

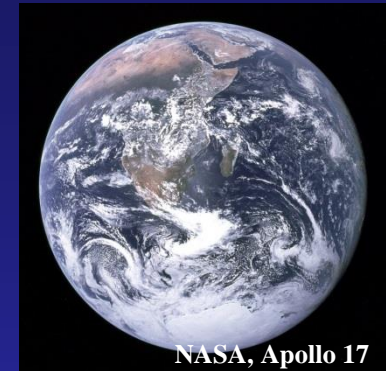
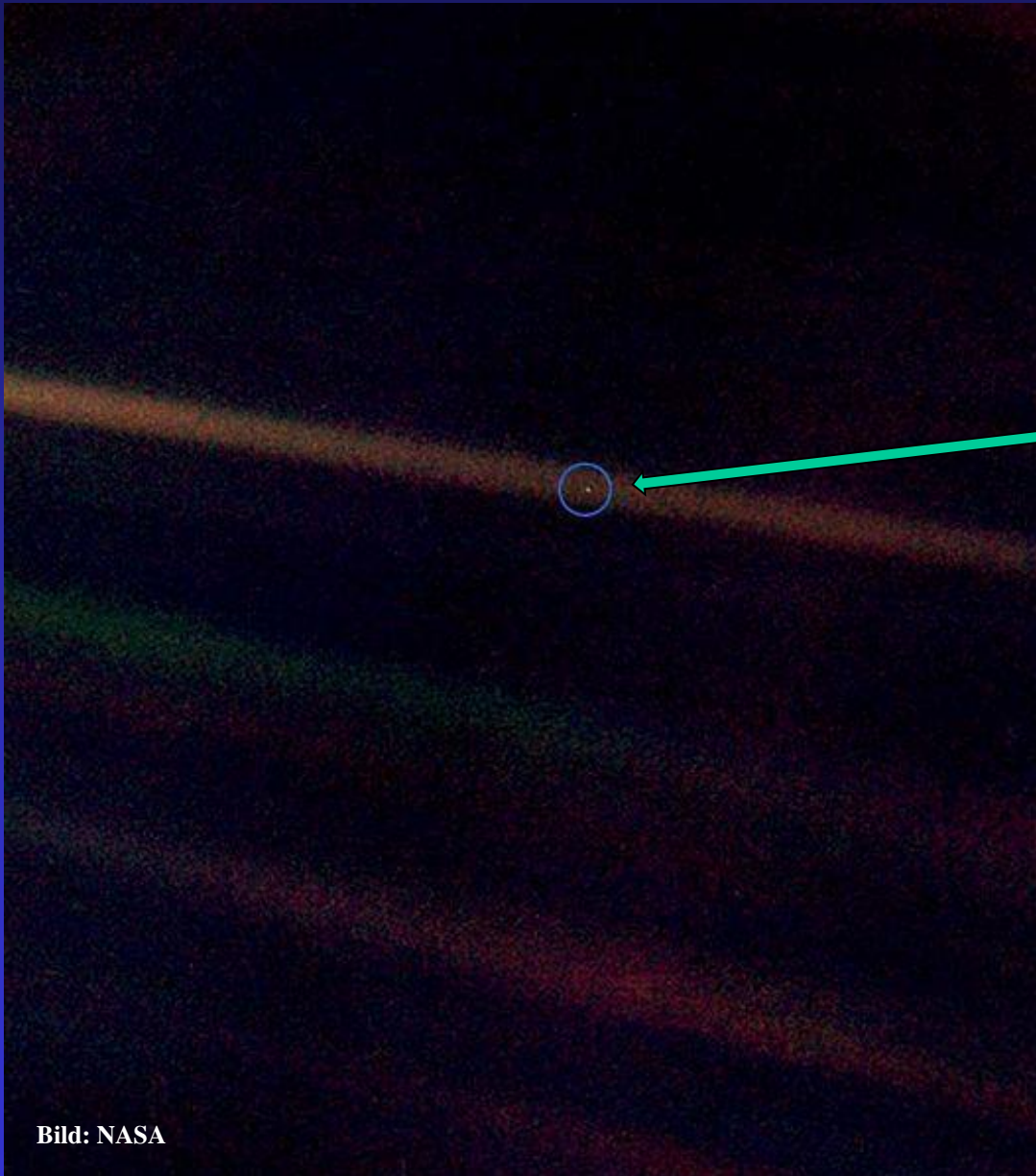
Die Suche nach der zweiten Erde

Thomas Henning, Silvia Scheithauer

Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg



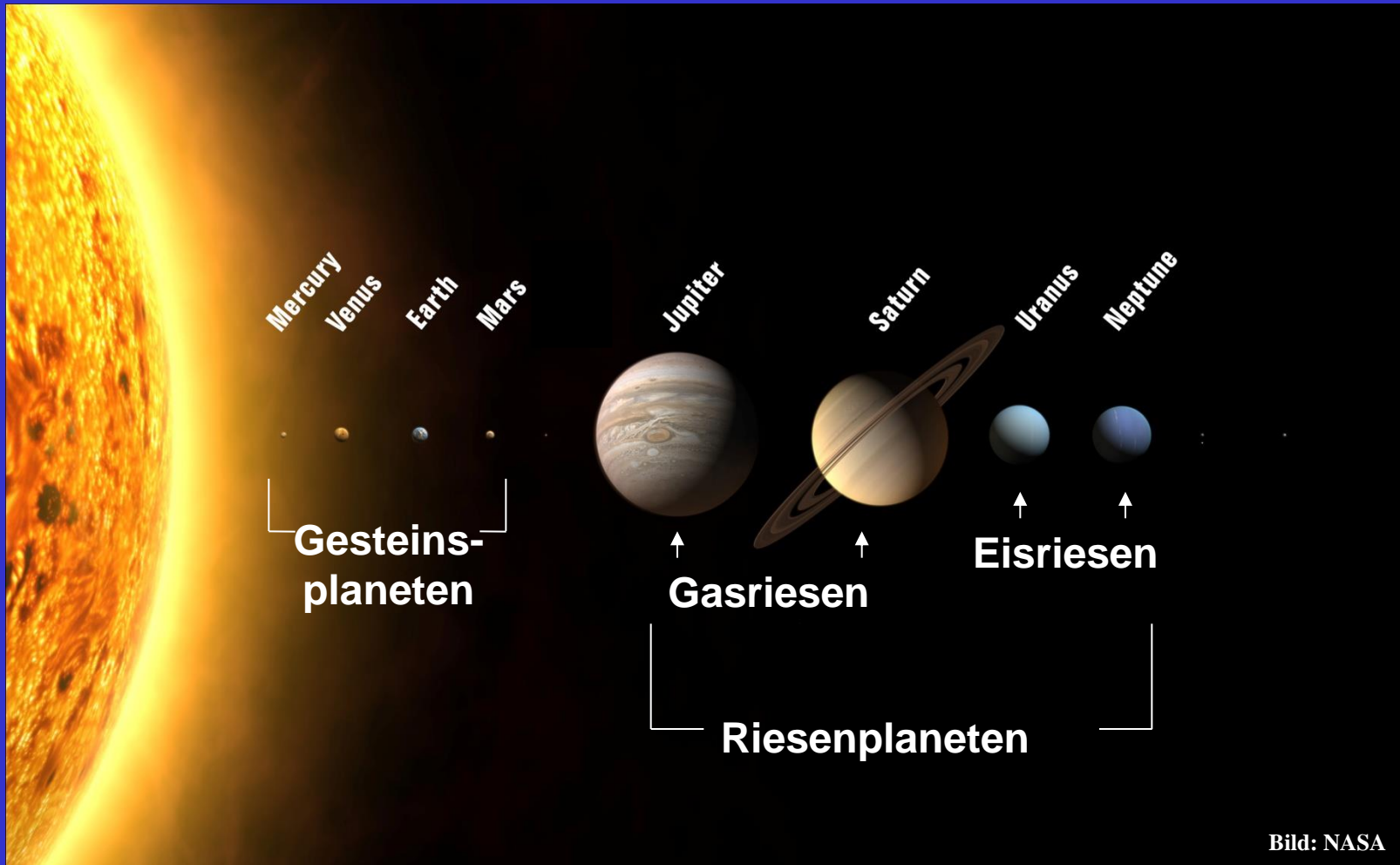
Blick zurück: Die erste Erde ...



**Erde – „Pale Blue Dot“
(0,12 Pixel groß)**

**Voyager 1 @
6,4 Milliarden km
Entfernung @
14. Februar 1990**

Die Planeten in unserem Sonnensystem



Gibt es andere Planetensysteme?

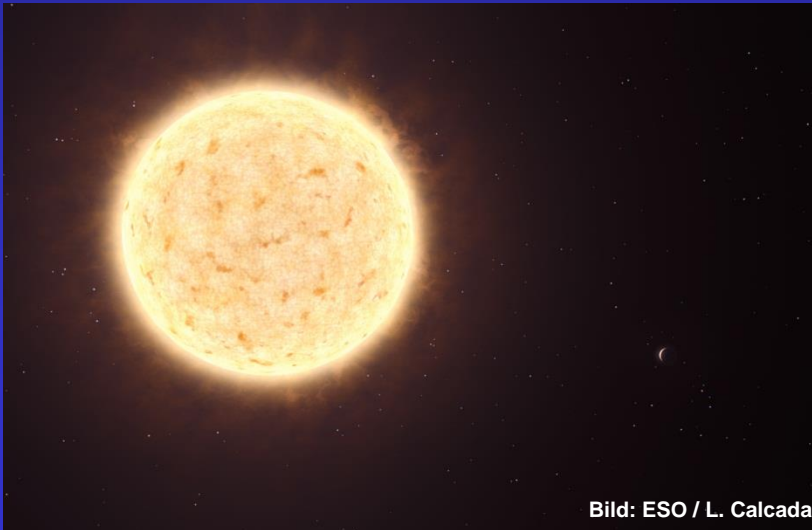
Warum ist es schwer, Exoplaneten zu beobachten?

1. Sie sind sehr weit weg.

Das nächste Sonnensystem (Alpha Centauri) ist 4.3 Lichtjahre von uns entfernt, das sind 41 000 000 000 000 km.

2. Der Stern, den sie umkreisen, leuchtet viel heller als die Planeten.

3. Aufgrund der großen Entfernung, können wir Stern und Exoplanet nicht getrennt sehen.



Wie können wir einen extrasolaren Planeten sehen?



Bild: NASA, <http://planetquest.jpl.nasa.gov>

Wie können wir einen extrasolaren Planeten sehen?

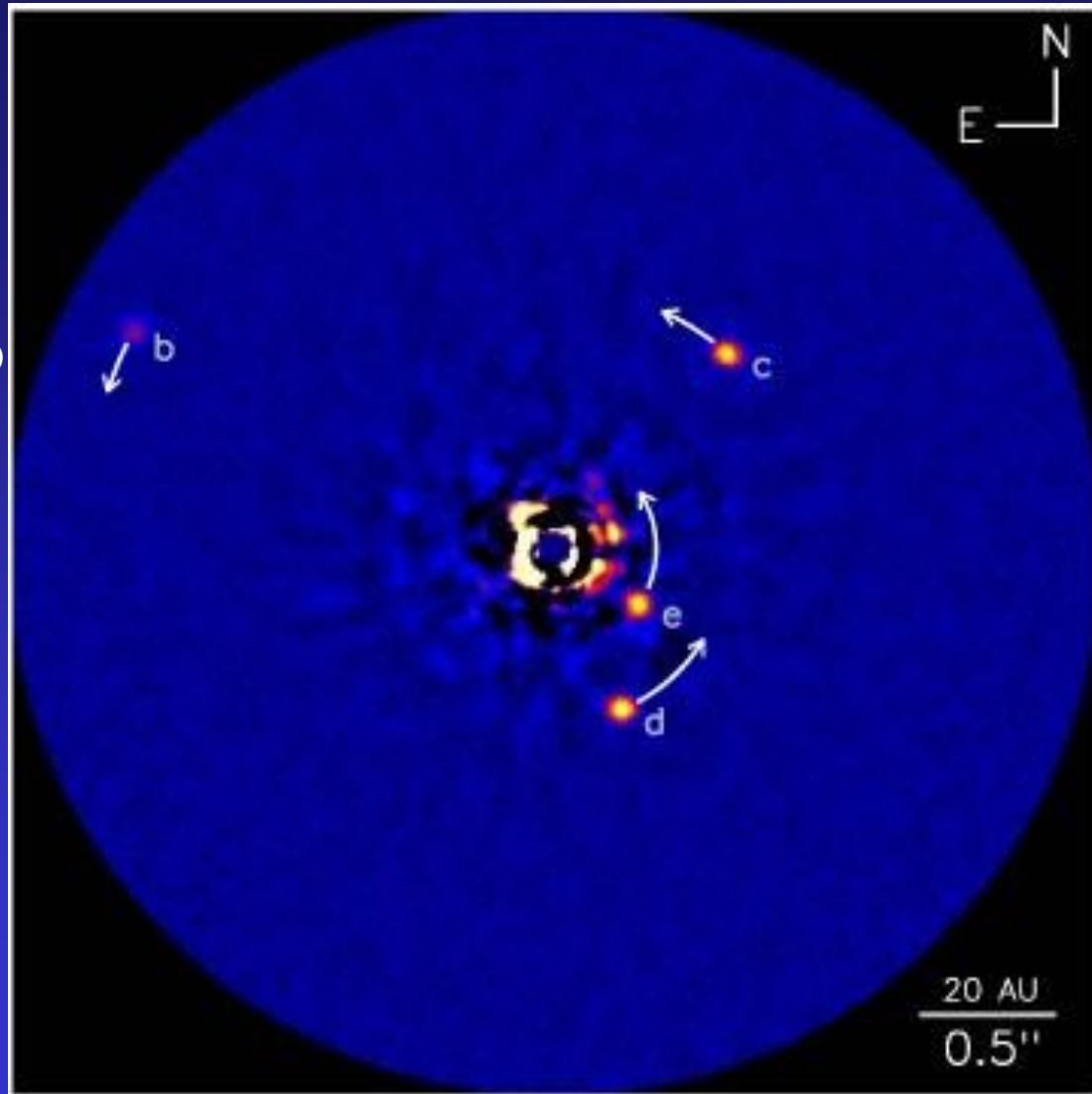


Bild: NASA, <http://planetquest.jpl.nasa.gov>

Wir können Planeten auch direkt sehen: HR 8799

14 to 68AU
(1 AU = Abstand Erde-Sonne)

5-7 M_J



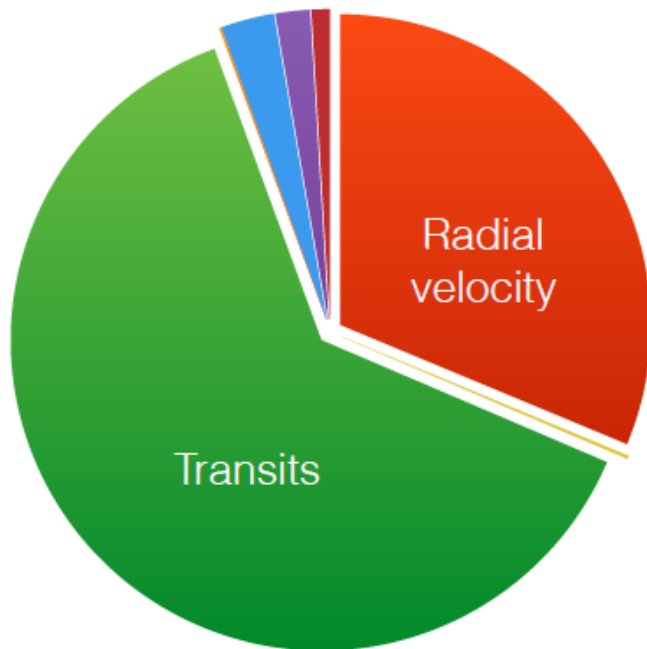
Marois et al. (2008, 2010)

1995-2019 - Eine Flut von Entdeckungen ...

Wolszczan & Frail (1992): Planetensystem um den Millisekundenpulsar PSR 1257+12

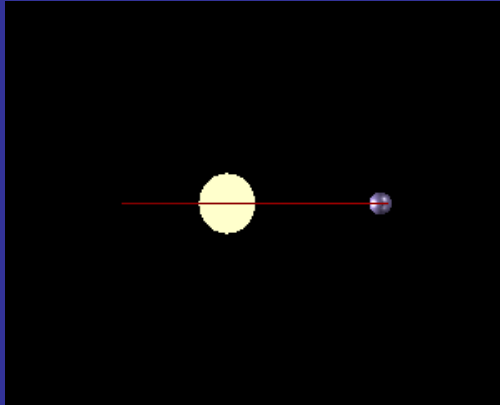


- Radial velocity
- TTV
- Primary transit
- Astrometry
- Direct imaging
- Microlensing
- Pulsar



- Mehr als **3000 Exoplaneten** entdeckt
- **Radialgeschwindigkeitsmethode** (Planeten bis zu 10 AU; Gesteinsplaneten auf nahen Umlaufbahnen)
- **Transit-Technik** (Kepler-Mission) (Planeten bis zu 1AU – Erdähnliche bis zu Riesenplaneten)

Radialgeschwindigkeitsmethode

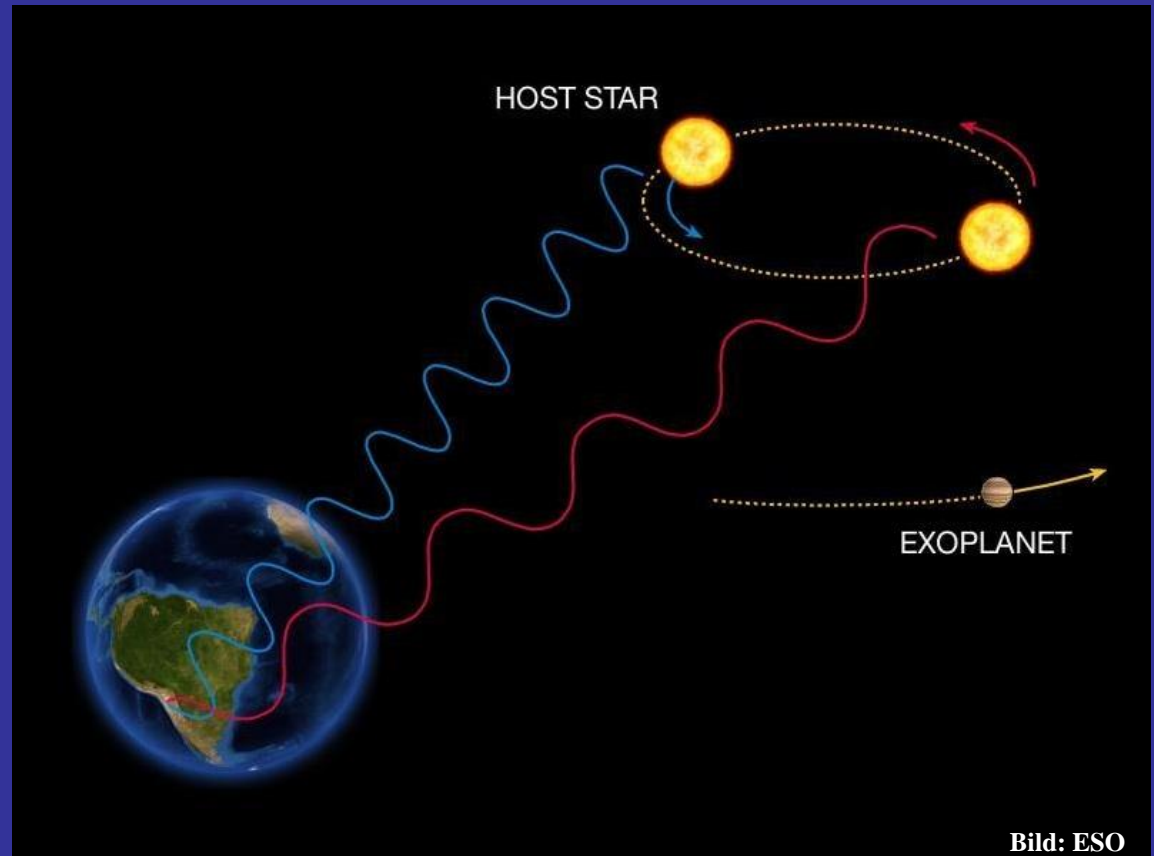
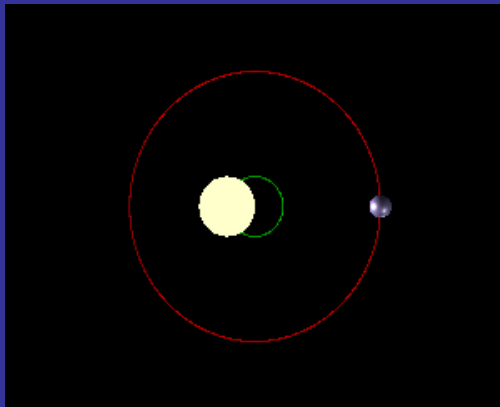


Doppler-Effekt

→ Verschiebung des Spektrums

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

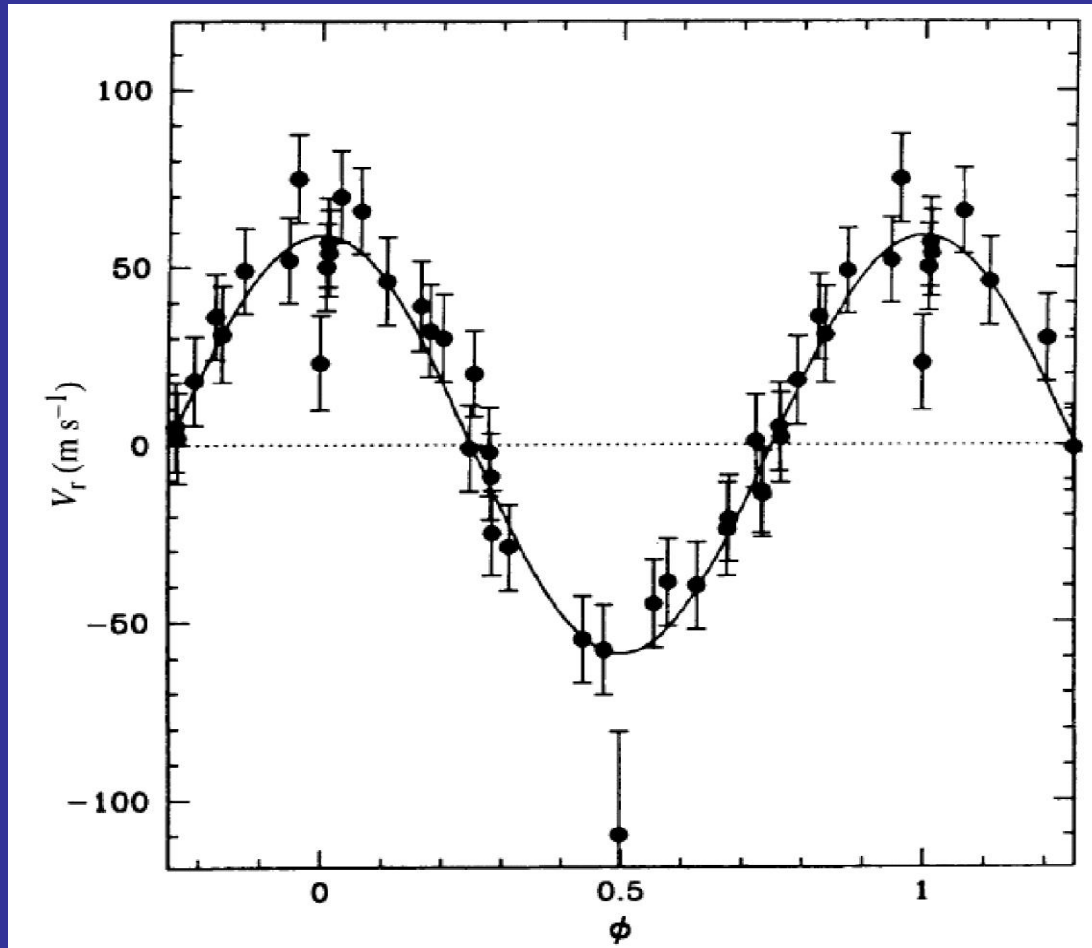
Animation:
https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_spectroscopy



messbar: Umlaufperiode, Abstand, Massenabschätzung $M \sin i$

1995: Entdeckung des Exoplaneten 51 Pegasi b

Radialgeschwindigkeitsmethode



Mayor & Queloz

Periode = 4,23 Tage

$M_{\text{sin}i} = 0,468 M_J$

$a = 0,05 \text{ AU}$

G5V-Stern

Mayor & Queloz, Nature 1995

Venustransit 2004



Bild: AP

Transitmethode

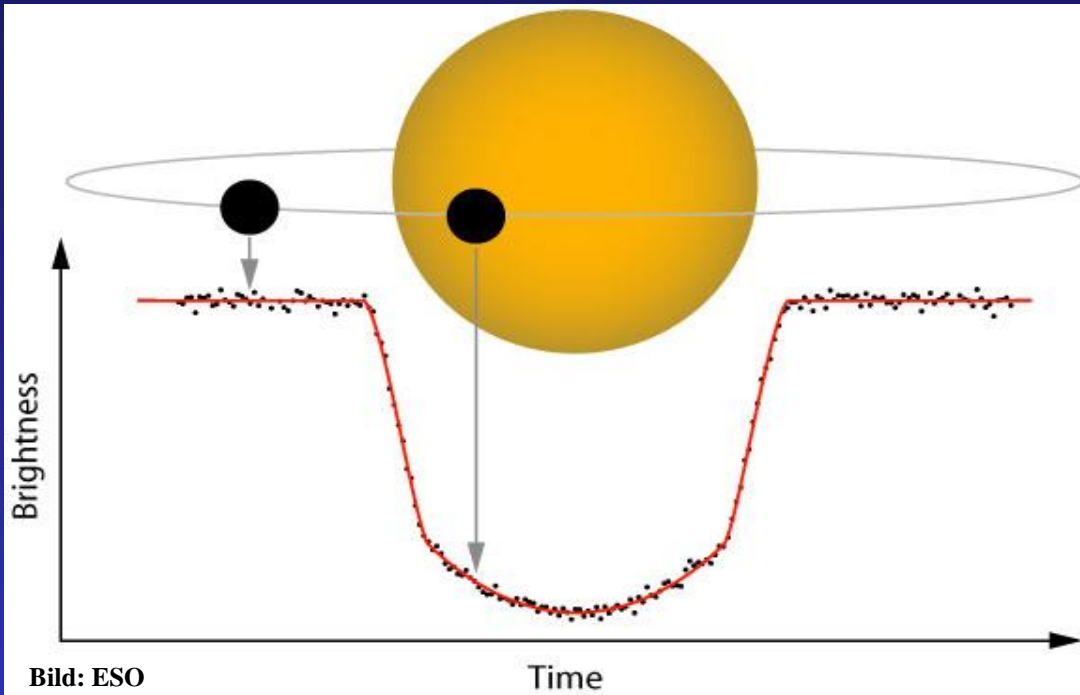


Bild: ESO

Planet umkreist Sonne
und bedeckt sie
teilweise (Finsternis)

Voraussetzung:

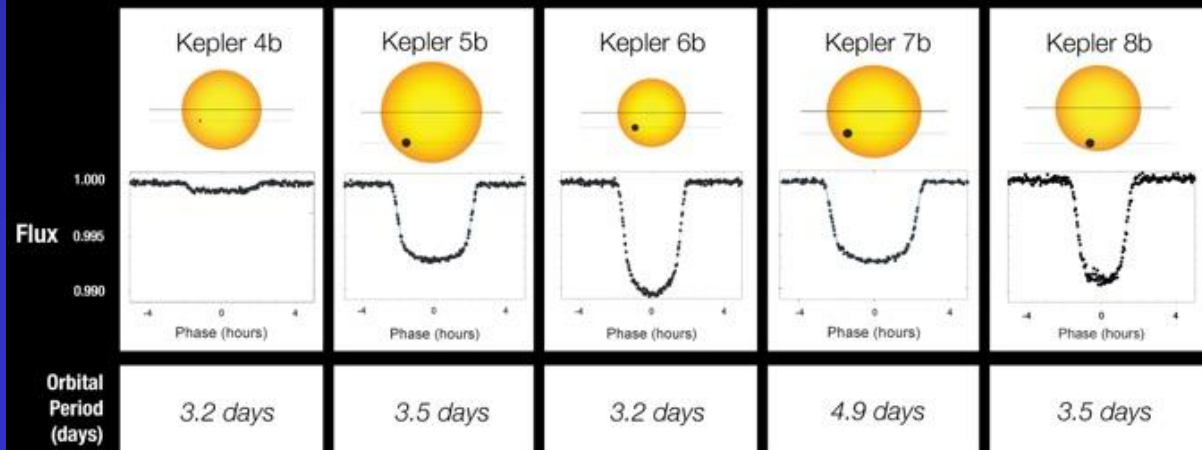
wir schauen in etwa
senkrecht auf die
Bahnebene des
Planeten

Kepler Satellit (seit 2009), NASA

Messbar:

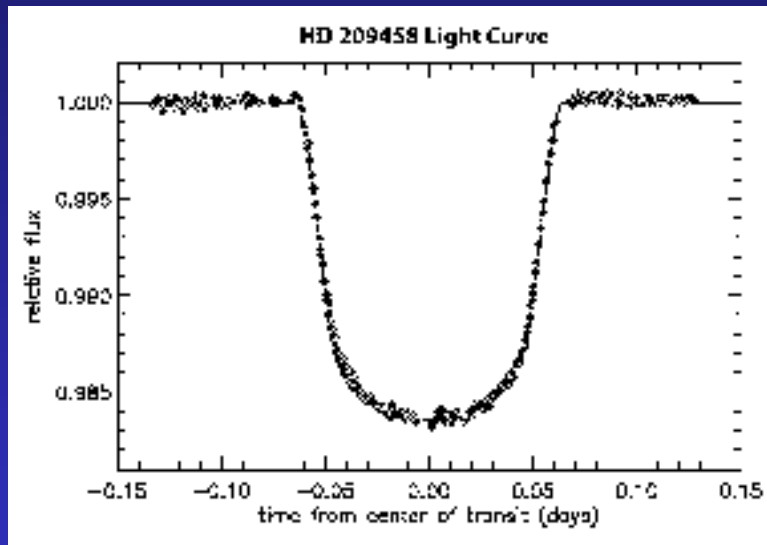
Helligkeitsveränderung
→ Größe des Planeten

Zeit zwischen Transits
→ Abstand des Planeten
zu seiner Sonne



Transitmethode

Hubble Space Telescope HD 209458

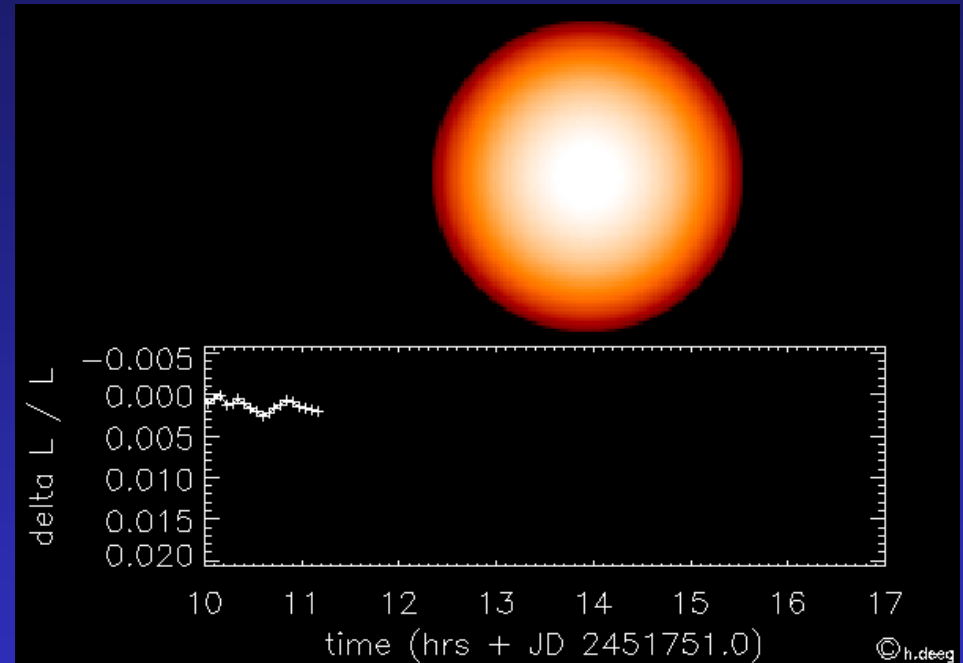


NASA, T. M. Brown, D. Charbonneau, R. L. Gilliland,
R. W. Noyes, & A. Burrows

Masse = $0,62 M_J$

Große Halbachse = $0,046 \text{ AE}$

Radius $1,42 R_J$



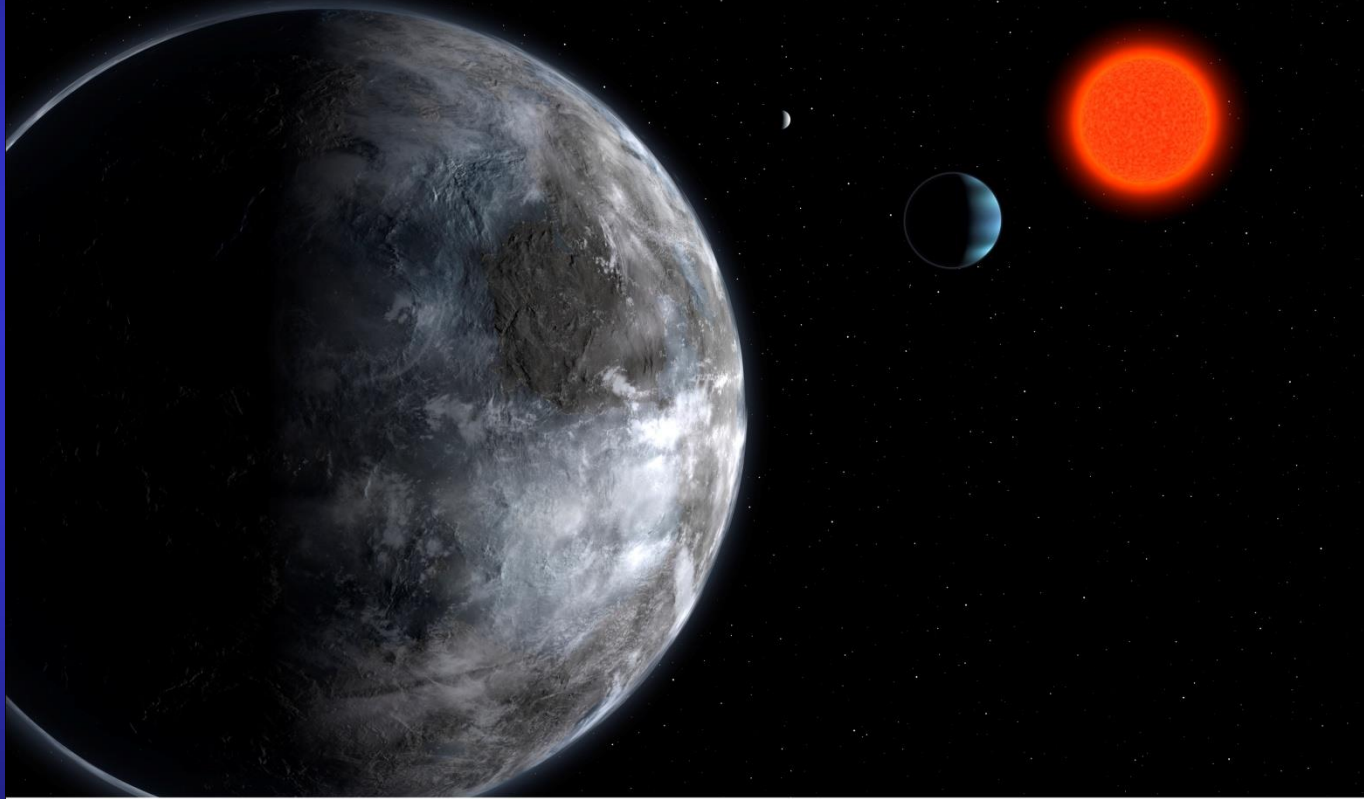
Animation: Hans Deeg, Instituto de Astrofísica de Canarias

Aus der Kombination von Transit und Radialgeschwindigkeitsmessungen:

Dichte $0,27 \text{ g/cm}^3$ Planet kann nur aus H und He bestehen

ESO 22/07 „Astronomers find first earth-like planet in habitable zone“ (April 2007, Udry et al.)

„Die Schwester der Erde“, „A segunda terra“



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

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

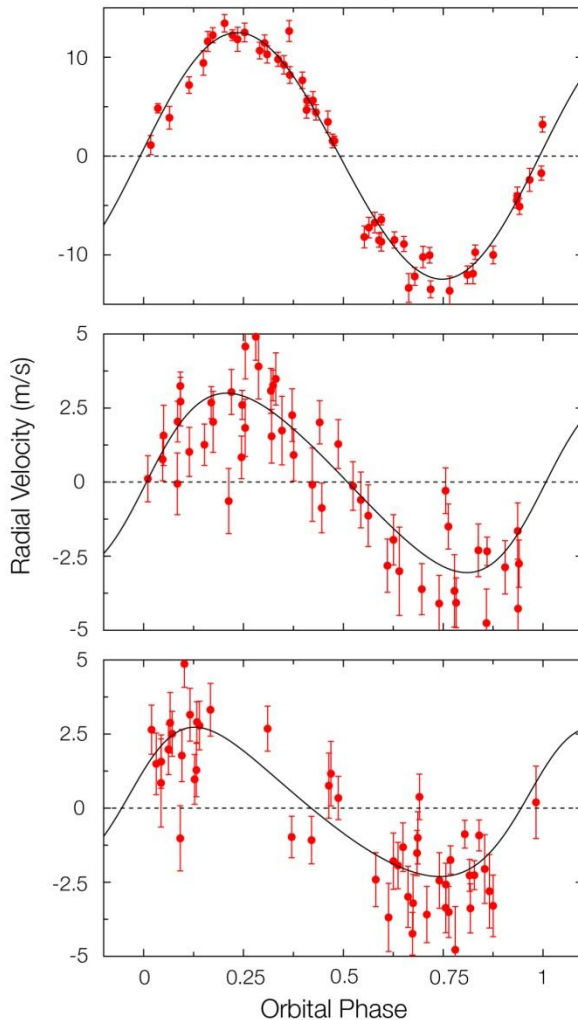
This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.



Gliese 581 – 20,5 Lichtjahre
Masse = 1/3 der Sonnenmasse
(Spektraltyp M)

Gliese 581b: 15 Erdmassen, 5.4 d
Gliese 581c: 5 Erdmassen, 13 d
Gliese 581d: 8 Erdmassen, 84 d (?)

Temperatur: 0-40 °C
(14x näher zum Stern als Erde
zur Sonne: 0,073 AU)



Observed Velocity Variation of Gliese 581



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

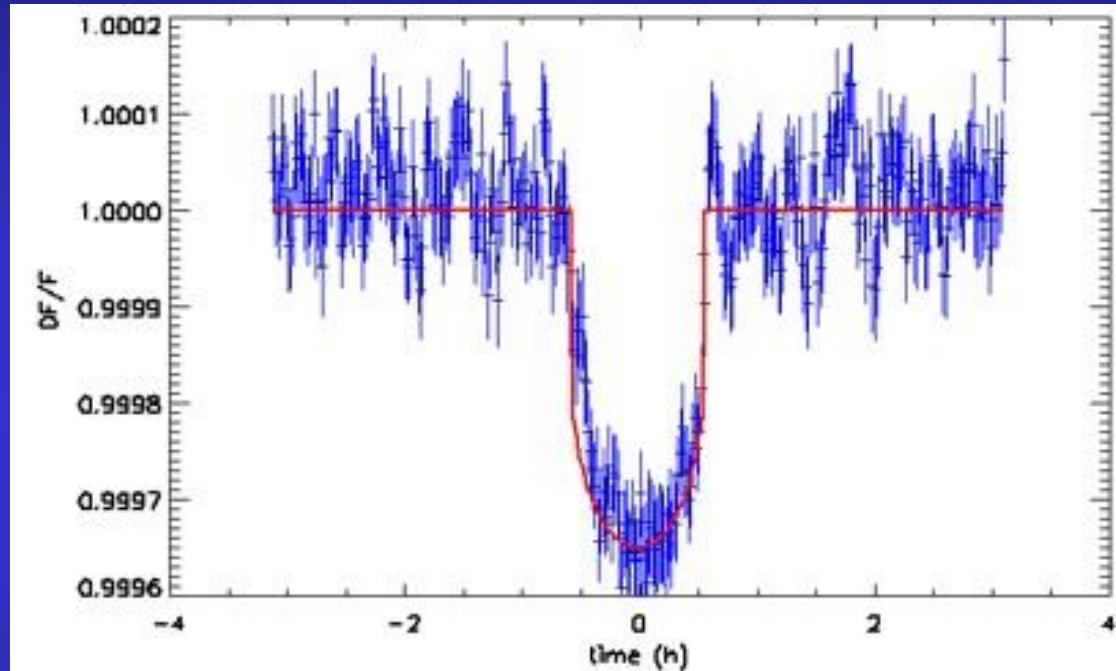
This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.

Geschwindigkeitsvariation: 2-3 m/s: 9 km/h

HARPS: High Accuracy Radial Velocity for Planetary Searcher

Corot-7b – Der erste Gesteinsplanet

RV-Methode und Transit

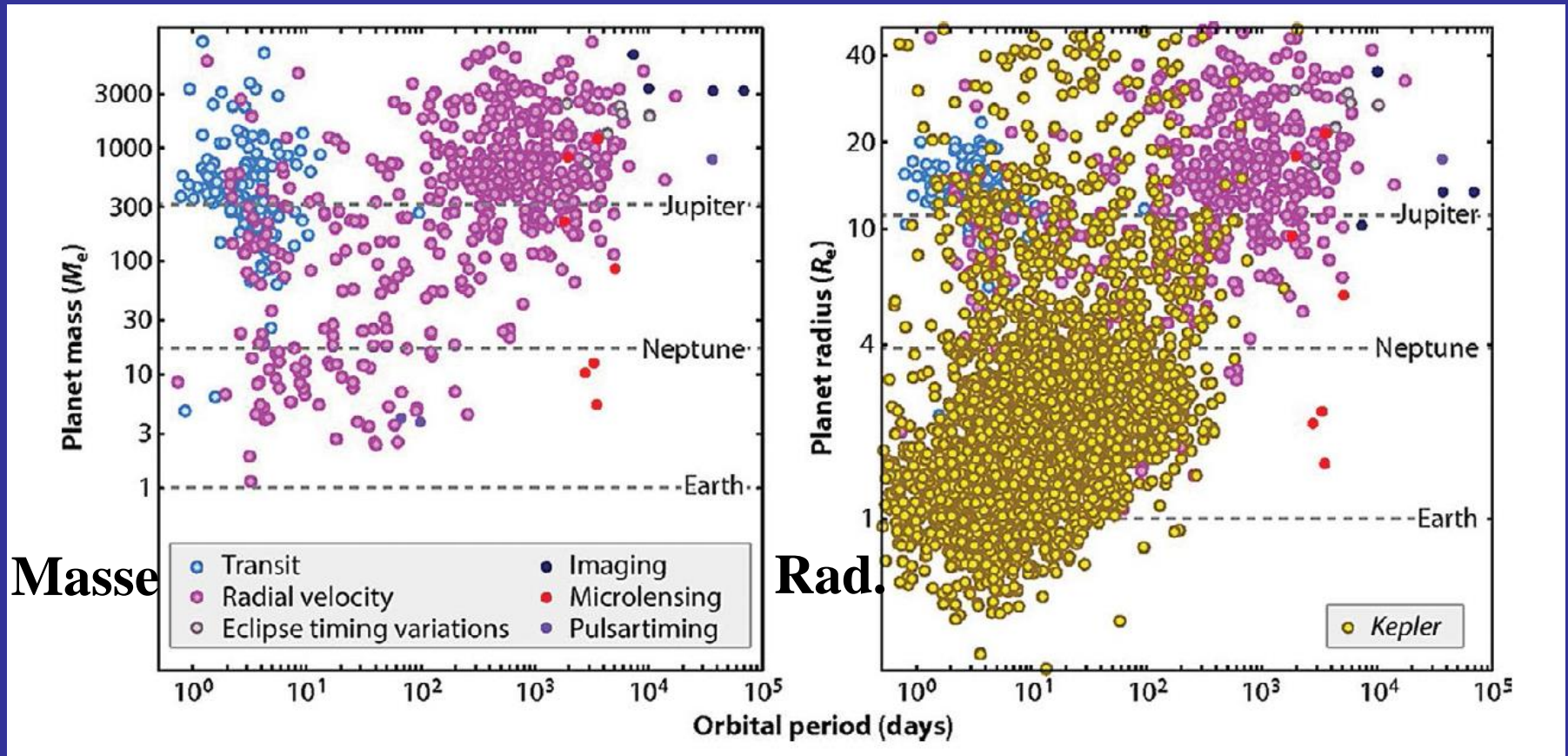


Leger et al.
(2009)

Queloz et al.
(2009)

4,8 Erdmassen und Dichte von $5,6 \text{ g/cm}^3$
(Große HA=0.017 AE, $e=0$, $P=0,85$ Tage, G9V-Stern, 150 pc)

Diversität: Masse und Radius

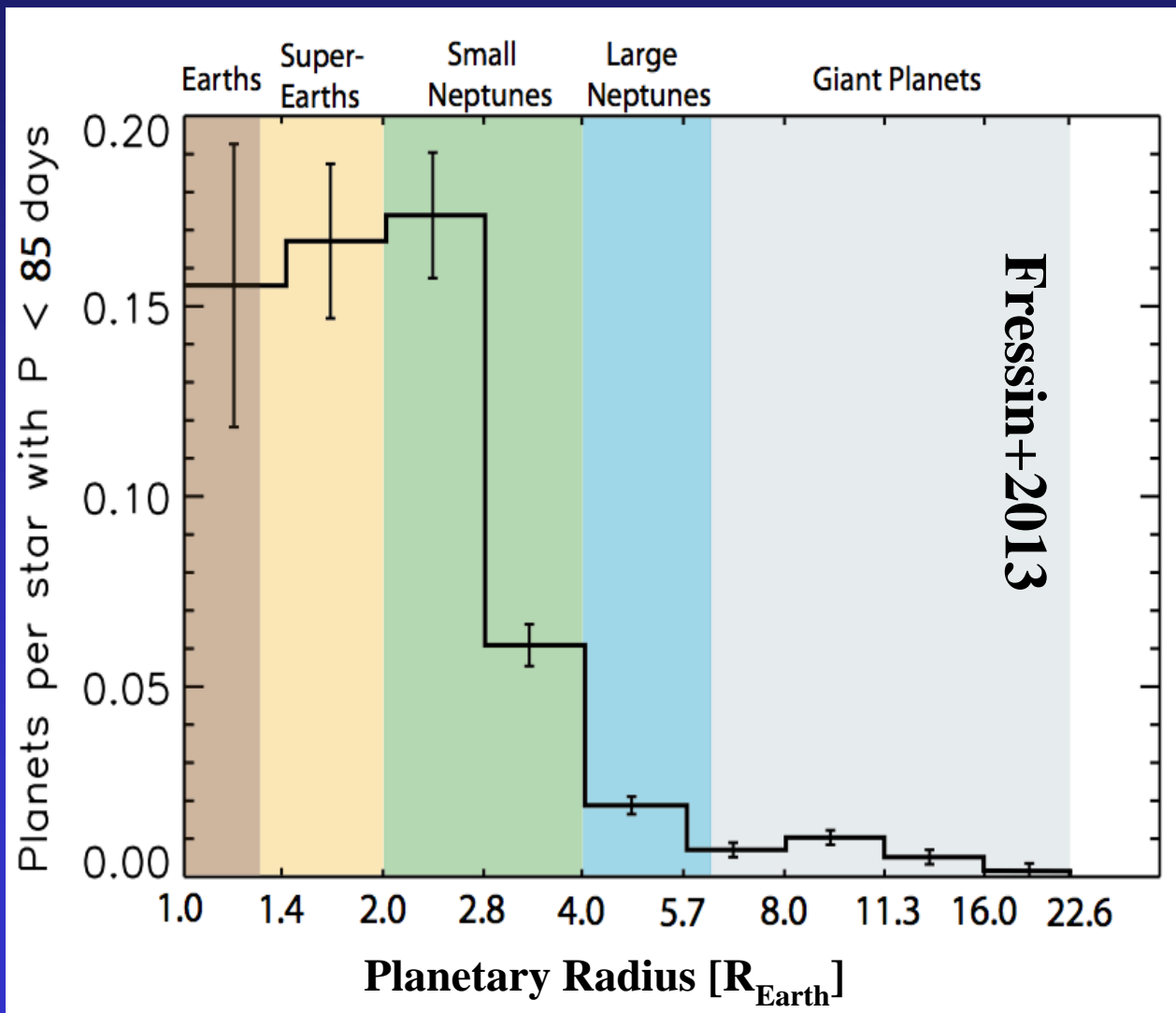


Bathala (2014)

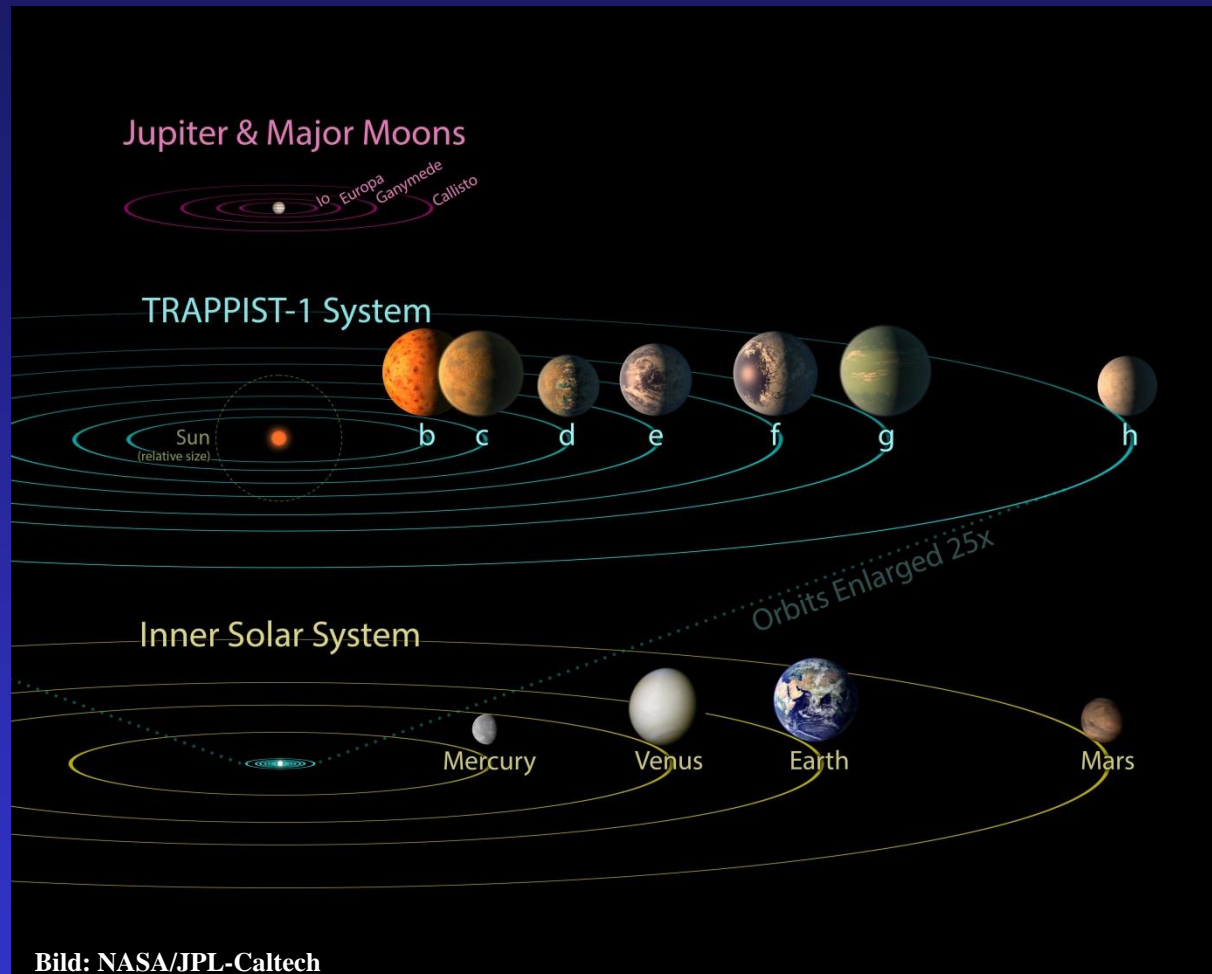
Eine wichtige Entdeckung: Erdähnliche Planeten und Super-Erden sind häufig!

2 Planeten/
M-Stern

1 Planet/
G-Stern

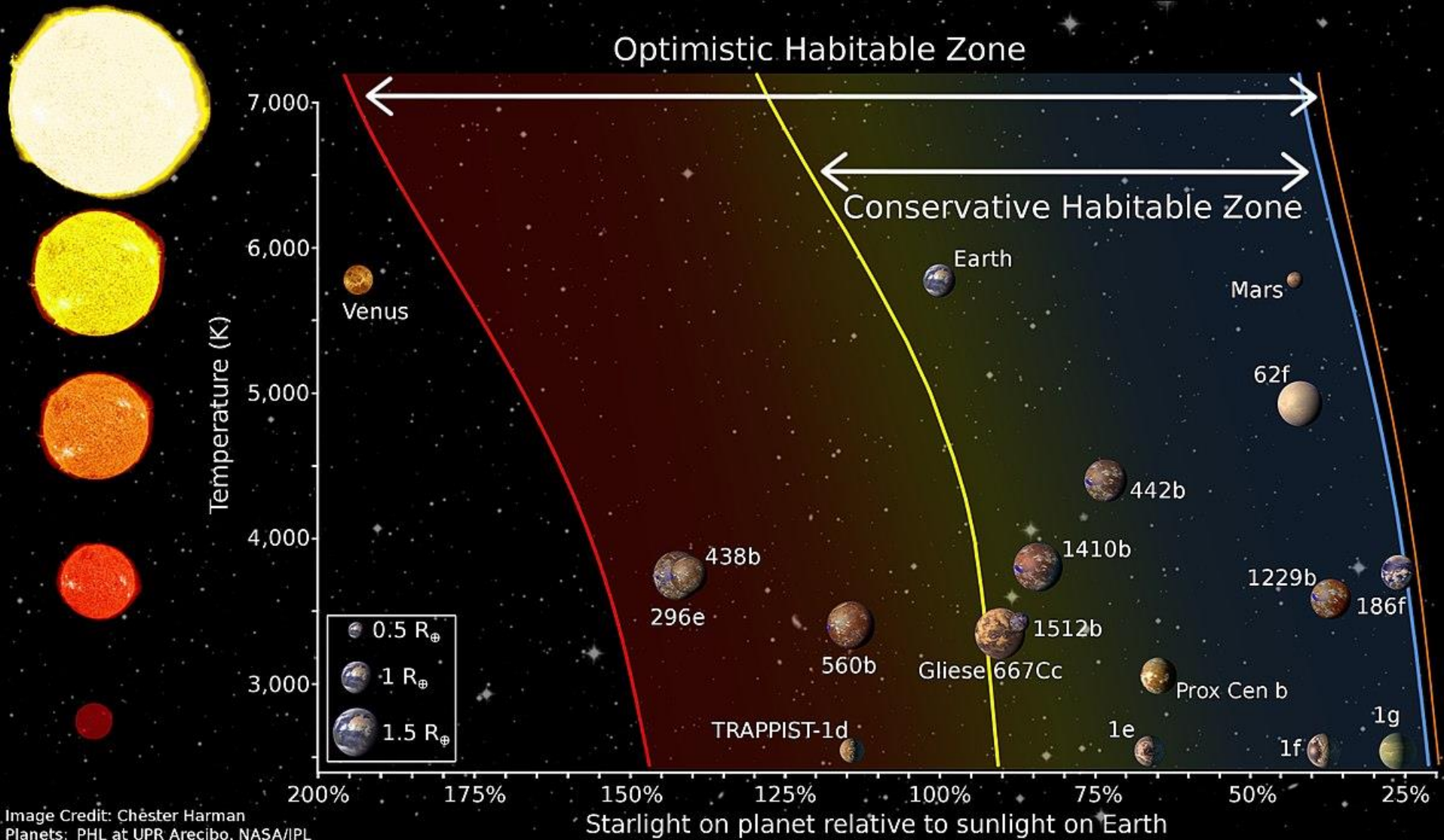


7 Planeten auf einen Streich – Trappist-1



- 7 Planeten mit Massen zwischen 0,5 und 1 Erdmasse
- Roter Zwergstern (M8) in 40 Lichtjahren Entfernung
- Zumindest die Planeten d und e liegen in habitabler Zone

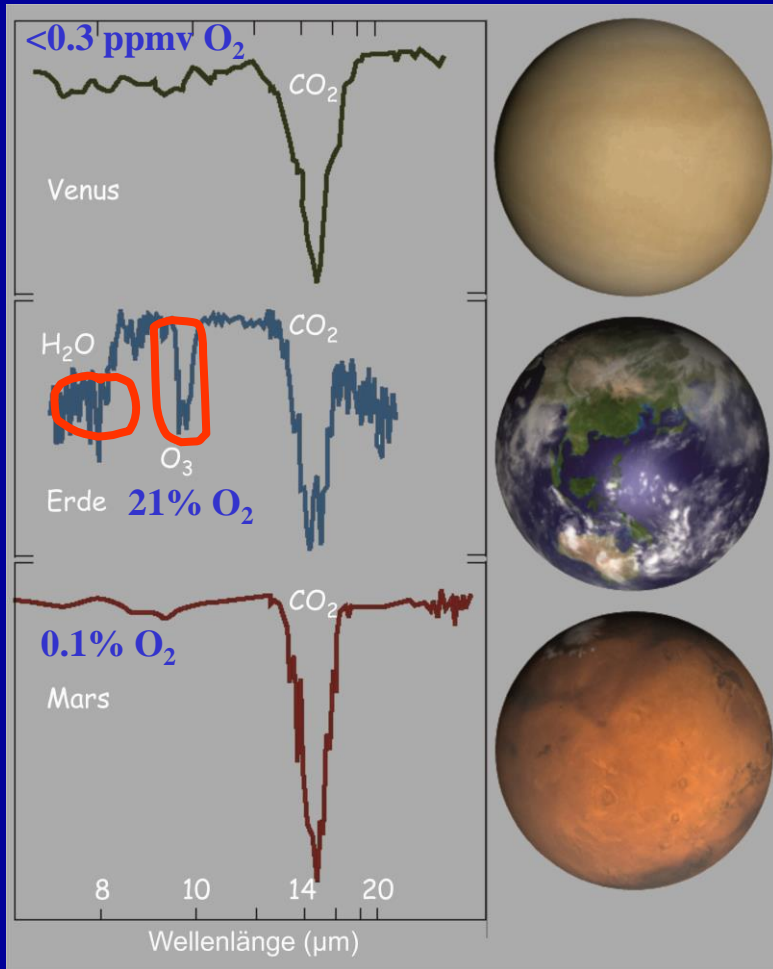
Die Habitable(n) Zone(n)



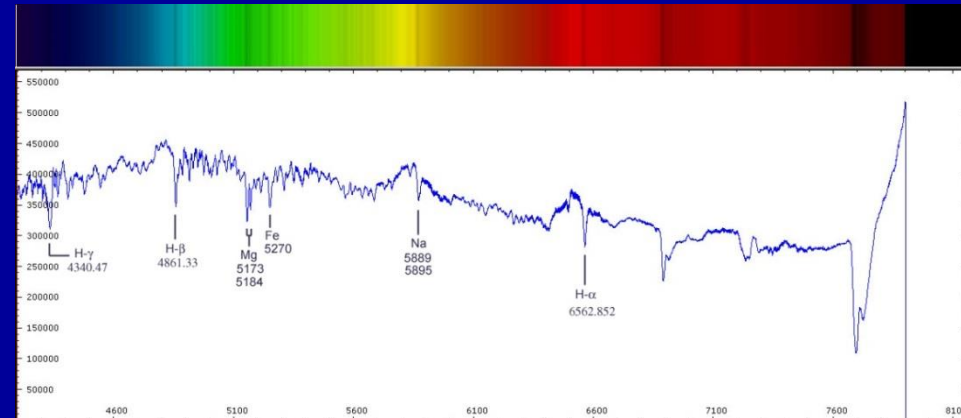
Bereich, in dem flüssiges Wasser dauerhaft auf Planeten existieren kann, abhängig von der Sternleuchtkraft (Masse, Radius, Oberflächentemperatur)

Planetenatmosphären

Spektrum "Fingerabdruck"



Sonnenspektrum



Wenn die Photosynthese auf der Erde stoppt, dann fällt das Sauerstoffniveau exponentiell auf $<0.4\%$ in ~ 10 Millionen Jahren ab.

Teleskope sollten bei erdähnlichen Planeten nach O_2 suchen (Ozon, Wasser).

Erdatmosphäre über geologische Zeiträume



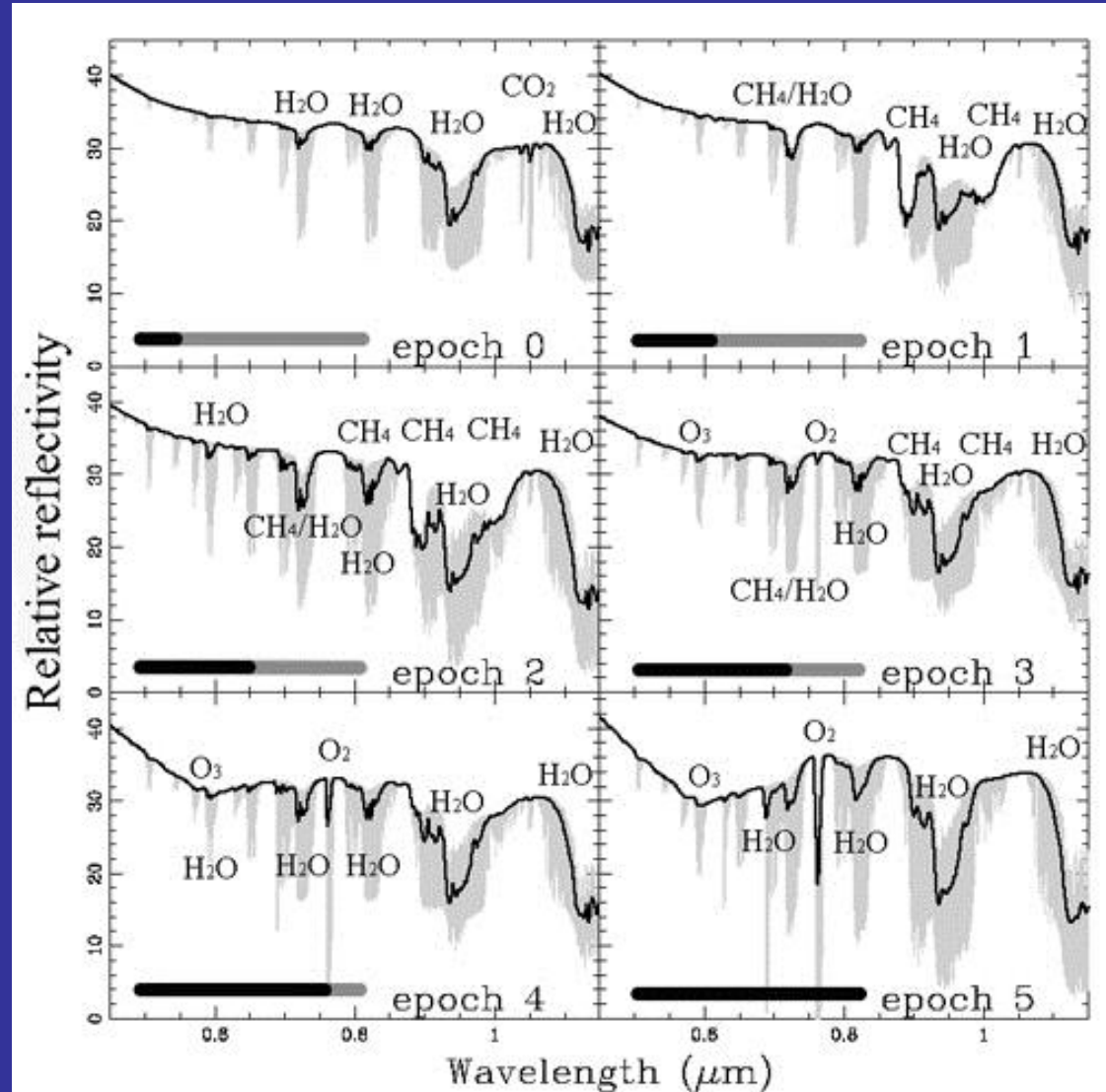
0: 3.9-3.5 GJahre: N_2 , CO_2 , H_2S



3: 2.5-2 GJahre: CH_4 , N_2 , CO_2

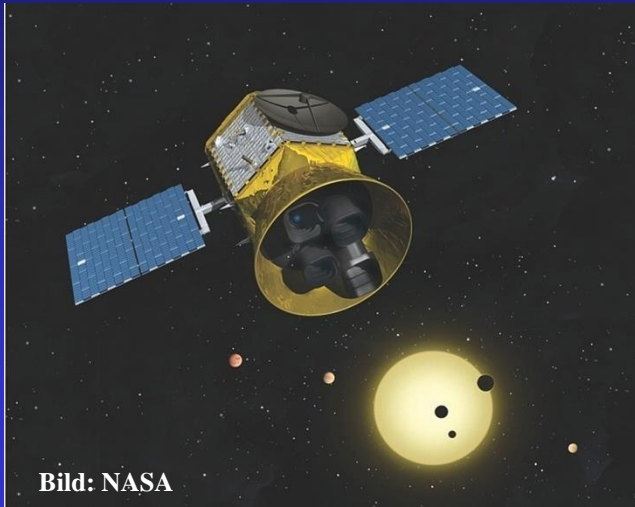


5: 300 Mill. Jahre – Heute: N_2 (78%), O_2 (21%)



Kaltenegger, Traub, Jucks (2007)

Die neuen Missionen ...



TESS (NASA)

Transiting Exoplanet Survey Satellite

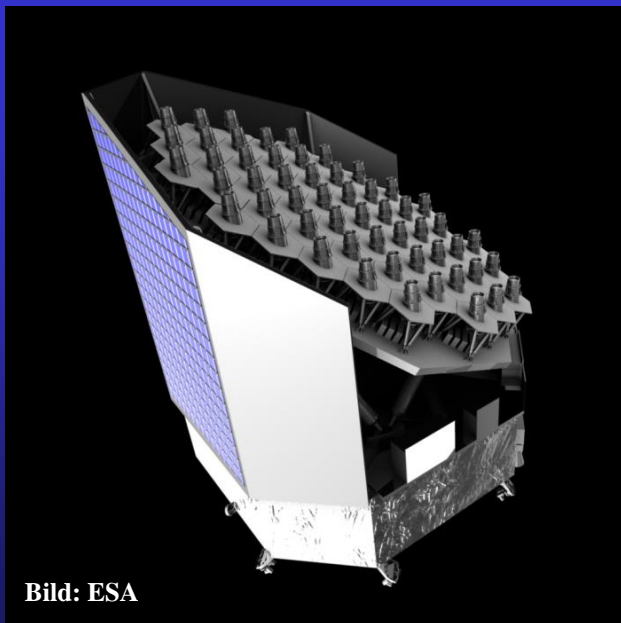
Start: April 2018 – 2 Jahre Mission

500.000 Sterne (F5 bis M5)

Hellste 100.000 Sterne: 1 Minuten Kadenz

4 Kameras: 24°x24° Feld jeweils

16.8 Mpixel CCDs



PLATO (ESA)

(Planetary Transits & Oscillations of Stars)

Start: 2026 – 6 Jahre

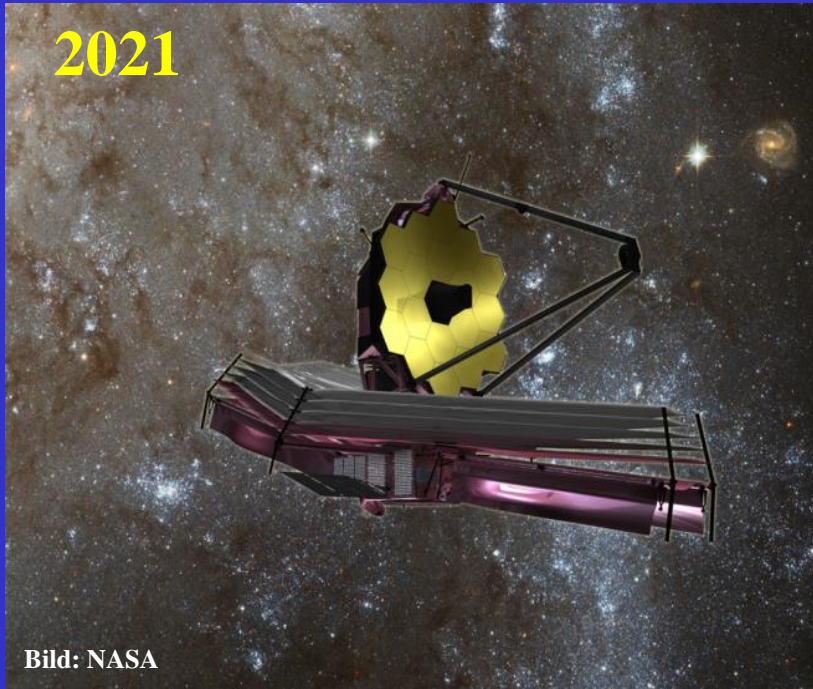
32 Teleskope (8-11 mag)

2 Teleskope (4-8 mag)

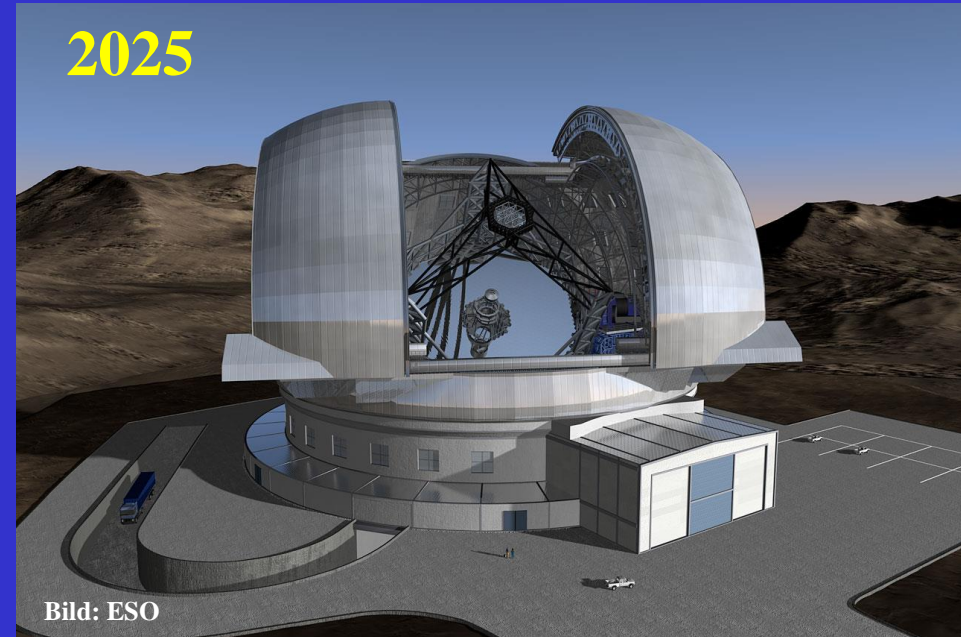
Gesamtfeld per Pointing: 2250 Quadratgrad

4 CCDs per Teleskop (4510x4510 pixels)

Scheiben & Planeten – Die Zukunft ist strahlend ...



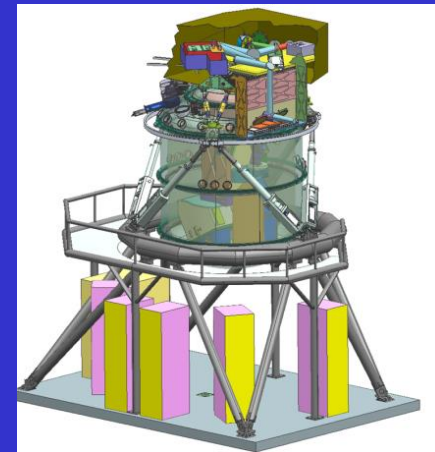
James Webb Space Telescope




European Extremely Large Telescope



MIRI Instrument/MPIA



METIS Instrument/MPIA

The background of the slide is a vast field of galaxies, known as the Hubble Ultra Deep Field. It shows a dense collection of galaxies in various shapes and sizes, including spiral, elliptical, and irregular forms, scattered across a dark cosmic background. The galaxies are illuminated in various colors, from bright yellow and orange to deep blues and purples, representing different stages of star formation and galaxy evolution.

**Es gibt viele Milliarden von Sternen in vielen
Milliarden von Galaxien.**

**Aufgrund der bisherigen Exoplanetenentdeckungen
kann man davon ausgehen, dass fast alle Sterne
Planeten besitzen.**

Wir leben in interessanten Zeiten!