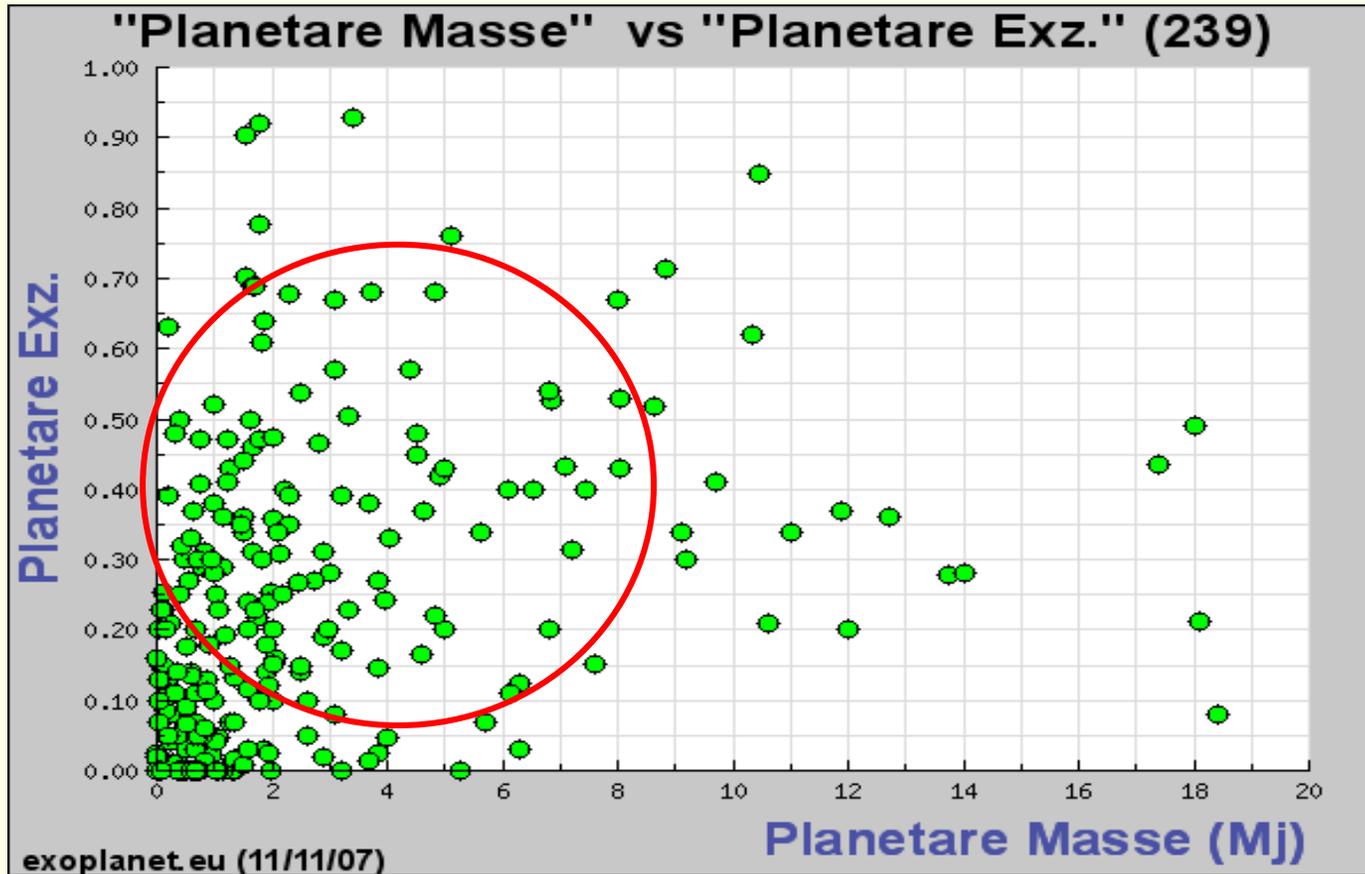




Leben auf Planeten mit exzentrischen Orbits

excursions beyond the habitable zone

Extrasolare Planeten

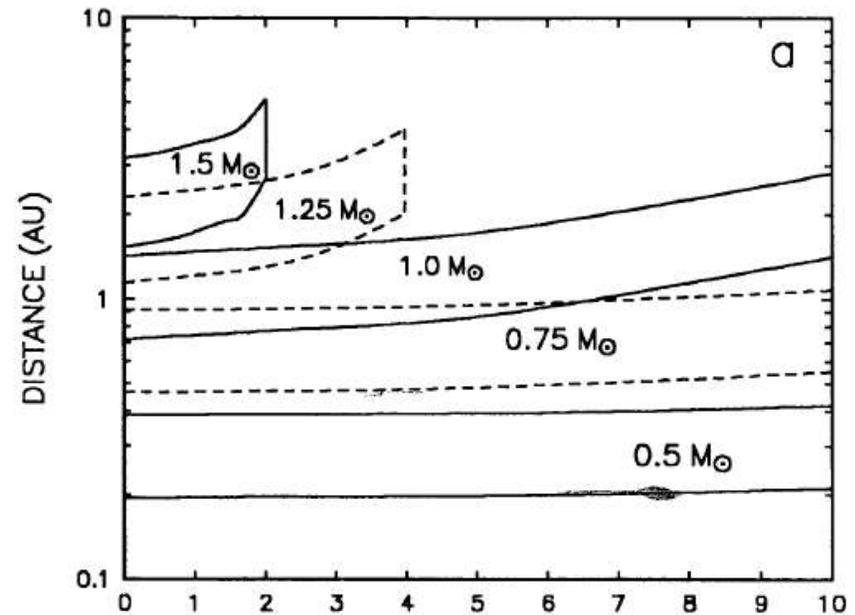


Leben auf Exoplaneten?

Kriterien für Habitabilität

Nach Kasting 1993:

- Vorhandensein von flüssigem Wasser
- Planet muss sich für Entwicklung dauerhaft in der habitablen Zone (HZ) befinden
- CHZ = continuously habitable zone = Bereich der über mehrere Jahrmilliarden in der HZ liegt (Sternentwicklung!)



Klimamechanismen

- Temperaturextreme gedämpft durch Carbonat-Silicat-Zyklus → beeinflusst die Menge an CO₂ in Atmosphäre
- Rate von CO₂ Ablagerung in Erdkruste ist temperaturabhängig
- Planeten nahe dem äußeren Rand der HZ sollten also eine dichte CO₂ Atmosphäre aufweisen → effizientere Wärmeleitung und -Speicherung

Carbonat-Silikat-Zyklus

- Zusammenhang von atmosphärischem CO₂-Anteil und Oberflächentemperatur → CO₂ Niveau in Atm. steigt/sinkt mit fallenden/steigenden Temperaturen
- Atm. CO₂ verringert sich → Verwitterung von Kalzium- und Magnesiumsilikaten im Gestein → Einlagerung in Sedimenten
- Kohlenstoff in 400 Millionen Jahren aufgebraucht!

...Carbonat-Silikat-Zyklus

- Plattenverschiebungen → Sedimente unter großem Druck und hoher T
- Bildung von Kalziumsilikaten und gasförmigem CO₂
- Ausstoß durch Vulkane
- Erhöhung des atm. CO₂

...Carbonat-Silikat-Zyklus

Negatives Feedback

- Verwitterung braucht flüssiges Wasser
- Gefrorene Ozeane → Verwitterung stoppt
→ Ansammlung von CO₂ in Atmosphäre
- Bildung einer dichten CO₂ Atm. →
Treibhauseffekt → Eis schmilzt
- Realistisch: CO₂-Erhöhung schon vor
Einfrieren der Ozeane → globale
Vereisung wird verhindert
- erklärt die Stabilität unseres Klimas trotz
anfänglich schwächerer Sonnenstrahlung

Bedingungen für Grenzen der HZ

- CO₂-Zyklus nicht mehr möglich, wenn CO₂ kondensiert (äußere Grenze)
- Konsequenzen
 - CO₂-Wolken → höhere Albedo → Abkühlung
 - Verringerung des Treibhauseffekts
- Wasserverlust in feuchter Stratosphäre (Photolyse)

TABLE I
Critical Orbital Distances around Our Sun for Different Planetary Parameters

Case	Inner edge		Outer edge	
	Runaway greenhouse	Water loss	1 st CO ₂ condensation	Maximum greenhouse
Standard model	0.84	0.95	1.37	1.67
Mars-sized planet*	0.88	0.98	1.49	1.67
Big planet**	0.81	0.91	1.29	1.64
pN ₂ = 0.1 bar	0.84	0.96	1.36	1.67
pN ₂ = 10 bars	0.84	0.88	1.39	1.69
pCO ₂ = 3 x 10 ⁻³ bar	0.84	0.94		
pCO ₂ = 3 x 10 ⁻³ bar	0.84	0.97		
pCO ₂ = 3 x 10 ⁻² bar	0.84	0.99		
pCO ₂ = 0.3 bar	0.84	1.00		
pCO ₂ = 3 bar	0.84	0.95		
pCO ₂ = 30 bar	0.84	0.90		

* Surface gravity = 3.73 m sec⁻².

** Surface gravity = 25.0 m sec⁻².

Grenzen der solaren HZ nach Kasting

- innere Grenze zwischen 0.95 AU (Wasserdampf bildet sich in der Stratosphäre), und 0.85 AU (Temperaturanstieg infolge eines runaway greenhouse-Effekts)
- äußere Grenze bei 1.37 AU (Bildung von CO₂-Wolken)
- Grenzen der CHZ zwischen 0.95 und 1.15 AU

Elliptische Orbits in der HZ (Williams & Pollard, 2002)

- ein Drittel der entdeckten Exoplaneten besitzt Exzentrizitäten > 0.4
- d.h. der Planet verlässt in jedem Orbit die habitable Zone
- nach konservativer Ansicht nicht habitabel, aber:
- Ist Leben vielleicht auch dort möglich?

Ausdehnung der Grenzen der HZ

- äußere Grenze kann sich unter bestimmten Bedingungen nach außen verschieben:
 - Bedeckung mit CO₂-Wolken → Erwärmung des Planeten durch Streuung im Infraroten
 - Unter optimalen Bedingungen könnte ein Planet bis zu 2.4 AU warm genug sein

Überlegung:

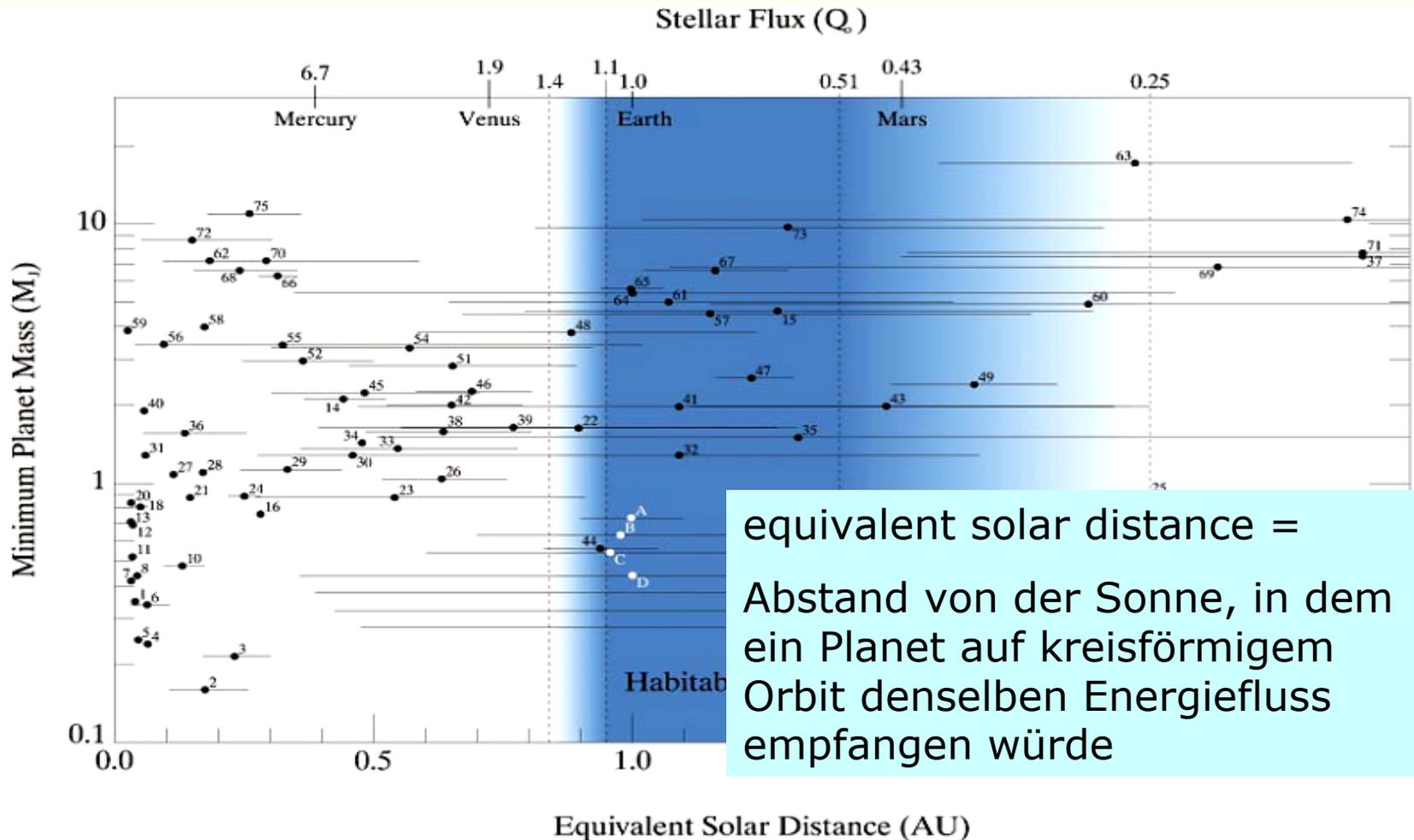
Wann wäre solch ein Planet habitabel?

- trotz der Extrembedingungen in Peri- und Apoastron könnten globale Vereisung oder runaway greenhouse vermieden werden
- wenn der *gemittelte Energiefluss* vom Stern dem quasi konstanten Energiefluss der Sonne auf die Erde entspricht ($\sim 1370 \text{ W/m}^2$)

Stellarer Fluss für exzentrische Orbits

- mittlerer Fluss über einen Orbit: $\langle F \rangle = \frac{L}{4\pi a^2(1-e^2)^{1/2}}$
- durchschnittlicher Energiefluss STEIGT mit höherer Exzentrizität
- kurzzeitige Schwankungen können durch diverse atmosphärische Mechanismen ausgeglichen werden

Planetensysteme und ihre HZ



Berechnungsmodelle

- Simulation eines erdähnlichen Planeten in exzentrischen Orbits
- 3D Klimamodell GENESIS2 (Thompson & Pollard 1997)
 - eindimensionales Energiebilanz-Modell EBM (Williams & Kasting 1997)

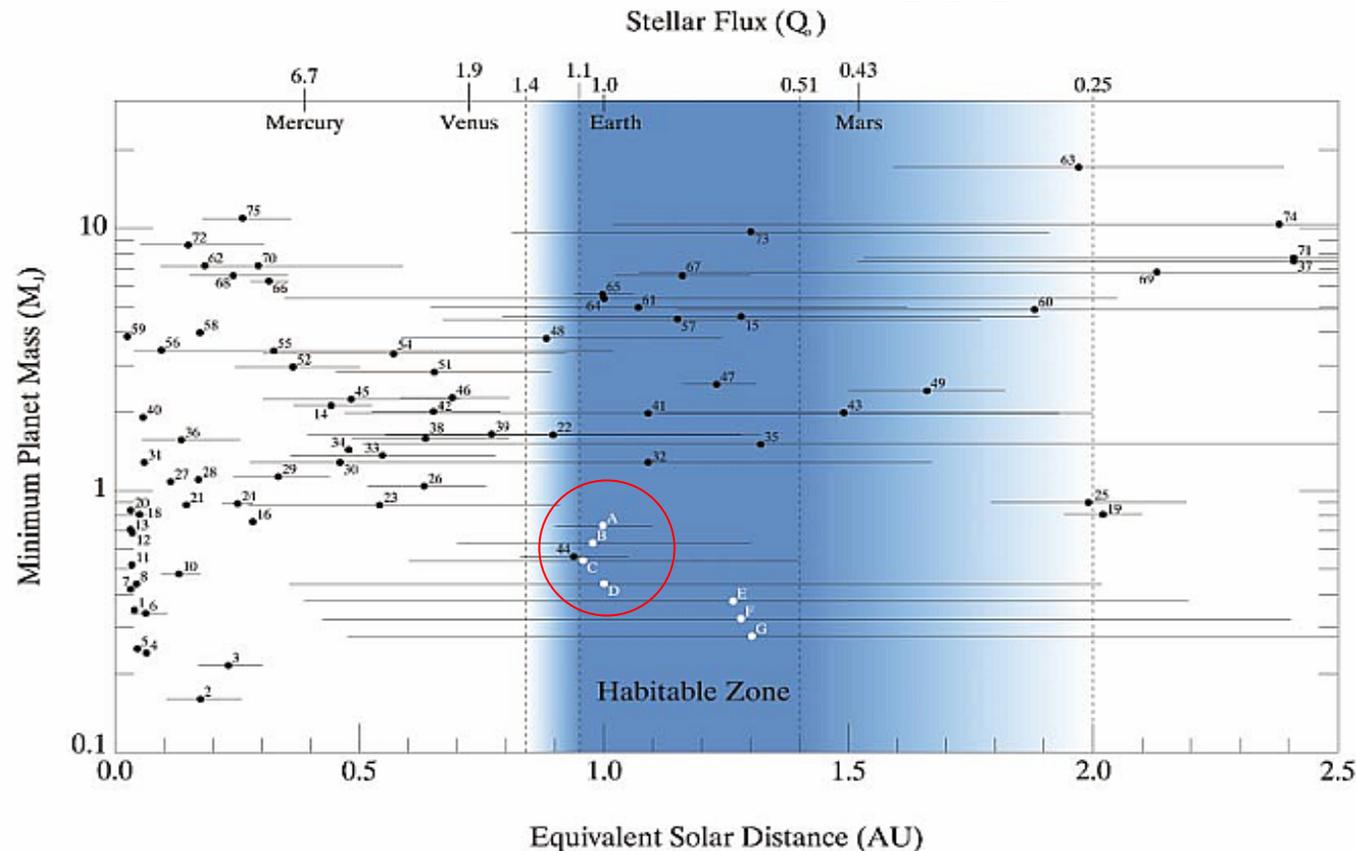
GENESIS2 Klimamodell

- atmosphärische Zirkulation
- simuliert Oberfläche mit Vegetation, Erde, Schnee und Eis mit $2^\circ \times 2^\circ$ Auflösung
- fix: $a=1.0$ AU, $P=365$ d, $\varepsilon=23.45^\circ$
Rotationsachse, Topographie und atm. Zusammensetzung wie auf der Erde
- variable Sonnenleuchtkraft → verschiedene Positionen innerhalb der HZ
- 4 Simulationen mit $e=0.1, 0.3, 0.4, 0.7$

Erhöhung der Exzentrizität auf 0.4 GCM runs 1-3

Runs	Fig 1	Eccentricity	Luminosity (L_{\odot})	$p\text{CO}_2$ (bars)	T_{ave} ($^{\circ}\text{C}$)
GCM 1	A	0.1	1.00	3.45×10^{-3}	14.90
GCM 2	B	0.3			
GCM 3	C	0.4			
GCM 4	D	0.7			
EBM 1	D	0.7			
EBM 2	D	0.7			
EBM 3	E	0.7			
EBM 4	F	0.7			
EBM 5	G	0.7			

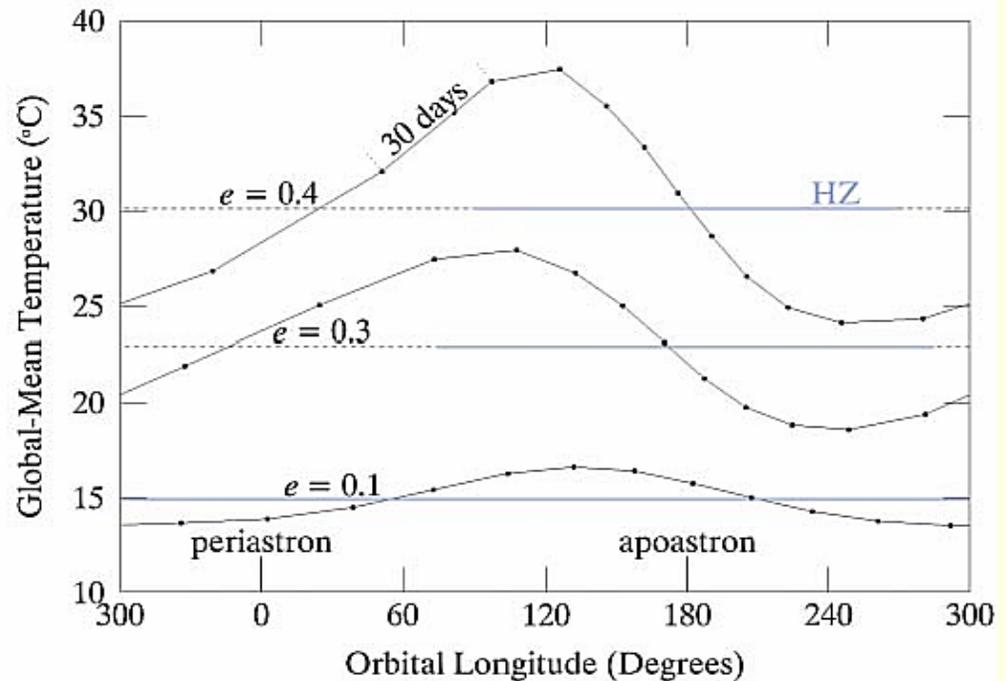
nahe der inneren
Grenze



Resultate: GCM runs 1-3

GCM indicates that the run was performed using the general-circulation climate model (GENESIS II) developed by Thompson & Pollard (1997), and EBM refers to the energy-balance model of Williams & Kasting (1997). Letters used to label the planets in Figure 1 are given in column 2. Orbital semi-major axis and orbital period were 1.0 AU and 365 days for each run. Obliquity (23.45°), continental topography and concentrations of primary gases (with the exception of H_2O and CO_2) in Earth's atmosphere were also maintained at present values. Carbon dioxide levels for GCM runs 1-4 and EBM run 1 were held fixed at 345 ppmv, whereas the levels reported for EBM runs 2-5 were calculated using the model by accounting for the effects of carbonate-silicate weathering.

Runs	Fig 1	Eccentricity	Luminosity (L_\odot)	pCO_2 (bars)	T_{ave} ($^\circ C$)
GCM 1	A	0.1	1.00	3.45×10^{-3}	14.90
GCM 2	B	0.3	1.00	3.45×10^{-3}	22.90
GCM 3	C	0.4	1.00	3.45×10^{-3}	30.11
GCM 4	D	0.7	0.71	3.45×10^{-3}	22.45
EBM 1	D	0.7	0.71	3.45×10^{-3}	21.17
EBM 2	D	0.7	0.71	4.28×10^{-4}	12.94
EBM 3	E	0.7	0.60	5.03×10^{-2}	14.82
EBM 4	F	0.7	0.50	3.39×10^{-1}	16.17
EBM 5	G	0.7	0.40	1.28×10^0	17.03



Resultate: GCM runs 1-3

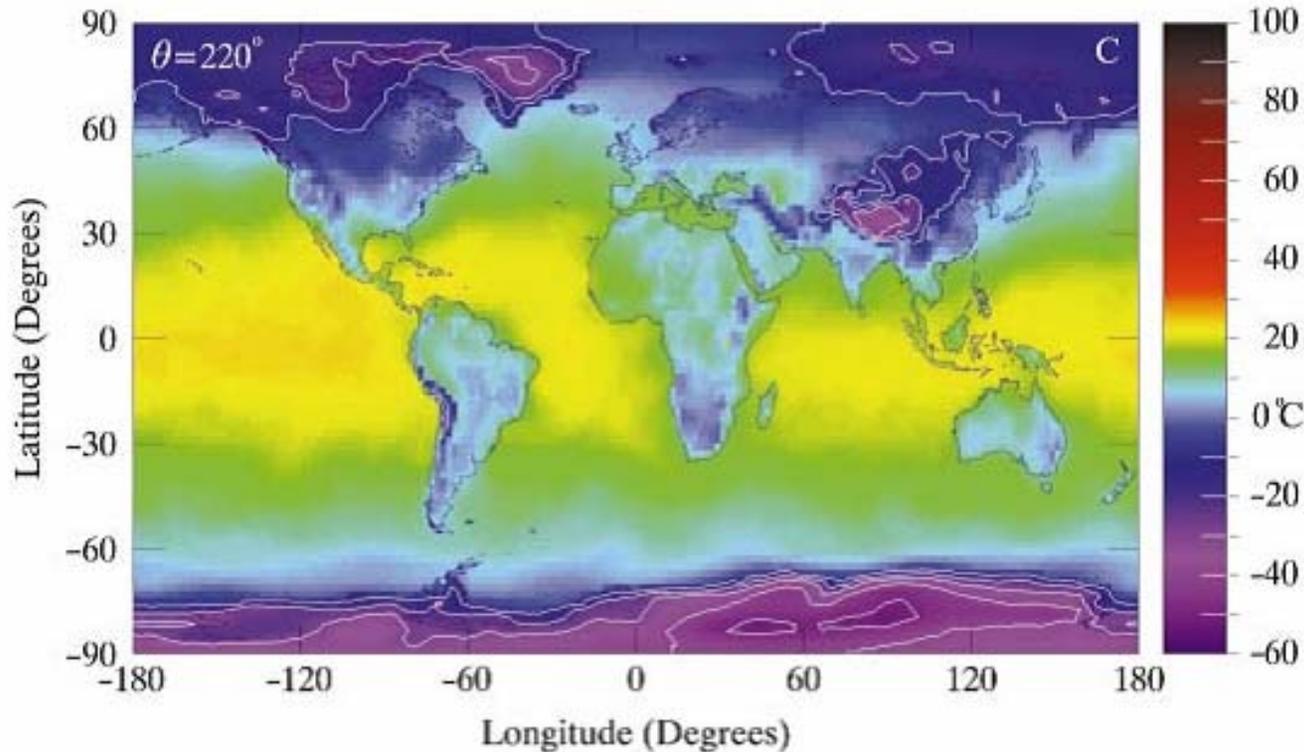
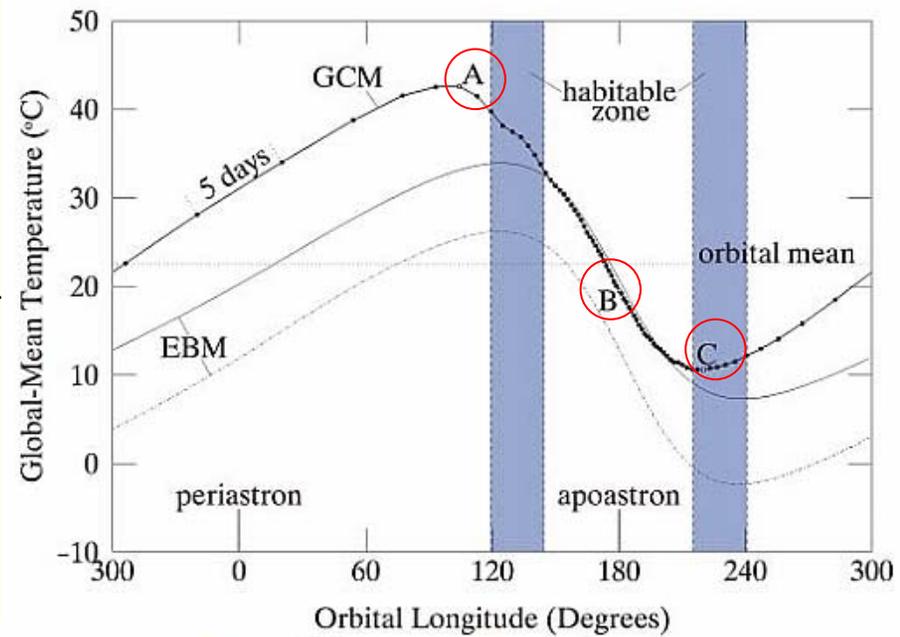
- $e=0.0167 \rightarrow e=0.4$ bewirkt Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur von 14.6° auf 30.1°C .
- Zeit innerhalb der HZ:
 $365\text{d} (e<0.1) \rightarrow 180\text{d} (e=0.4)$
- Feuchtigkeit und Niederschlag steigen mit höherer Temperatur aufgrund erhöhter Verdunstungsrate
 \rightarrow erstes Stadium der Destabilisierung
- Luftfeuchtigkeit in Stratosphäre erst ab 65°C (\rightarrow Verlust von Wasser durch Photolyse)

Simulation eines Planeten mit $e=0.7$

GCM run 4 & EBM runs 1-3

- Planeten mit hoher Exzentrizität entdeckt (16 Cygni B, HD222582)
- befinden sich in HZ, jedoch nur für Bruchteil ihres Orbits
- Simulation eines solchen Planeten mit einer Exzentrizität von 0.7
- $a=1.0$ AU, $L=0.714 L_{\text{Sonne}}$ → entspricht dem mittleren Fluss, den die Erde in einem kreisförmigen Orbit empfangen würde

Resultate: GCM run 4

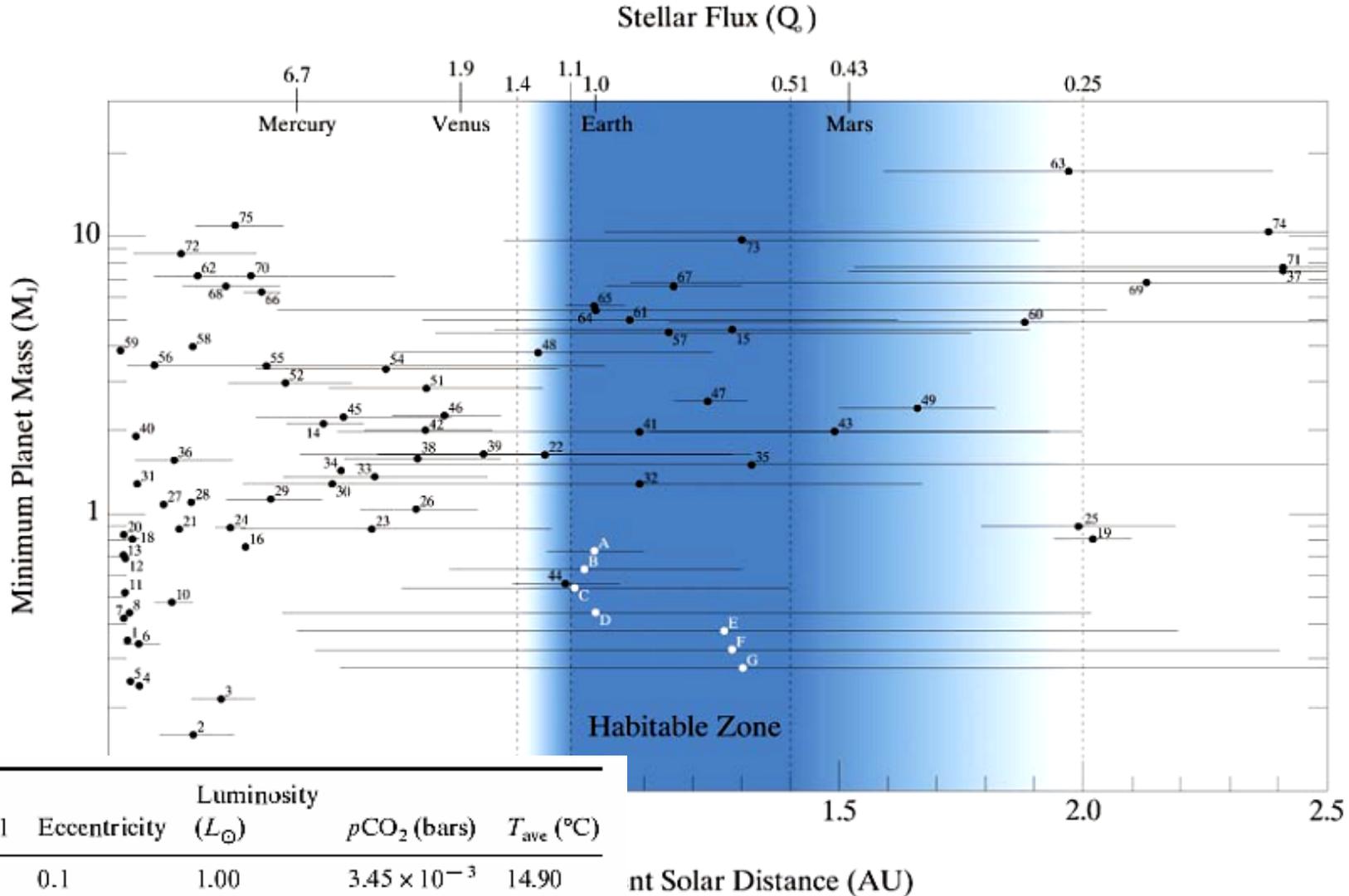


Resultate: GCM run 4

- Durchschnittstemperatur 7.8°C wärmer als die Erde, obwohl dem selben stellaren Fluss ausgesetzt
- heißeste Temperatur $>80^{\circ}\text{C}$ → schädlich für viele Lebensformen
- allerdings nur kurze Dauer (60-90d) wegen hoher Geschwindigkeit im Perihel
- 64% außerhalb der HZ → Temperaturen fallen, aber nicht unter Gefrierpunkt
- Ozean besitzt das ganze Jahr über flüssiges Wasser

EBM Model (Williams & Kasting)

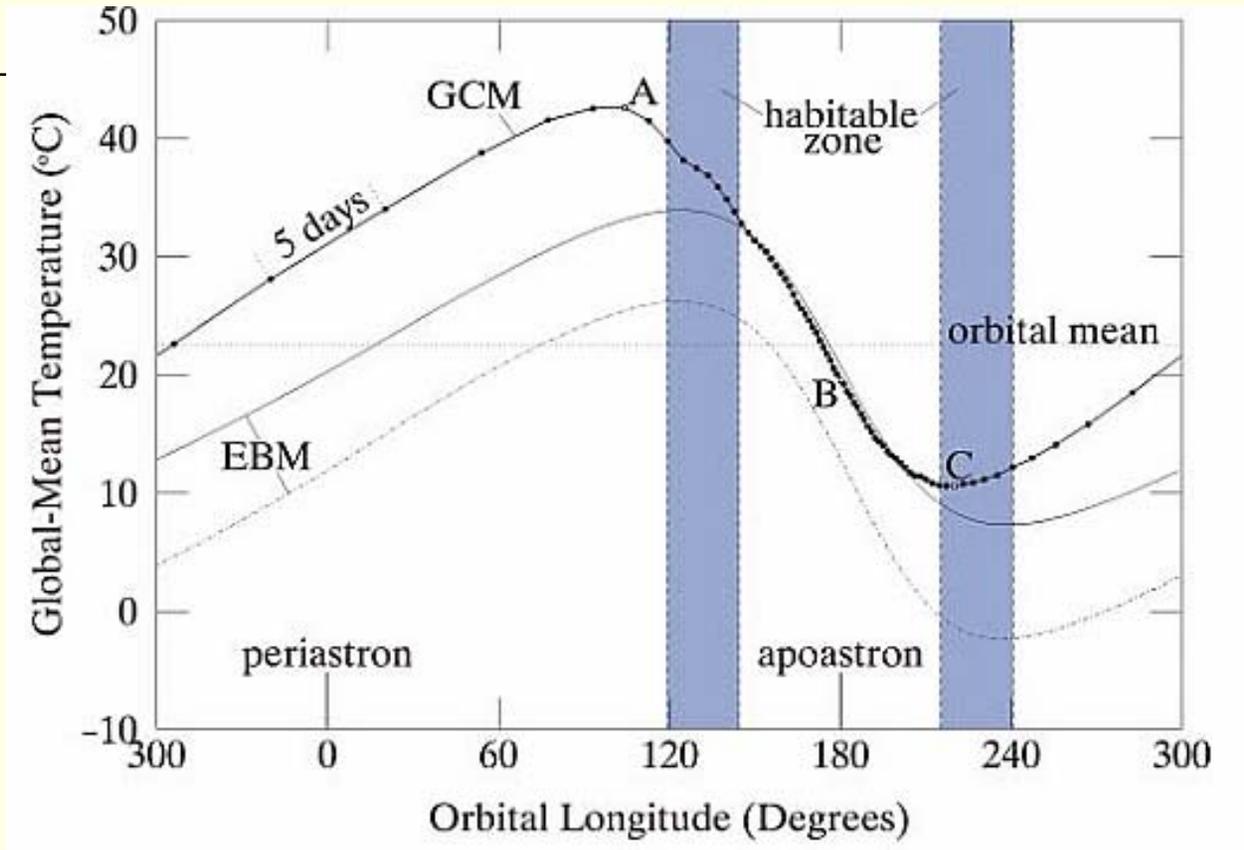
- bezieht den Carbonat-Silicat-Zyklus mit ein
- zuerst Vergleich mit GCM (run 1)
- dann Berechnung des Gleichgewichts-CO₂-Niveaus das erforderlich ist für Ausgleich zwischen Produktion (Vulkane) und Umwandlung (Verwitterung, Ablagerung in Erdkruste)
- Gleichgewichts-CO₂-Levels für Planeten weiter außerhalb in der HZ
→ $L = 0.6, 0.5, 0.5 L_{\text{Sonne}}$, e und a konstant



Runs	Fig 1	Eccentricity	Luminosity (L_{\odot})	$p\text{CO}_2$ (bars)	T_{ave} ($^{\circ}\text{C}$)
GCM 1	A	0.1	1.00	3.45×10^{-3}	14.90
GCM 2	B	0.3	1.00	3.45×10^{-3}	22.90
GCM 3	C	0.4	1.00	3.45×10^{-3}	30.11
GCM 4	D	0.7	0.71	3.45×10^{-3}	22.45
EBM 1	D	0.7	0.71	3.45×10^{-3}	21.17
EBM 2	D	0.7	0.71	4.28×10^{-4}	12.94
EBM 3	E	0.7	0.60	5.03×10^{-2}	14.82
EBM 4	F	0.7	0.50	3.39×10^{-1}	16.17
EBM 5	G	0.7	0.40	1.28×10^0	17.03

nt Solar Distance (AU)

Resultate: EBM



Vergleich der globalen mittleren Temperatur für GCM run 4, EBM run 1 und 2. A, B und C zeigen die Position des Planeten für die Temperaturkarten.

Resultate: EBM

- Trend: CO₂-Erhöhung als Reaktion auf schwächere Leuchtkraft:
 - Verwitterungsrate verlangsamt sich bei niedrigen Temperaturen → CO₂ akkumuliert in Atm.
 - bewirkt Temperaturerhöhung von 12 auf 17°C (wärmer als Erde bei 1 AU!)
 - Problem: Bildung von CO₂ Wolken
- für $L=0.4L_{\text{Sonne}}$ und $e=0.7$, bewegt sich der Planet zwischen einer skalierten solaren Distanz von 0.4AU im Perihel und 2.26AU im Aphel!

Vergleich der Modellierungen

GCM indicates that the run was performed using the general-circulation climate model (GENESIS II) developed by Thompson & Pollard (1997), and EBM refers to the energy-balance model of Williams & Kasting (1997). Letters used to label the planets in Figure 1 are given in column 2. Orbital semi-major axis and orbital period were 1.0 AU and 365 days for each run. Obliquity (23.45°), continental topography and concentrations of primary gases (with the exception of H₂O and CO₂) in Earth's atmosphere were also maintained at present values. Carbon dioxide levels for GCM runs 1–4 and EBM run 1 were held fixed at 345 ppmv, whereas the levels reported for EBM runs 2–5 were calculated using the model by accounting for the effects of carbonate–silicate weathering.

Runs	Fig 1	Eccentricity	Luminosity (L_{\odot})	$p\text{CO}_2$ (bars)	T_{ave} (°C)
GCM 1	A	0.1	1.00	3.45×10^{-3}	14.90
GCM 2	B	0.3	1.00	3.45×10^{-3}	22.90
GCM 3	C	0.4	1.00	3.45×10^{-3}	30.11
GCM 4	D	0.7	0.71	3.45×10^{-3}	22.45
EBM 1	D	0.7	0.71	3.45×10^{-3}	21.17
EBM 2	D	0.7	0.71	4.28×10^{-4}	12.94
EBM 3	E	0.7	0.60	5.03×10^{-2}	14.82
EBM 4	F	0.7	0.50	3.39×10^{-1}	16.17
EBM 5	G	0.7	0.40	1.28×10^0	17.03

Fazit

- Kurzzeitige extreme Klimaschwankungen auf elliptischen Orbits schließen Möglichkeit für Leben nicht aus
- Langzeitstabilität hängt hauptsächlich vom mittleren stellaren Fluss über einen gesamten Orbit ab, nicht so sehr von der Zeit in der HZ
- Einige der bisher entdeckten extrasolaren Gasplaneten könnten trotz hoher Exzentrizität auf ihren Monden Bedingungen für die Entwicklung von Leben bieten
- Größere Anzahl von Planeten als angenommen könnten für Leben geeignet sei!

Literatur

- Earth-like worlds on eccentric orbits;
Darren M. Williams & David Pollard, 2002
- Habitable zones around Main Sequence Stars; James F. Kasting, Daniel P. Whitmire & Ray T. Reynolds, 1993