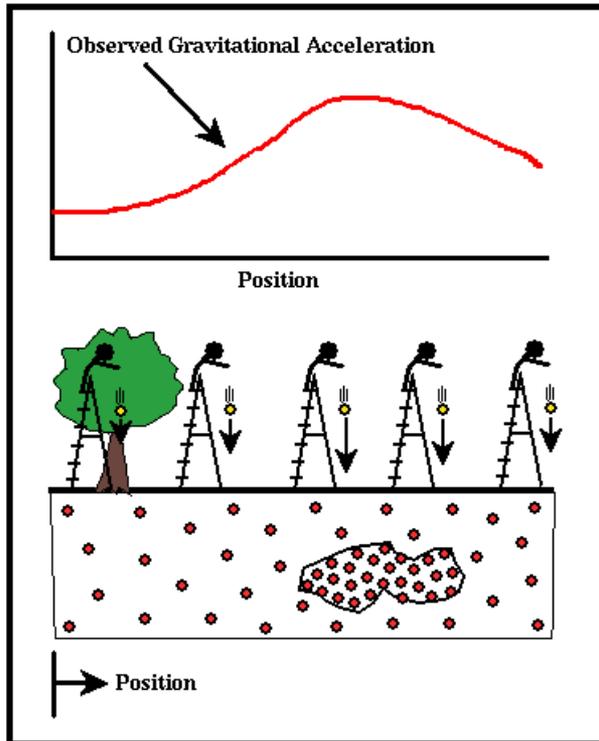


Mars

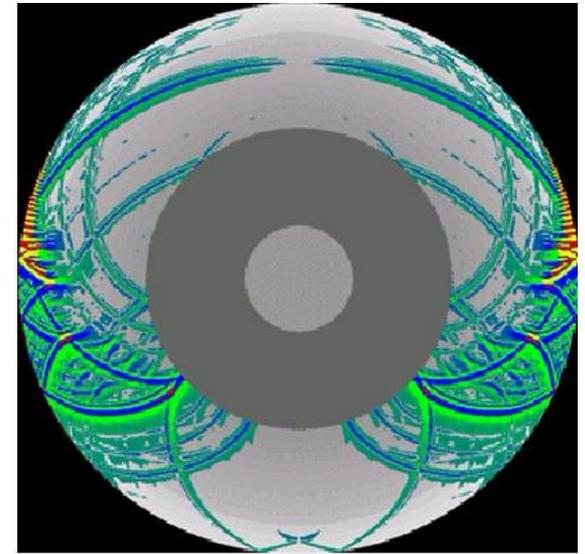
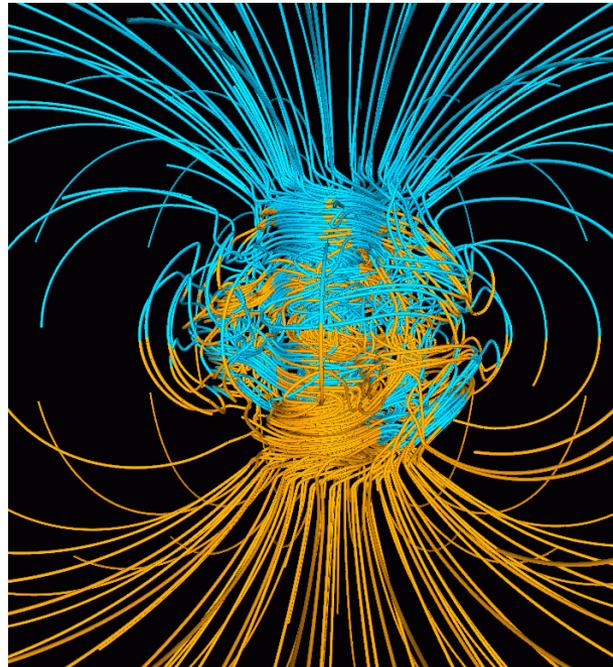


- Ausbreitung von Erdbebenwellen

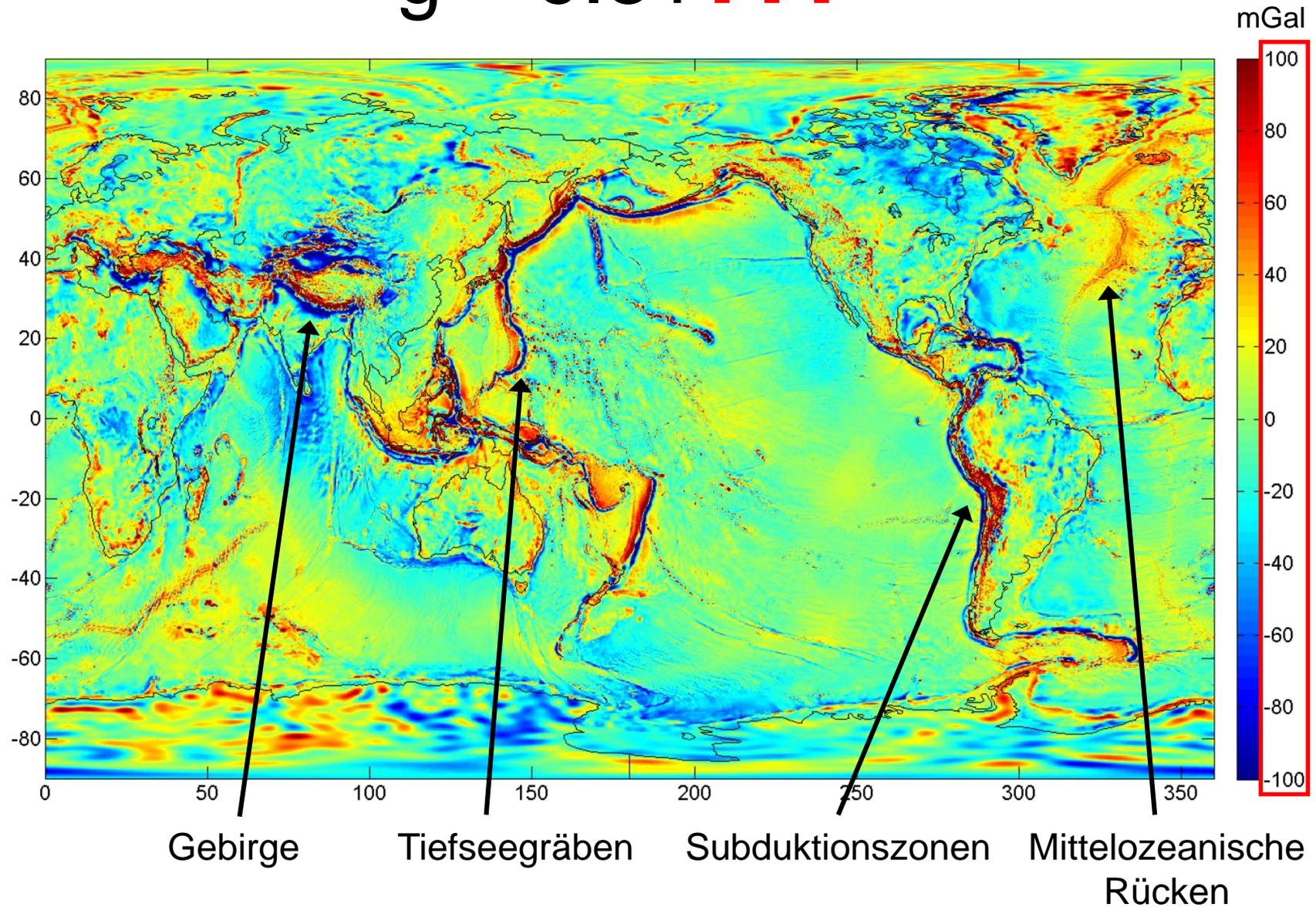
- Schwerefeld

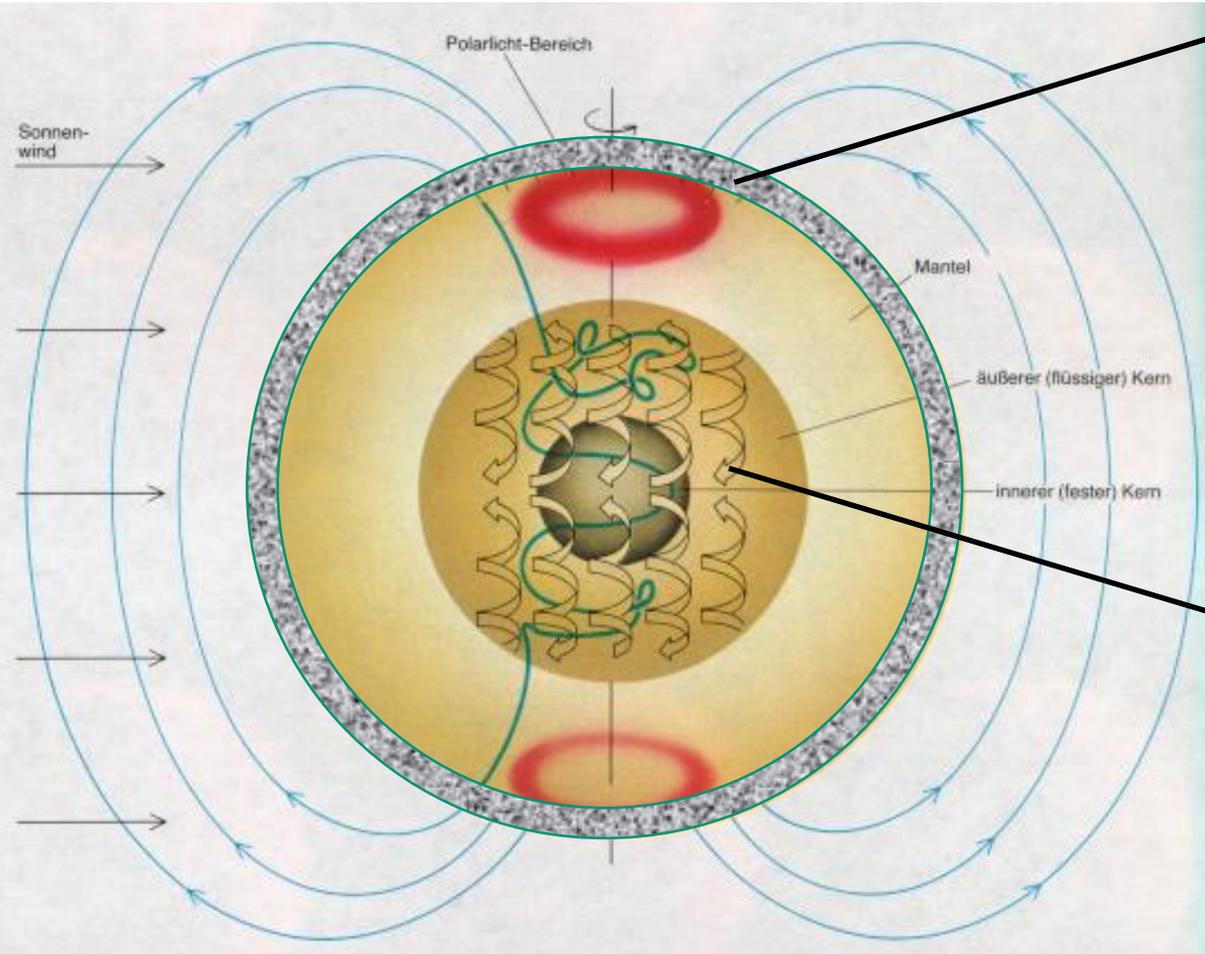


- Magnetfeld



$$g = 9.81 \dots$$

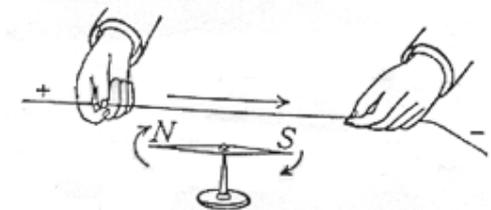


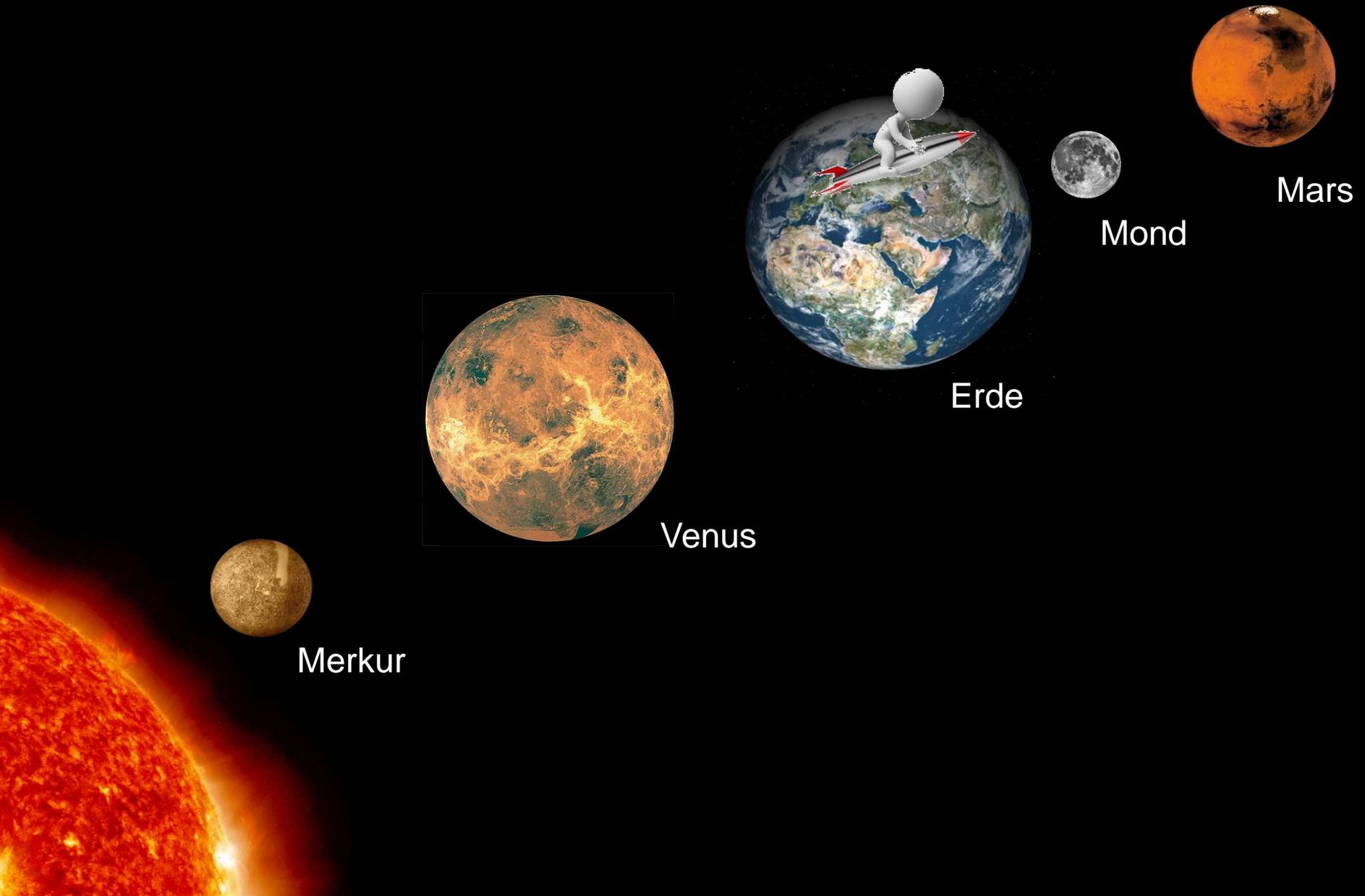


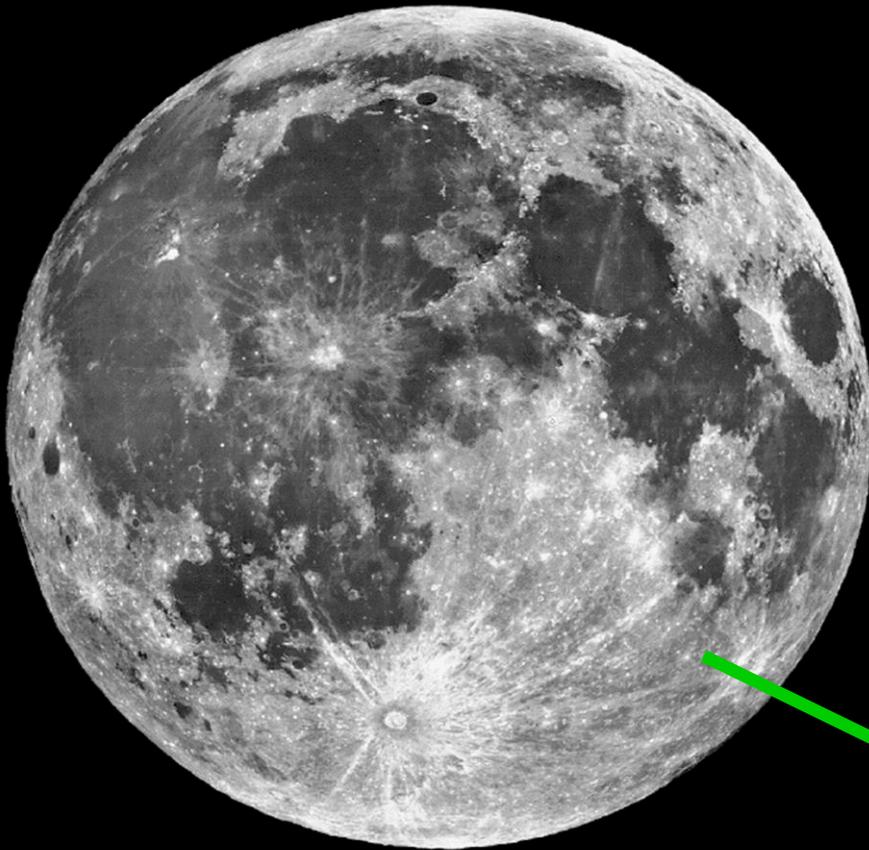
**Remanente Magnetisierung**  
durch magnetische Mineralen



**Induzierte Magnetisierung**  
durch bewegte geladene  
Teilchen im flüssigen  
Außenkern







## Mond

- „Relativ einfach“
- Menschen waren schon da
- „nur“ 384 000 km entfernt



~ 1.2 Lichtsekunden

Wie misst man das  
Schwerefeld mit Satelliten ?

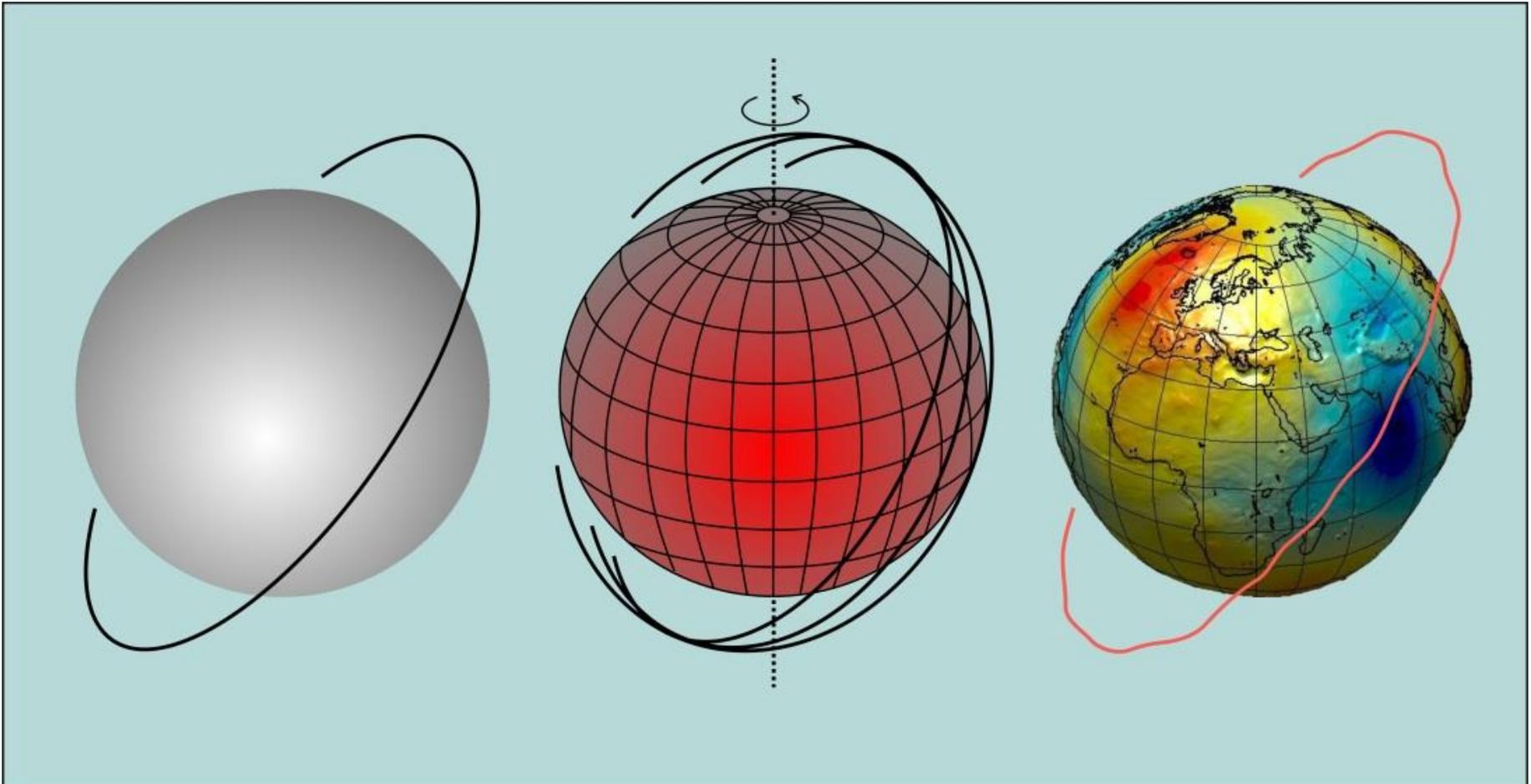


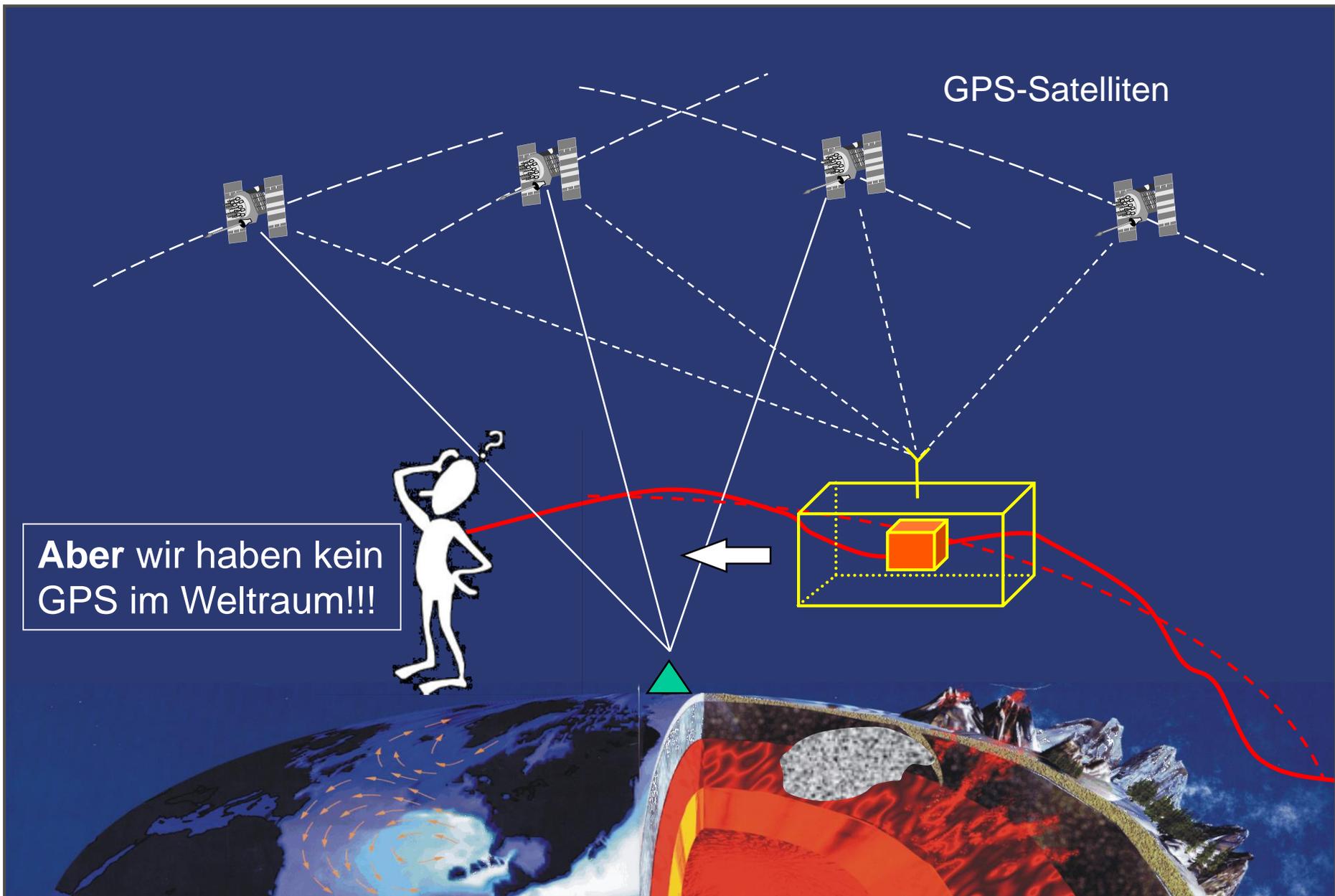
- Beobachtung der Bahn eines Satelliten

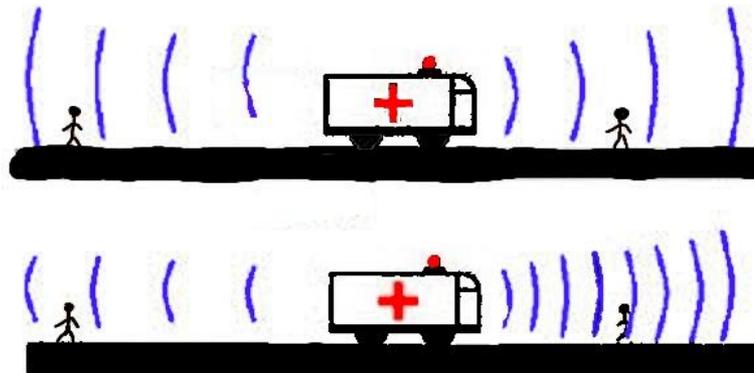
Erde/Planet als  
homogene Kugel

Abgeplattete(r)  
Erde/Planet

Unregelmäßige  
Massenverteilung







## Deep Space Network



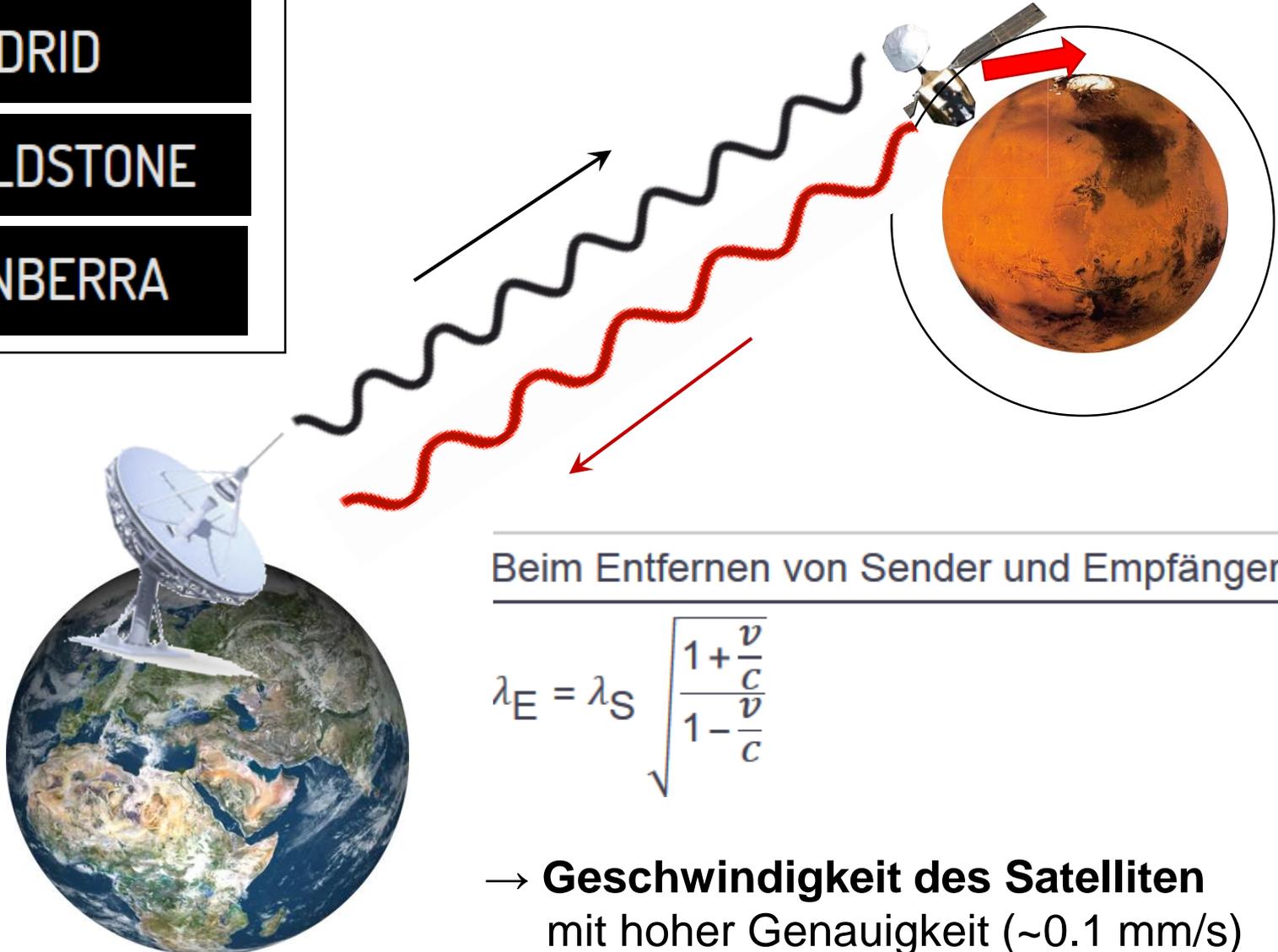
MADRID

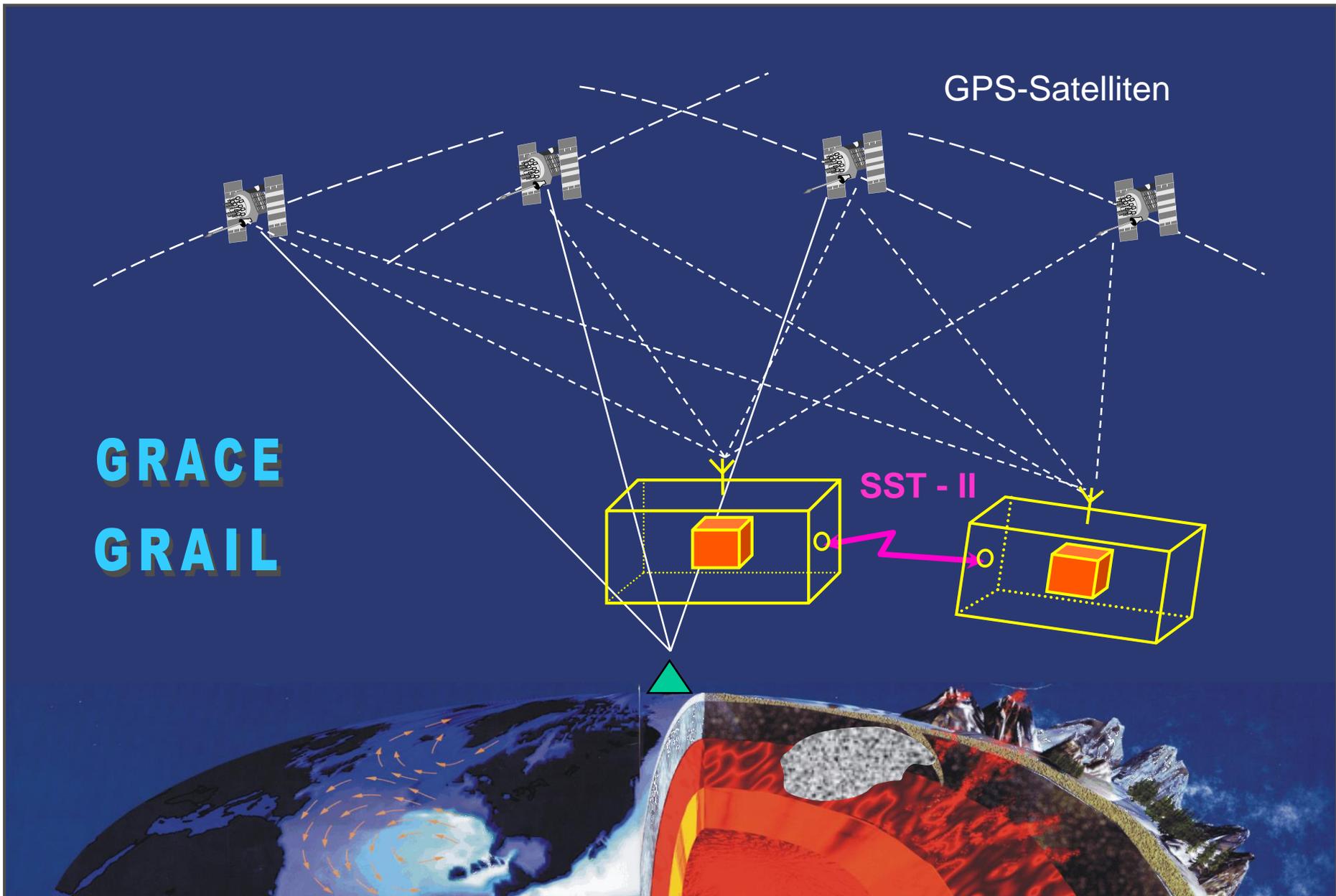


GOLDSTONE

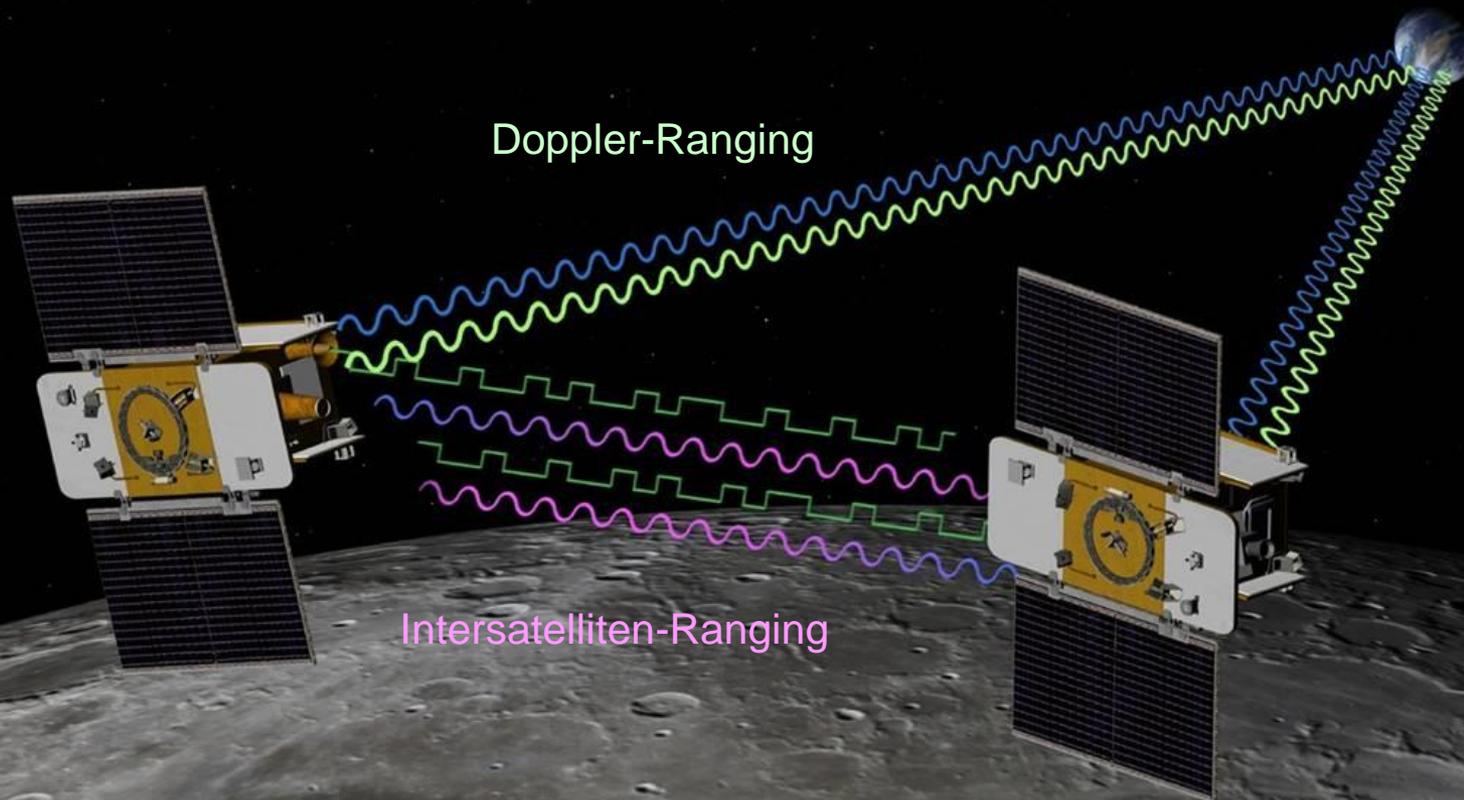


CANBERRA



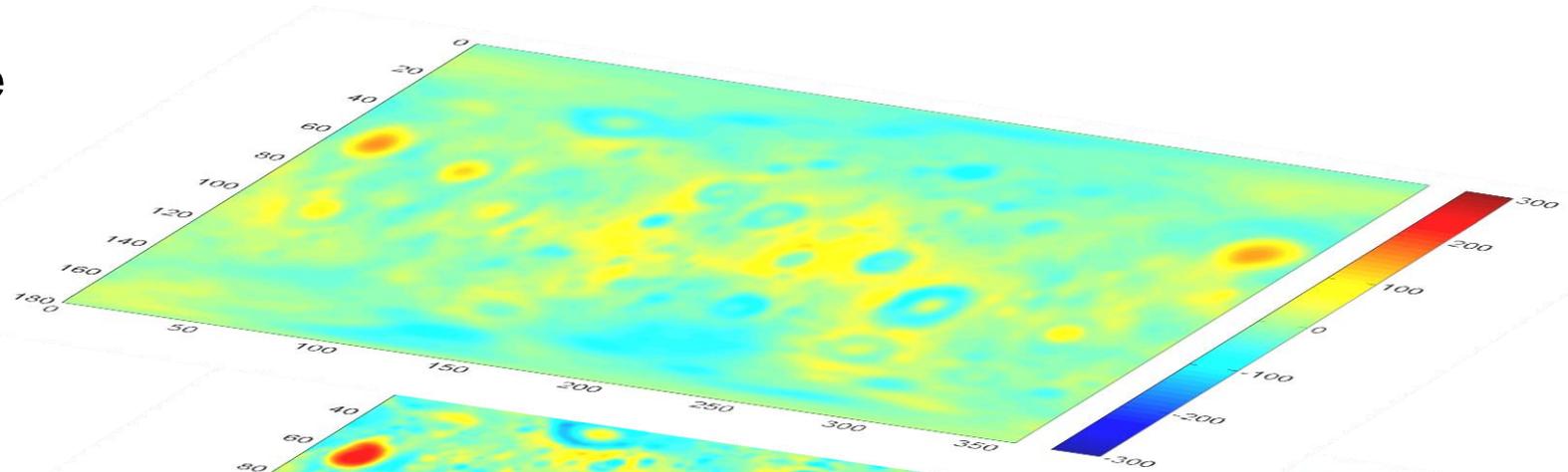


- Missionsdauer: 1. März – 17. Dezember 2012
- Flughöhen: 55 – 5 km

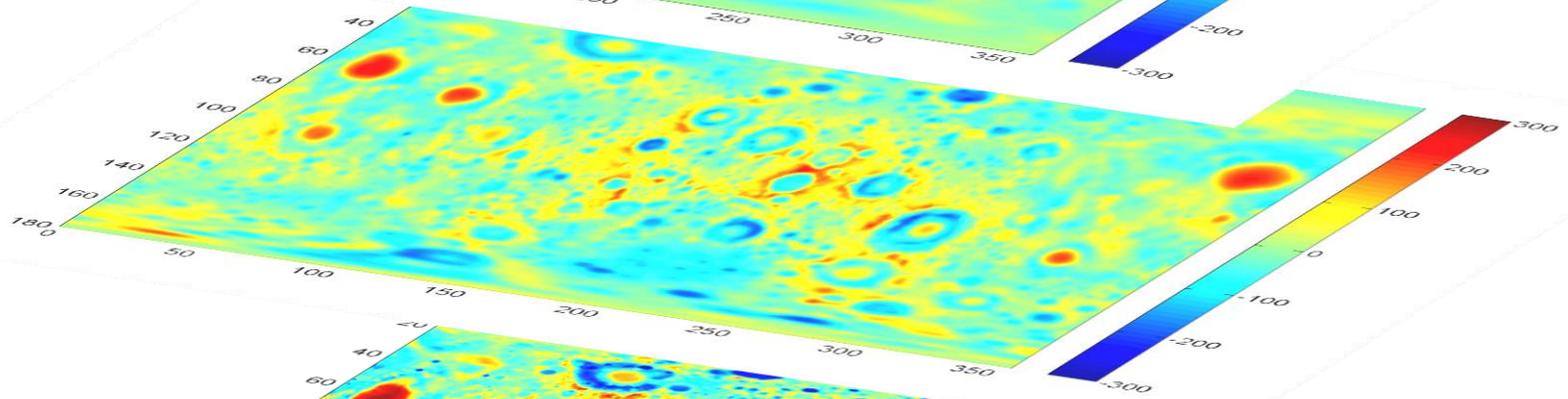


Flughöhe

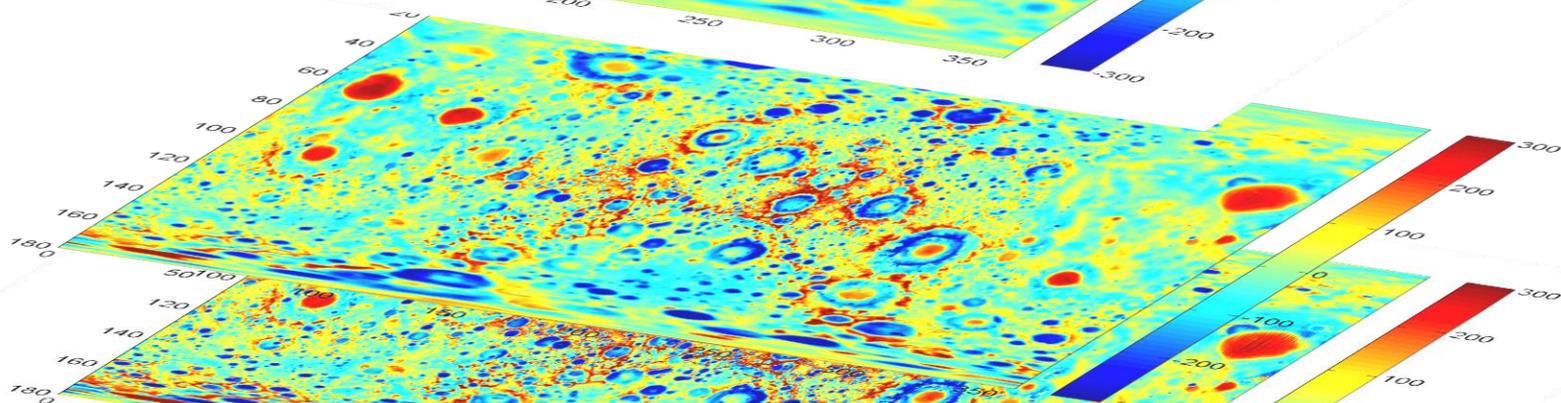
100 km



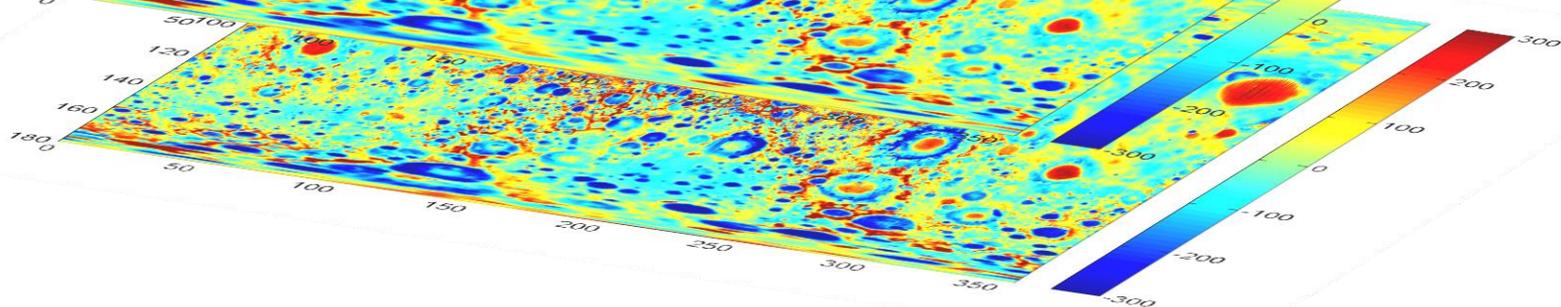
35 km



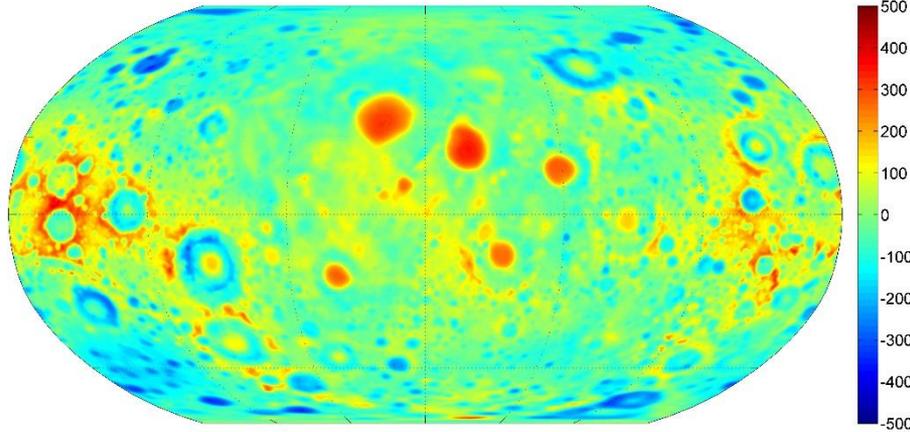
5 km



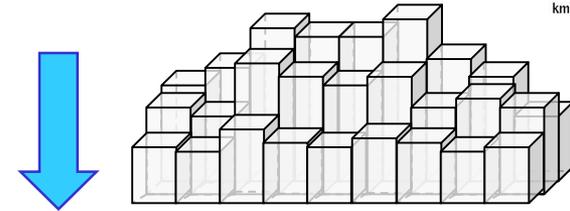
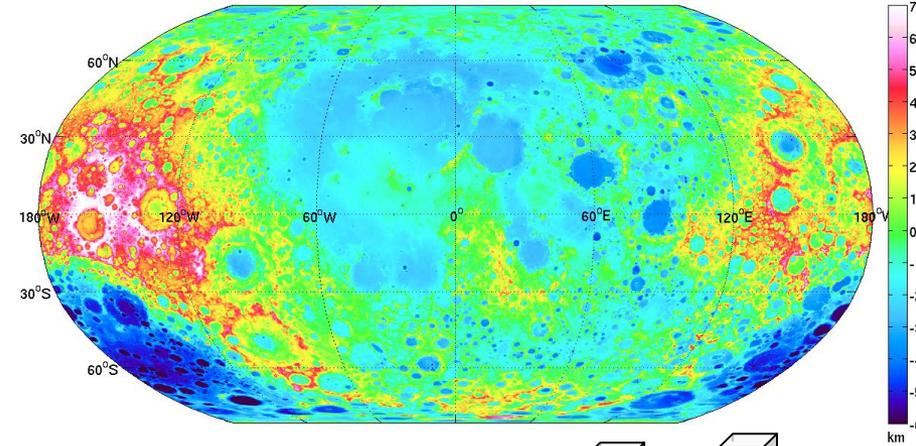
0 km



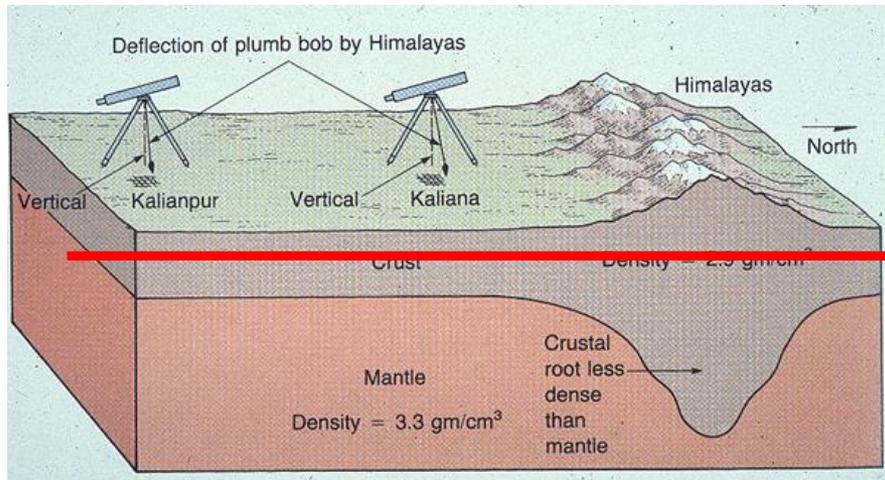
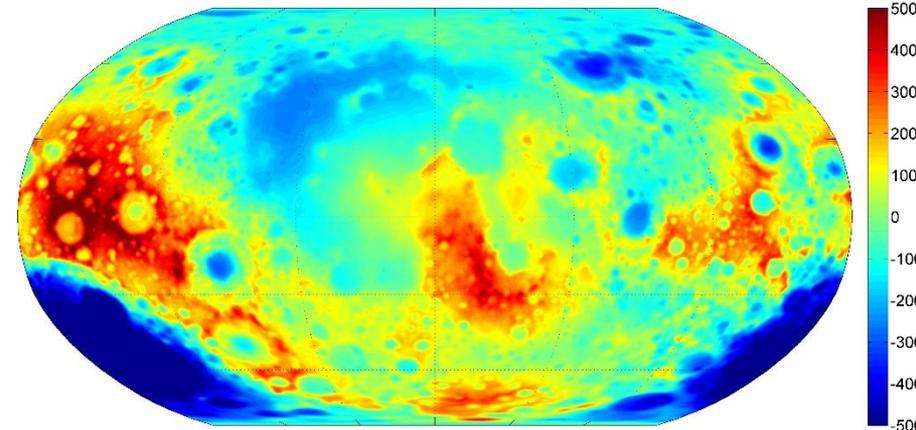
## Schwerefeld



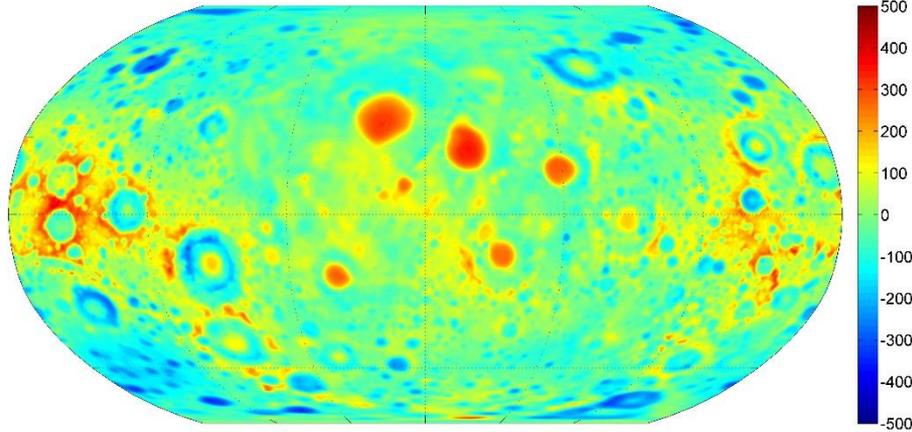
## Höhenmodell ( $\pm 7$ km)



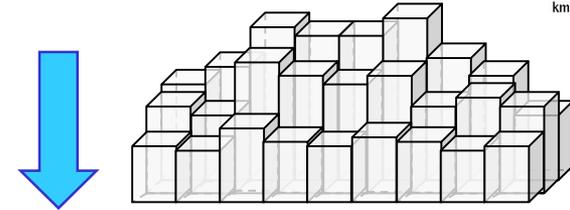
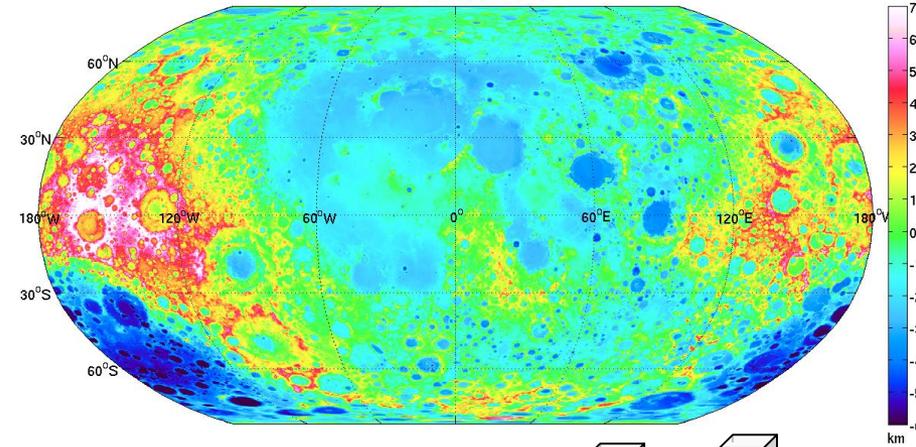
## Topografische Schwere



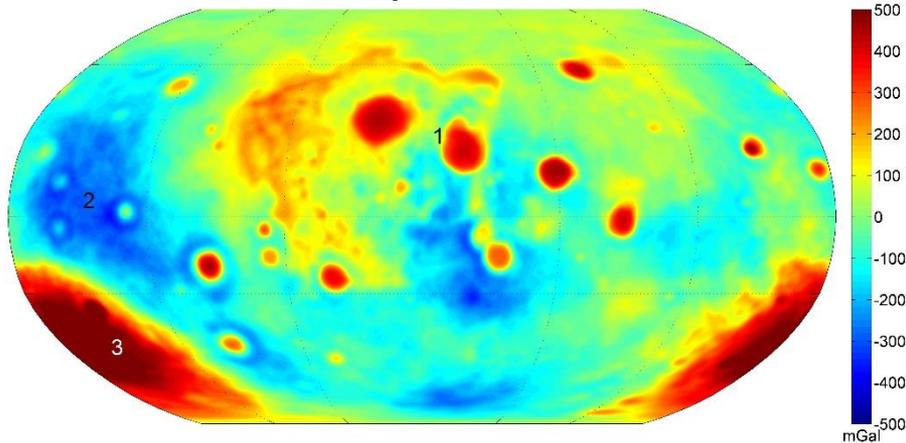
## Schwerefeld



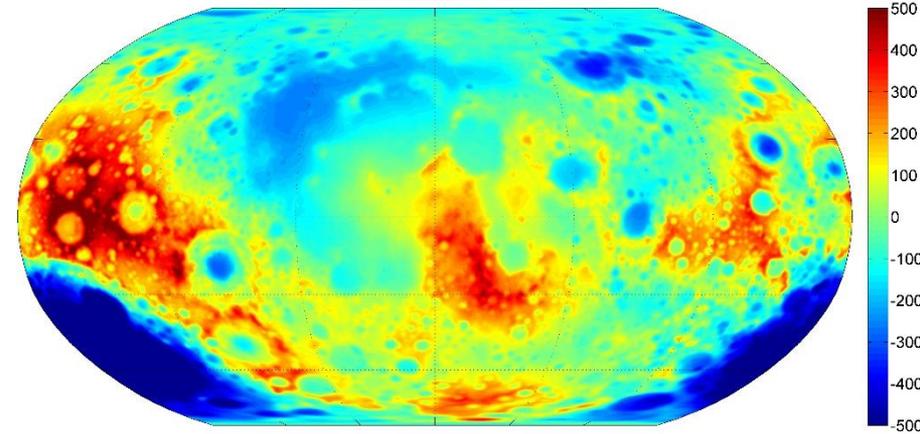
## Höhenmodell ( $\pm 7$ km)



## Schwere des Inneren

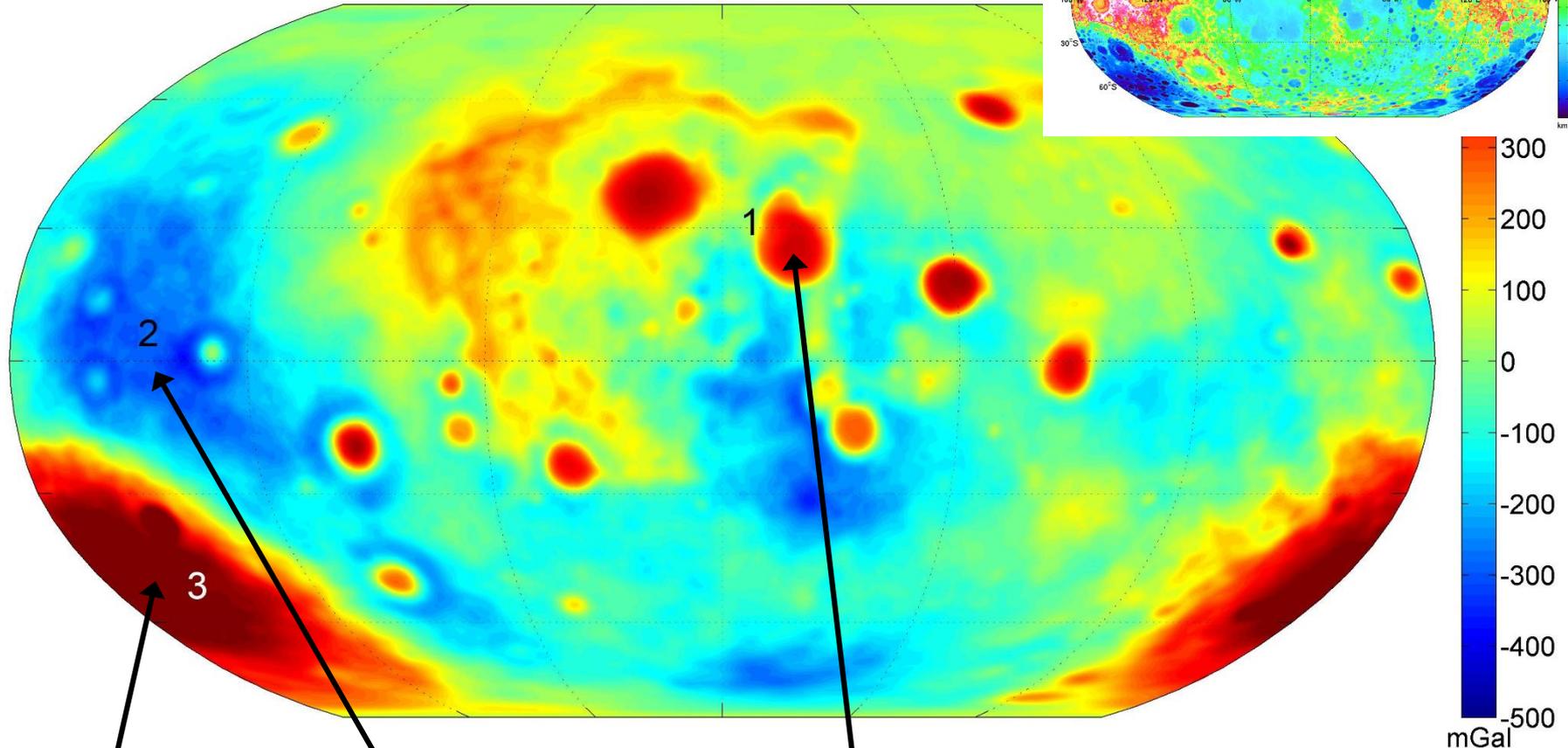


## Topografische Schwere



## Schwere des Inneren

Bouguerschwere



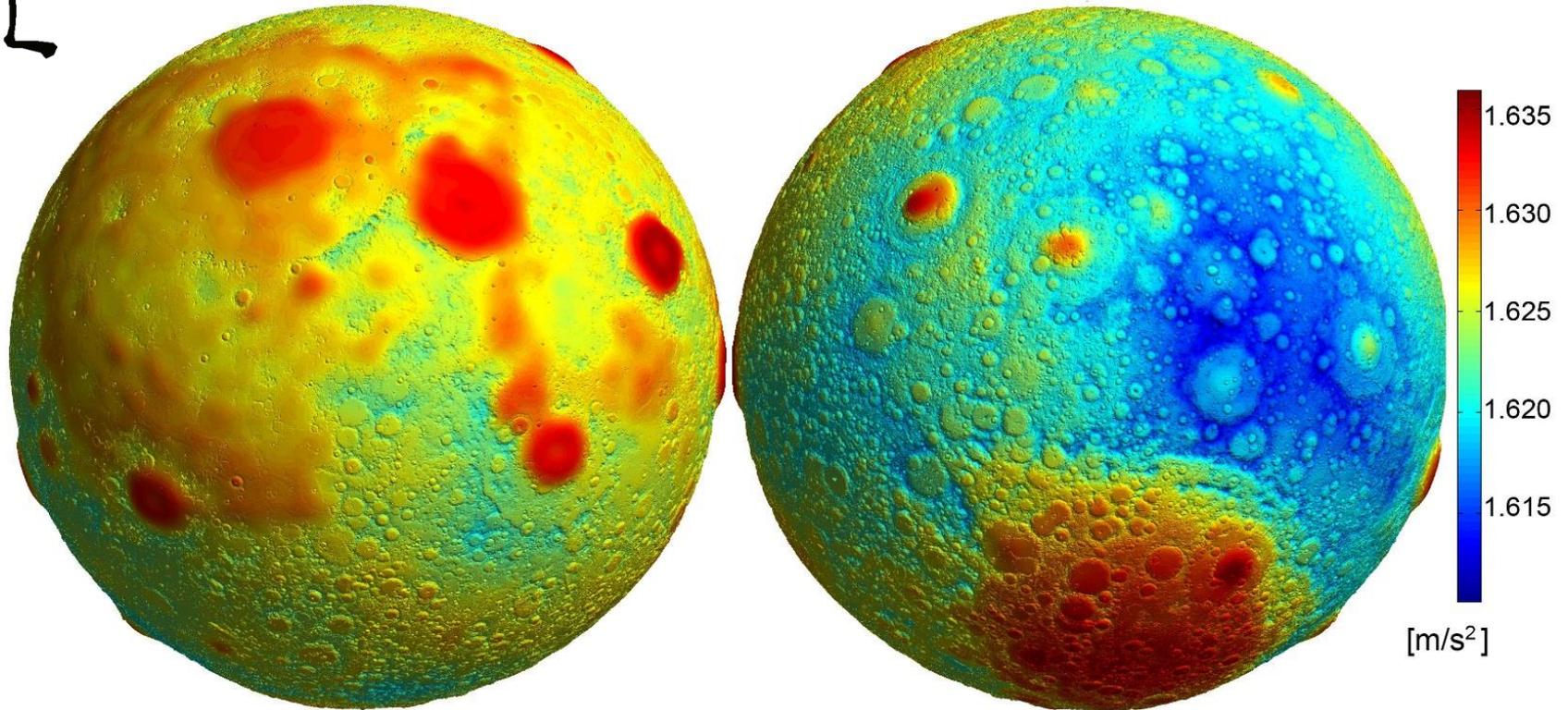
2 „Gebirgsurzeln“

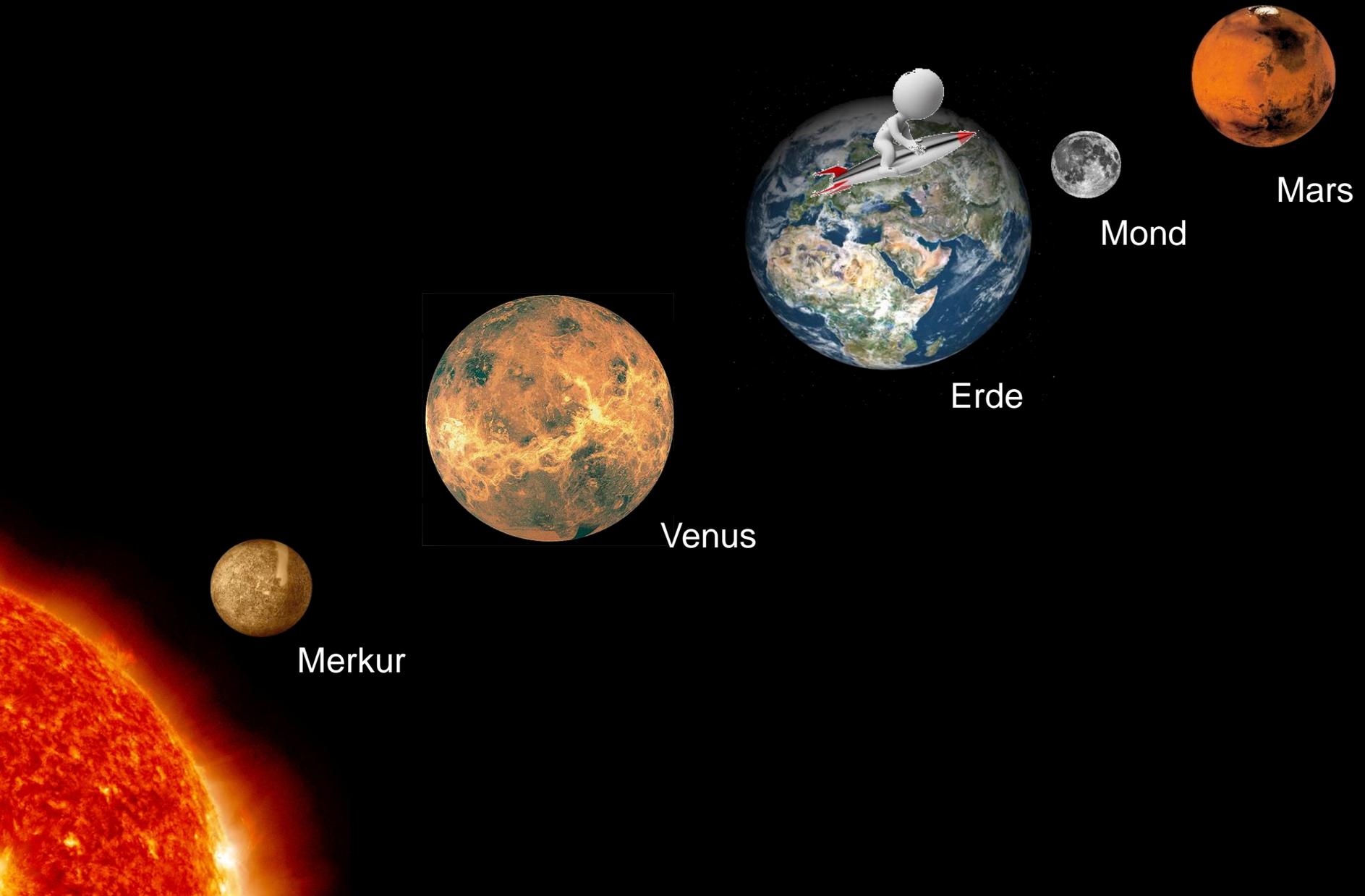
3 Apollo-Becken: Einschlagsregion auf Mondrückseite

1 Intrusionen von Mantelmaterial mit hoher Dichte als Folge großer Asteroideneinschläge



Wegen der niedrigen Flughöhe von GRAIL kennen wir das Schwerefeld des Mondes heute besser als jenes der Erde.

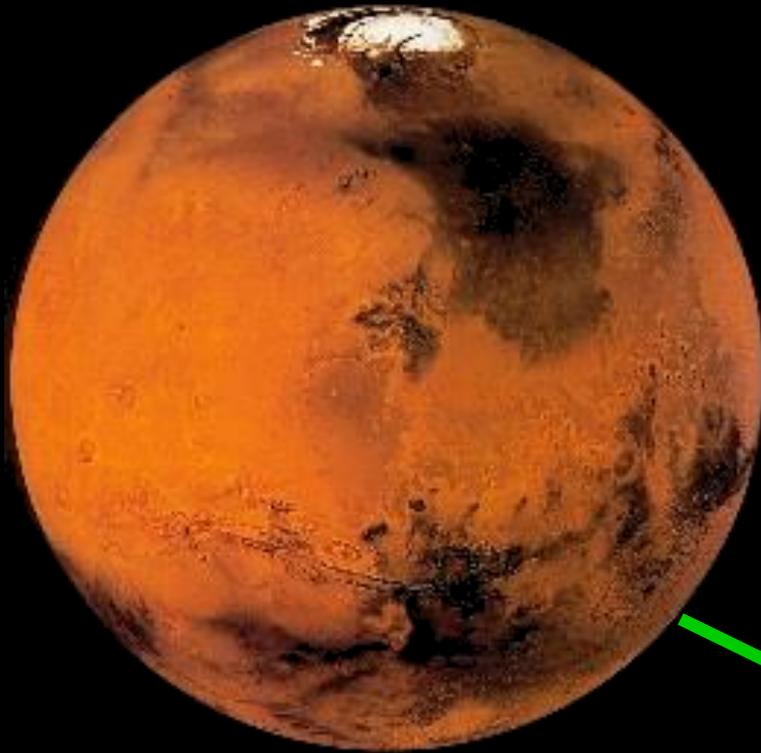


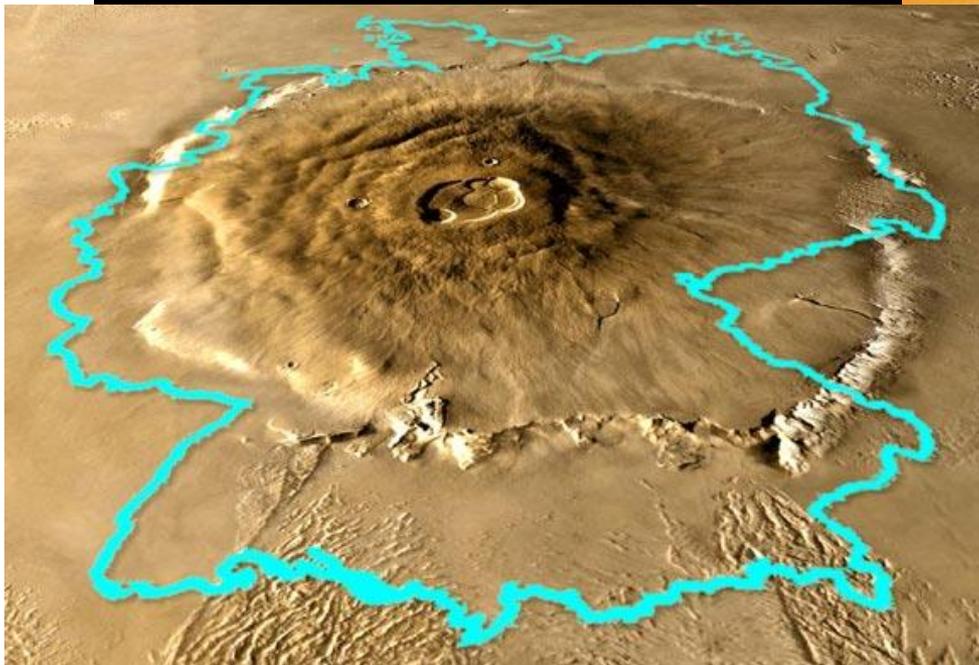
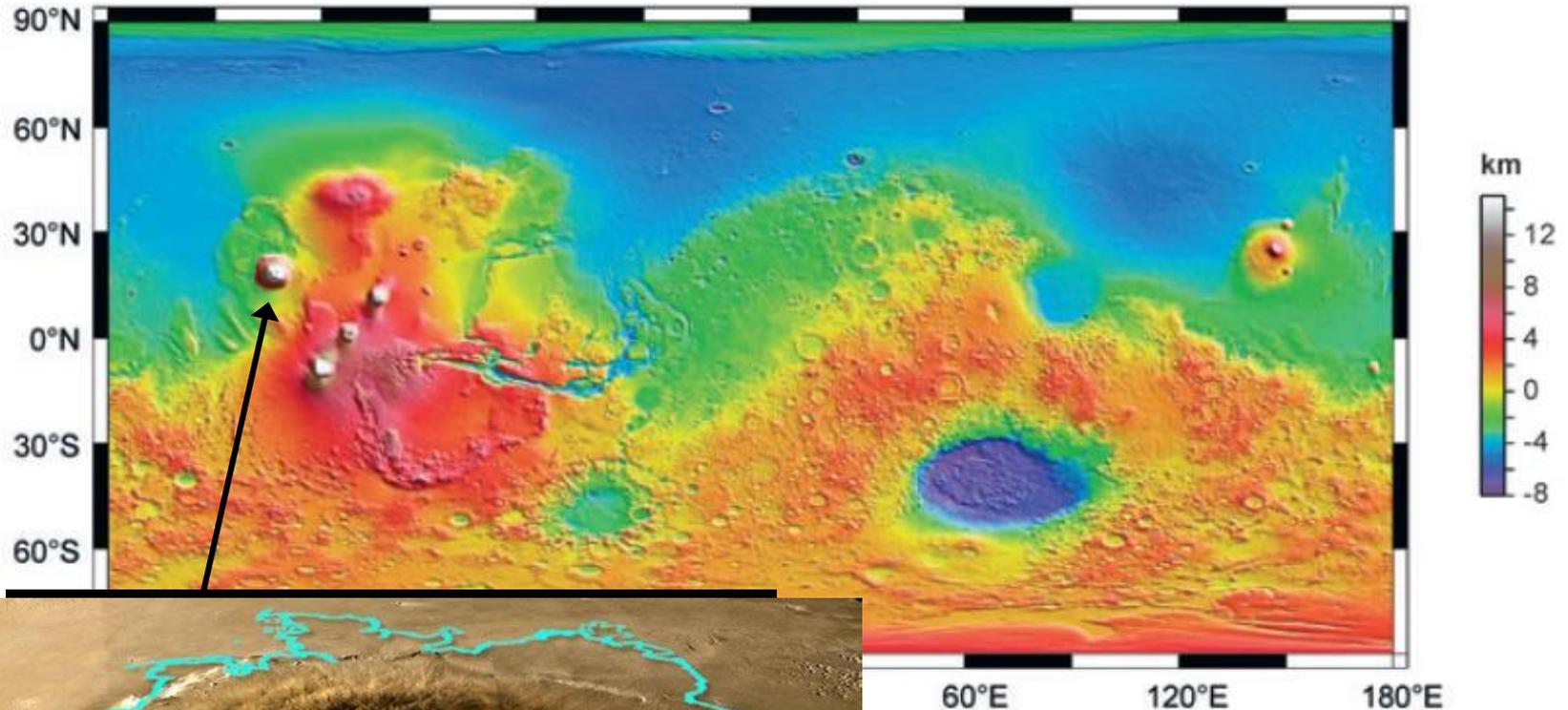


## Mars

- Bisher mehr als 30 Missionen, davon 14 Orbiter und 6 erfolgreiche Lander
- Schwerefeldbeobachtung aus Doppler-Tracking
- Atmosphäre: 0.006 bar, CO<sub>2</sub>

~ 3.1–22.3 Lichtminuten





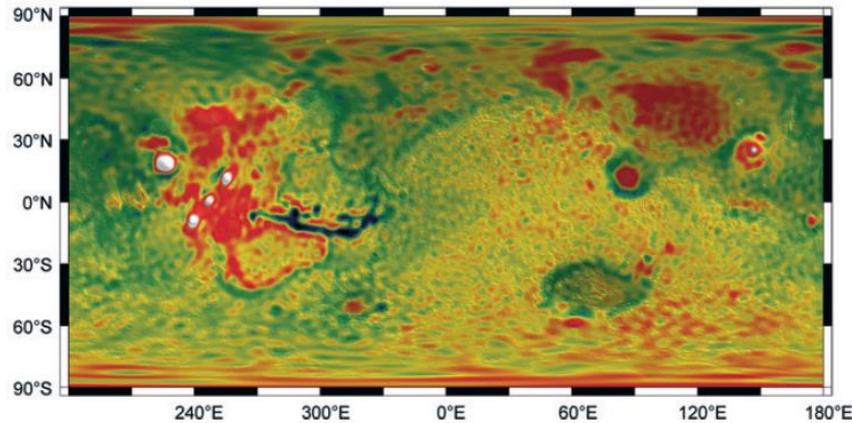
- Markante Nord-Süd-Asymmetrie
- Hellas-Einschlagsbecken
- Schildvulkan Olympus Mons (Höhe >24 km)

Gibt es diese Asymmetrie auch im Inneren?

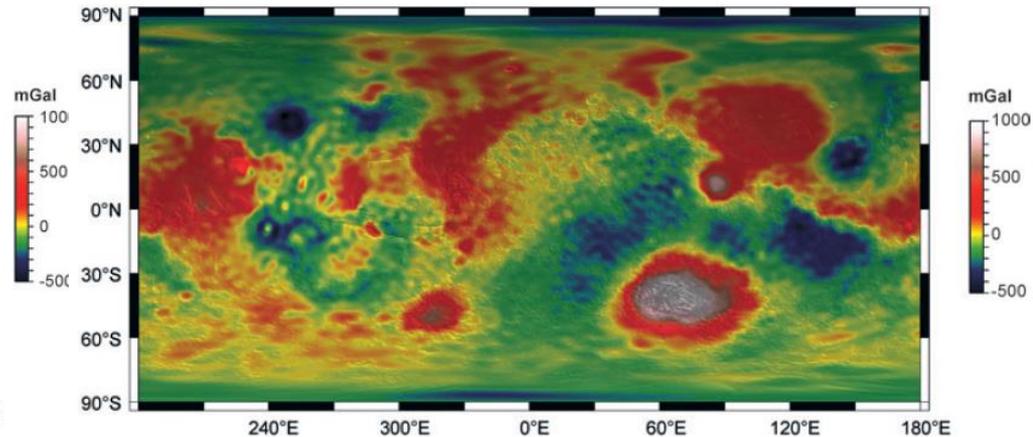
Was ist der Grund dafür?



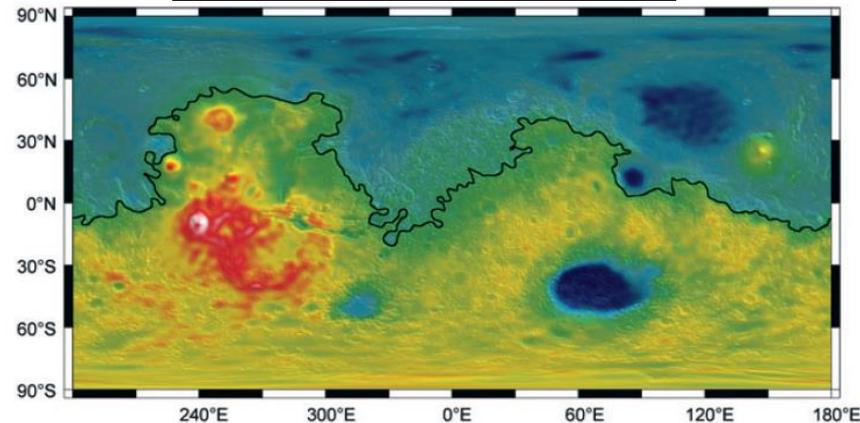
Schwerefeld



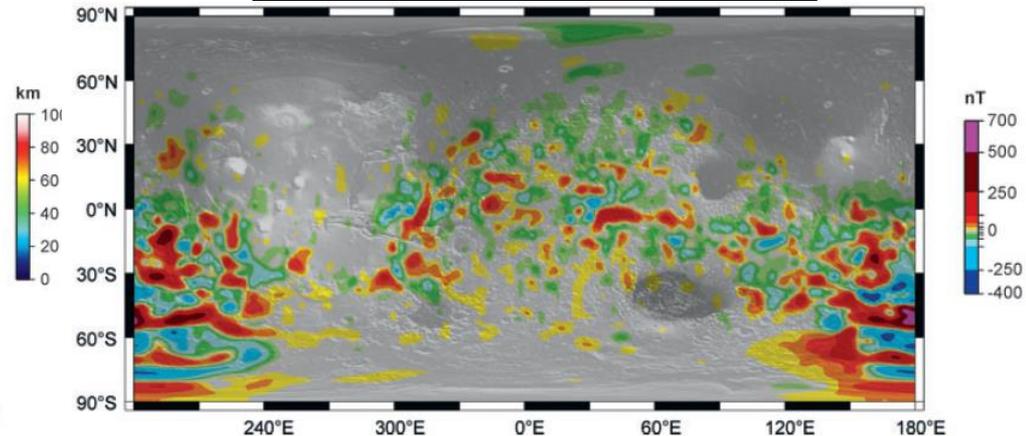
Schwerefeld nach topogr. Korrektur



Krustendicke

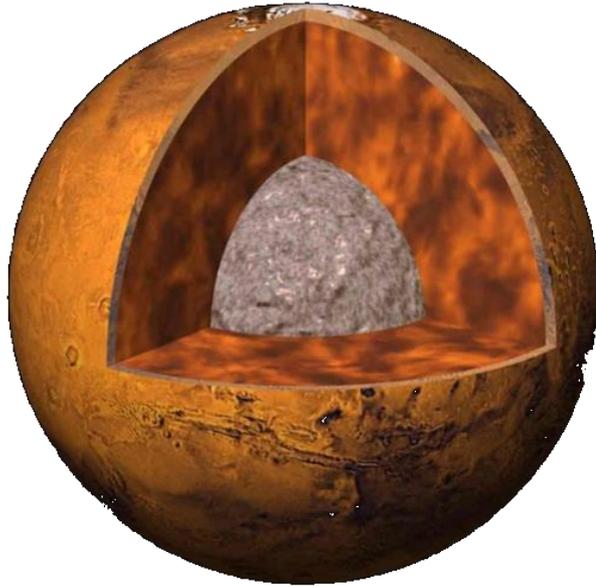


Magnetische Signaturen

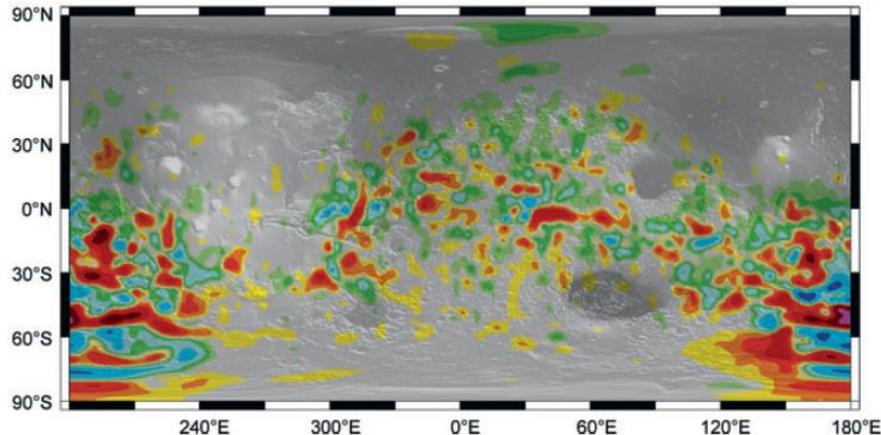


Grund für Asymmetrie:

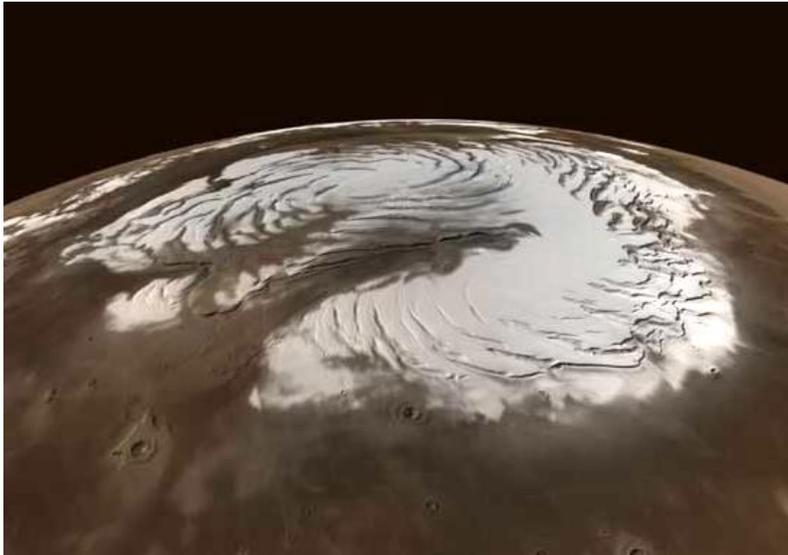
- Interne Prozesse (Mantelkonvektion, Plattentektonik) ODER
- Externe Prozesse (Impakt im Norden)



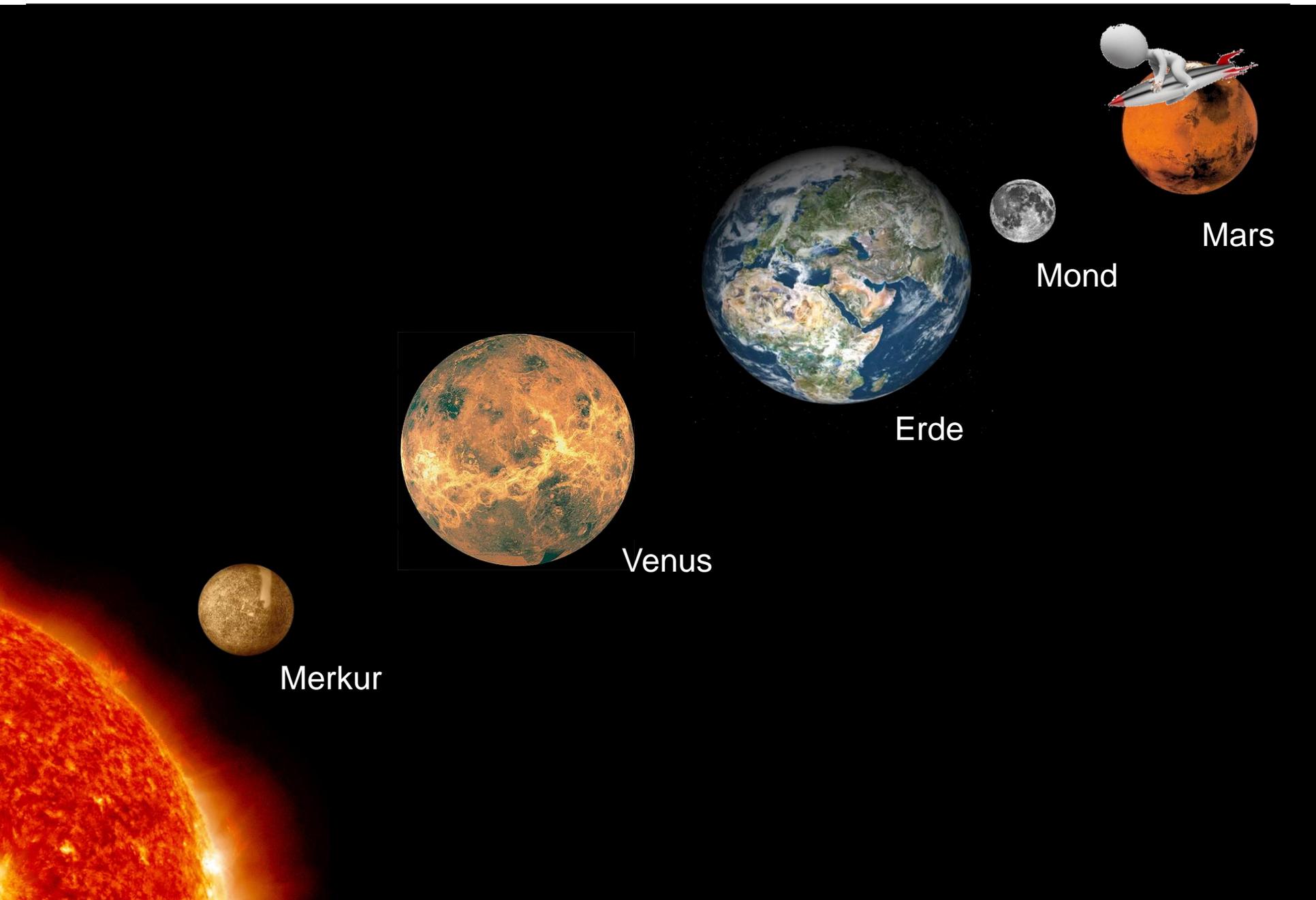
- Kern im Zentrum: geschlossen aus Rotationsverhalten (Trägheit), abgeleitet aus Bahndaten
- Radius ca. 1500 km, Dichte  $\sim 7300 \text{ kg/m}^3$
- Material: Eisen, Schwefel (aus Spektroskopie)
- komplett flüssig ???
- Dennoch kein induziertes Dipolfeld, obwohl Rotationsdauer 24.6 h



- Streifenmuster im sehr alten Süden sind ein Indiz für früheres Dipolfeld  
→ Plattentektonik



- Dauerhafte Eiskappen aus gefrorenem Kohlendioxid und Wassereis
- Mächtigkeit bis zu 3 km
- Jahreszeitliche Schwankungen
- In jedem Marsjahr kondensiert in etwa ein Drittel der dünnen Marsatmosphäre zu Trockeneis (aus Schweremessungen).
- Mittlere tägliche T-Schwankungen:  $-75^{\circ}\text{C}$  bis  $-10^{\circ}\text{C}$
  
- MRO entdeckt 2015 Hinweise auf flüssiges Wasser
- Im Marssommer:  $T \sim -10^{\circ}\text{C}$
- Taupunkt des mit vielen Salzen gesättigten Eises herabgesetzt  
→ wird flüssig
- Rinnsale fließen die steinig-sandigen Hänge des Mars hinab.



Merkur

Venus

Erde

Mond

Mars

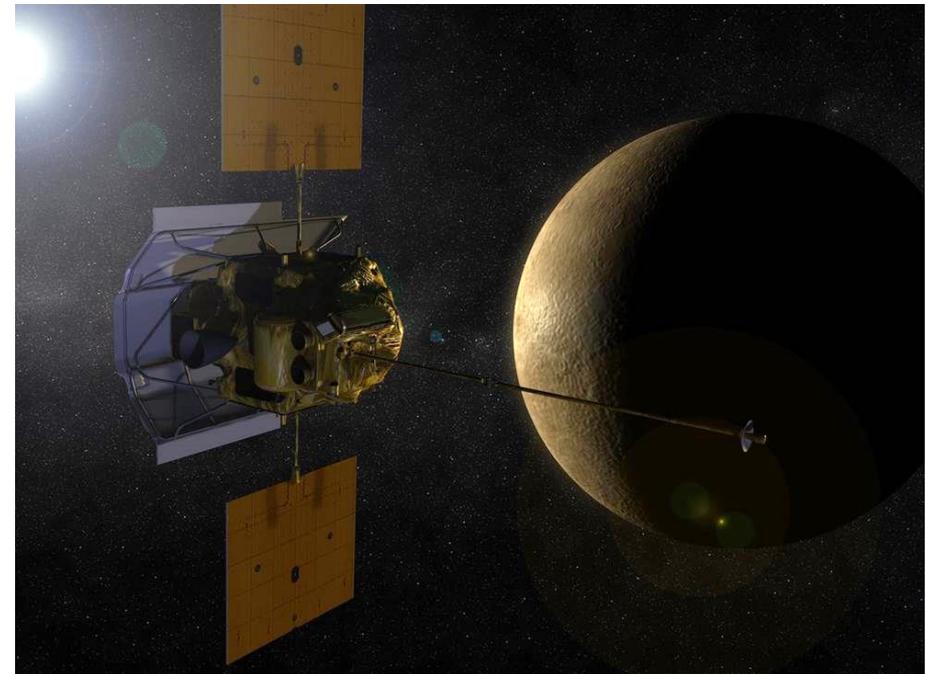
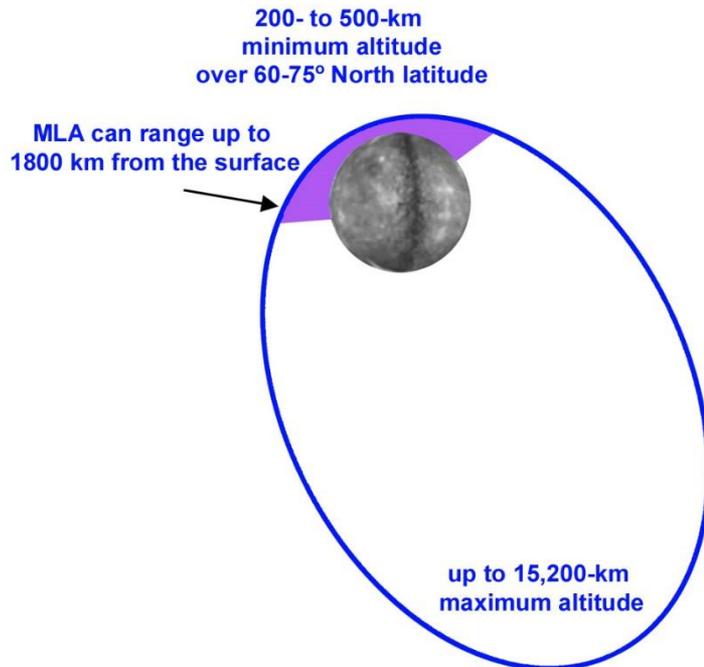
## Merkur

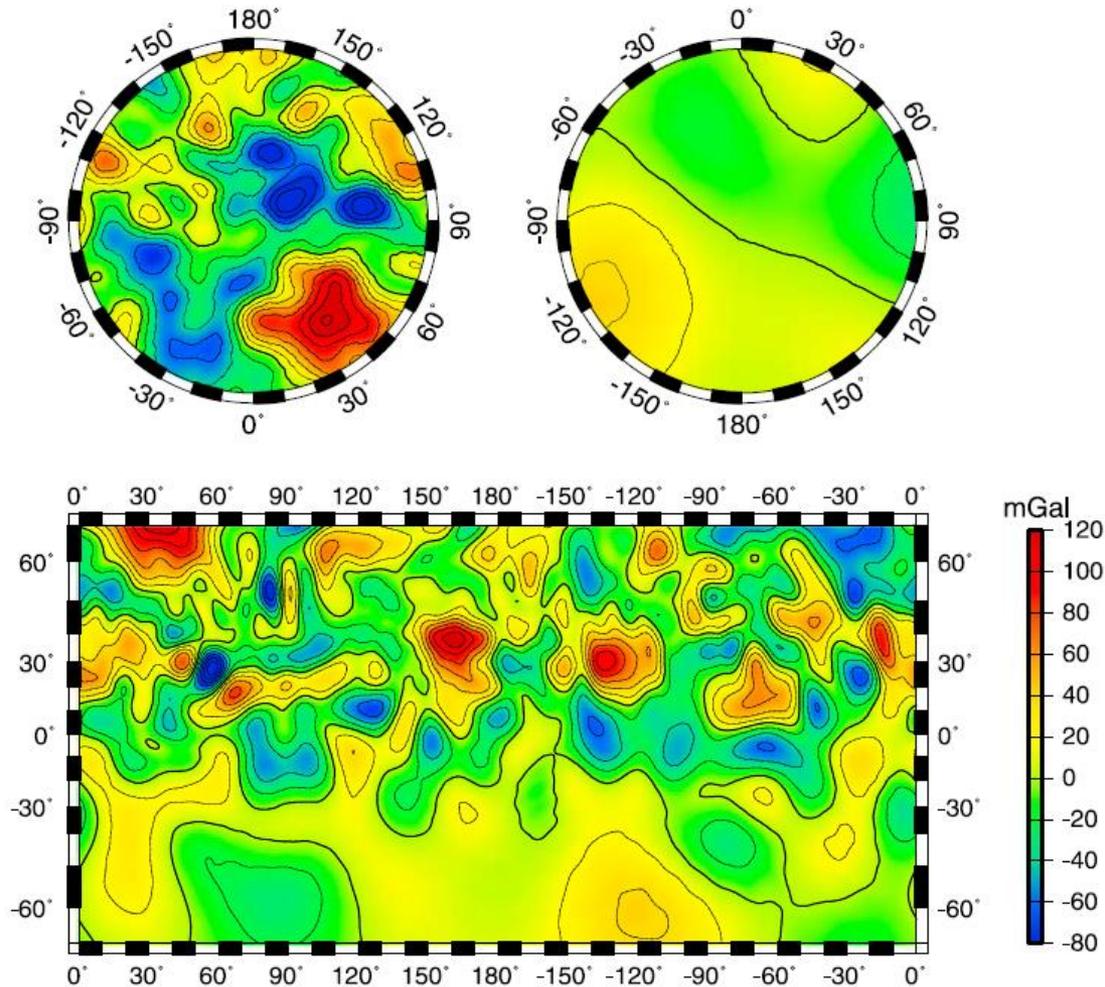
- Schwerefeldbeobachtung aus Doppler-Tracking
- Bislang nur 2 Missionen

~ 4.4–12.2 Lichtminuten

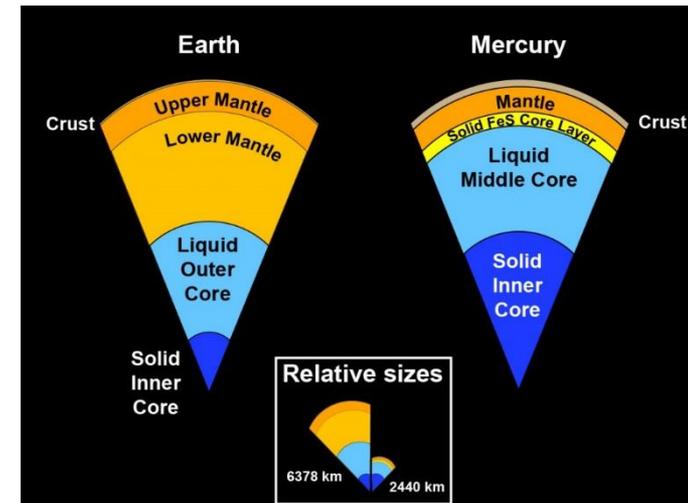
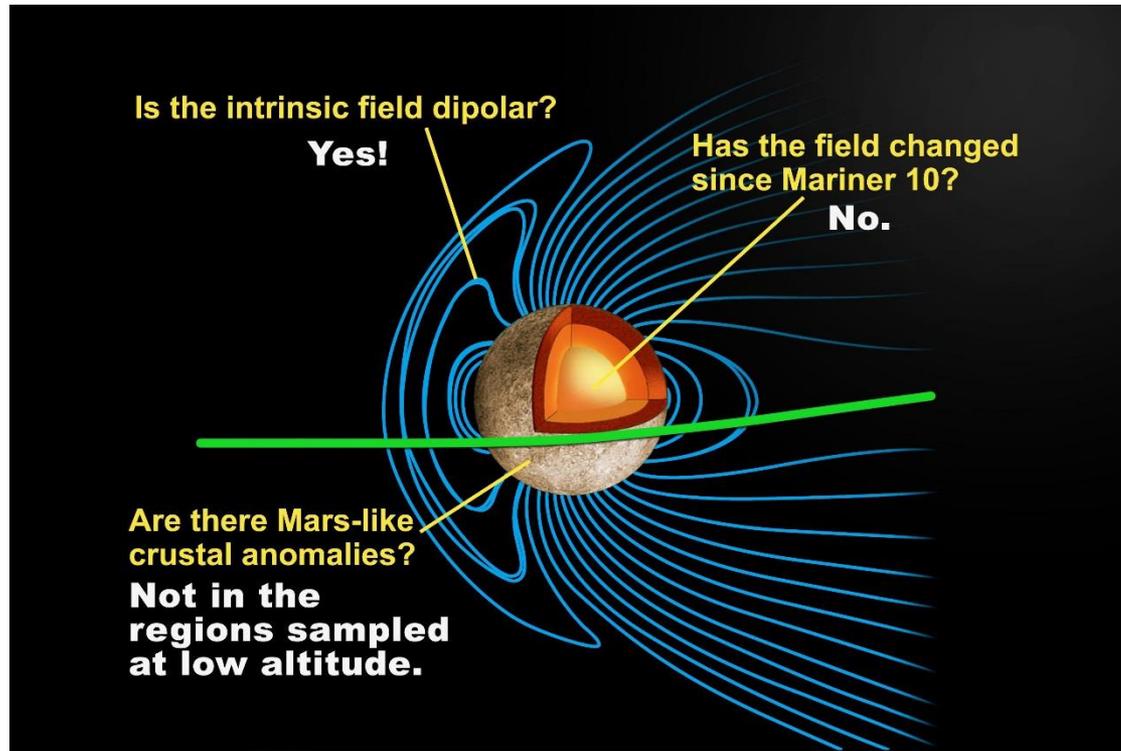


- **ME**rcury **S**urface, **S**pace **EN**vironment, **GE**ochemistry & **R**aging spacecraft
- Missionsperiode: 18 März 2011 – 30 April 2015
- Nach Mariner 10 erst die zweite Sonde am Merkur
- Radio tracking sehr störanfällig gegenüber Sonnenplasma
- Stark exzentrische Bahn



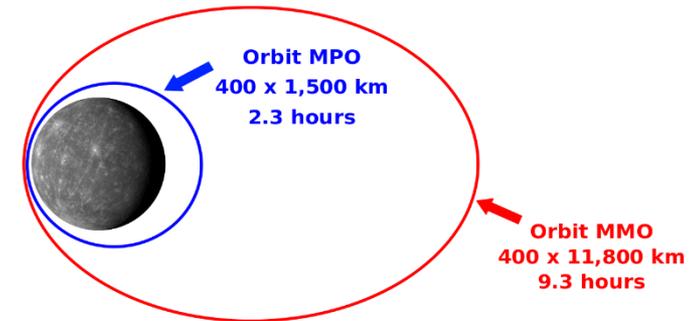


Höhere räumliche Auflösung nur für die Nordhemisphäre

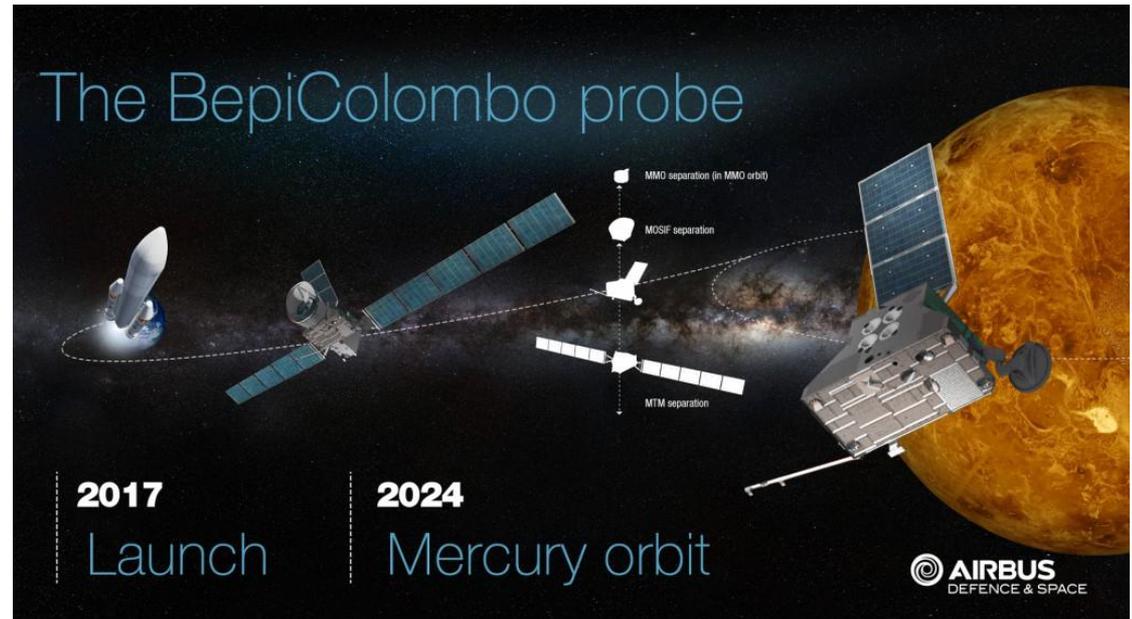
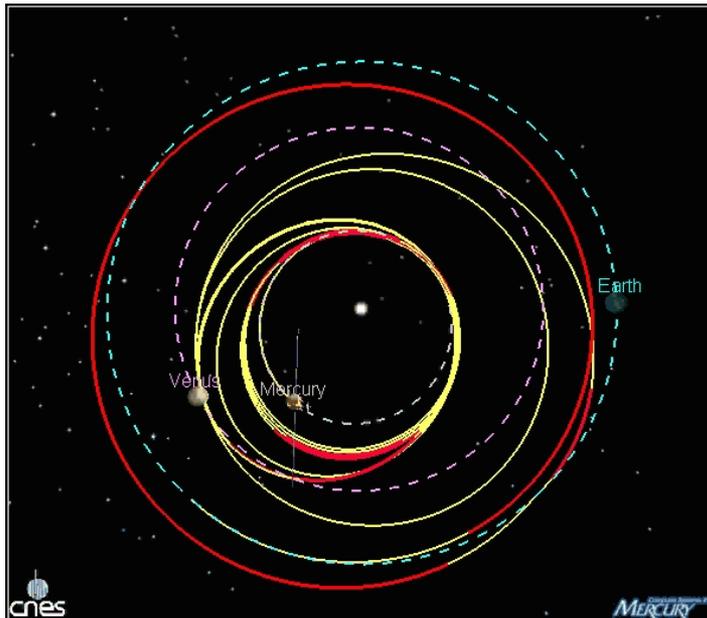


- Rotationsdauer ca. 58.5 Tage
- Dipolfeld (Stärke ca. 1% der Erde) → flüssiger Kern
- Oder doch remanente Magnetisierung der Krustengesteine???

- ESA / JAXA
- 2 Satelliten: - Mercury Planetary Orbiter (MPO)  
- Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO)
- Start: Januar 2017 (geplant)
- Aufgaben: Magnetfeld, Geologie und Geschichte des Merkur



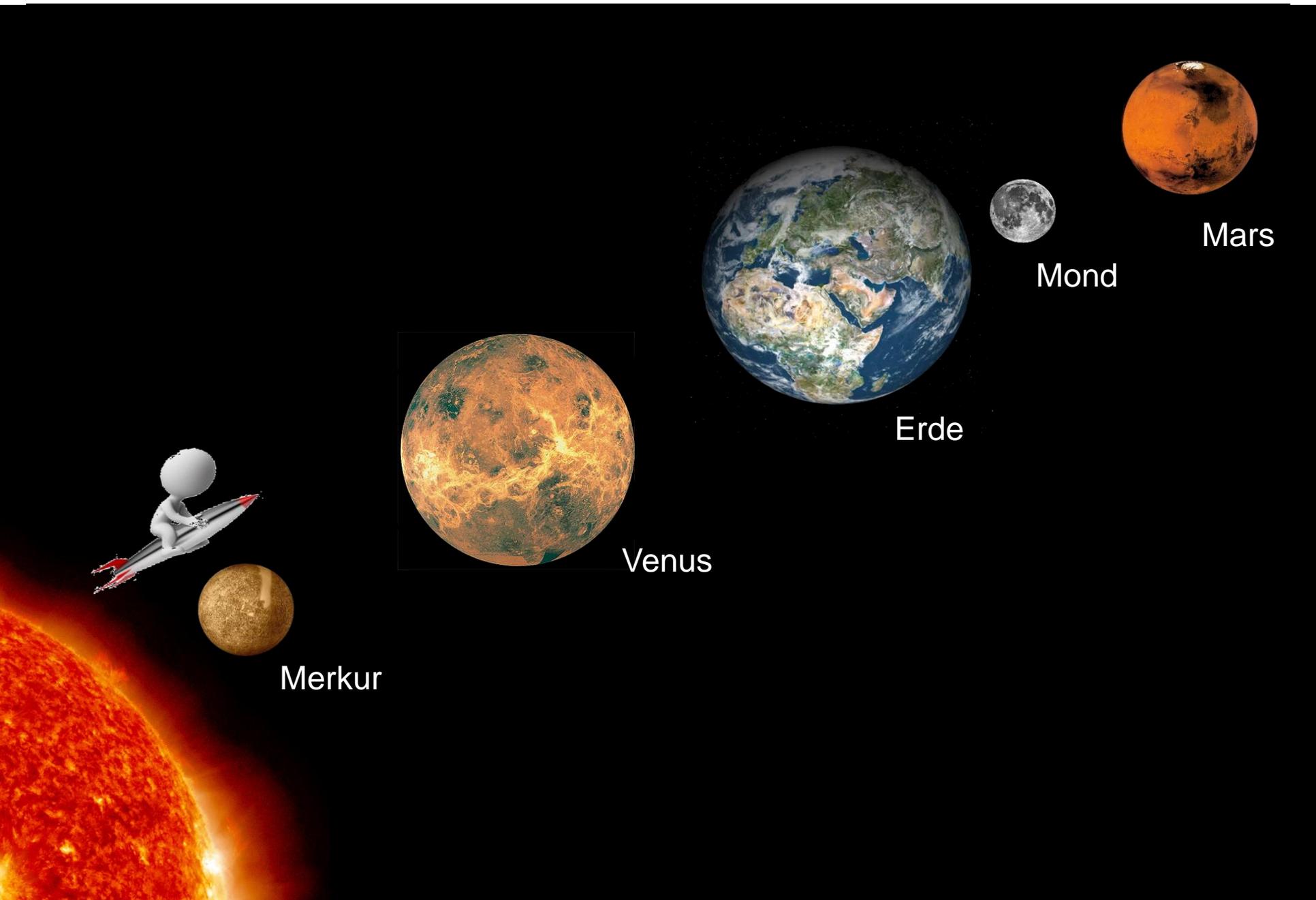
Der lange Weg zum Merkur ...



# Von Pionieren, Kundschaftern und Kurieren – was uns Satellitenmissionen über die Physik von Planeten erzählen

## Schlussfolgerungen

- Heute weitestgehend gute Information über Oberfläche
- Dagegen Information über das Innere nur über indirekte Beobachtungen möglich → „Spurensuche“
- Vielfach Anwendung von Technologien, die für die Erdbeobachtung entwickelt wurden
- Erkundung von Planeten ist wichtig, um über unsere eigene Erde zu lernen



Merkur

Venus

Erde

Mond

Mars

