

# Habitable Welten in unserem Sonnensystem und darüber hinaus

Gerda Horneck

DLR, Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln

[gerda.horneck@dlr.de](mailto:gerda.horneck@dlr.de)



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

# Geschichte des Lebens auf der Erde



**Alter der Erde: 4,6 Milliarden Jahre**  
**Alter des Lebens: > 3,5 Milliarden Jahre**





# Geschichte des Lebens auf der Erde

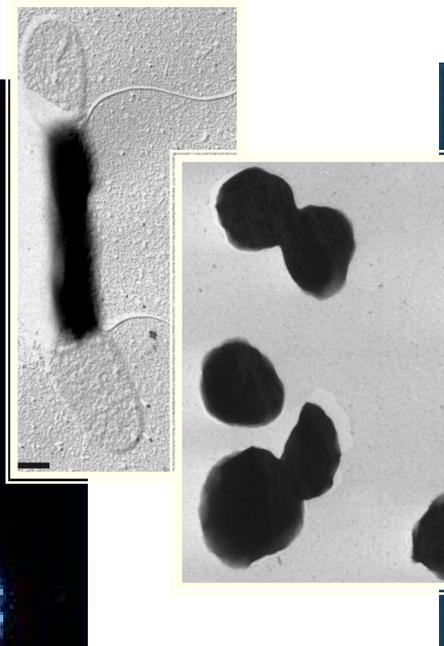
---

## Mikroorganismen

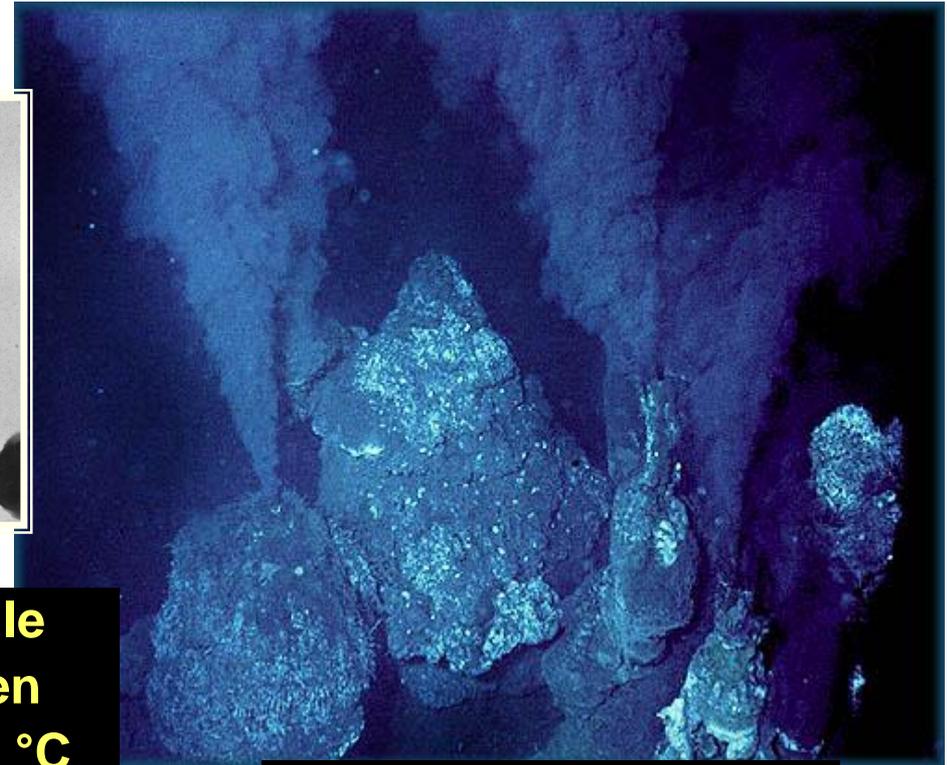
- kommen seit den Anfängen des Lebens vor
- besiedeln Boden, Luft und Wasser
- sind an Extremgebiete angepasst



# Anpassung an hohe Temperaturen: Thermophilie



**Hyperthermophile  
Mikroorganismen  
wachsen bei 113 °C**



**Schwarze Raucher**



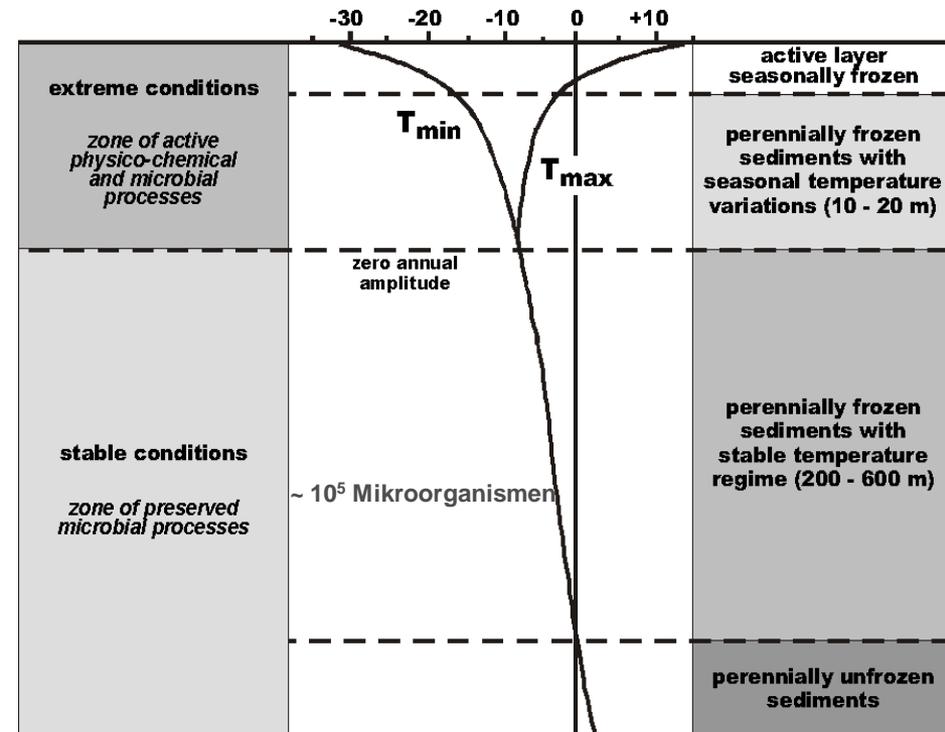
# Anpassung an tiefe Temperaturen: Psychrophilie

## Mikroorganismen im Permafrost

- $\approx -10^{\circ}\text{C}$  (Arktis),  $\approx -25^{\circ}\text{C}$  (Antarktis)
- 92-97% Eis, 3-8 % flüssiges Wasser



B



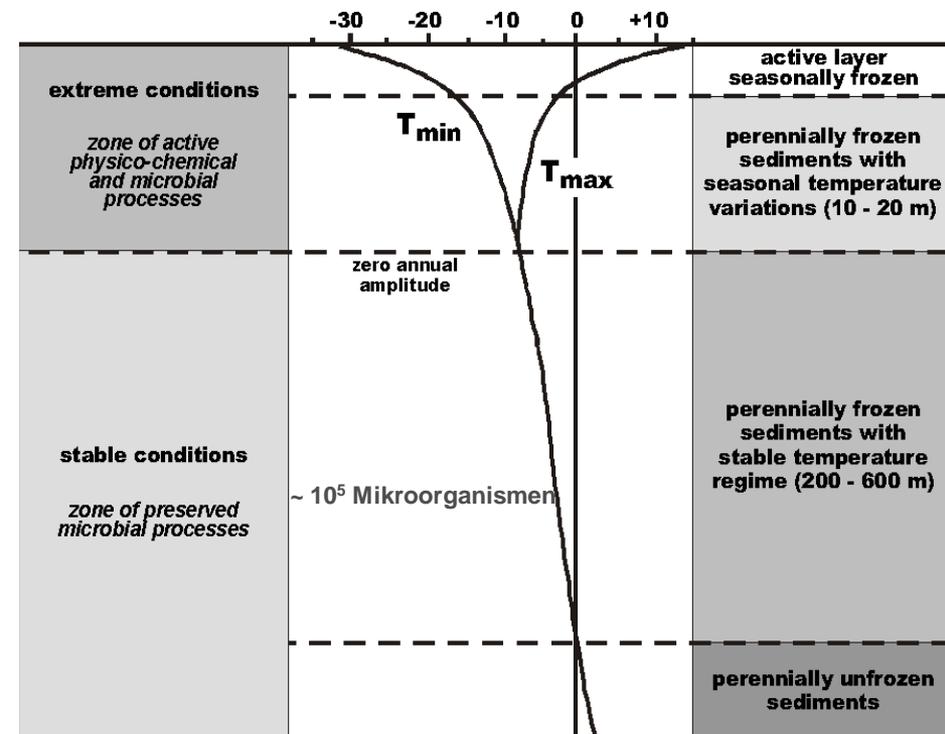
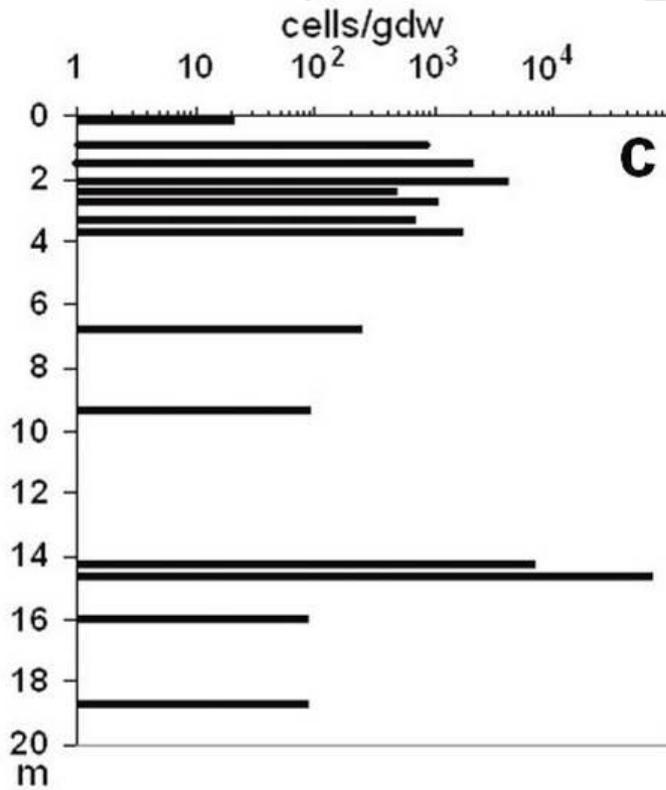
## Permafrost in der Arktis (Sibirien)



# Anpassung an tiefe Temperaturen: Psychrophilie

## Mikroorganismen im Permafrost

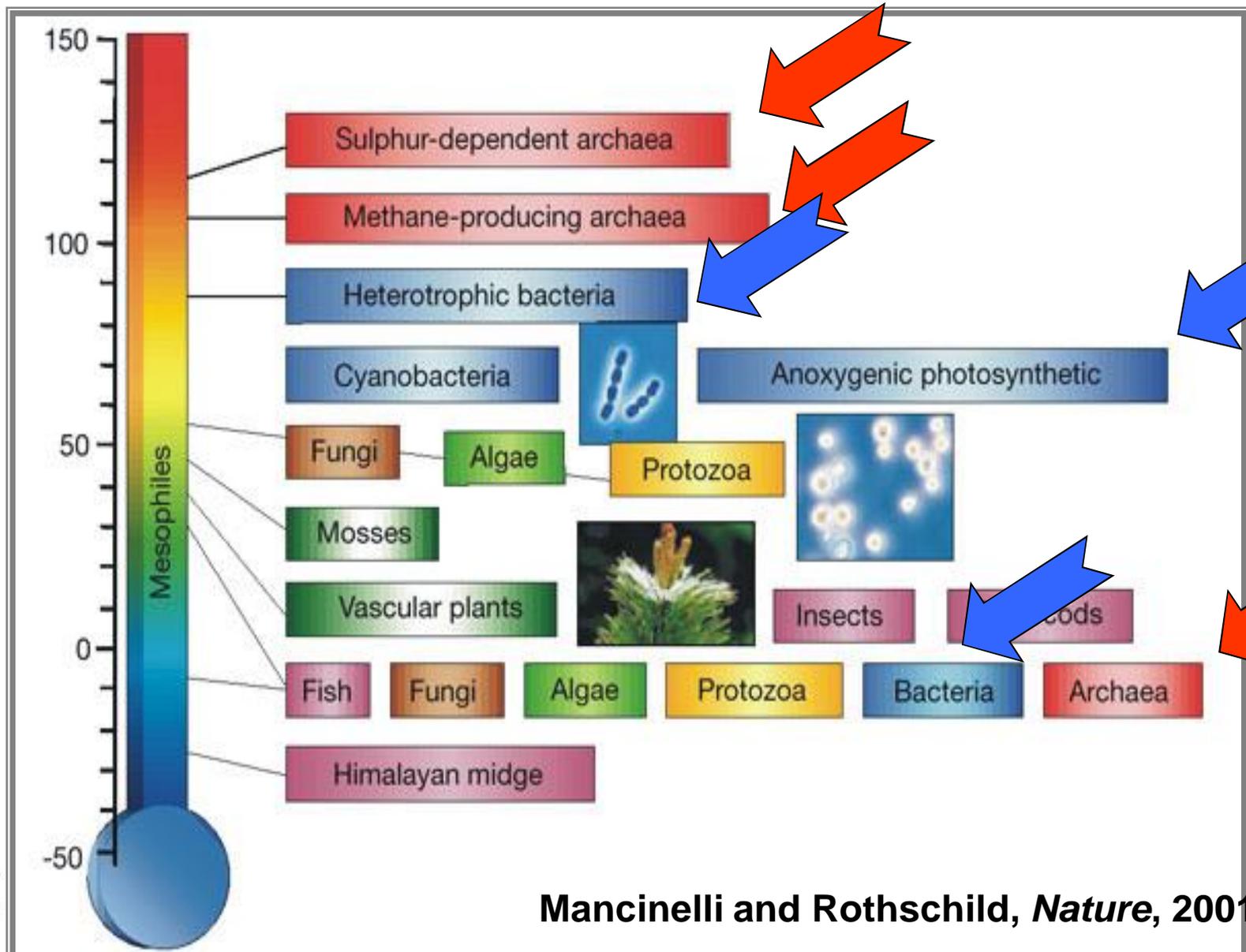
- $\approx -10^\circ\text{C}$  (Arktis),  $\approx -25^\circ\text{C}$  (Antarktis)
- 92-97% Eis, 3-8 % flüssiges Wasser



*Gilichinsky et al. 2007*



# Temperaturbereiche der Mikroorganismen

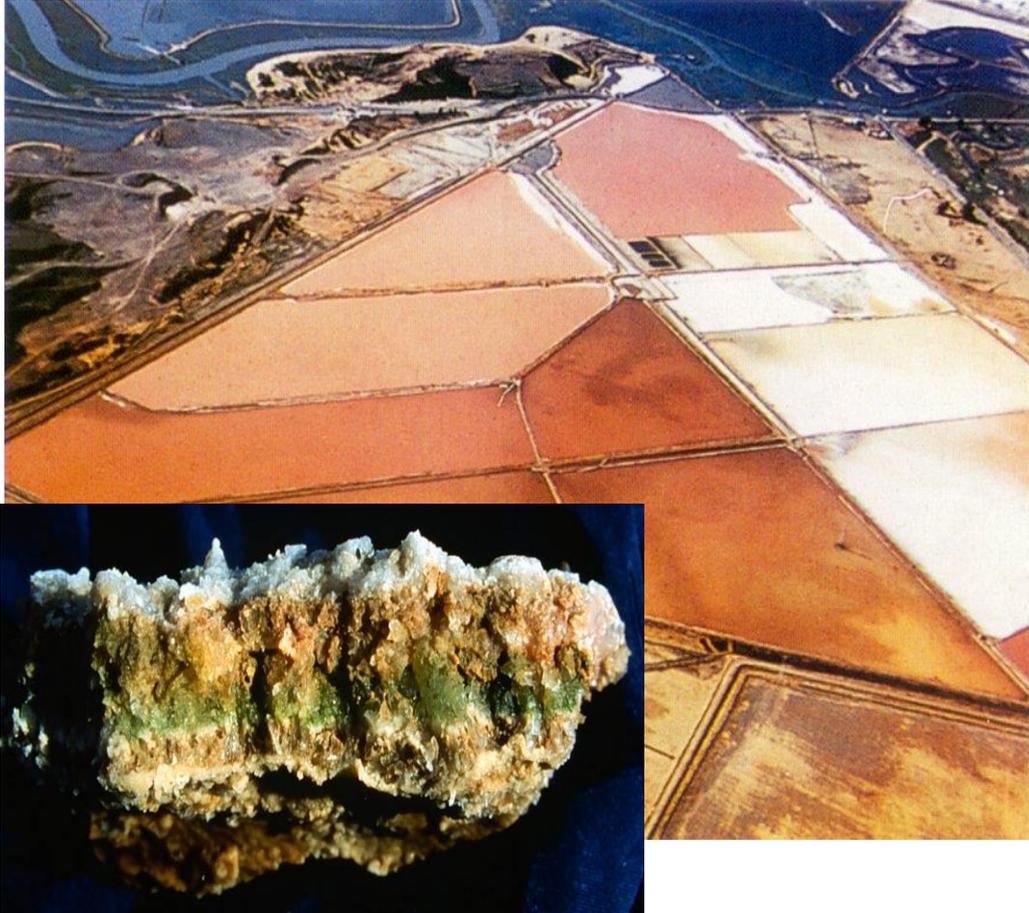


Mancinelli and Rothschild, *Nature*, 2001

horneck  
.2.2011

# Anpassung an hohen Salzgehalt: Halophilie

---



- **Salz-im-Zytoplasma**  
**Strategie:** Adaptation des Stoffwechsels an hohe Salzkonzentrationen ( $K^+$  ,  $Na^+$ )
- **Organische-Osmolyten**  
**Strategie:** Zytoplasma mit ungeladenen, wasserlöslichen organischen Verbindungen angereichert (Zucker, Alkohole, Aminosäuren)

# Anpassung an toxische Salze: Arsenat

---

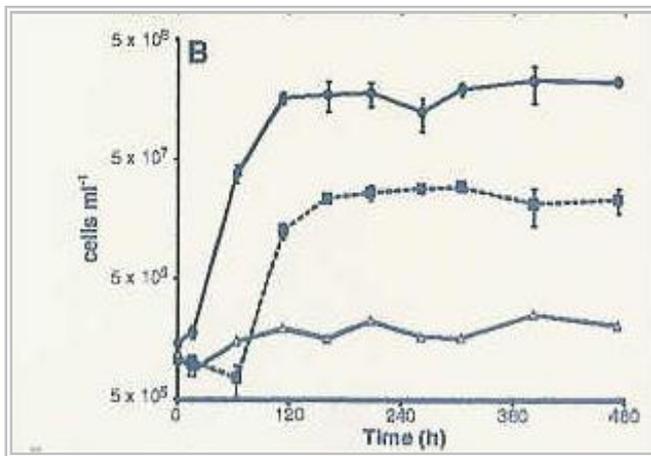
**Hypothese: Arsenat kann Phosphat ersetzen (GFAJ-1)**



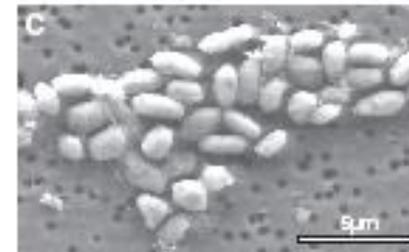
**Geomicrobiologist Felisa Wolfe-Simon, collecting lake-bottom sediments in the shallow waters off Mono Lake's 10 Mile Beach. Credit: ©2010 Henry Bortman**

# Anpassung an toxische Salze: Arsenat

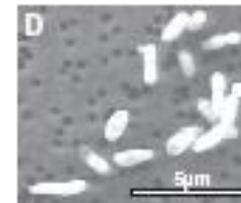
Hypothese: Arsenat kann Phosphat ersetzen (GFAJ-1)



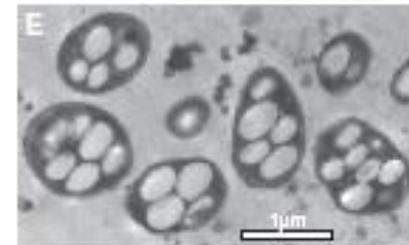
-As/+P



+As/-P



-As/-P



+As/-P

GFAJ-1: Isolat aus Mono Lake ( $200 \mu\text{M AsO}_4^{3-}$ )

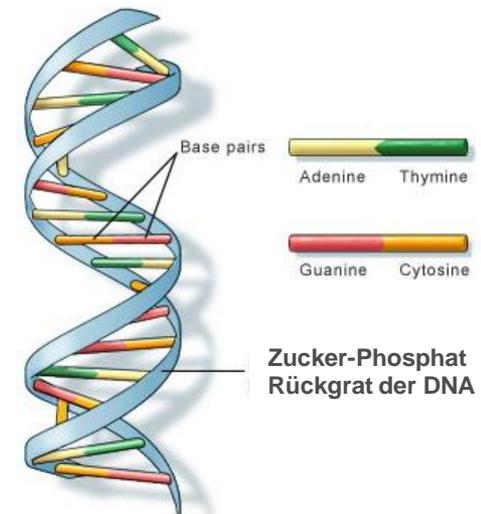
Wolfe-Simon et al. Science, 2010

# Anpassung an toxische Salze: Arsenat

## Hypothese: Arsenat kann Phosphat ersetzen (GFAJ-1)

### Intrazelluläre Verteilung von radioaktiv markiertem Arsenat: $^{73}\text{AsO}_4^-$

Subzelluläre Fraktion gelöst in	Anteil (%)
Phenol (Protein + s.m.w. Metabolite)	$80.3 \pm 1.7$
Phenol:Chloroform (Proteine + Lipide)	$5.1 \pm 4.1$
Chloroform (Lipide)	$1.5 \pm 0.8$
<b>Restl. wässr. Fraktion (DNA/RNA)</b>	<b><math>11.0 \pm 0.1</math></b>



**Folgerung: In GFAJ-1 könnte das Phosphat im Zucker-Phosphat Rückgrat der DNA durch Arsenat ausgetauscht sein.**

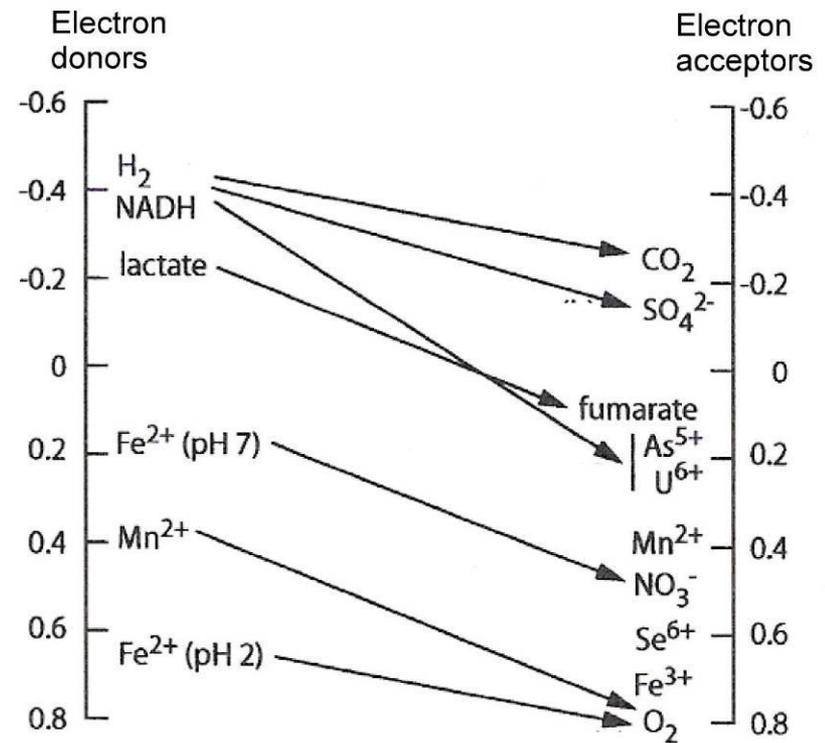
**NASA: Die Definition des Lebens muss neu geschrieben werden !!!!**

**Warnung: Außergewöhnliche Aussagen bedürfen außergewöhnlicher Belege**

*Wolfe-Simon et al. Science, 2010*

# Mikroorganismen aus der „Unterwelt“

## SLIME (Subsurface Lithoautotrophic Microbial Ecosystem)



# Mikroorganismen im Verborgenen

---



## Kryptoendolithische Mikrobengemeinschaften



# Grenzen der Habitabilität für Mikroorganismen

---

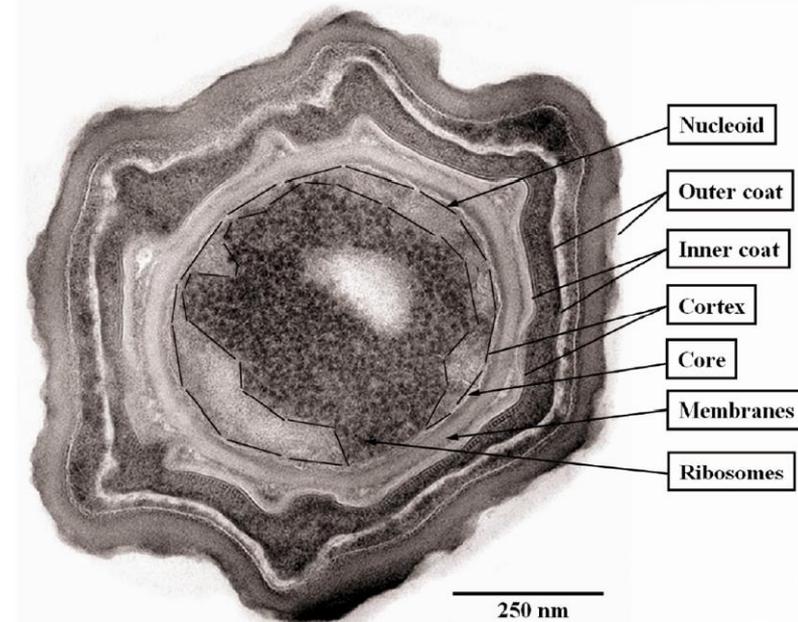
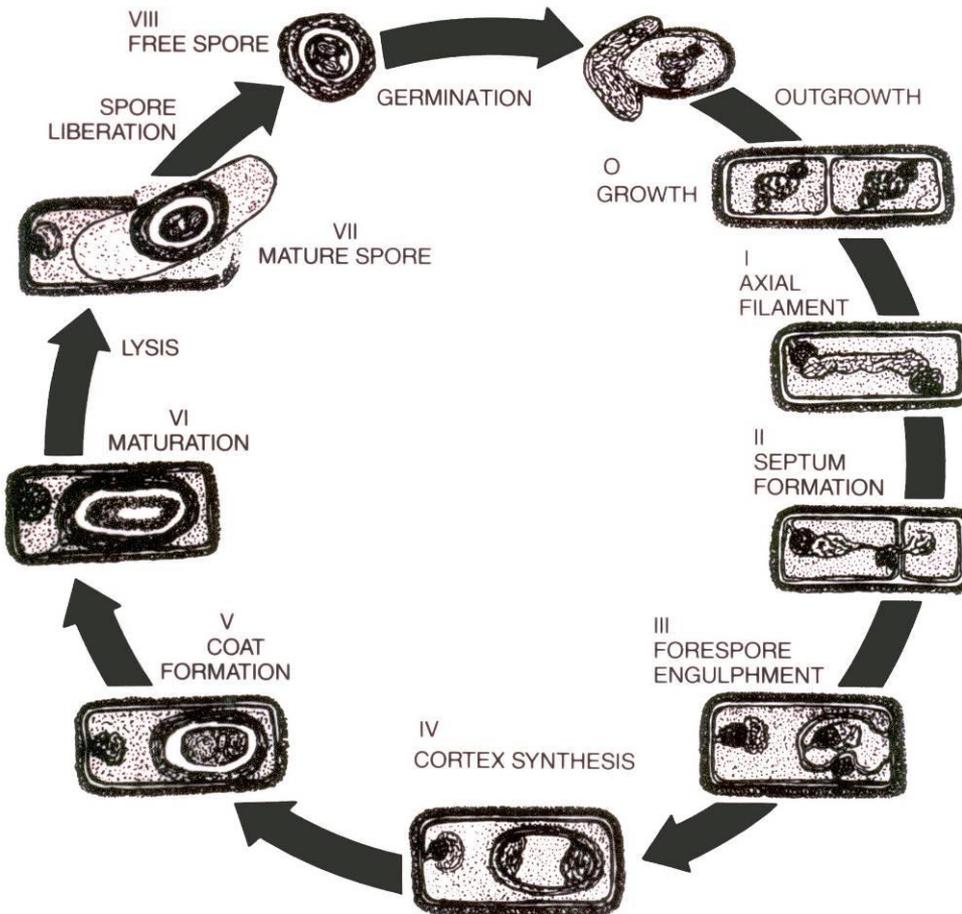
## Grenzen für Wachstum und Vermehrung

- **Temperatur:** -20°C to +113°C
- **Wasser-Stress:**  $a_w \geq 0.7$
- **Salzgehalt:** Salz Konzentration  $\leq 30 \%$ , auch Salzkristalle
- **pH:** pH = 1-11
- **Nährstoffe:** Viele verschiedene Nährstoffe möglich  
Autotrophes Wachstum  
Toleranz für lange Hungerzeiten
- **Sauerstoff:** Aerobier/Anaerobier
- **Strahlung:** Hohe Strahlenresistenz (<60 Gy/h)



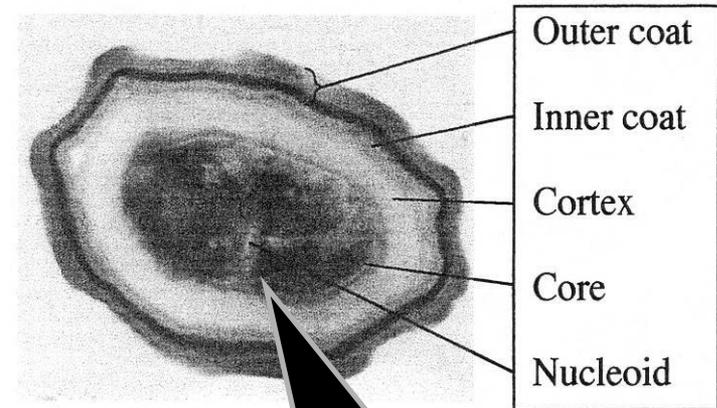
# Grenzen der Habitabilität für Mikroorganismen

## Die Bakterienspore als Überlebenskünstler



# Bakteriensporen

- **Schützende Sporenhülle**
- **Dicke Wandung (Cortex)**
- **Geringer Wassergehalt**
- **Hoher Mineraliengehalt ( $\text{Ca}^{2+}$ )**
- **Kleine Proteine schützen DNA**
- **Wirksame DNA Reparatur nach der Keimung**
- **Leichte Verbreitung**
- **Überlebt viele Stressfaktoren**
  - Austrocknung / Strahlung / Hitze
  - Chemische Schadstoffe (Alkohol, Aceton, Säuren)
- **Räumliches und zeitliches Überdauern von ungünstigen Bedingungen**



**Anhydrobiosis**

# Bakteriensporen: Vorkommen

Atmosphäre



*B. stratosphericus*



Boden

*B. thermoterrestis*



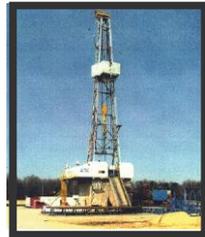
*B. subtilis*  
„Heu-Bazillus“)

Wüste



*B. sonorensis*

Untergrund



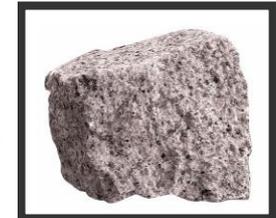
*B. infernus*

Reinraum



*B. pumilus* SAFR

Gestein



*B. simplex*

Nahrung



*B. cereus*

Pathogene



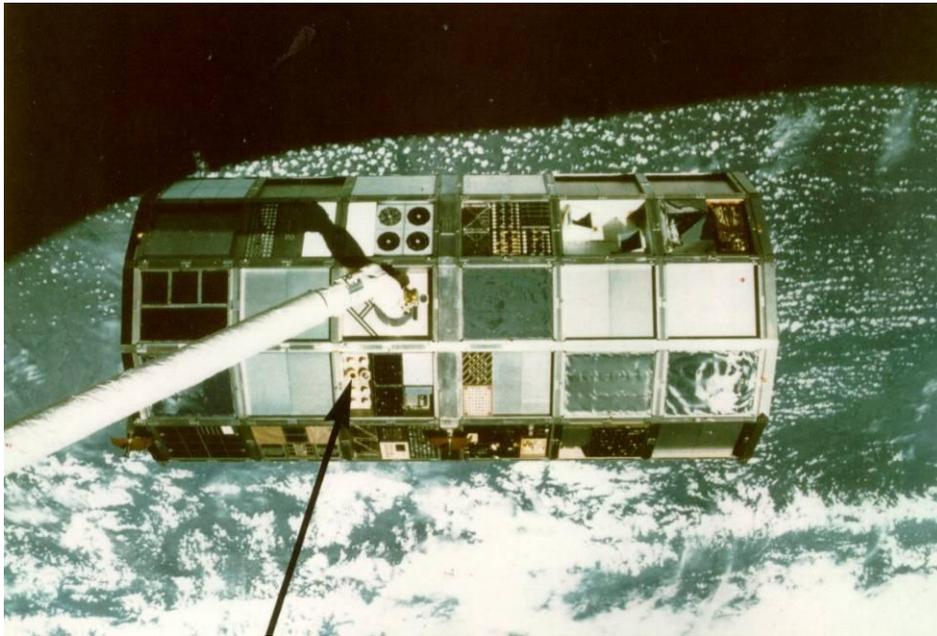
*B. anthracis*

Insekten



*B. thuringiensis*

# Bakteriensporen: Überleben im Weltraum

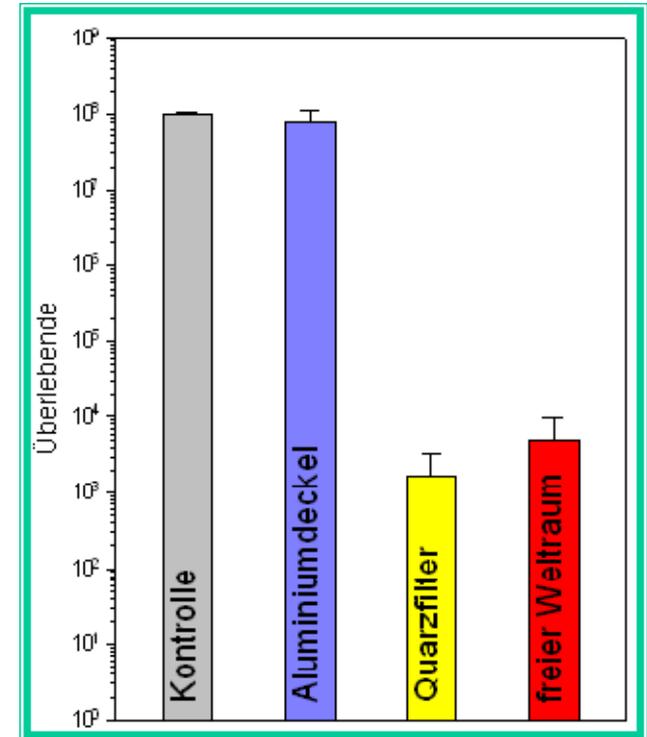


Sporen von *B. subtilis*

Long Duration Exposure Facility (LDEF) war 6 Jahre im Weltraum



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft



Sporen unter einer Alu-Folie überlebten zu ~ 86 % 6 Jahre im Weltraum (vor UV-Strahlung geschützt)

# Grenzen der Habitabilität für Mikroorganismen

---

## Grenzen fürs Überleben

- **Temperatur:**  $\leq -263^{\circ}\text{C}$  to  $+150^{\circ}\text{C}$
- **Wasser- stress:**  $0 \leq a_w \leq 1.0$   
Sporen überleben im Vakuum ( $10^{-6}$  Pa)
- **Salzgehalt:** Salzkristalle (Endoevaporite)
- **pH:** pH = 0 - 12.5
- **Nährstoffe:** nicht nötig, besser ohne
- **Sauerstoff:** nicht nötig, besser ohne
- **Strahlung:** Hohe Strahlenresistenz ( $<5$  kGy)
- **Zeit:**  $\leq 25 - 40 \times 10^6$  a

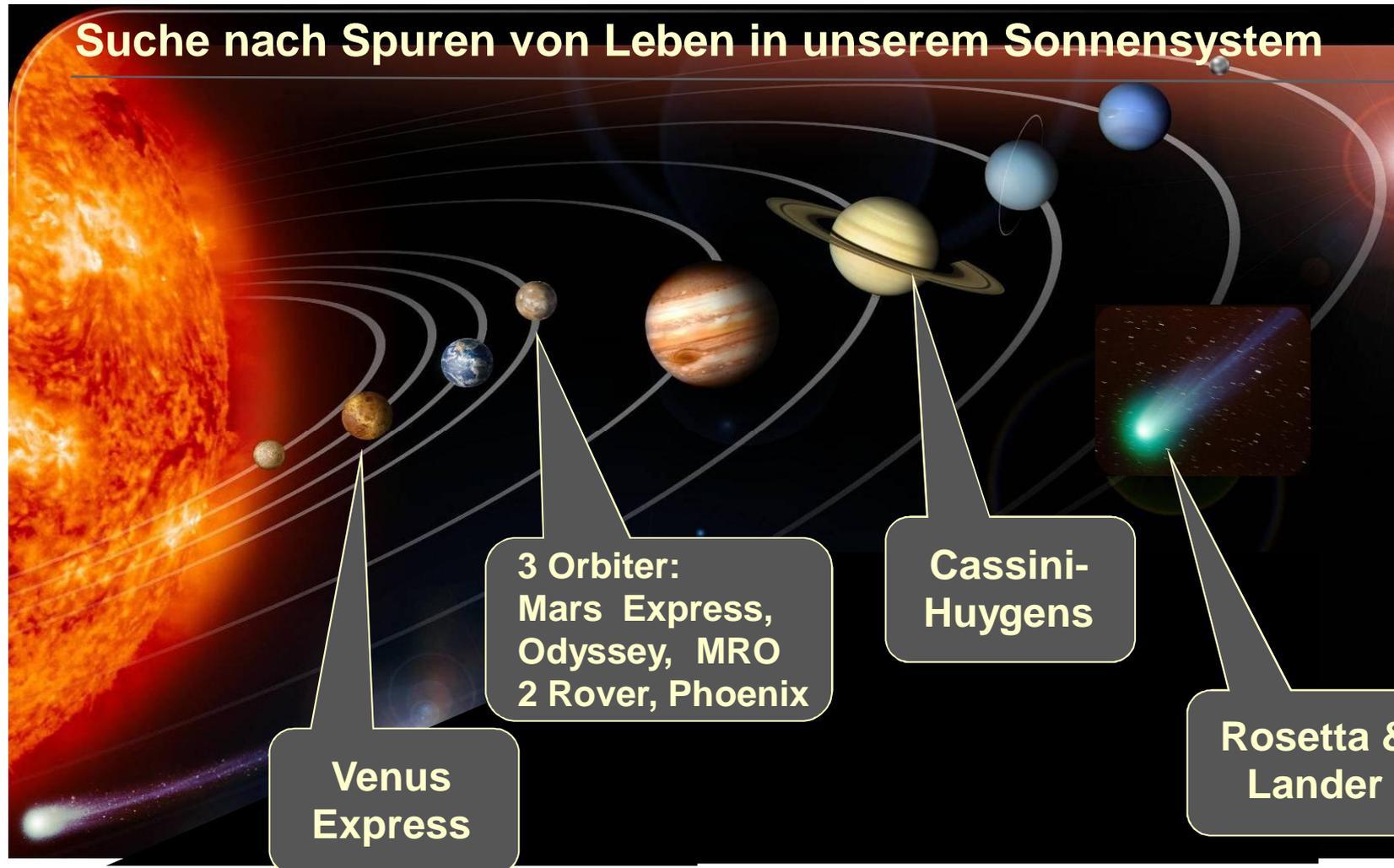




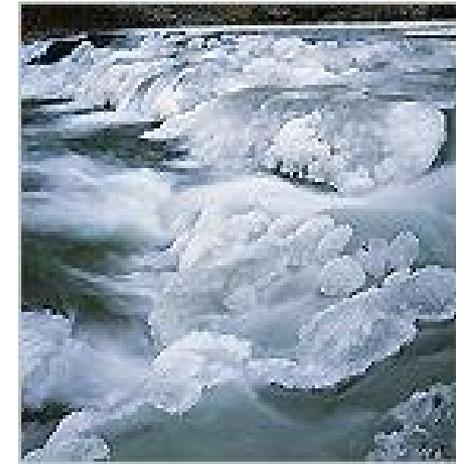
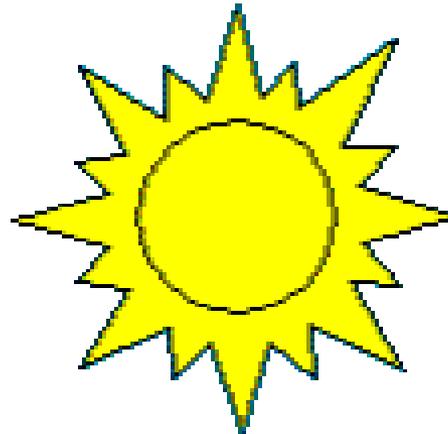
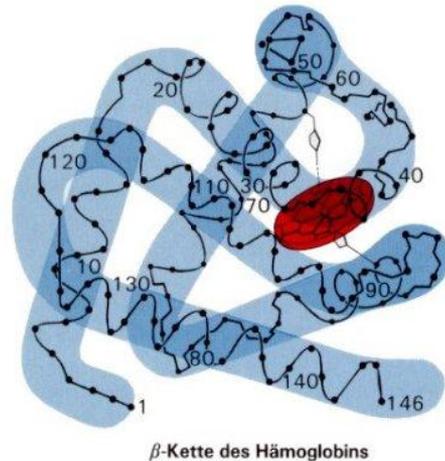
„Die Erde ist bis jetzt die einzige uns bekannte Welt,  
die Leben beherbergt“

*Carl Sagan, Pale Blue Dot, 1994*

# Weitere habitable Welten in unserem Sonnensystem ?



# Drei Voraussetzungen für Habitabilität



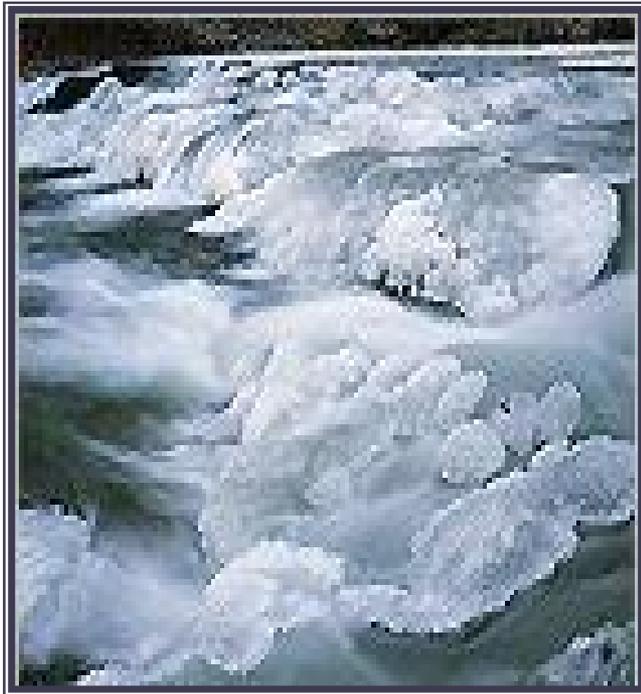
**Kohlenstoffchemie und  
biogene Elemente:  
CHONSP**

**Energiequelle:  
Sonne oder  
chemisch**

**Wasser in  
flüssigem Zustand**

# Flüssiges Wasser als Voraussetzung für Habitabilität

---

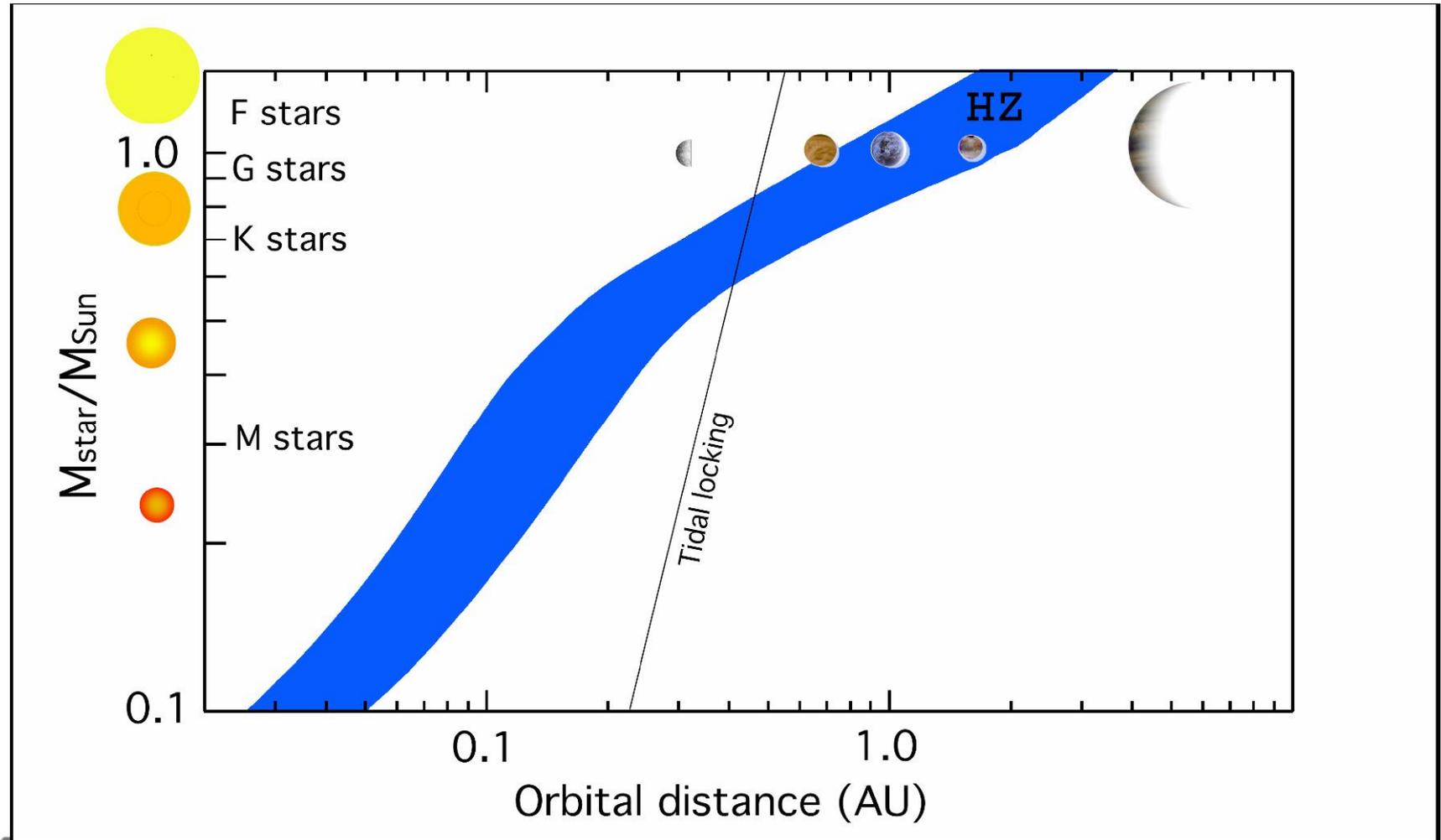


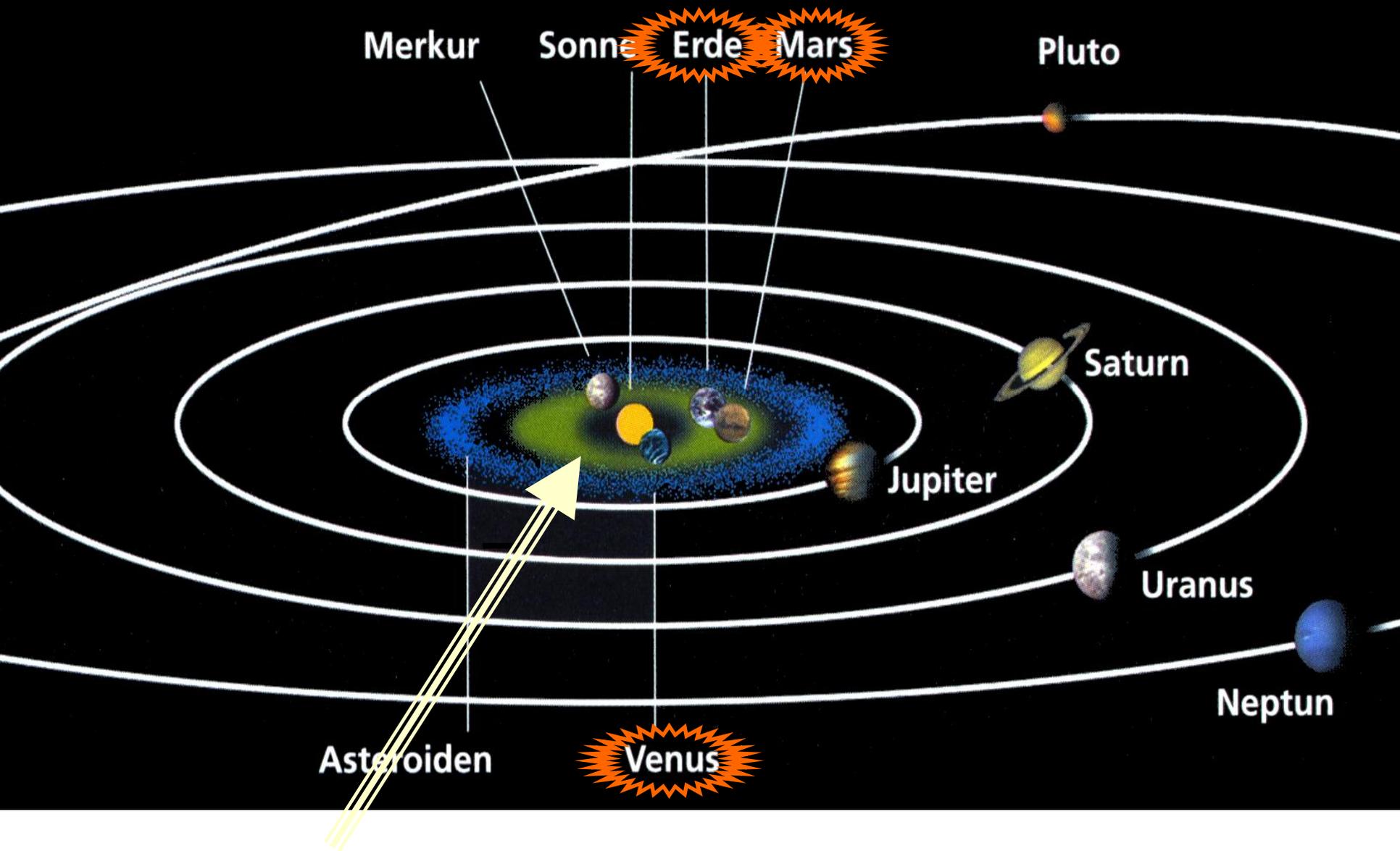
## Wasser ist

- **Diffusionsmittel**
- **Selektives Lösungsmittel (hydrophile and hydrophobe Gruppen)**
- **Reaktionspartner**
- **Strukturgeber der Biopolymere**
- **Wärmeleiter**
- **Lehmproduzent (präbiotische Chemie)**

# Habitable Zone als Funktion des Abstands vom Stern

## Flüssiges Wasser auf der Oberfläche des Planeten





## Habitable Zone um unsere Sonne



Ist Venus habitabel?

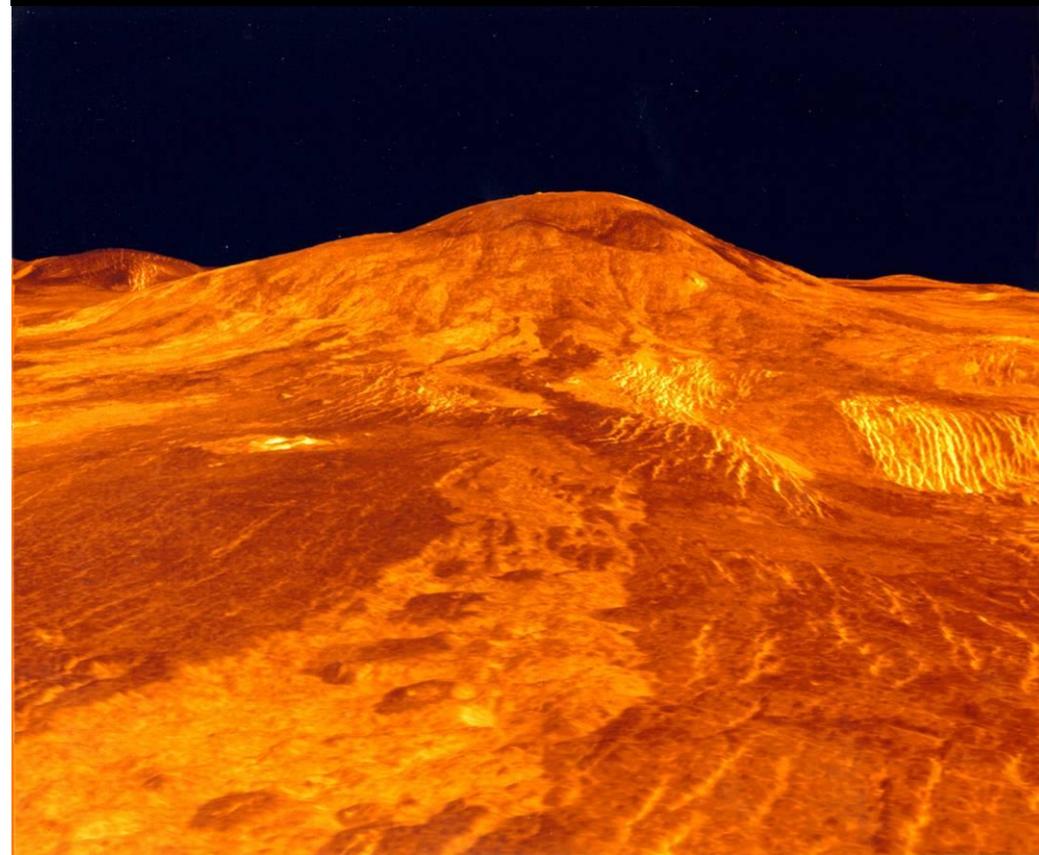
---

## ESA's Mission zur Venus: VenusExpress



**Start: 9. November 2005**

**Ankunft im Venus Orbit: April 2006**



**Temperatur: 464 °C**

**Druck: 9.2 MPa**

**Atmosphäre: 96,5 % CO<sub>2</sub>**

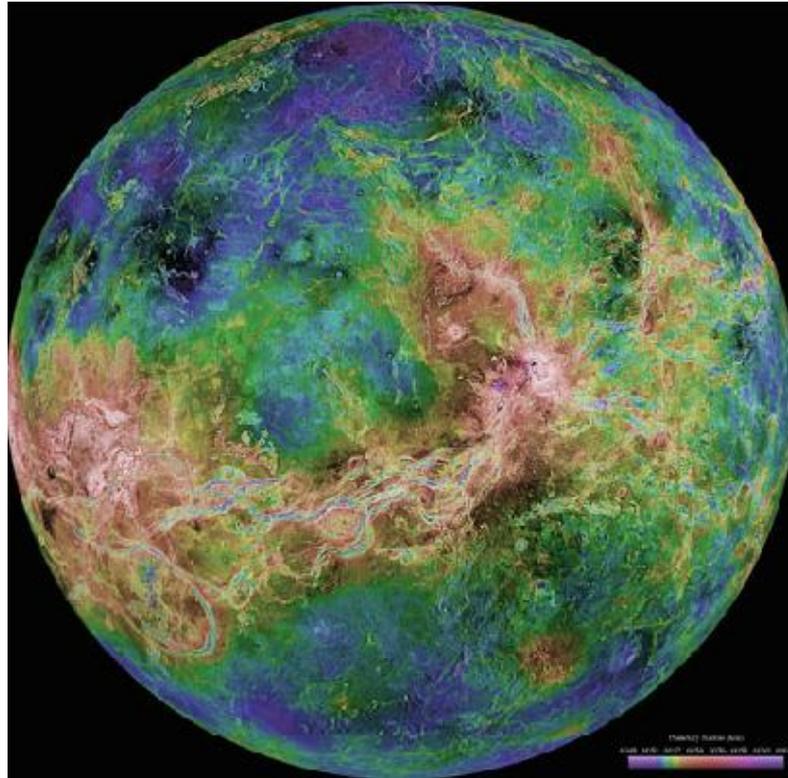
**⇒ Treibhauseffekt**



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

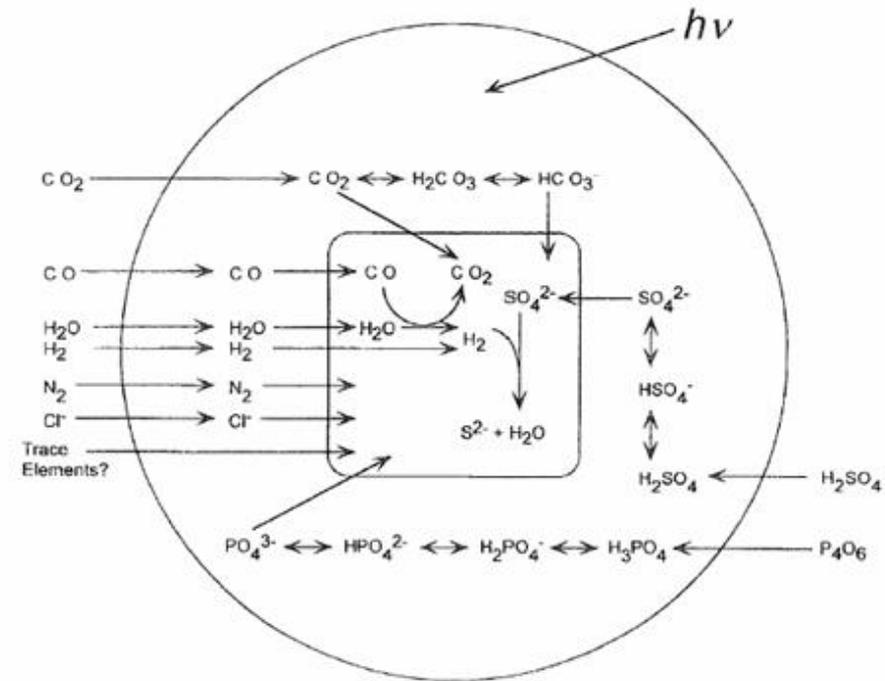
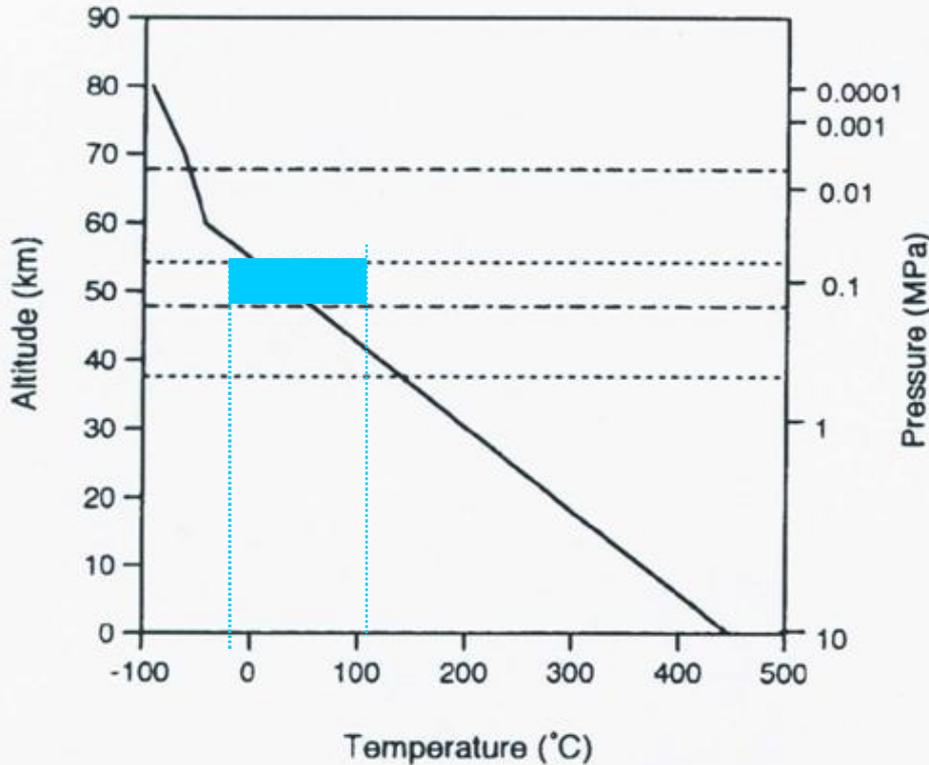
# War Venus habitabel?

---



- 100 fache Anreicherung von Deuterium in der Atmosphäre**
- ⇒ Es gab früher mehr Wasser auf der Venus**
- ⇒ Ozean auf der frühen Venus (bis vor 1 Milliarden Jahren) ?**

# Sind die Wolken von Venus habitabel?



**Anaerobe acidophile Schwefelsäurebakterien  
in den Schwefelsäure-Tropfen der Wolken?**

# Unsere Erde ist habitabel

---

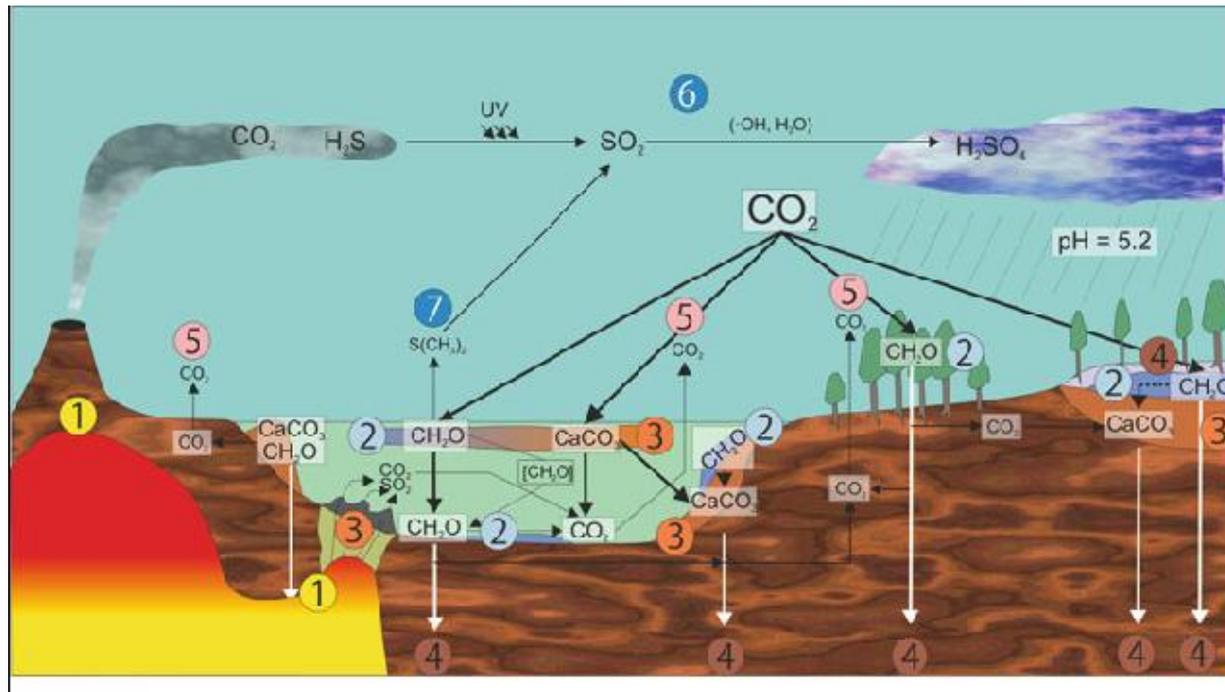


**Bewohnt seit > 3,5 Milliarden Jahren**

**Das Leben gestaltet seine Umwelt**



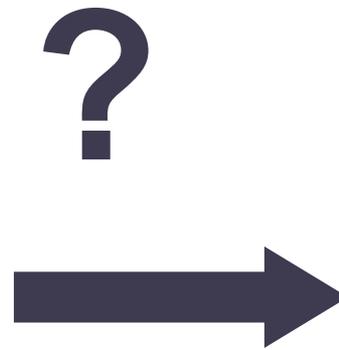
# Unsere Erde und Habitabilität: Biogeochemischer Kreislauf



- 1: Haupt-C-Quelle in geothermalen System: Vulkane
- 2: Organisches C-Reservoir (Biosphäre und organische Nebenprodukte)
- 3: Anorganisches C-Reservoir (Carbonate)
- 4: Anorganische und organische C-Senken
- 5: C-Kreislauf
- 6: S-Kreislauf ( $\text{H}_2\text{S}$  Photo-Oxidation)
- 7: Wolken-Keimbildung durch Schwefelsäurebildung

# Ist oder war Mars habitabel?

## Mars war einst wärmer und feucht



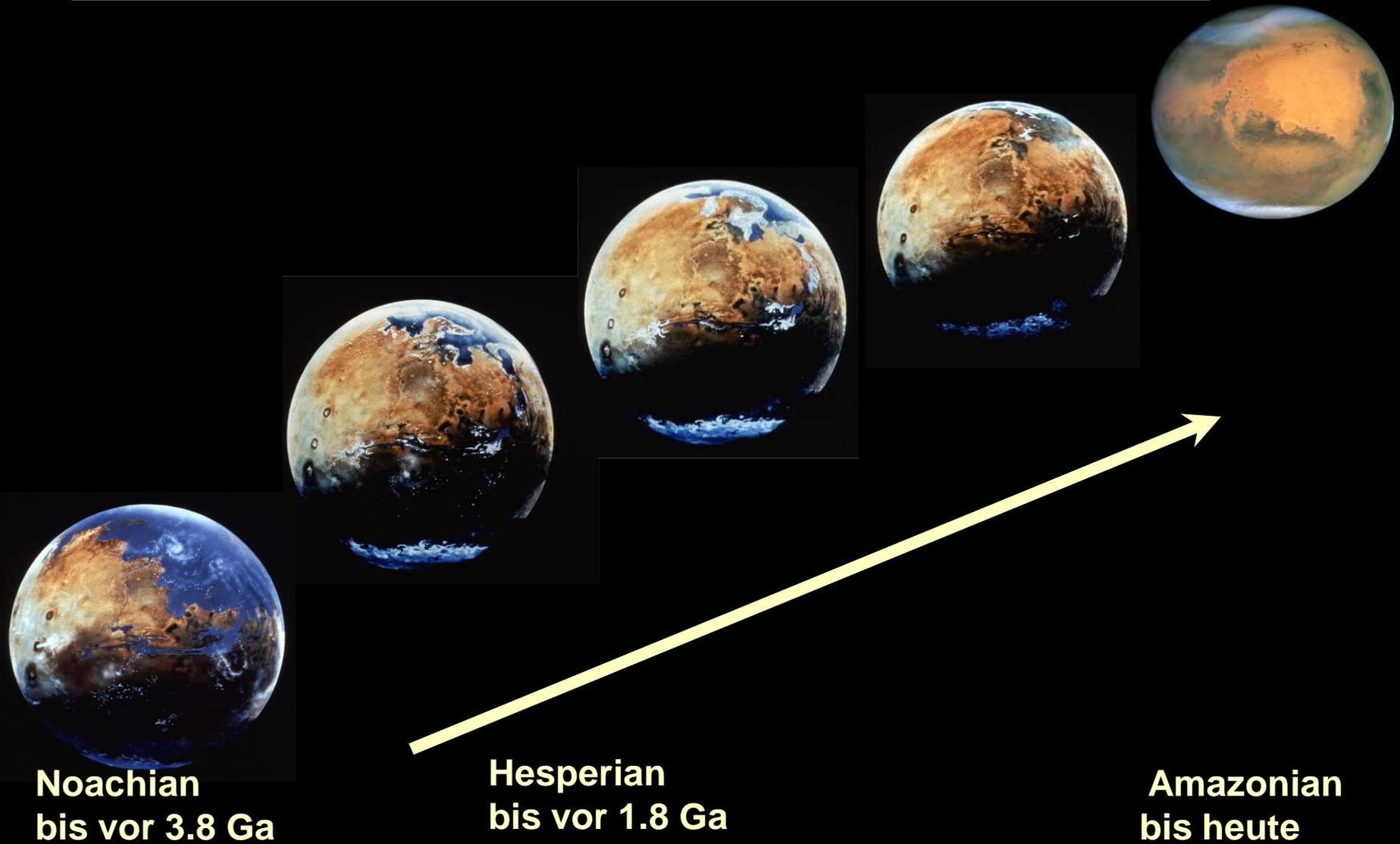
20. Mai 2003

vor mehr als > 3.8 Ga



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

# Ist oder war Mars habitabel?



# War Mars habitabel?

---



**Epoche 1 : Noachian**  
bis vor ~ 3.8 Ga  
warm und feucht mit  
Flüssen und evt.  
flachen Ozeanen

## **Postulierte Mars-Biosphäre**

- **Leben entstand ähnlich wie auf der frühen Erde**
- **vielfältige Mikrowenwelt**

*McKay and Davis, 1991*

# Wwar Mars habitabel?

---

## Terrestrische Beispiele



**Epoche 2:** Frühes Hesperian  
vor 3.8 - 3.1 Ga  
die Eiszeit beginnt;  
flüssiges Wasser nur  
noch sporadisch

### **Postulierte Mars-Biosphäre**

- Plankton unter dem Eis
- benthische Mikroben am Boden eisbedeckter Seen
- im Permafrost
- Ausweitung der Artenvielfalt

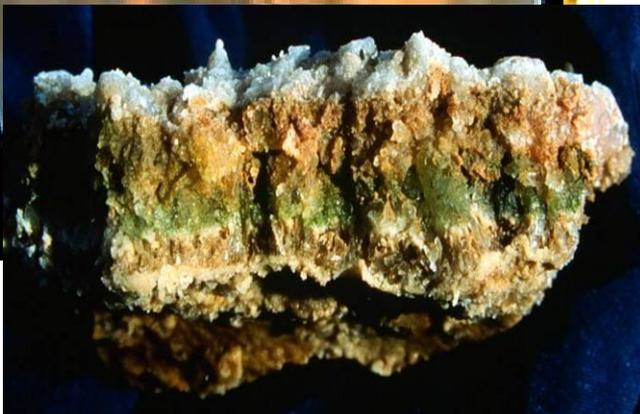
# War Mars habitabel?

## Terrestrische Beispiele



Sandstein  
Antarctica

Evaporit  
Baja  
California



**Epoch 3 : Spätes Hesperian  
bis vor 1,8 Milliarden Jahren,  
flüssiges Wasser nur noch**

- in porösem Gestein und
- in größeren Tiefen

## **Postulierte Mars-Biosphäre**

- Rückzug in „Oasen“
  - endolithisch
  - endoevaporitisch
  - unterirdische  
„Steinfresser“





# Ist Mars habitabel?

---

Epoche 4: Amazonian  
seit 1,8 Ga

hohe Strahlung: UV & kosmische  
Luftdruck: Tripelpunkt des Wassers,  
flüssiges Wasser nur im Untergrund

Postulierte Mars-Biosphäre

entweder ausgestorben oder in  
unterirdischen „Oasen“:

- unterirdische  
Mikrobengesellschaften
- im Permafrost
- in unterirdischen hydrothermalen  
Quellen?

Mars von  
Pathfinder

# Ist Mars habitabel?

---

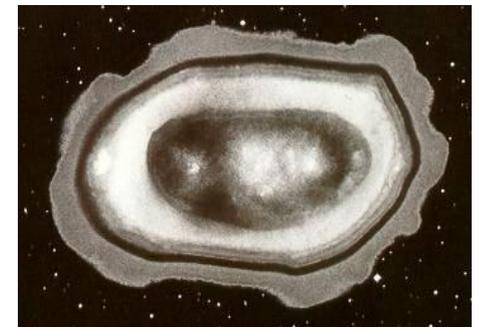


**Episodische Wasserausbrüche  
während der gesamten  
Marsgeschichte**

**Postulierte Mars-Biosphäre  
Dauerformen als  
“Überlebenskünstler”**

- Bakteriensporen

**Spore von  
*Bacillus subtilis***



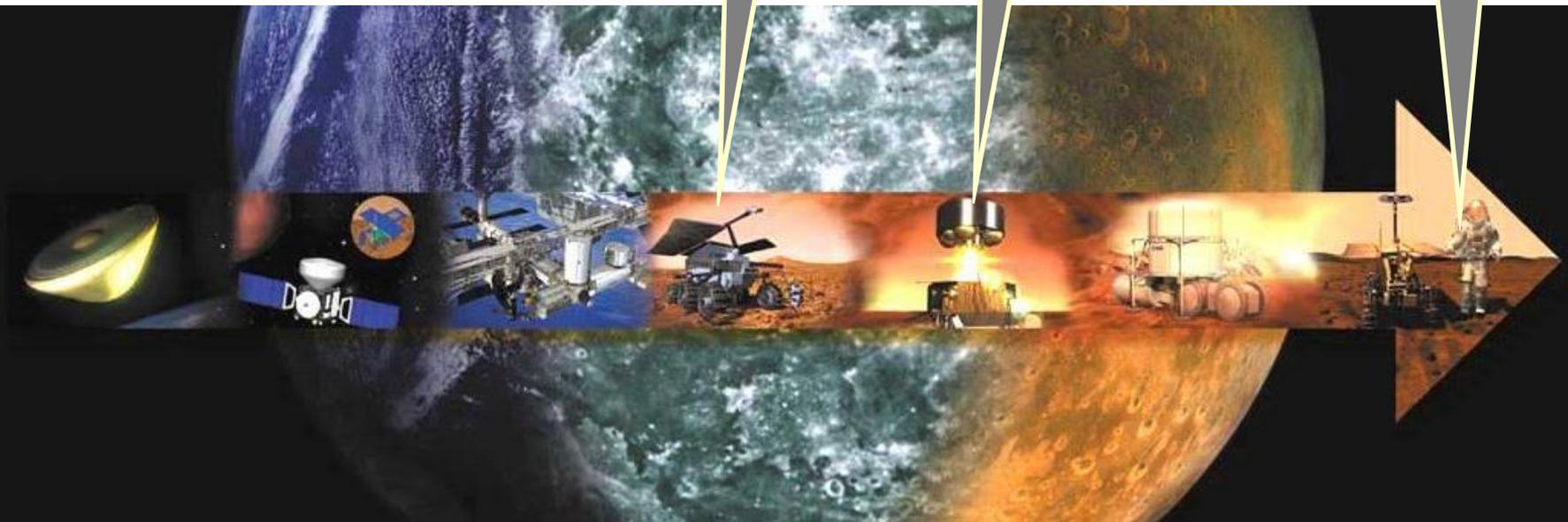
# ESA/NASA gemeinsames Mars Programm

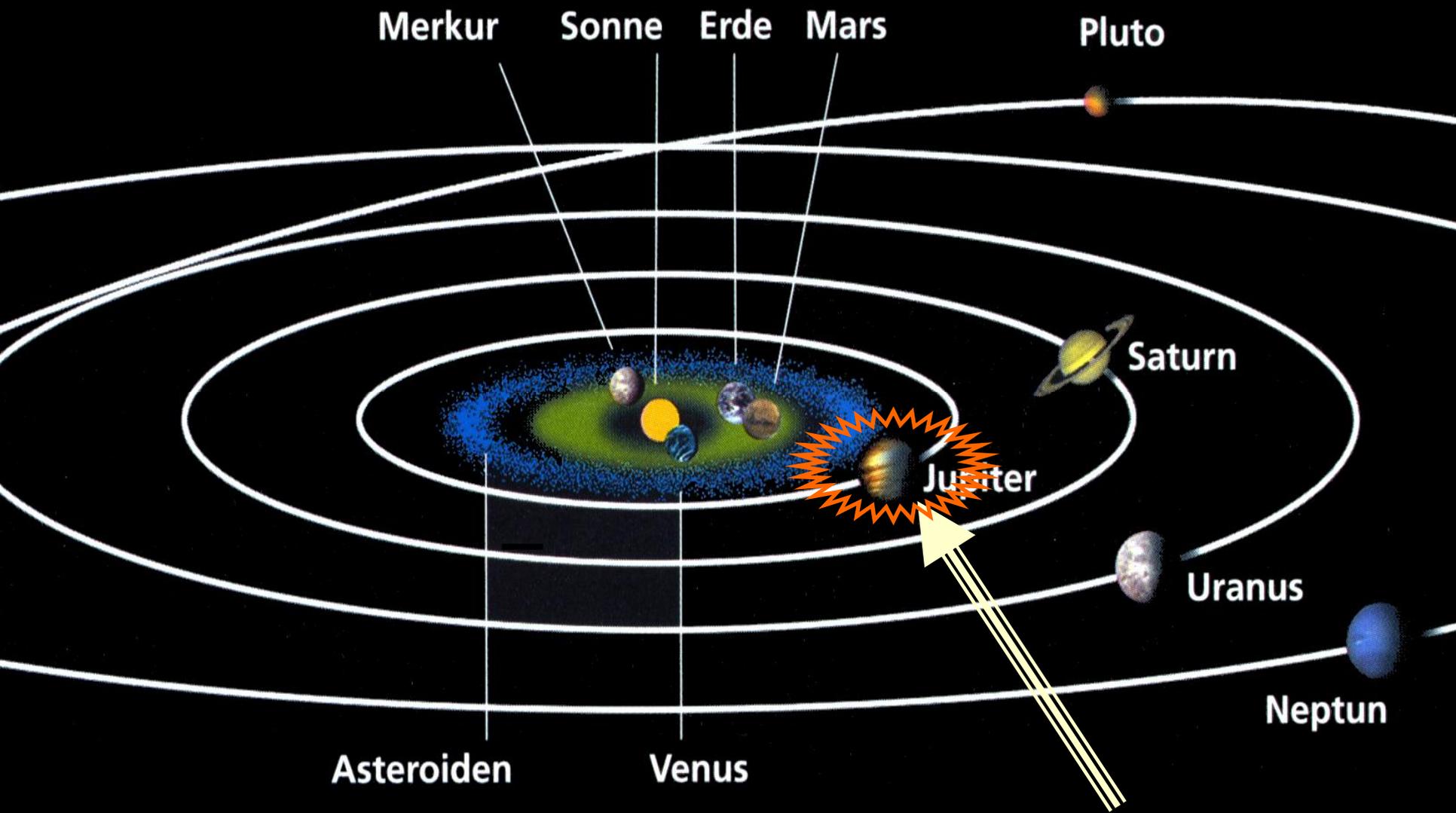
Auf der Suche nach Anzeichen von marsianem Leben

ExoMars

Mars Sample  
Return

Bemannte  
Mission



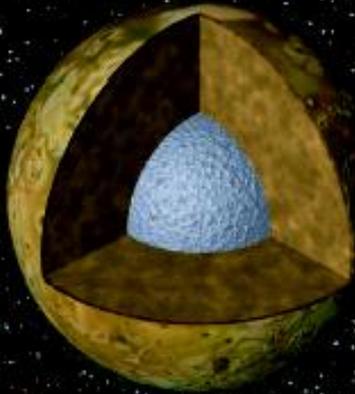


## Habitable Zone um Jupiter ?

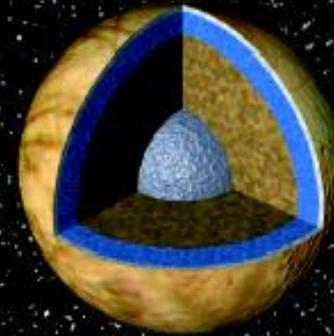


# Die 4 Gallileischen Monde des Jupiter

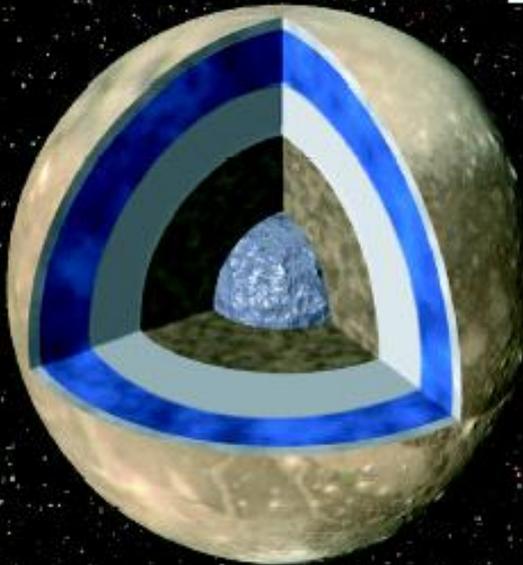
Io



Europa



-  *iron-rich core*
-  *silicate mantle*
-  *ocean*
-  *ice*



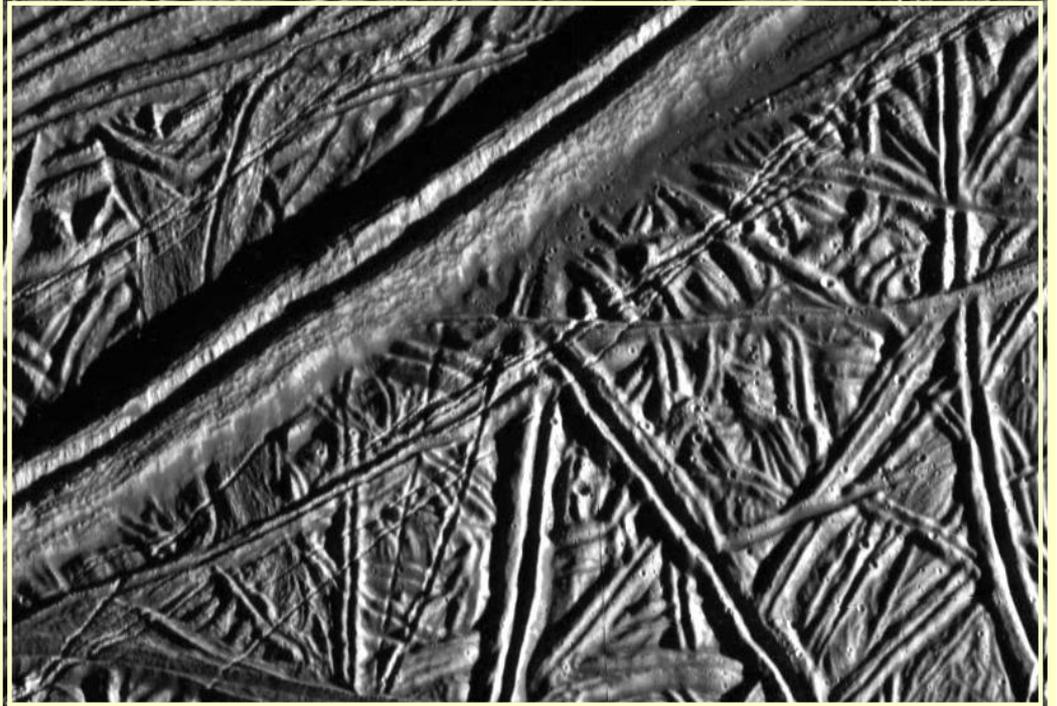
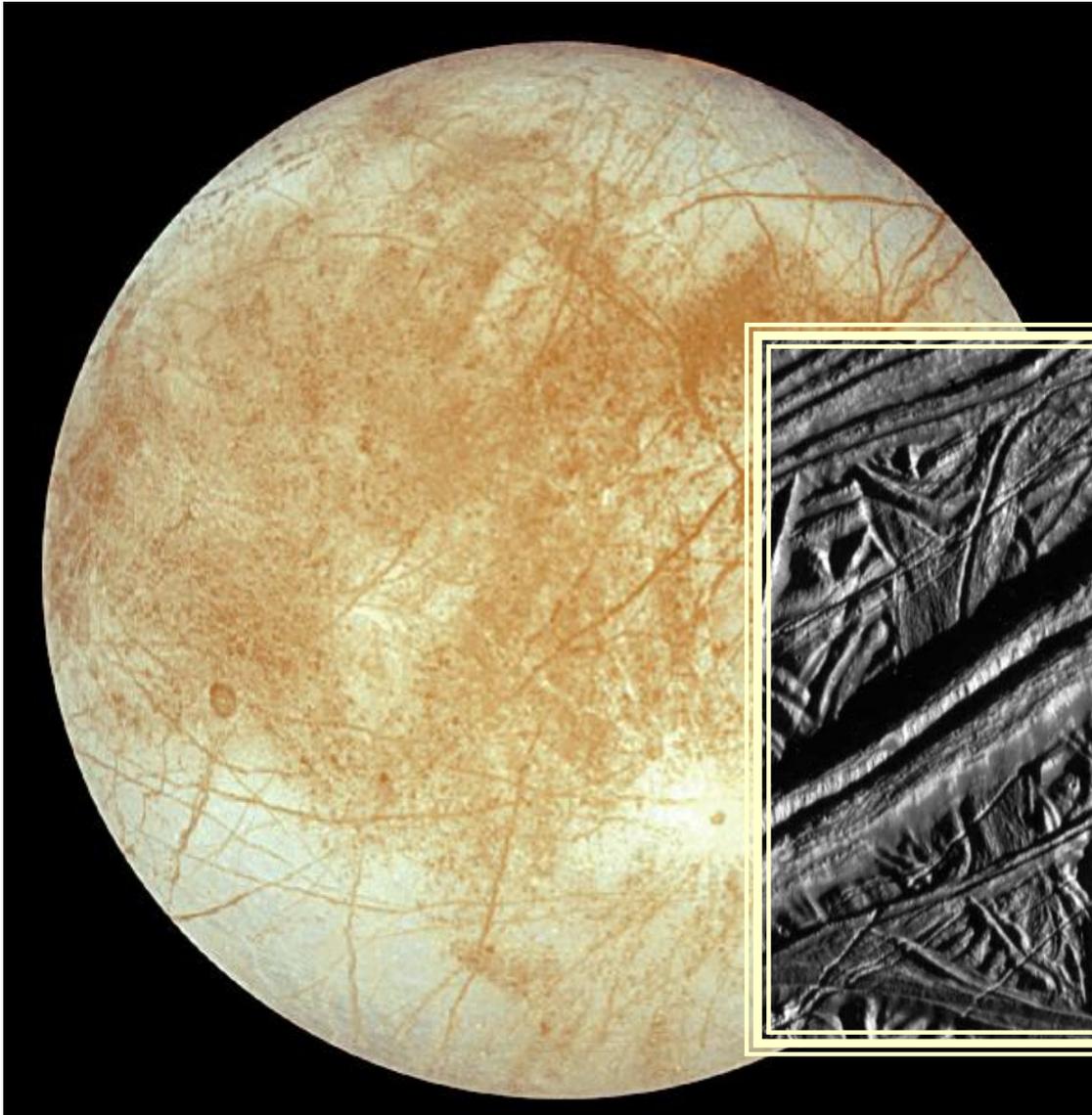
Ganymede



Callisto

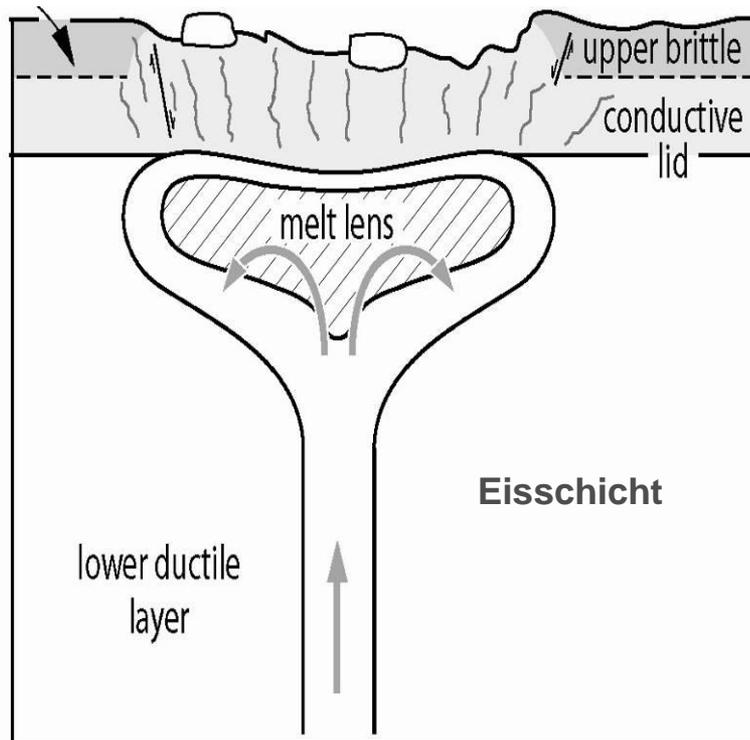
# Jupiter's Mond Europa: Habitabilität ?

---

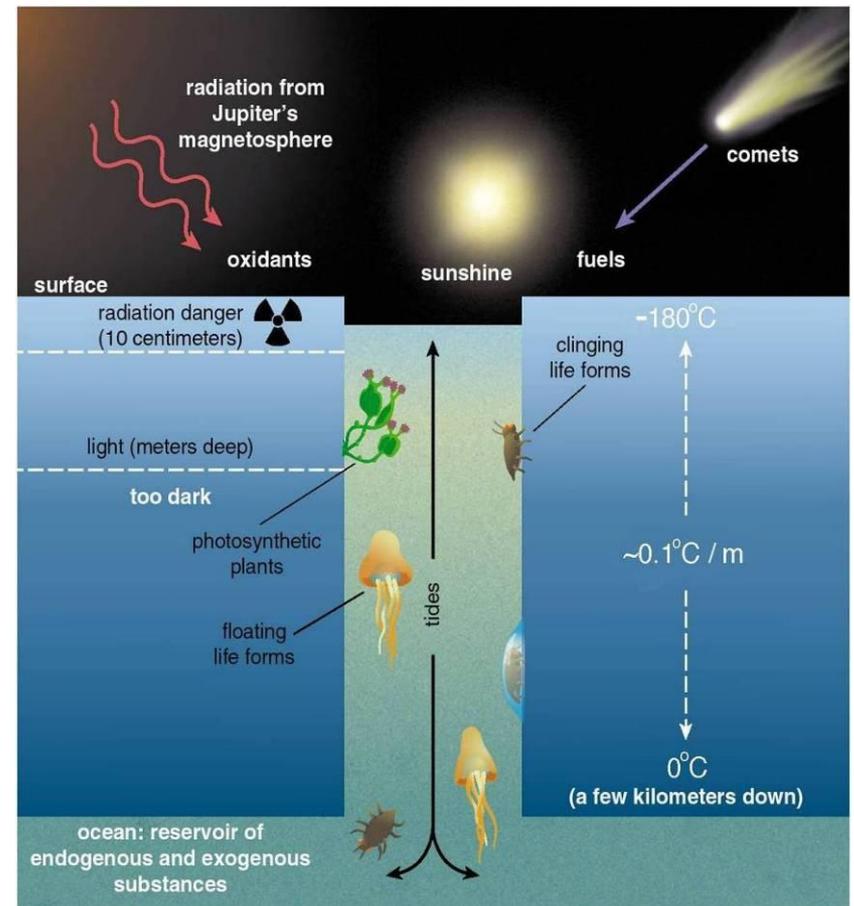


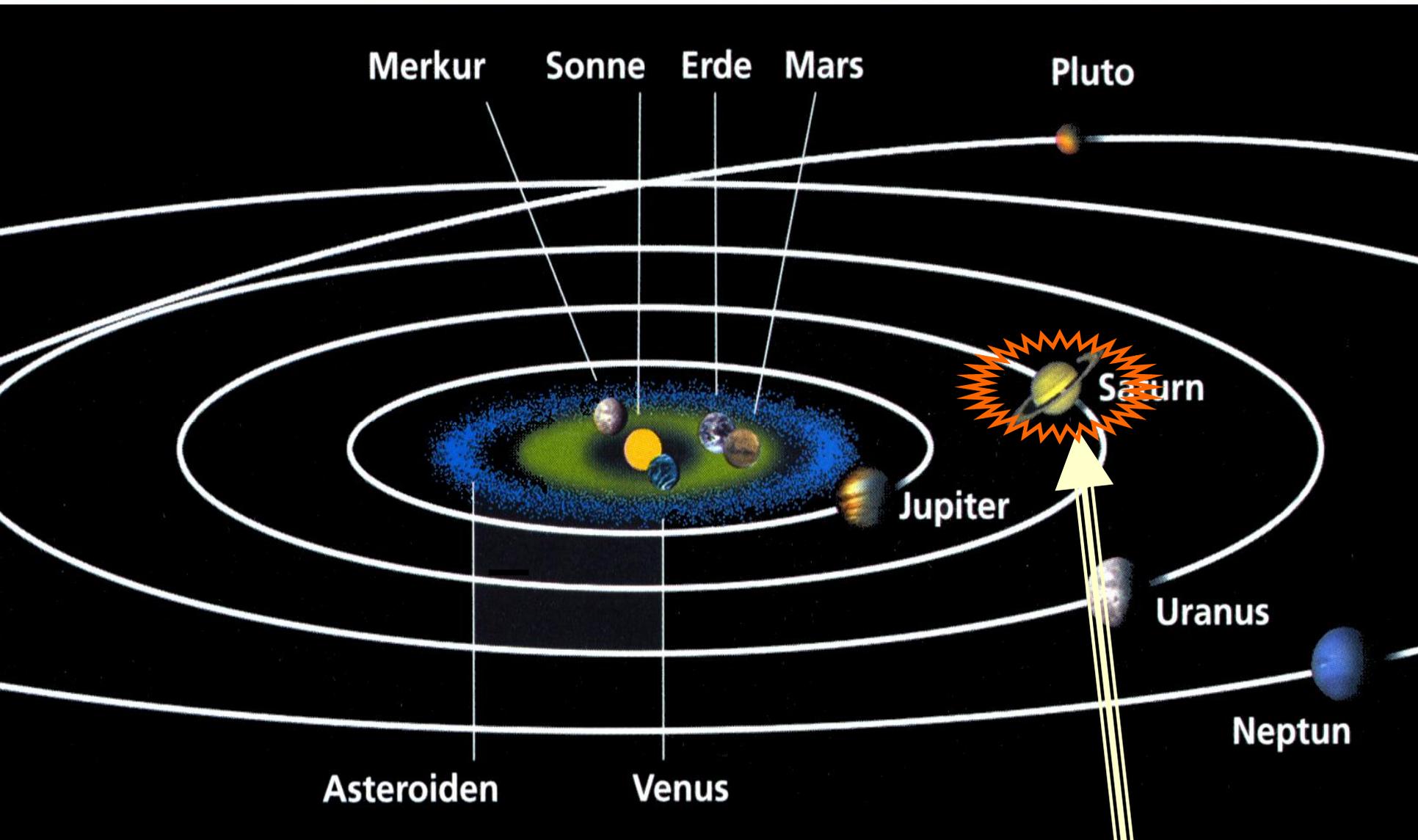
# Jupiter's Mond Europa: Ozean unter dem Eispanzer

## Modell der Spaltenbildung



## Habitabilität im Ozean und den Eisspalten von Europa ?

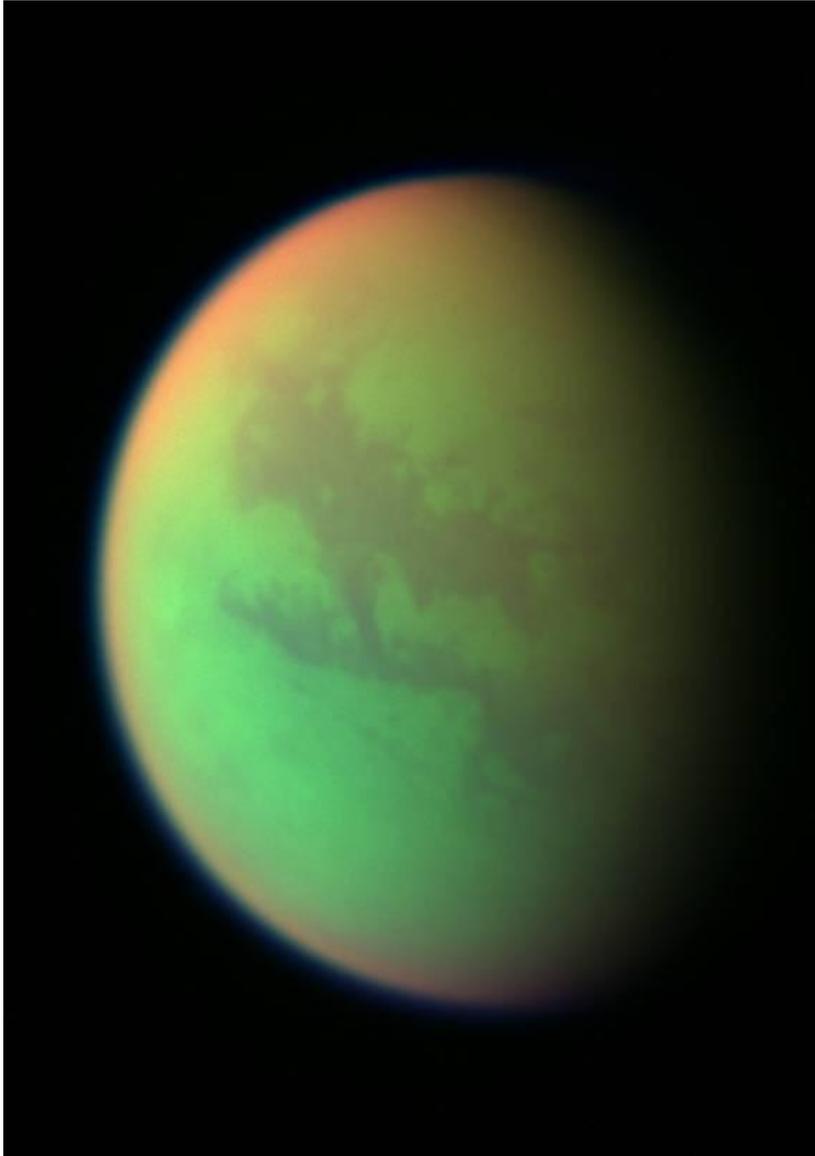




## Habitable Zone um Saturn ?

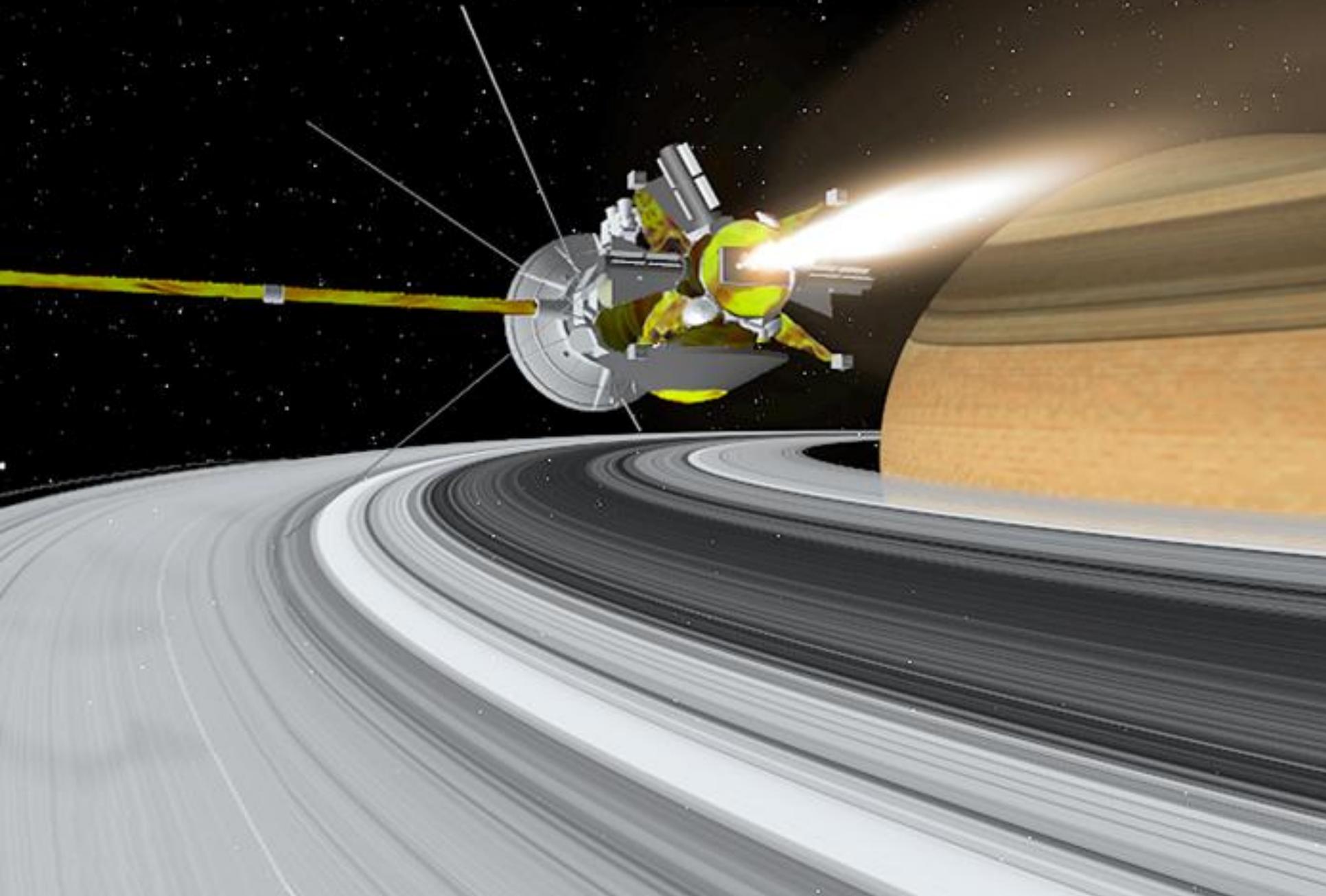


# Saturn's Mond Titan: Einziger Mond mit Atmosphäre



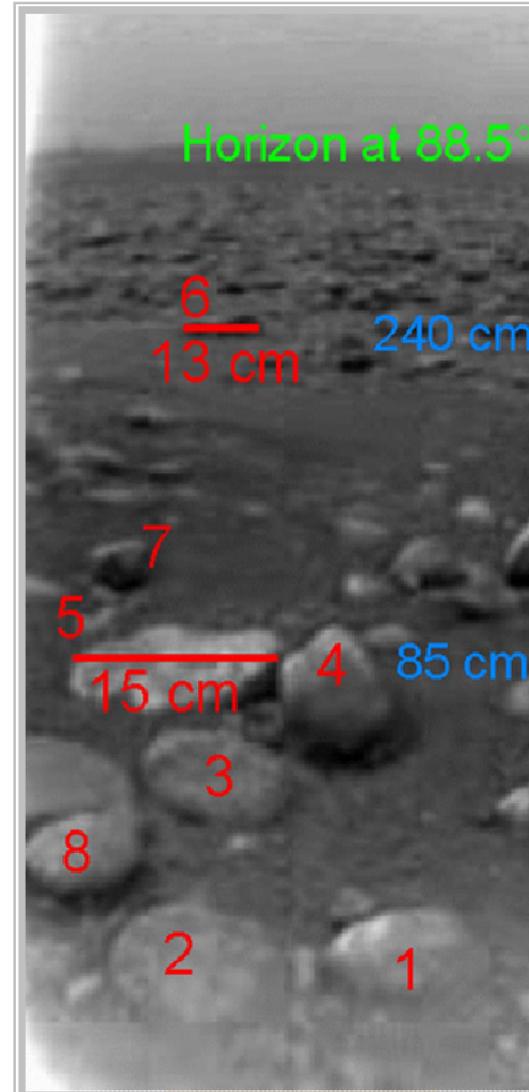
- Radius : 2575 km, 40% der Erde
- Mittler Temperatur: -180 °C
- Atmosphäre: N<sub>2</sub> - CH<sub>4</sub>
- Druck: 1500 hPa

**1. Juli 2004 : Sonde Cassini tritt in Saturn Orbit ein**



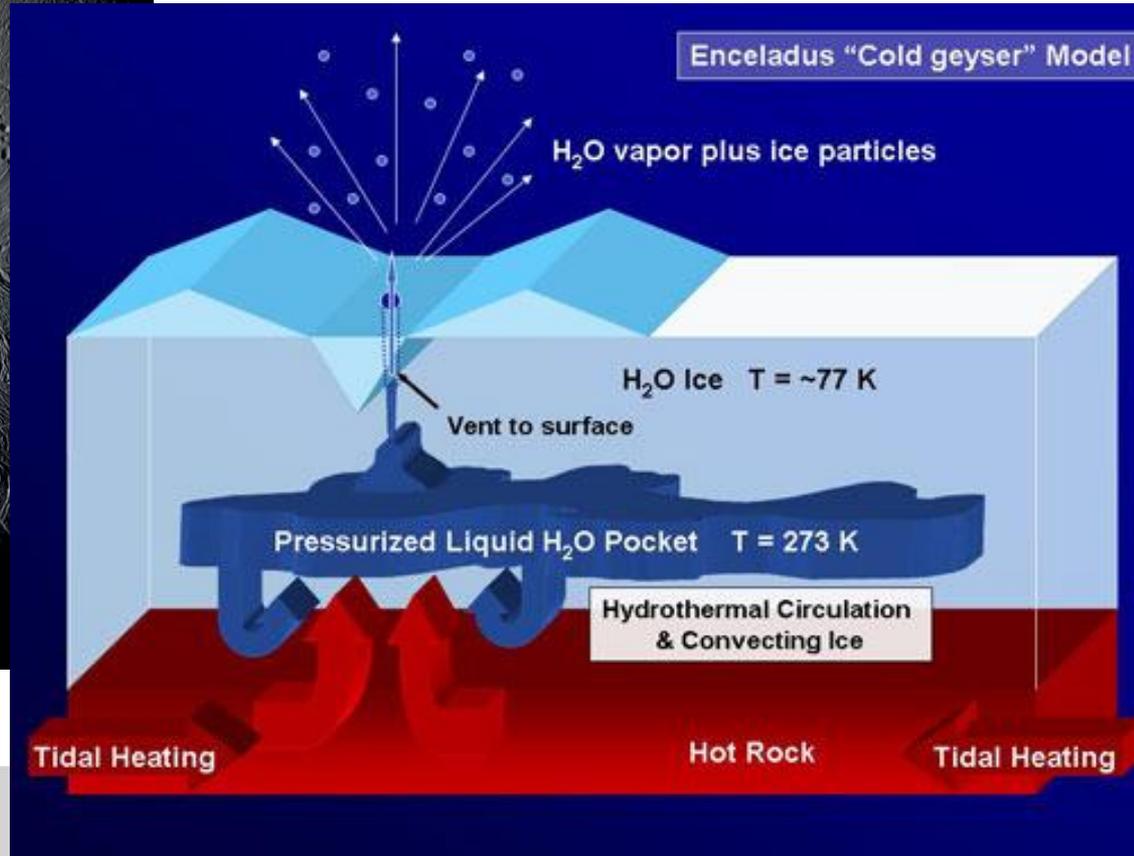
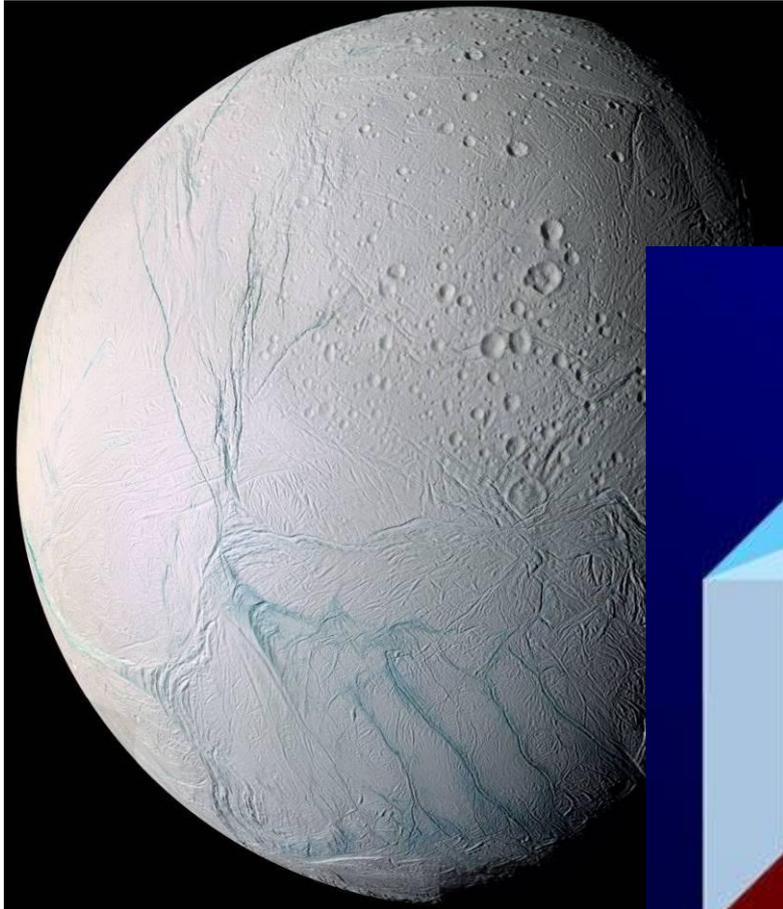
# Huygens Sonde landete auf Titan am 14. Januar 2005

- **Steine aus Wasser-Eis und Methan**
- **Ozeane und Flüsse aus Methan und Äthan**
- **Komplexe organische Verbindungen**
- **Modell der frühen Erde, bevor das Leben entstand ?**

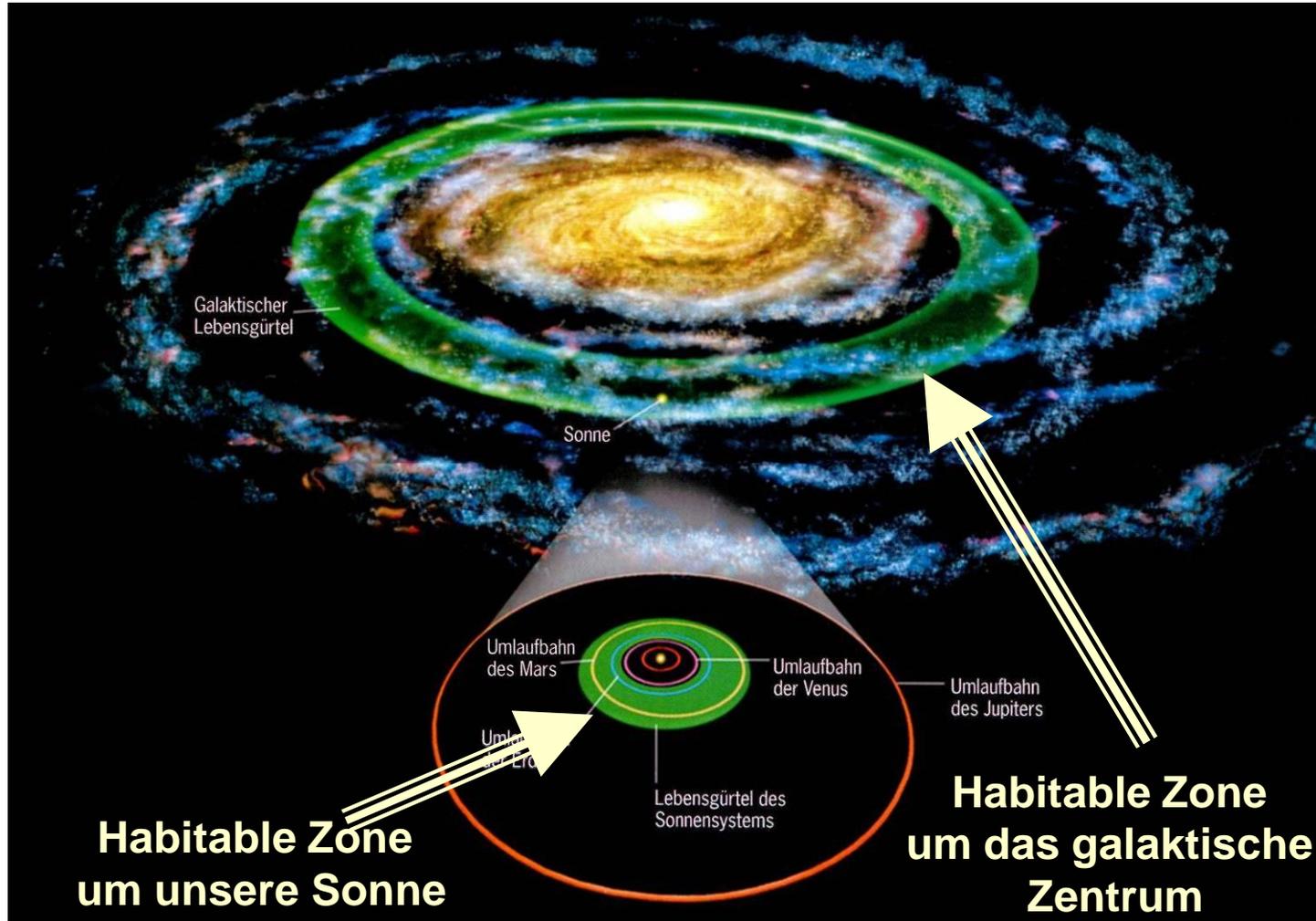


# Saturn's Mond Enceladus: Kalte Geysire

**Cryo-Vulkanismus:**  
 $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NaCl}$



# Habitable Zone in unserer Galaxie



# Habitabilität in unserer Galaxie: Voraussetzungen

---

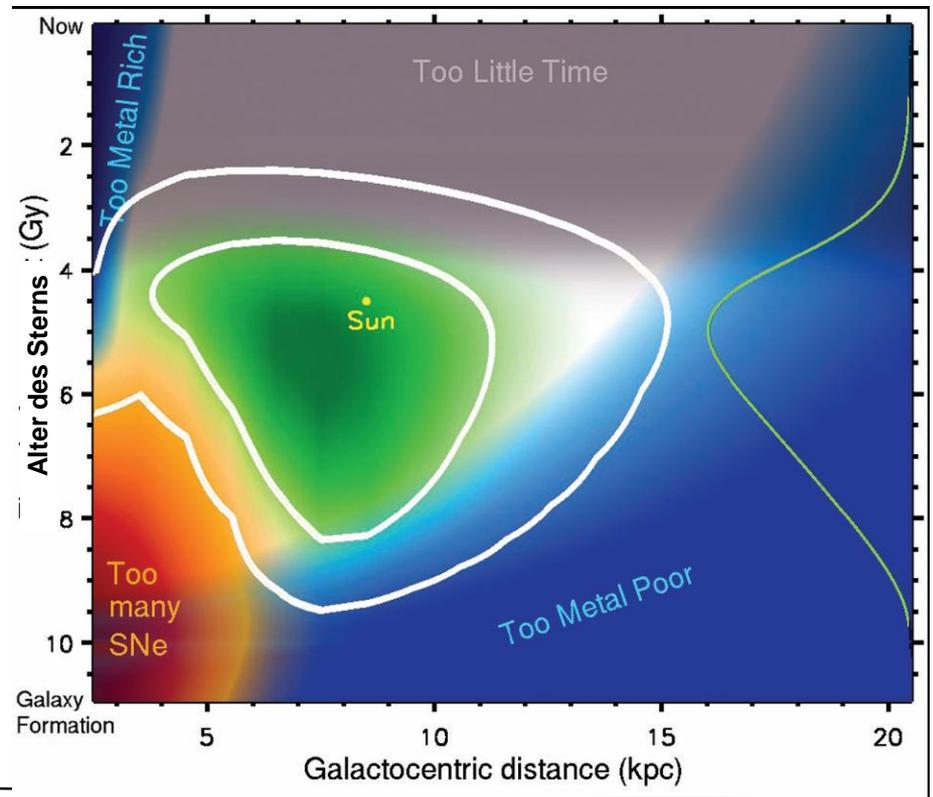
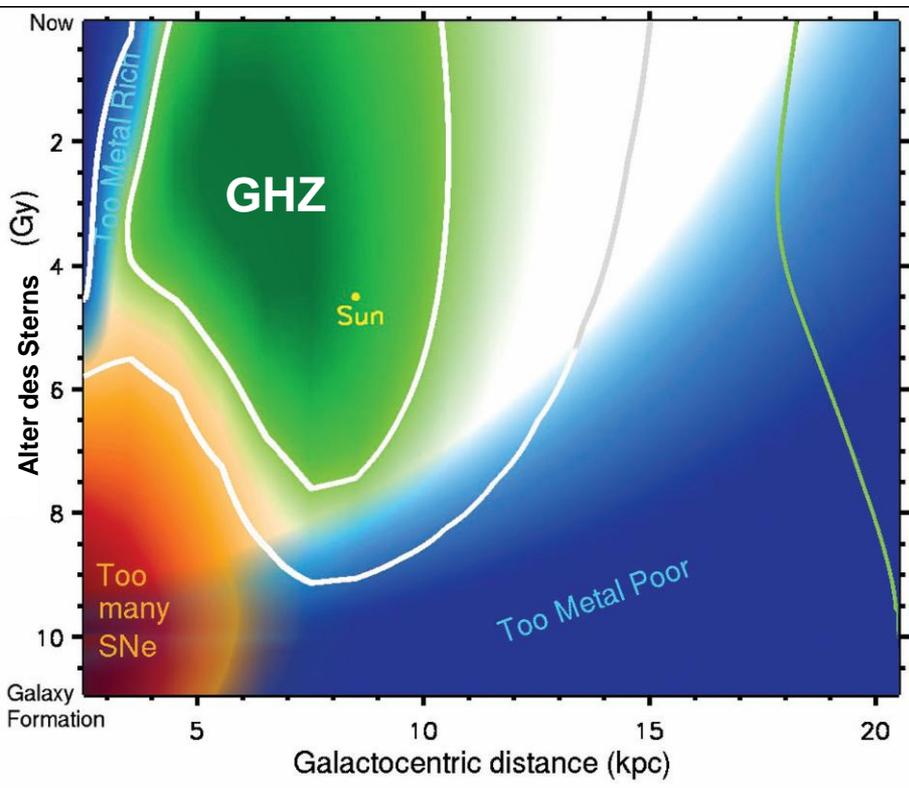


- *Vorhandensein eines Zentralsterns*
- *Genügend schwere Elemente zur Bildung von terrestrischen Planeten*
- *Keine Supernovae in unmittelbarer Nähe*
- *Ausreichend Zeit für eine biologische Evolution*

***Lineweaver, Fenner and Gibson, 2004, Science, 303, 59***



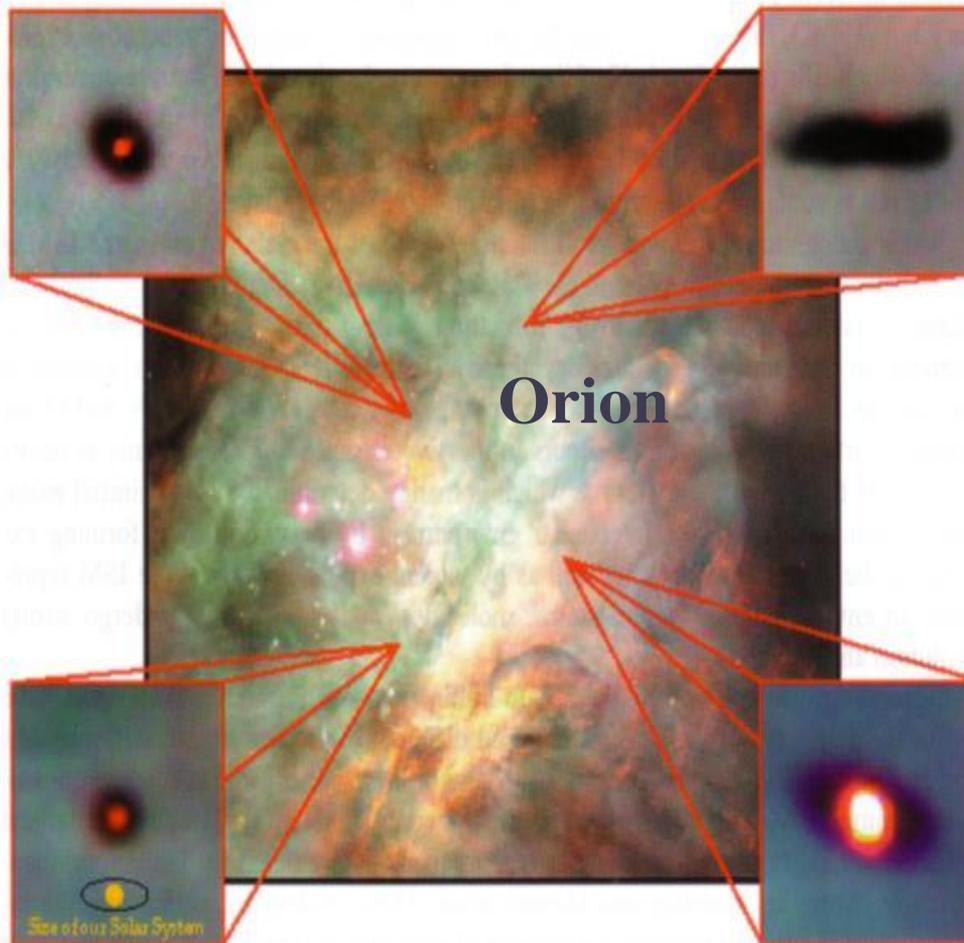
# Galaktische habitable Zone: GHZ



**GHZ für einfaches mikrobielles Leben**

**GHZ für komplexes multizelluläres (intelligentes) Leben**

# Habitabilität in unserer Galaxie



**519 extrasolare Planeten  
entdeckt (31. Januar 2011)**

- Planetenbildung ist ein normaler Vorgang in unserer Galaxie
- Die meisten Planeten haben Riesenmassen (Jupiter) und sind nahe am Stern
- Kürzlich Planeten mit kleineren Massen entdeckt (Neptun, Uranus)
- Gibt es eine zweite Erde?

# Habitabilität in unserer Galaxie

## Gibt es eine zweite Erde?



The Planetary System in Gliese 581  
(Artist's Impression)



ESO Press Photo 22a/07 (25 April 2007)

This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.

in der Helmholtz-Gemeinschaft

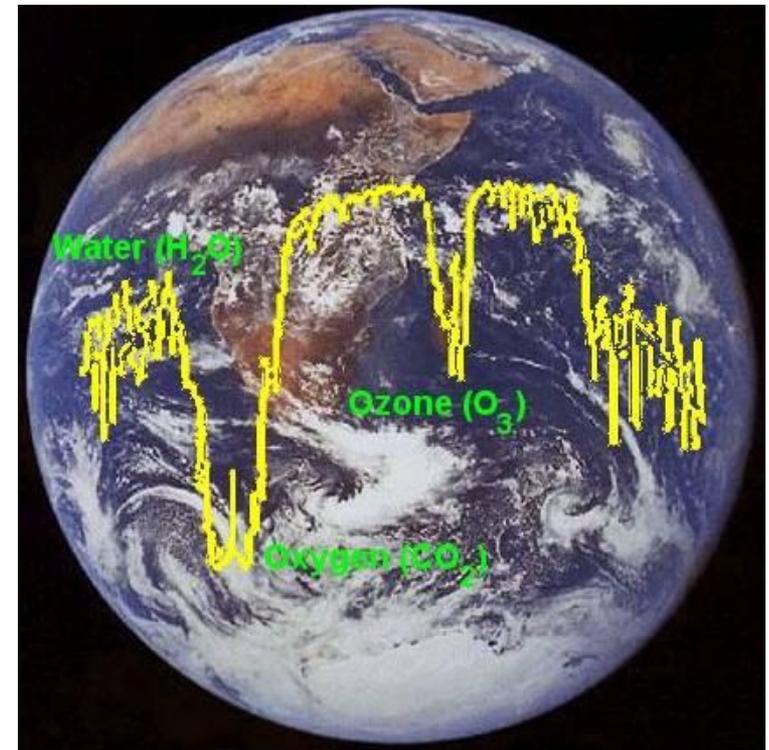
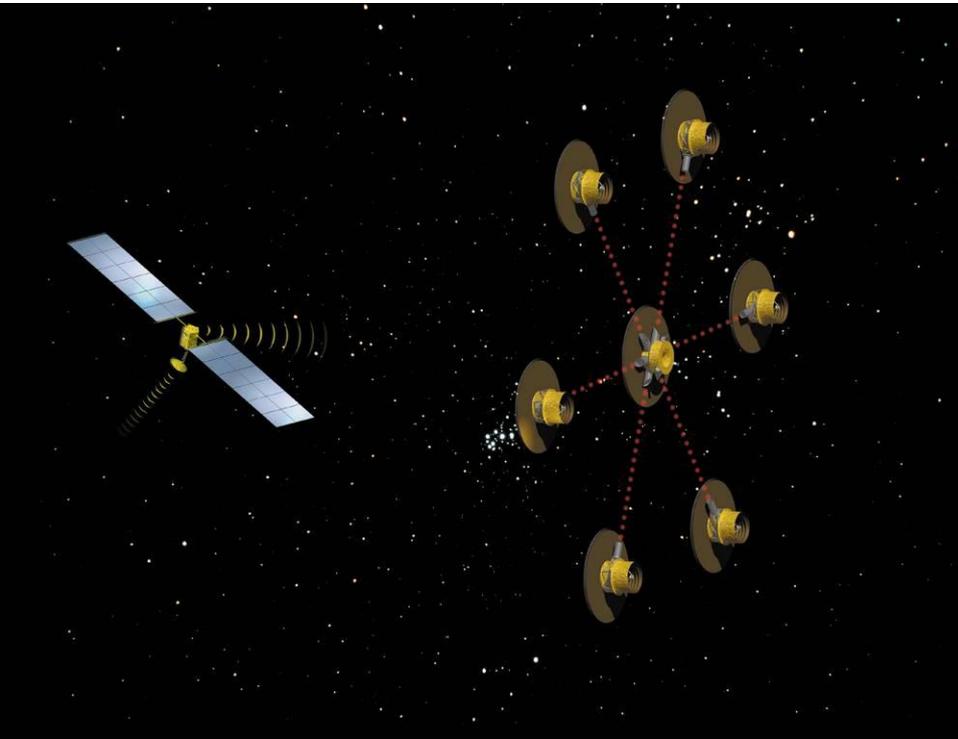
## Planet Gliese 581c, erster erdähnlicher Planet

- Radius: 1.5 x R Erde
- Masse: 5 x M Erde
- Abstand: 20.5 Lichtjahre
- Orbit: 13 d
  
- Oberflächentemperatur:  
0 - 40 °C

# Habitabilität in unserer Galaxie

Darwin

Interferometrie zur Entdeckung von erdähnlichen Planeten und Charakterisierung von Bio- Signalen



**100 - 200 Milliarden Sterne in unserer Milchstraße**  
**Mehr als 100 Milliarden Galaxien im sichtbaren Universum**  
**Sind wir allein?**



# Auf der Suche nach Signalen von Zivilisationen

---

**Drake Formel:**

$$P_a = f_g f_p n_e f_l f_j f_a I$$

**$P_a$  = Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Zivilisationen**

**$f_g$  = Anteil sonnenähnlicher Sterne**

**$f_p$  = Anteil solcher Sterne mit Planetensystem**

**$n_e$  = Anzahl erdähnlicher Planeten in solchem System**

**$f_l$  = Anteil solcher Planeten, auf den Leben entstanden ist**

**$f_j$  = Anteil solcher Planeten mit intelligenten Zivilisationen**

**$f_a$  = Anteil intelligenter Zivilisationen mit entwickelter Technik**

**$I$  = Lebenszeit einer solchen Zivilisation**



# Auf der Suche nach Signalen von Zivilisationen

**Drake Formel:**  
$$P_a = f_g f_p n_e f_l f_j f_a l$$

$P_a$  = Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Zivilisationen

$f_g$  = Anteil sonnenähnlicher Sterne (Milliarden)

$f_p$  = Anteil solcher Sterne mit Planetensystem (60 Millionen)

$n_e$  = Anzahl erdähnlicher Planeten in solchem System

$f_l$  = Anteil solcher Planeten, auf den Leben entstanden ist

$f_j$  = Anteil solcher Planeten mit intelligenten Zivilisationen

$f_a$  = Anteil intelligenter Zivilisationen mit entwickelter Technik

$l$  = Lebenszeit einer solchen Zivilisation

seti@home



# Astrobiologie

---

## **multidisziplinärer Ansatz:**

- ✓ **Astronomie,**
- ✓ **Planetenforschung,**
- ✓ **Geologie,**
- ✓ **Paläontologie,**
- ✓ **Chemie**
- ✓ **Biologie**

**Erforschung von Ursprung, Evolution and  
Ausbreitung des Lebens im Kontext der kosmischen  
Evolution**

**⇒ zu einer universellen Definition von Leben**

EANA

# EUROPEAN ASTROBIOLOGY NETWORK ASSOCIATION



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

<http://www.astrobiologia.pl/eana/>



## 11. European Workshop on Astrobiology

11.-14. Juli 2011

Köln

<http://www.eana2011.de/>