

Terra 2.0

Was macht einen Planeten eigentlich bewohnbar?

Markus Röllig

I. Physikalisches Institut, Universität zu Köln

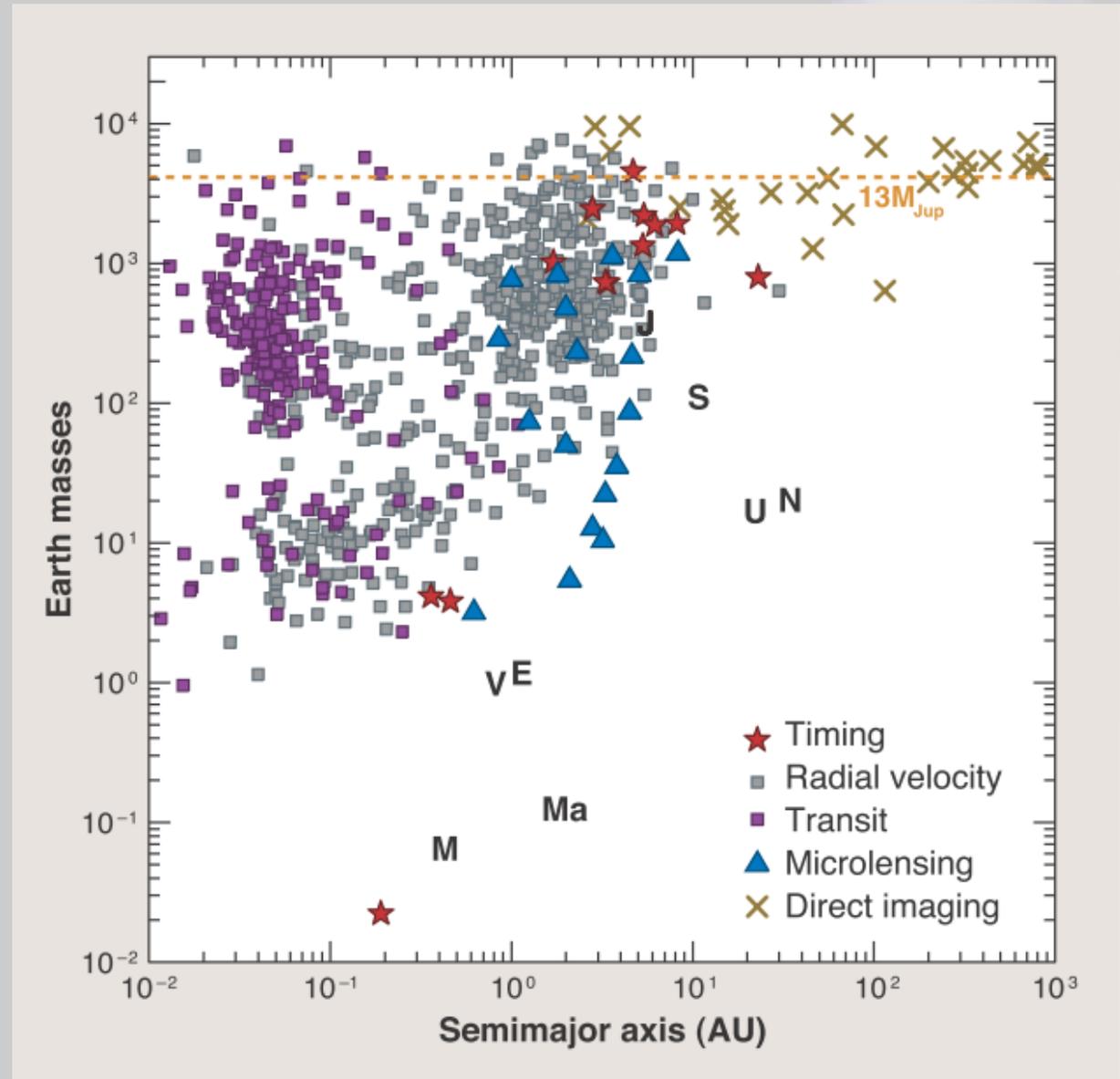


Motivation

- 850 bestätigte Exo-Planeten
- Exoplaneten kommen in allen Variationen vor.
- Schätzung:
 - 100-400 Mrd. Planeten in der Milchstrasse.
 - Jeder Stern hat im Durchschnitt 1 Planeten.

Bewohnbar?

Bekannte Exoplaneten (Stand März 2013)

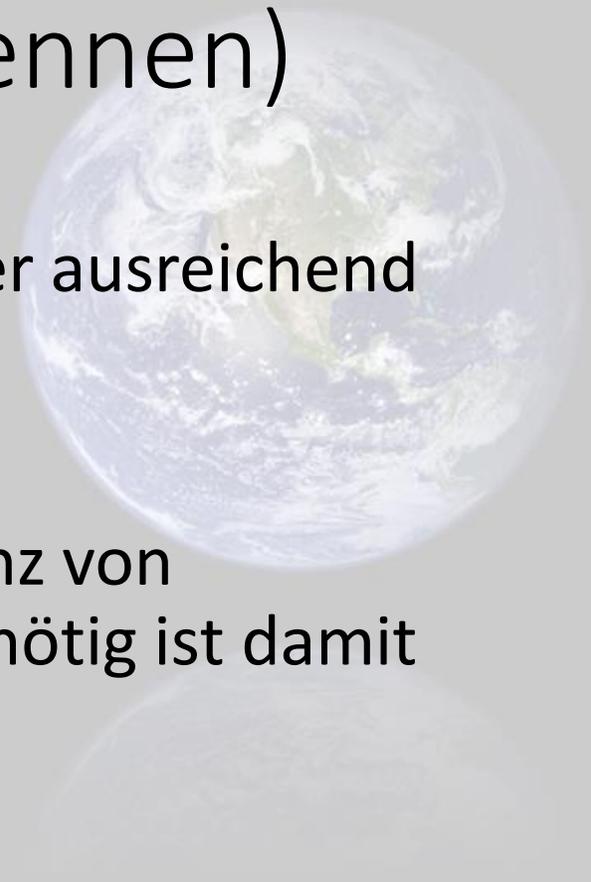


Bedingungen für Leben



Bedingungen für Leben (wie wir es kennen)

- eine genügend lange Zeitspanne in der ein Himmelskörper ausreichend „Bausteine des Lebens“ sammeln kann
- flüssiges Wasser im Kontakt mit diesen Bausteinen
- externe und interne Umweltbedingungen die die Existenz von flüssigem Wasser sicher stellen (für die Zeitspanne, die nötig ist damit sich Leben entwickeln kann).



Klassische Definition der Habitalen Zone

- HZ als Region um einen Stern, in der flüssiges Wasser existieren kann.
 - Wo herrschen Temperaturen zwischen 273 und 373 K?
 - Lehrbuch-Beispiel: Gleichgewicht von Heizung durch Sonneneinstrahlung und Kühlung durch Wärme-Abstrahlung

$$\underbrace{4\pi R_*^2 \sigma T_{eff}^4 \frac{\pi R_p^2}{4\pi d_p^2} (1 - A)}_{\text{Einstrahlung}} = \underbrace{4\pi R_p^2 \sigma T_p^4}_{\text{Abstrahlung}}$$



Klassische Definition der HZ

- HZ als Region um einen Stern, in der flüssiges Wasser existieren kann.
 - Wo herrschen Temperaturen zwischen 273 und 373 K?
 - Lehrbuch-Beispiel: Gleichgewicht von Heizung durch Sonneneinstrahlung und Kühlung durch Wärme-Abstrahlung

$$T_{Planet} = \frac{T_{Stern}}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{(1 - Albedo)} \sqrt{\frac{Radius\ des\ Sterns}{Distanz\ zum\ Stern}}$$



Klassische Definition der HZ

- Beispiel Erde:

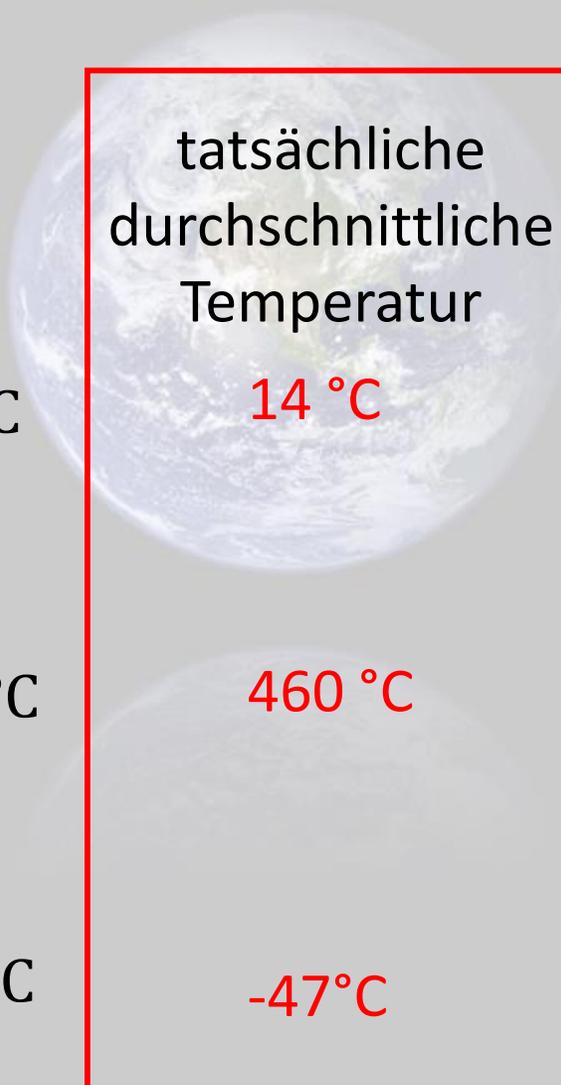
$$T_{Erde} = \frac{5780\text{K}}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{(1 - 0.37)} \sqrt{\frac{695500 \text{ km}}{149 \text{ Mio.km}}} = 249 \text{ K} = -24 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Beispiel Venus:

$$T_{Venus} = \frac{5780\text{K}}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{(1 - 0.65)} \sqrt{\frac{695500 \text{ km}}{108 \text{ Mio.km}}} = 252 \text{ K} = -21 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Beispiel Mars:

$$T_{Venus} = \frac{5780\text{K}}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{(1 - 0.15)} \sqrt{\frac{695500 \text{ km}}{228 \text{ Mio.km}}} = 217 \text{ K} = -56 \text{ }^\circ\text{C}$$



tatsächliche
durchschnittliche
Temperatur

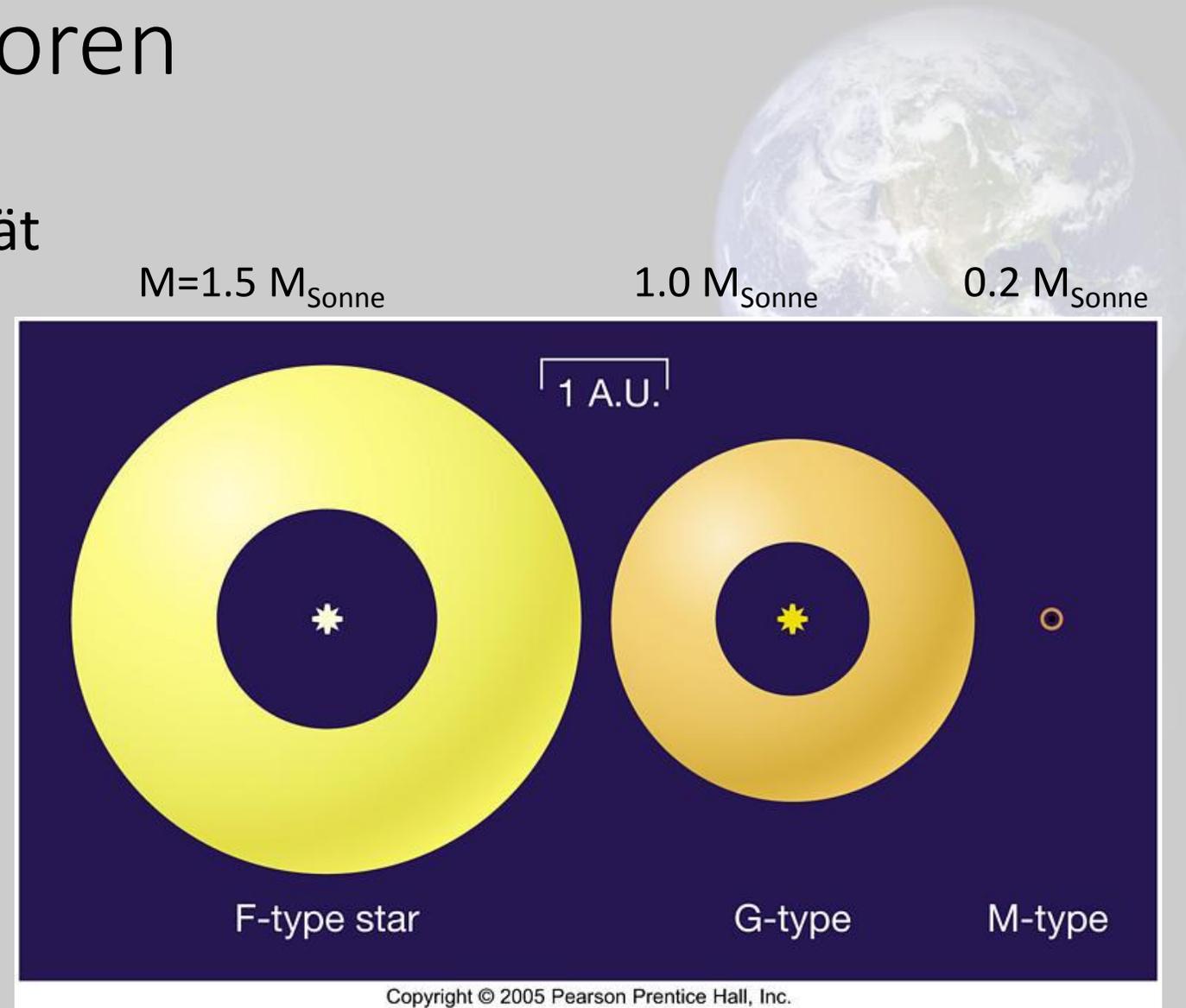
14 °C

460 °C

-47°C

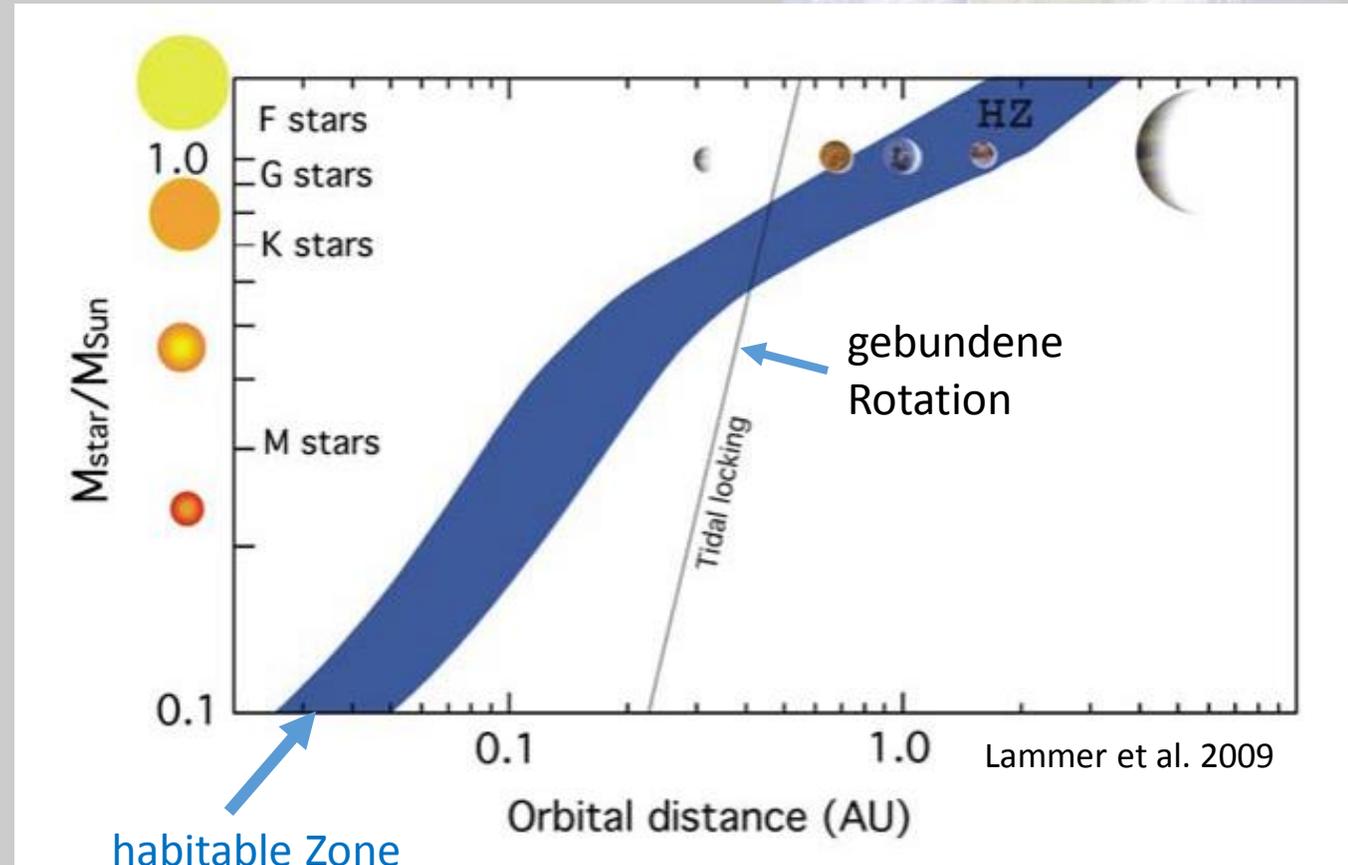
Begünstigende Faktoren

- Masse, Strahlung und Aktivität des Sterns
- Atmosphäre
- Plattentektonik
- Magnetfeld, Dynamo



Begünstigende Faktoren

- Masse, Strahlung und Aktivität des Sterns
- Atmosphäre
- Plattentektonik
- Magnetfeld, Dynamo

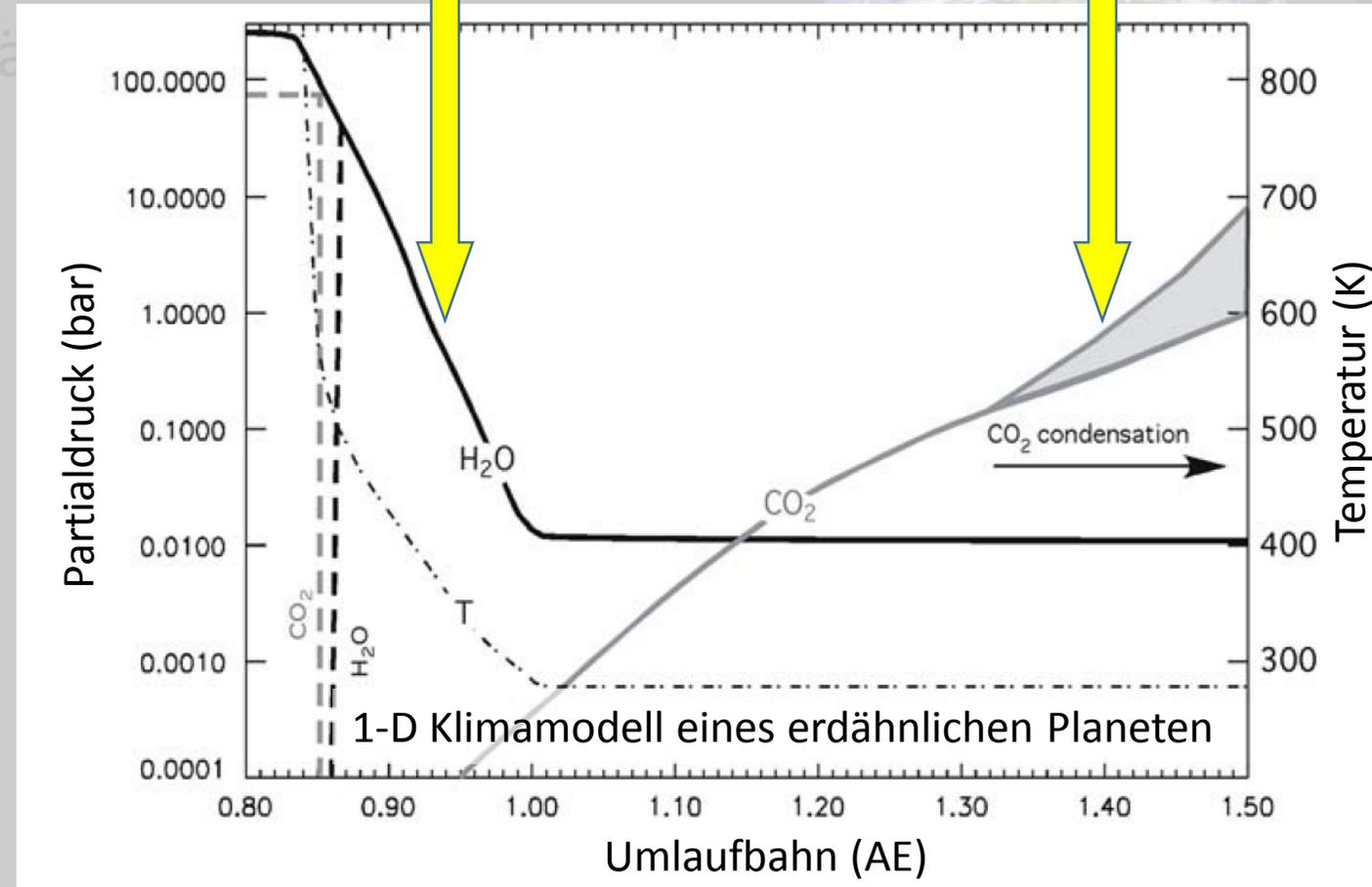


Begünstigende Faktoren

- Masse, Strahlung und Aktivität des Sterns
- Atmosphäre
- Plattentektonik
- Magnetfeld, Dynamo

beschleunigter
Treibhauseffekt

CO₂ Wolkenbildung
→ Anstieg der Albedo

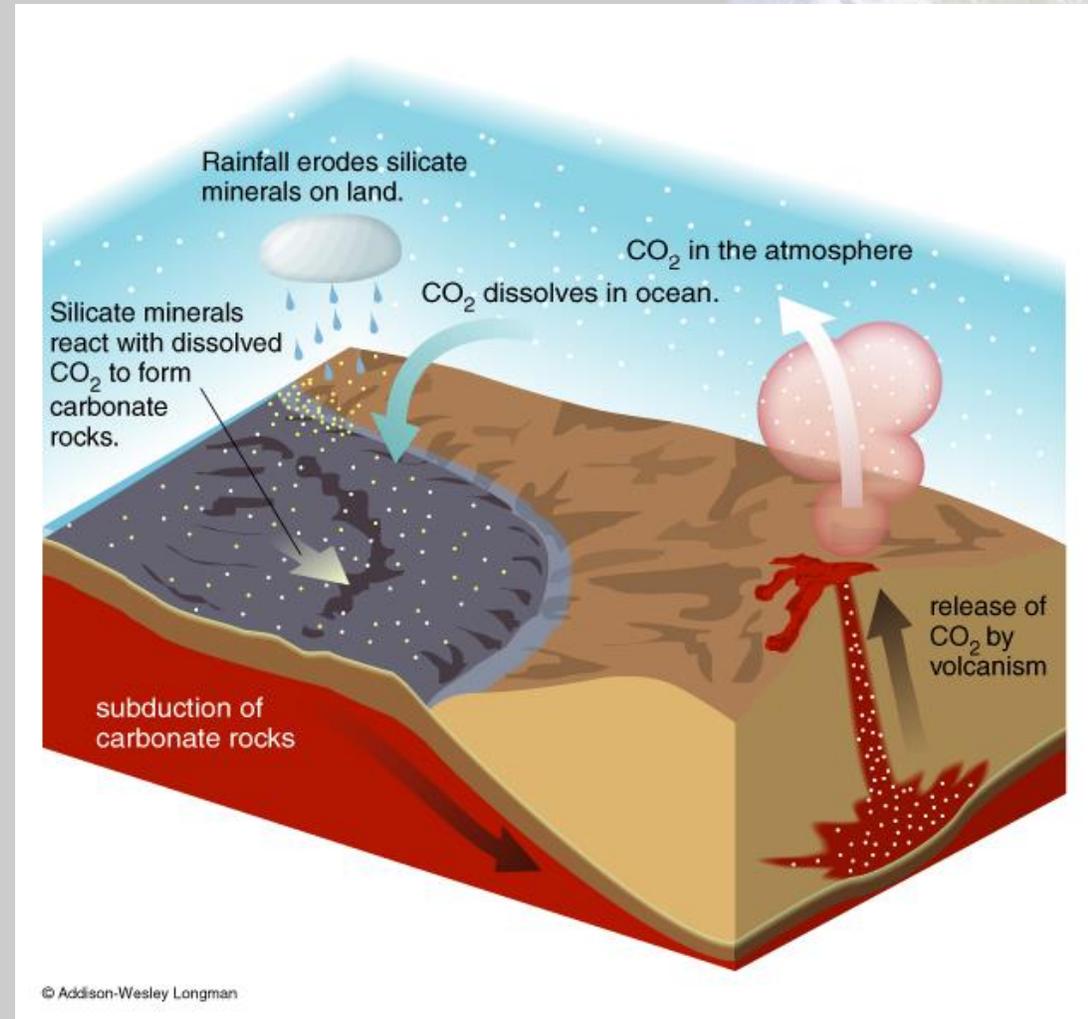


Begünstigende Faktoren

- Masse, Strahlung und Aktivität des Sterns
- Atmosphäre
- Plattentektonik
- Magnetfeld, Dynamo

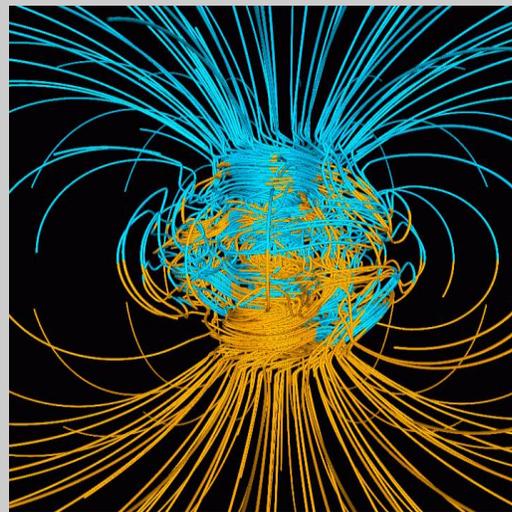
Carbonat-Silikat Zyklus

CO₂ Regelung auf langen Zeitskalen



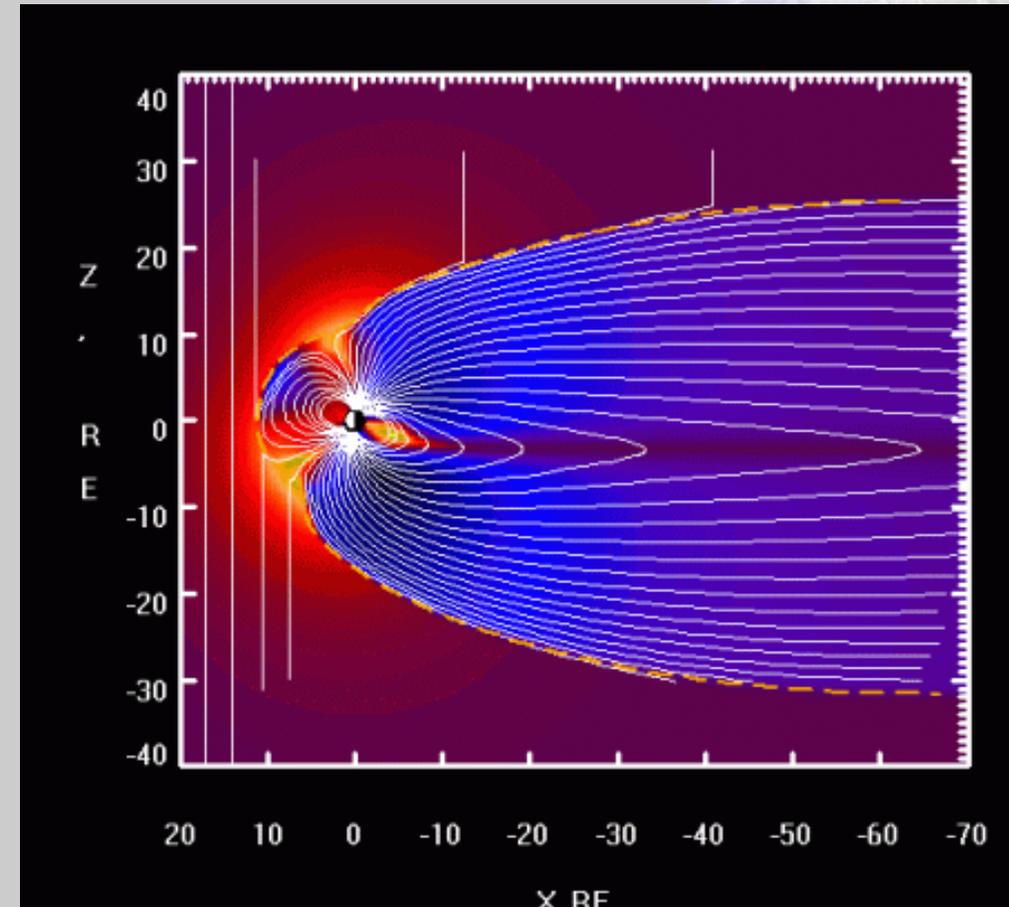
Begünstigende Faktoren

- Masse, Strahlung und Aktivität des Sterns
- Atmosphäre
- Plattentektonik
- **Magnetfeld, Dynamo**



Credit: Dr. Gary A. Glatzmaier
Los Alamos National Laboratory

Sonnenwind vs. Erdmagnetfeld



Credit: Dr. Nikolai Tsyganenko, USRA/NASA/GSFC

Begünstigende Faktoren

- Masse, Strahlung und Aktivität des Sterns
- Atmosphäre
- Plattentektonik
- Magnetfeld, Dynamo



- Zeitlich variabel
 - Strahlung und Aktivität des Sterns
→ *Kontinuierliche HZ*
 - Auskühlung des Planetenkerns
 - Plattentektonik benötigt Wasser
 - Erosion der Atmosphäre



Entwicklung bewohnbarer Planeten

- Klasse I
- Klasse II
- Klasse III
- Klasse IV



• Erdähnliche Planeten

- Sternklasse: G, K, F
(Sternaktivität lässt schnell genug nach um die entstehende Atmosphäre nicht zu gefährden)
- passende Umlaufbahn
- Stabile Atmosphärenbedingungen solange aktive Plattentektonik aufrecht erhalten werden kann.
- „Super-Erden“ $M=2-10 M_{\text{Erde}}$



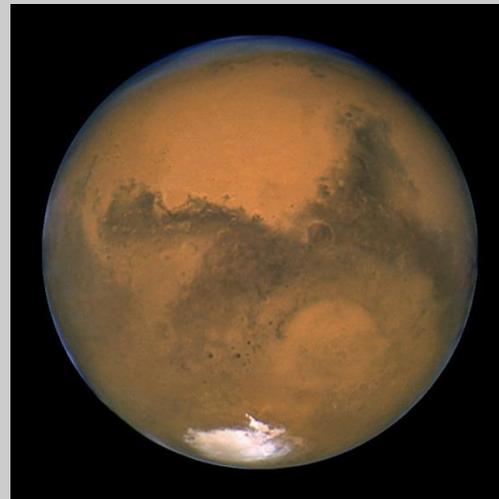
Entwicklung bewohnbarer Planeten

- Klasse I
- Klasse II
- Klasse III
- Klasse IV

NASA/JPL/RPIF/DLR

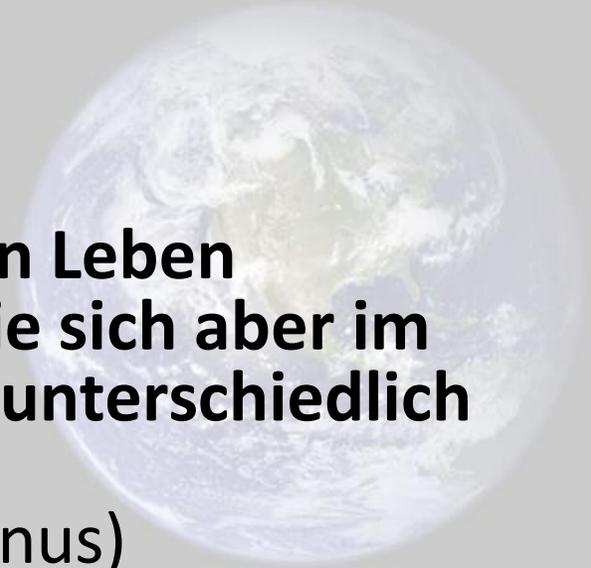


Venus



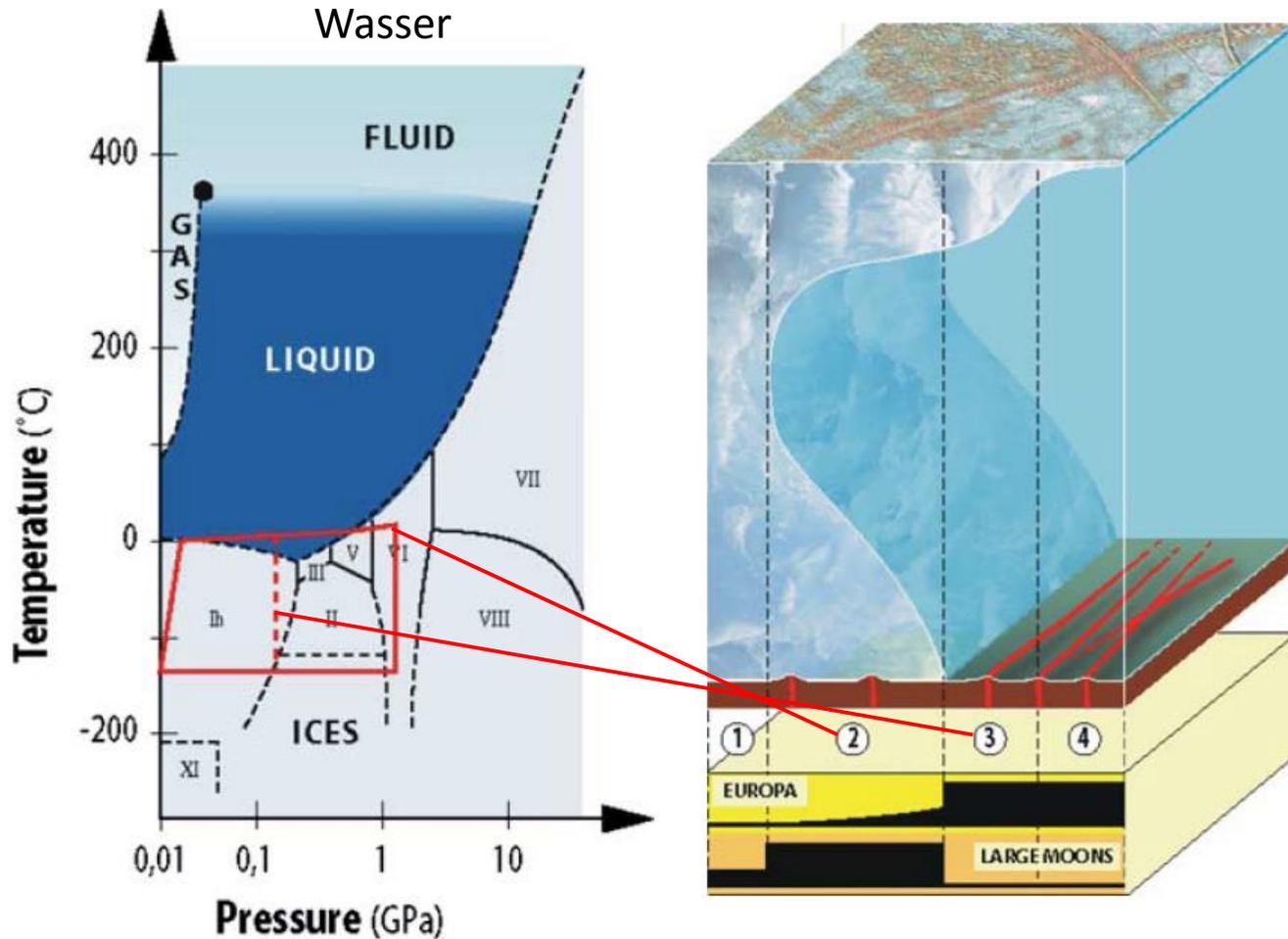
Mars

- **Planeten auf denen Leben entstehen kann, die sich aber im Vergleich zur Erde unterschiedlich entwickeln.**
(Bsp.: Mars und Venus)
 - HZ um massearme M und K Sterne
→ langsame (gebundene) Rotation
→ schwacher Dynamoeffekt
 - Abh. vom spektralen Typ können für einige 100 Mio. Jahre wasserreiche Oberflächenbedingungen herrschen bevor der Planet sein Wasserreservoir verliert.

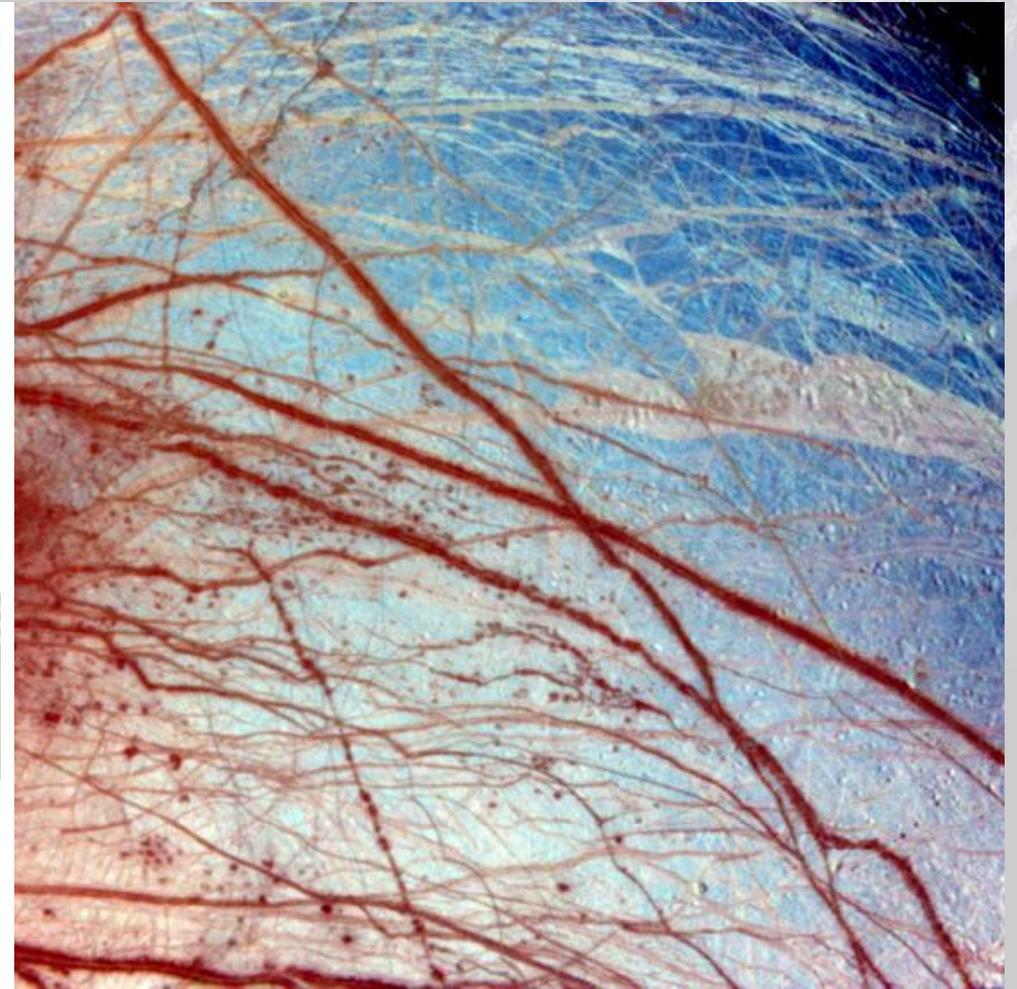


Wasser außerhalb der klassischen HZ ?!

Phasendiagramm



Jupitermond Europa



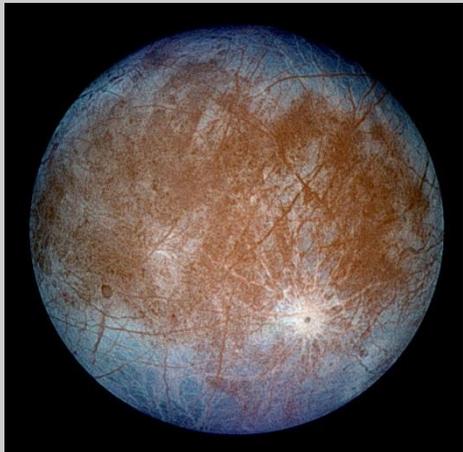
Entwicklung bewohnbarer Planeten

- Klasse I
- Klasse II
- Klasse III
- Klasse IV

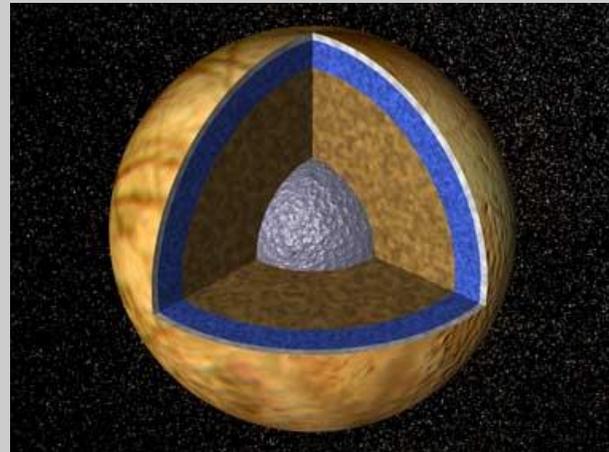


- **Planeten mit unterirdischen Ozeanen im Kontakt mit dem Gesteinskern**
(Bsp.: Europa)

- wasserreiche Planeten in zu großem Abstand zu ihrem Stern um flüssiges Wasser auf der Oberfläche zu haben.
- Problem: Ozean ist dunkel und abgeschirmt von organischem Meteoriteneintrag
- Hydrothermal Quellen als Energiequelle?



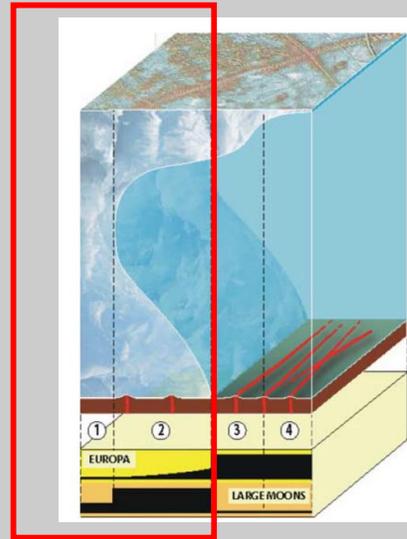
Europa



Europa-Modell

Entwicklung bewohnbarer Planeten

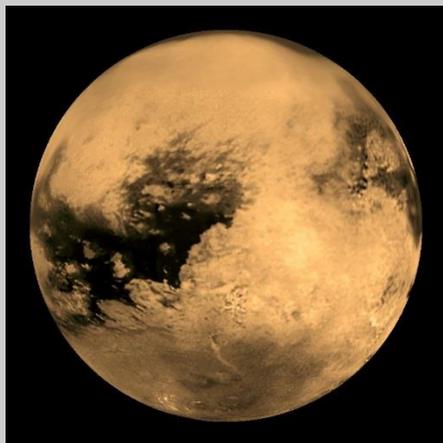
- Klasse I
- Klasse II
- Klasse III
- Klasse IV



- **Planeten mit (unterirdischen) Ozeanen über einer Eisschicht** (Bsp.: Titan, Ganymed, Kallisto und womöglich Enceladus)

- Abgeschirmt von mineralischen Salzen des Kerns sowie Licht und Materialeintrag von außen.
- Titanoberfläche: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4$ (Titan ist außer der Erde, der einzige Planet im Sonnensystem mit stehenden Oberflächen-„Gewässern“).

NASA/JPL/RPIF/DLR



Titan



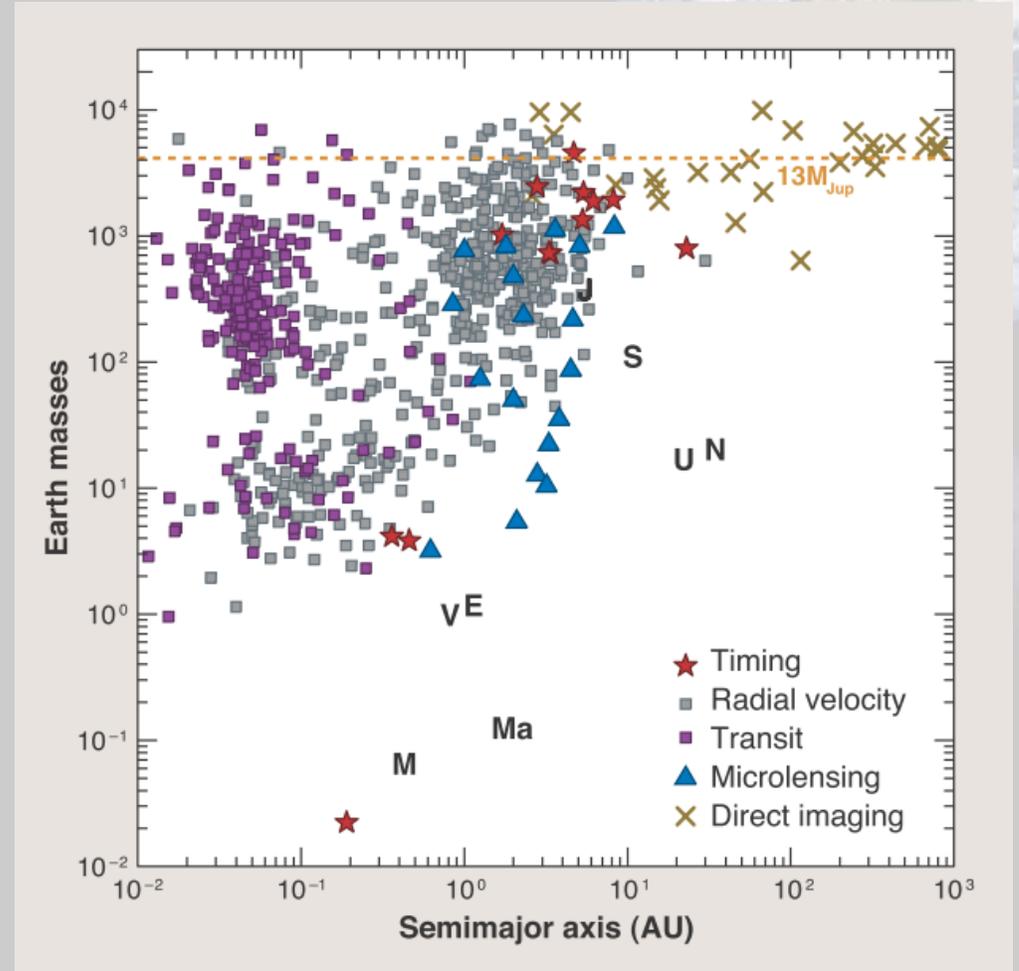
Ganymed



Enceladus

Könnte Leben in den HZ I-IV entstehen?

- I. Nur ein Exemplar bekannt, die Erde → Entstehung von Leben möglich.
- II. Zeitskala der Klasse I Bedingungen entscheidet ob sich Leben bilden kann.
- III. + IV. Entstehung von Leben viel unwahrscheinlicher als in I + II.

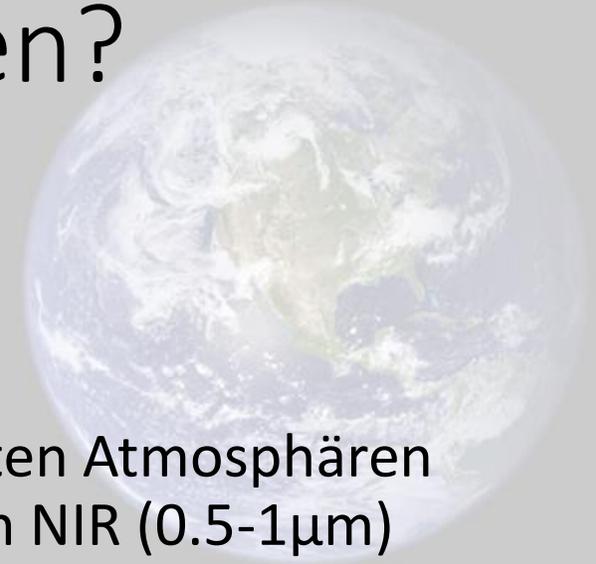


Könnte Leben in den HZ I-IV entstehen?

- I. Nur ein Exemplar bekannt, die Erde → Entstehung von Leben möglich.
- II. Zeitskala der Klasse I
Bedingungen entscheidet ob sich Leben bilden kann.
- III. + IV.
Entstehung von Leben viel unwahrscheinlicher als in I + II.

- Nachweis:

- Suche nach feuchten Atmosphären
H₂O Absorption im NIR (0.5-1μm)
- Abwesenheit von Wasser.
- Suche nach Biosignaturen (Bsp.:
O₂ (0.76μm), O₃ (9.6μm), CH₄
(7.66μm), N₂O (17 u. 7.8μm) und
CO₂.



Könnte Leben in den HZ I-IV entstehen?

- I. Nur ein Exemplar bekannt, die Erde → Entstehung von Leben möglich.
- II. Zeitskala der Klasse I
Bedingungen entscheidet ob sich Leben bilden kann.
- III. + IV.
Entstehung von Leben viel unwahrscheinlicher als in I + II.

• Nachweis:

- Fernerkundungsnachweis schwierig
- Bsp. Mars: In-situ Suche
- Bsp. Venus: Besseres Verständnis der Atmosphären- und Oberflächenbedingungen nötig. Rekonstruktion der geologischen Geschichte.



Könnte Leben in den HZ I-IV entstehen?

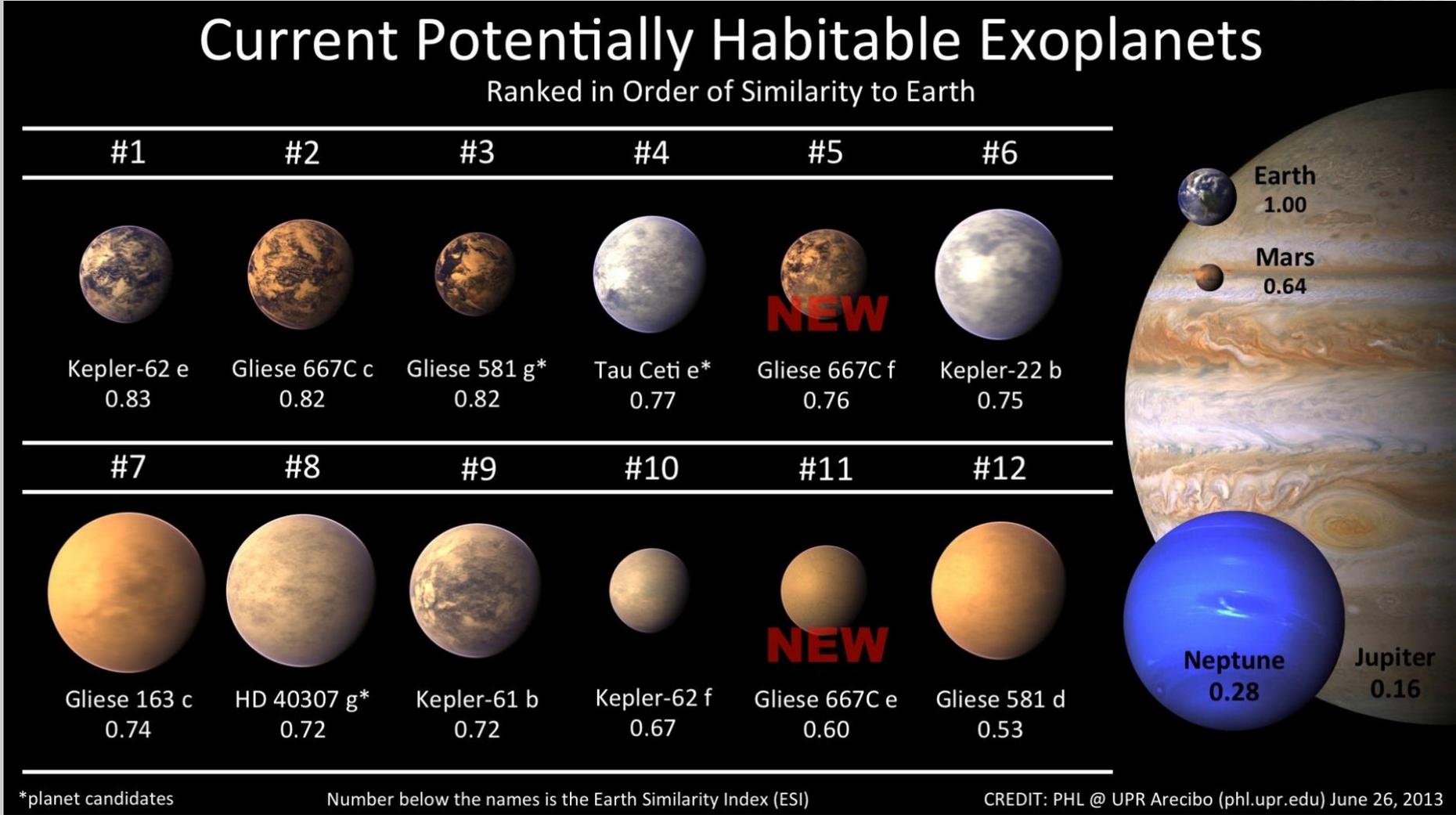
- I. Nur ein Exemplar bekannt, die Erde → Entstehung von Leben möglich.
- II. Zeitskala der Klasse I
Bedingungen entscheidet ob sich Leben bilden kann.
- III. + IV.
Entstehung von Leben viel unwahrscheinlicher als in I + II.

• Nachweis:

- Globaler, extern nachweisbarer Einfluss eventueller Lebensformen fraglich.
- Wassereis-Absorptionsbanden?
- Beispiel Europa: In-situ Mission
- Beispiel Titan: Erforschung des Methanzklus als Alternative zum Wasserzyklus



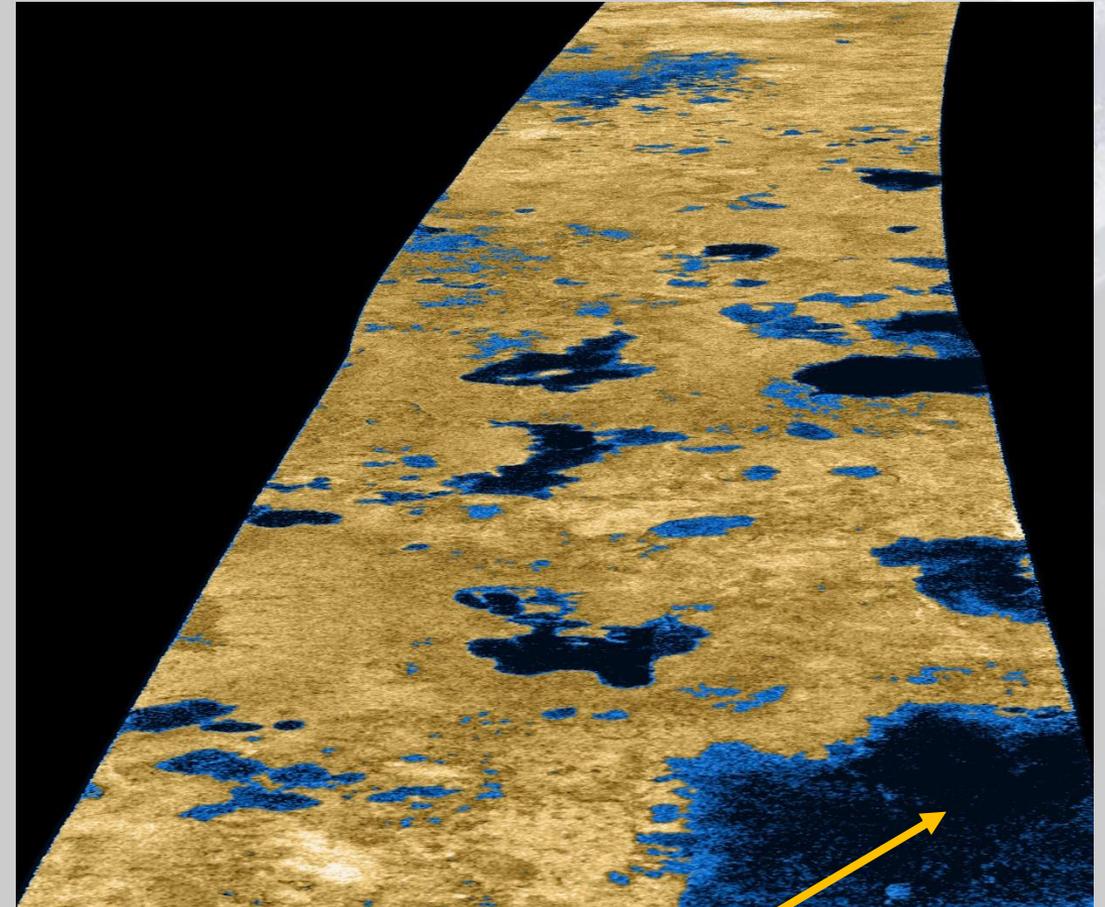
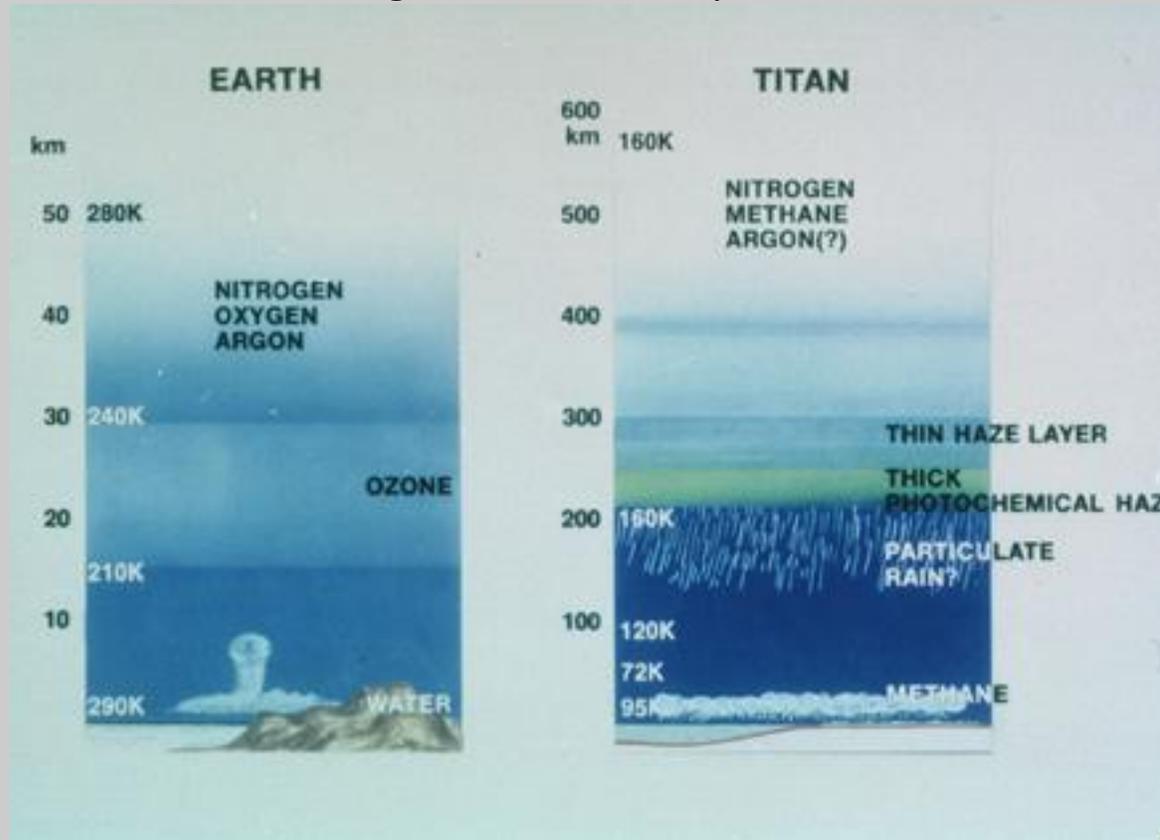
Exoplaneten in der Habitable Zone?





Exotische Bedingungen - Titanoberfläche

Vergleich der Atmosphären



flüssiges Ethan? 