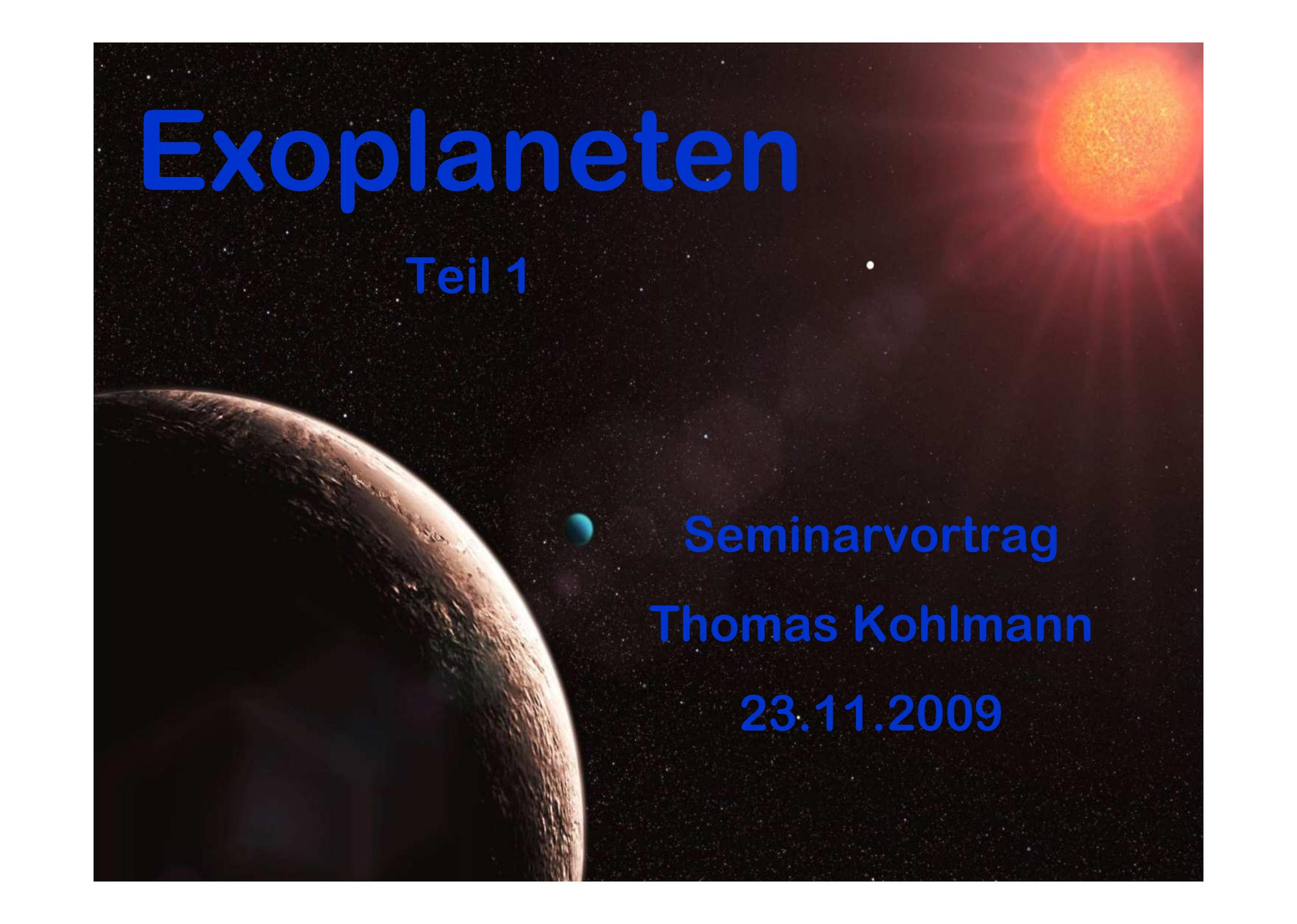


Exoplaneten

The background of the slide is a space-themed image. In the top right corner, there is a large, bright, orange-red star with a visible surface texture. In the bottom left corner, the curved, cratered edge of a brownish planet is visible. In the center of the frame, a small, blue-green planet is shown against the dark, star-filled background.

Teil 1

Seminarvortrag

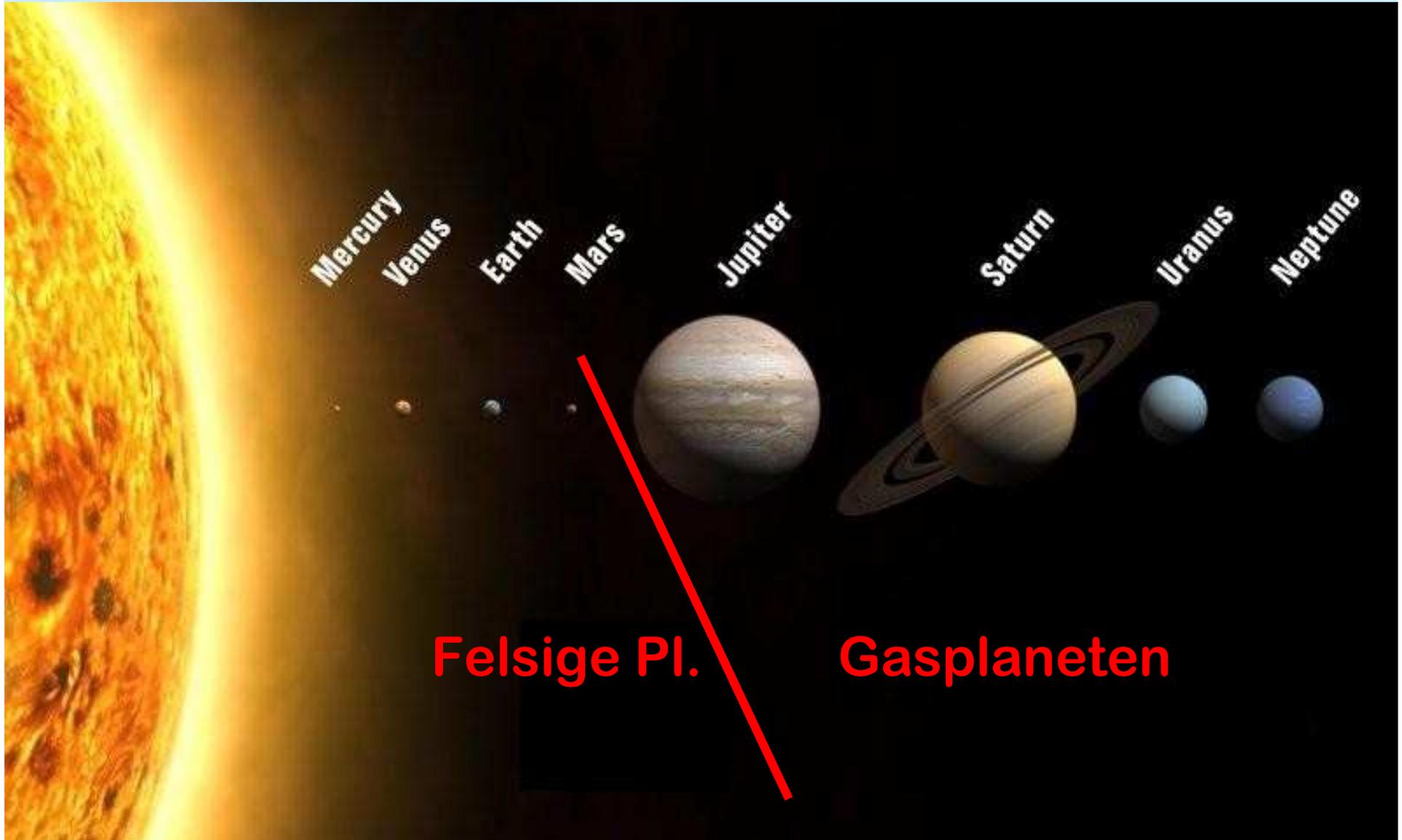
Thomas Kohlmann

23.11.2009

Was ist ein Planet ?

- früher: unstetes himml. Objekt, „Wandelstern“
- neue Entdeckungen → Definition schwieriger
- Planet :
Sternbegleiter mit weniger als $13 M_J$
(→ keine Deuteriumfusion)

Unser Sonnensystem



Was ist ein Exoplanet ?

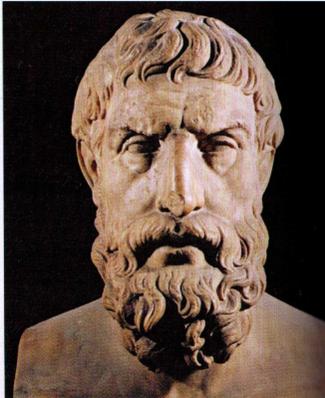
- Extrasolar → außerhalb des Sonnensystems
- KURZ: **EXOPLANET =**
Planet um einen anderen Stern
- Namensgebung:
z.B. **51 Peg b**

Warum interessant ?

- **rein wissenschaftlich**
 - jetzt aufspürbar !
 - Entwicklungsstadien → unser Sonnensystem!
 - Dynamik
- **philosophischer Ansatz :**



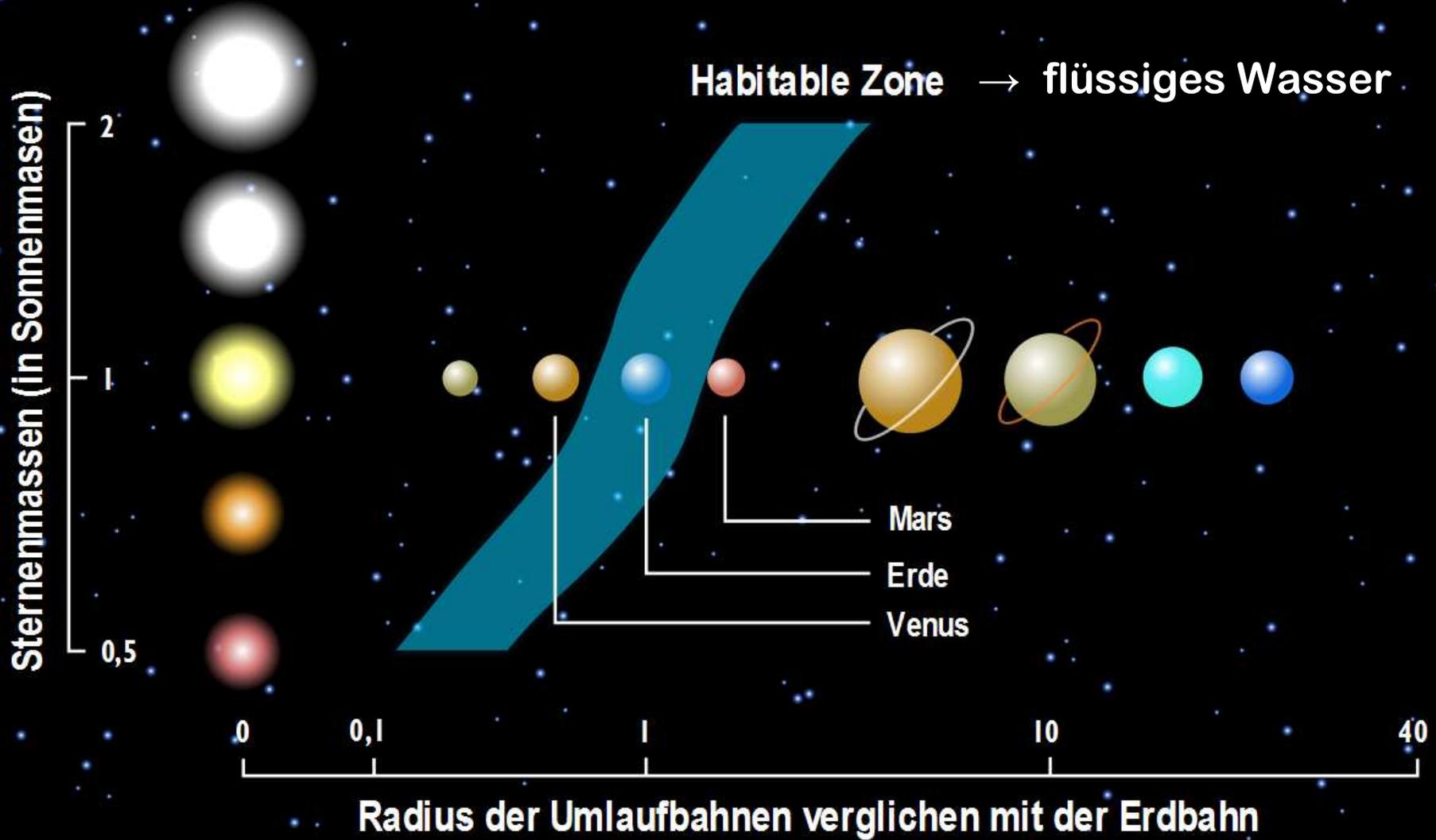
Aristoteles



Epicorus

Exo-Erden → LEBEN ?

Habitable Zone



Kurze Entdeckungsgeschichte

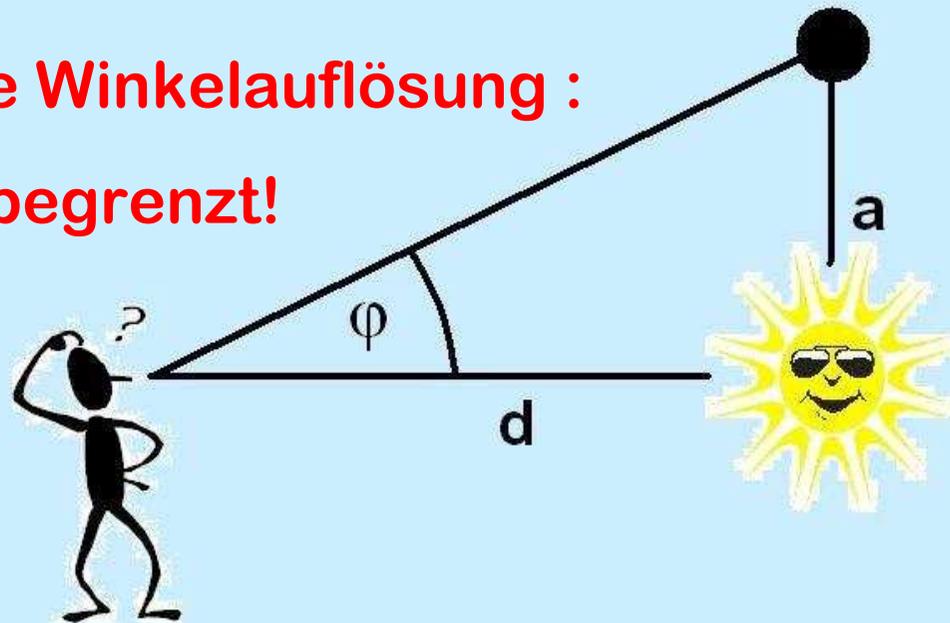
- **Mitte 20.Jhd. : Viele Falschmeldungen**
- **1992 : erste Planeten um Pulsar (Wolszczan)**
- **1995 : erster Planet um sonnenähnlichen Stern (Mayor & Queloz)**
- **1997 : erstes Planetensystem**
- **2004 : erste direkte Beobachtung (ESO)**
- **Okt. 2009 : 403 Exoplaneten in 341 Systemen**

Übersicht über Methoden

- **Direkte Abbildung :**
 - △ Koronographie
 - △ Interferometrie
 - △ Weltraumteleskope
 - △ adaptive Optiken
- **Indirekte Methoden :**
 - △ Radialgeschwindigkeit
 - △ Transit
 - △ Astrometrie
 - △ Lichtlaufzeitvariationen
 - △ Gravitationslinseneffekt

Direktes Abbilden → Probleme!!!

- **prinzipielle Winkelauflösung :
beugungsbegrenzt!**



$$\varphi \approx \tan \varphi = \frac{a}{d} \quad \rightarrow \quad \frac{1 \text{ AU}}{50 \text{ ly}} \approx 0,065''$$

$$\rightarrow \text{Teleskop: } \varphi_{\min} = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad \rightarrow \quad D \approx 2,7 \text{ m}$$

Direktes Abbilden → Probleme!!!

➤ Intensitätsverhältnis

$$\frac{L_{\text{Pl.}}}{L_*} = p(\lambda, \alpha) \cdot \left(\frac{R_{\text{Pl.}}}{a} \right)^2 \approx 10^{-9}$$



x * 100km



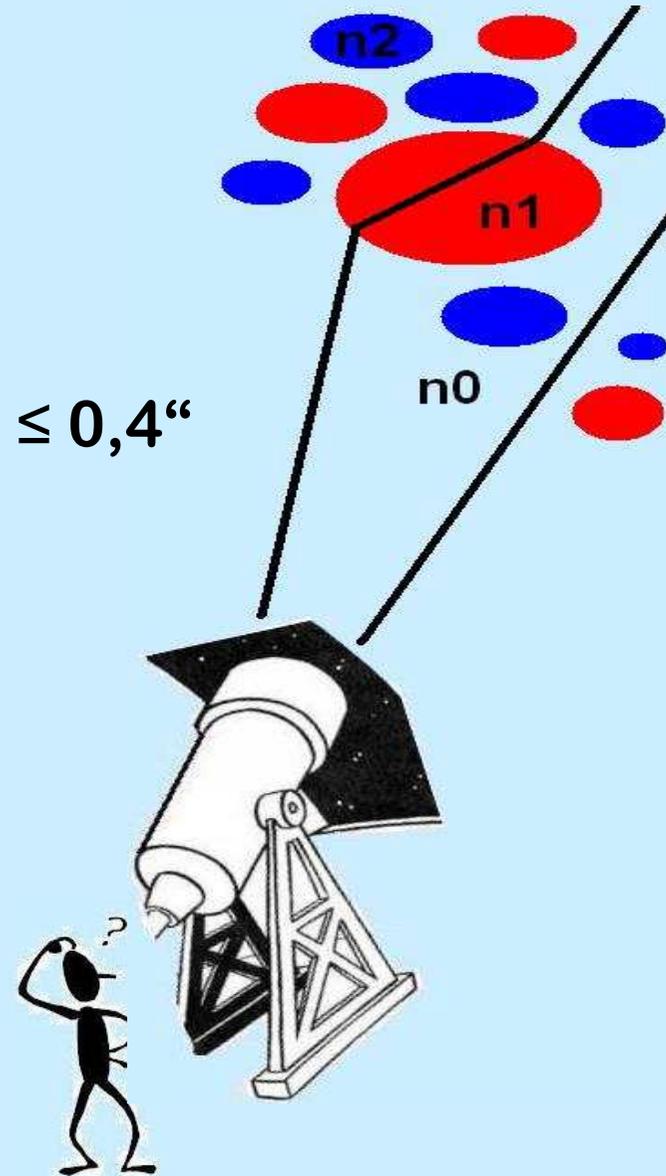
→ sehr empfindliche Apparaturen nötig !!!

Direktes Abbilden → Probleme!!!

➤ Seeing

→ atmosphärische Turbulenzen

→ Europa : 2" - 5" Chile: evtl. $\leq 0,4''$

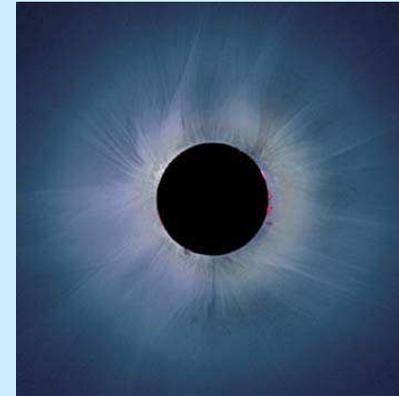


Direktes Abbilden → Lösungen!!!

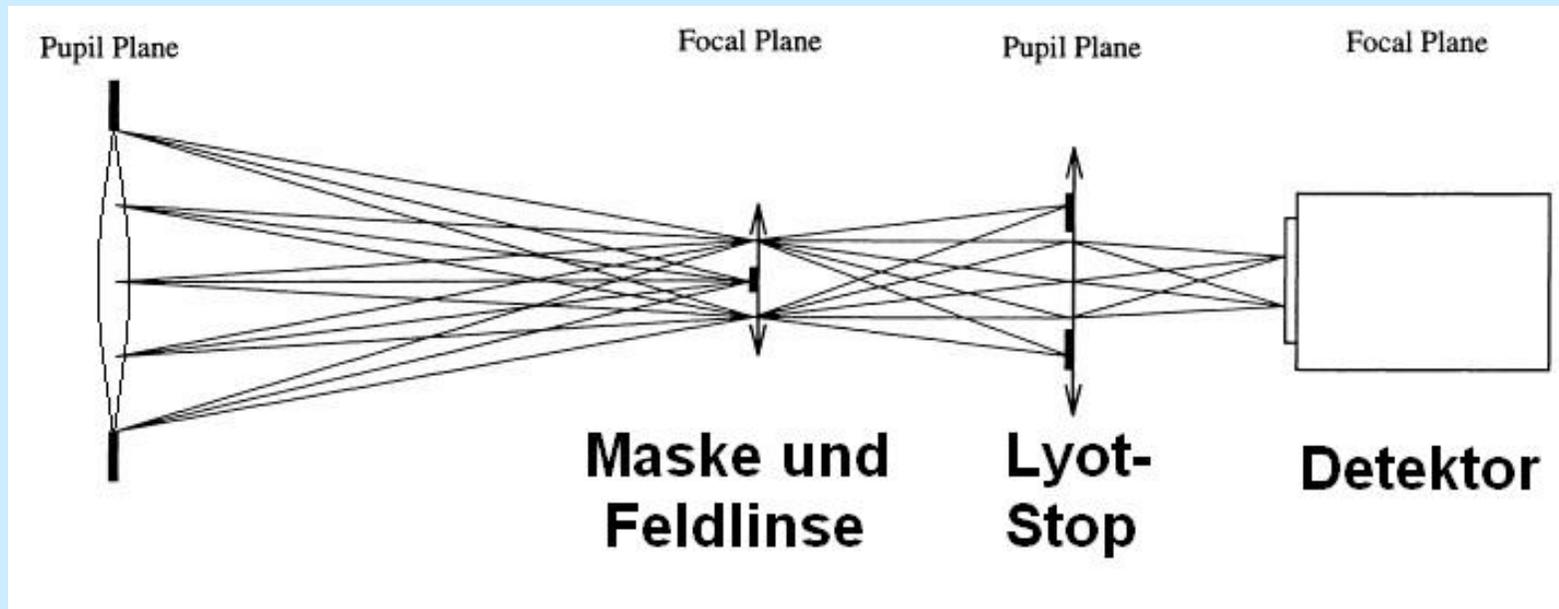
- **Intensitätsverhältnis :**
 - **Allg. : Infrarotbereich**
 - **Koronographie**
 - **Nulling Interferometrie**
- **Seeing :**
 - **Weltraumteleskope**
 - **Adaptive Optiken**
 - **...**



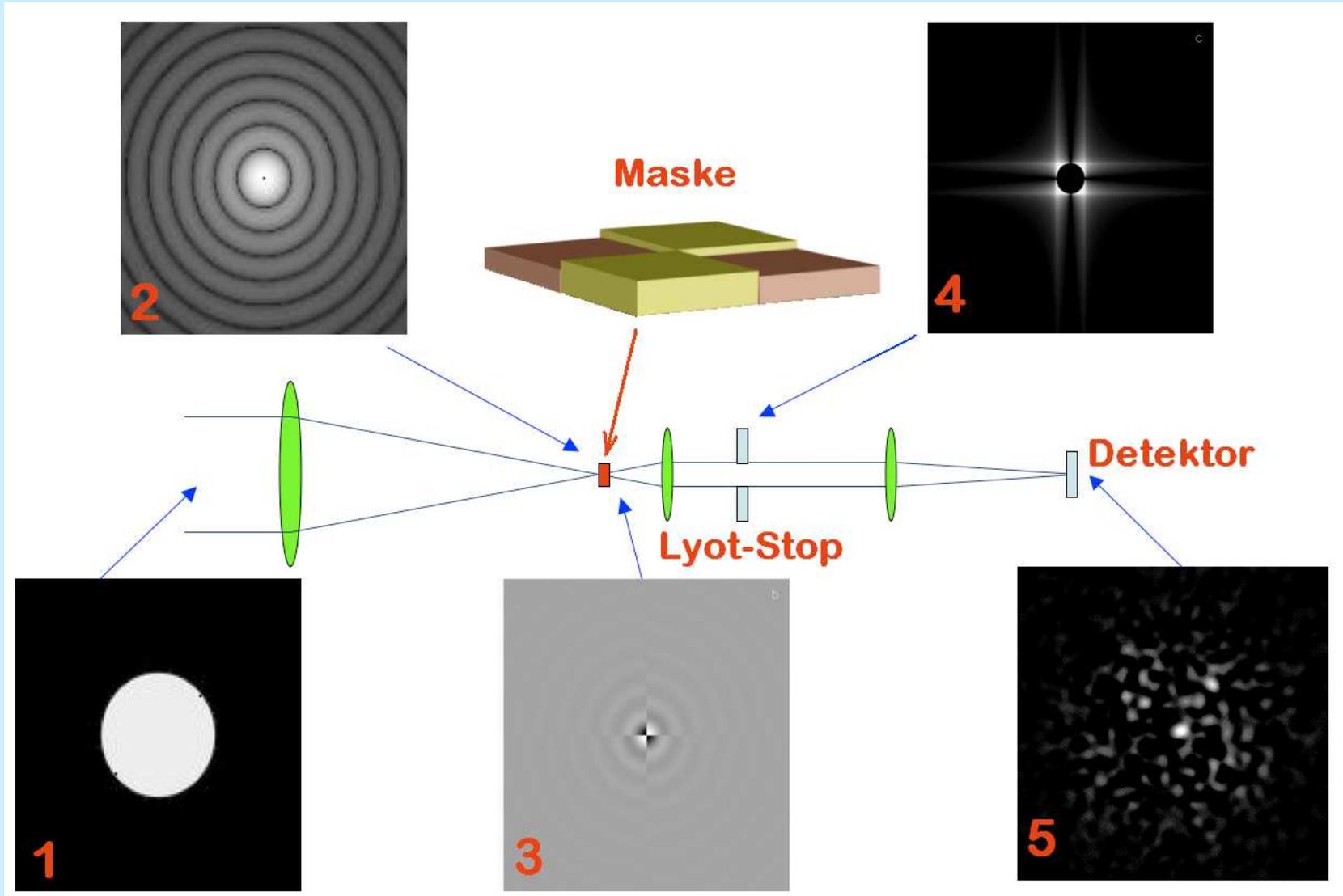
Koronographie



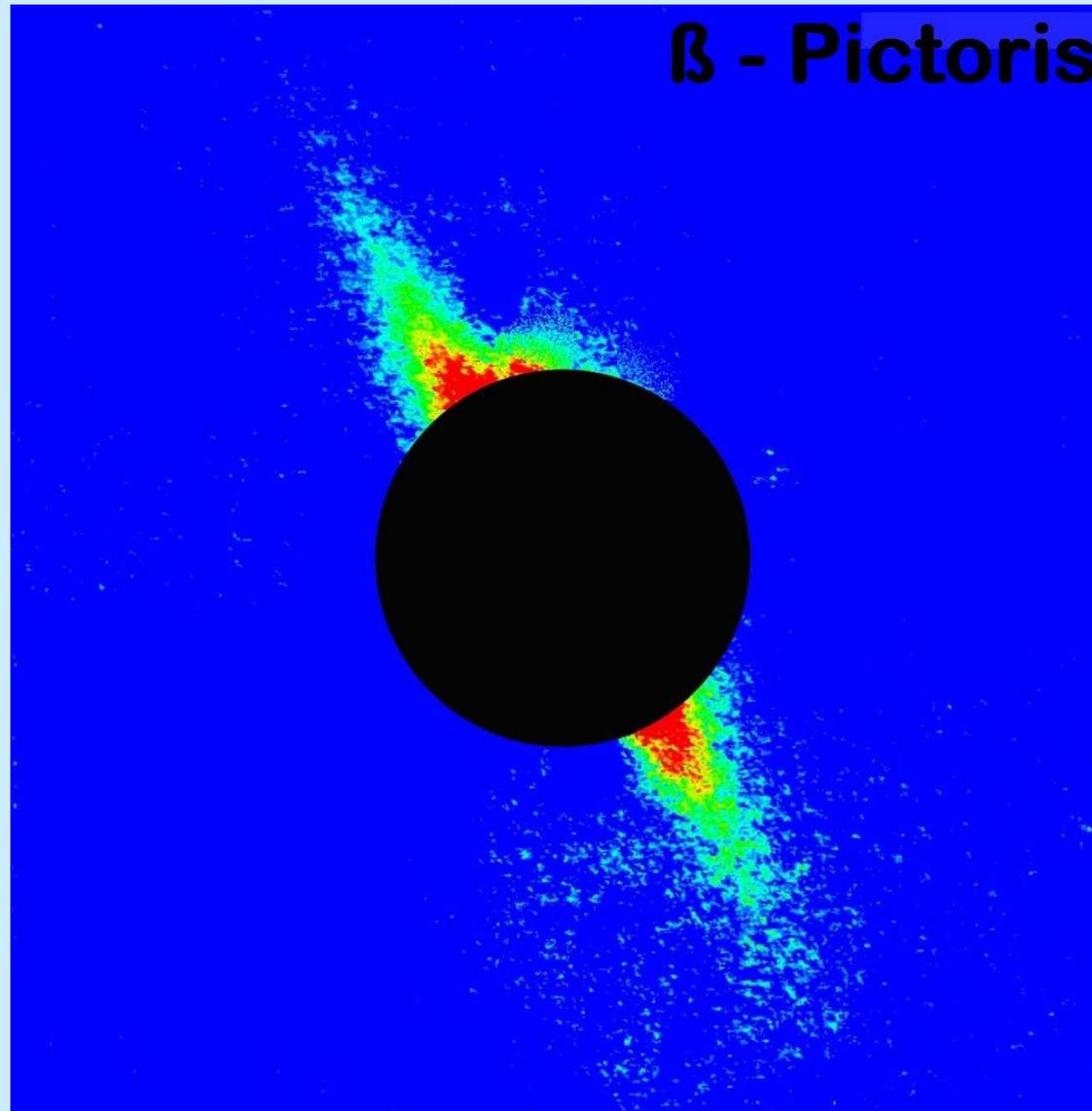
- **gezieltes Unterbrechen störenden Lichts**, z.B. durch Masken in Fokusebene



Koronographie : Beispiel

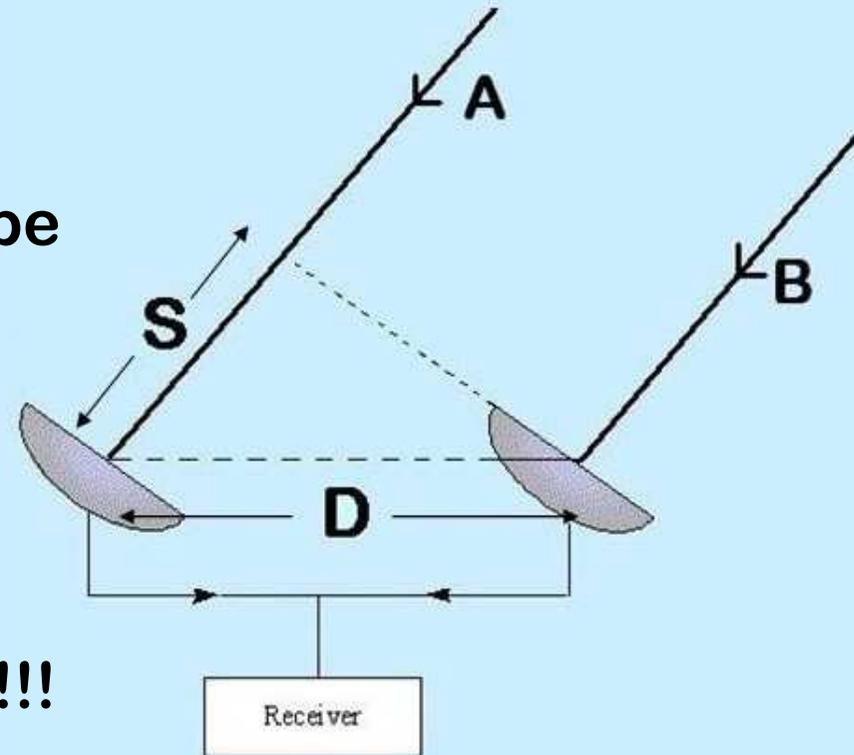


Koronographie : Erfolge

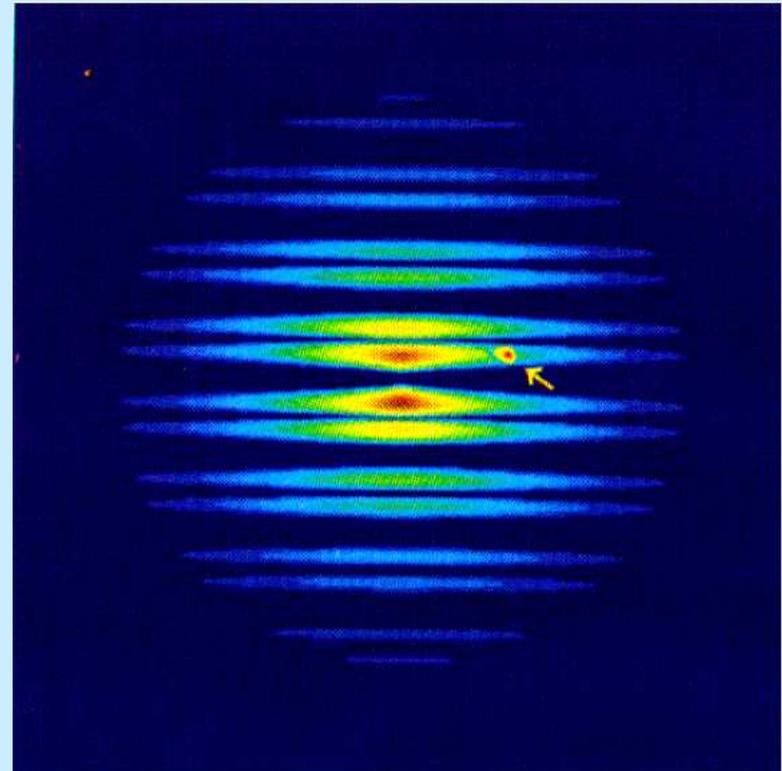
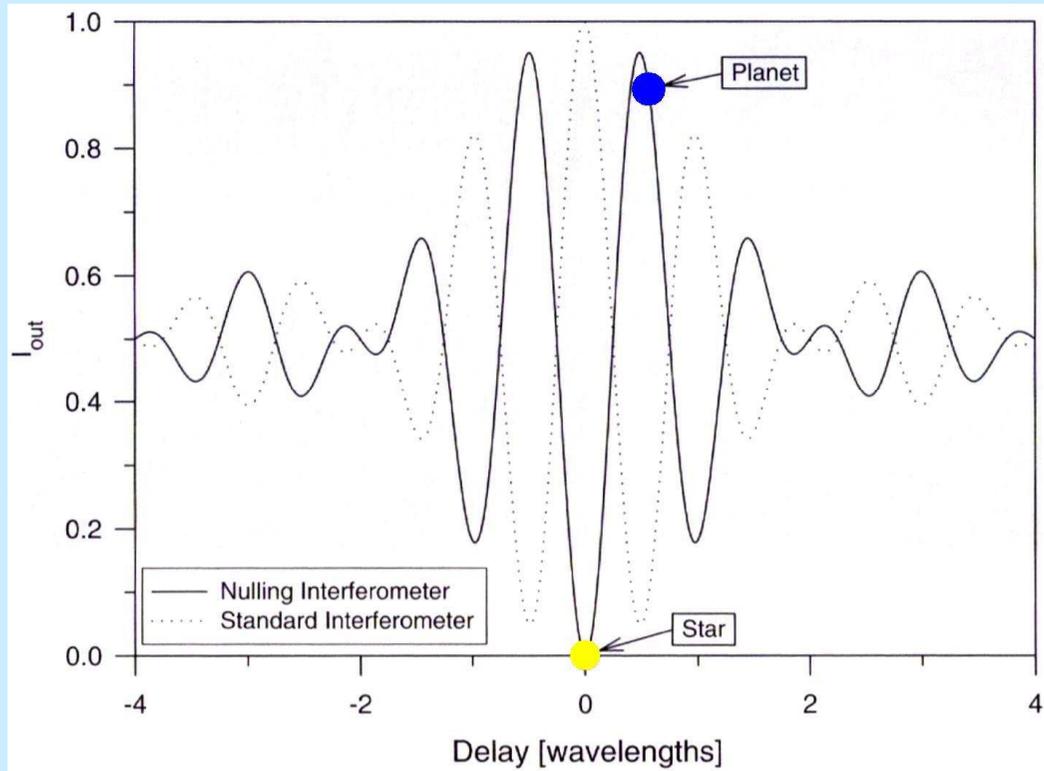


Nulling Interferometrie

- Idee : 1978, Bracewell
1 → 2 oder mehr Teleskope
- Signale interferieren
→ destruktiv für Stern,
konstruktiv für Planet !!!



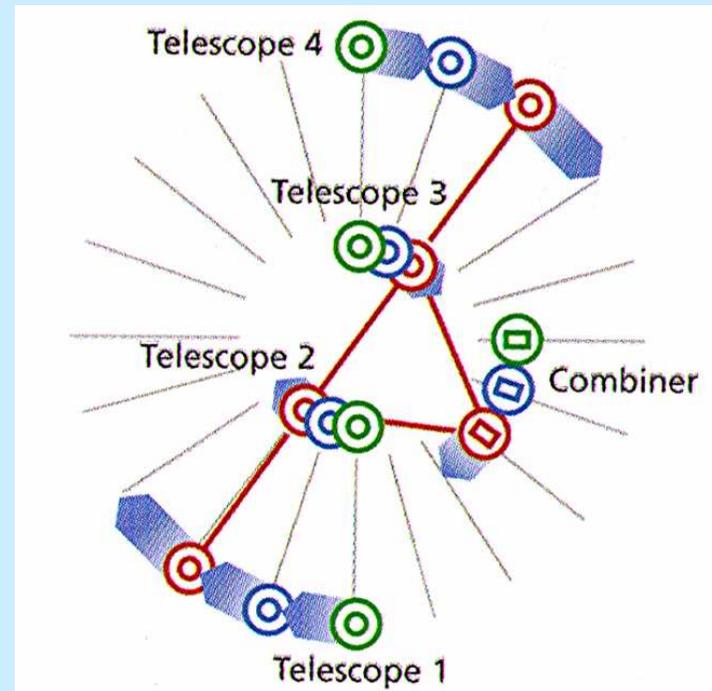
Nulling Interferometrie



Nulling Interferometrie : Probleme

- ungenaue Ausrichtung
- Phasenfluktuationen
- interne Kontrastverluste
- Wellenfrontverzerrungen

- Abhilfe : Interferometer
drehen →



Nulling Interferometrie : Einsatz

➤ Heute : z.B.

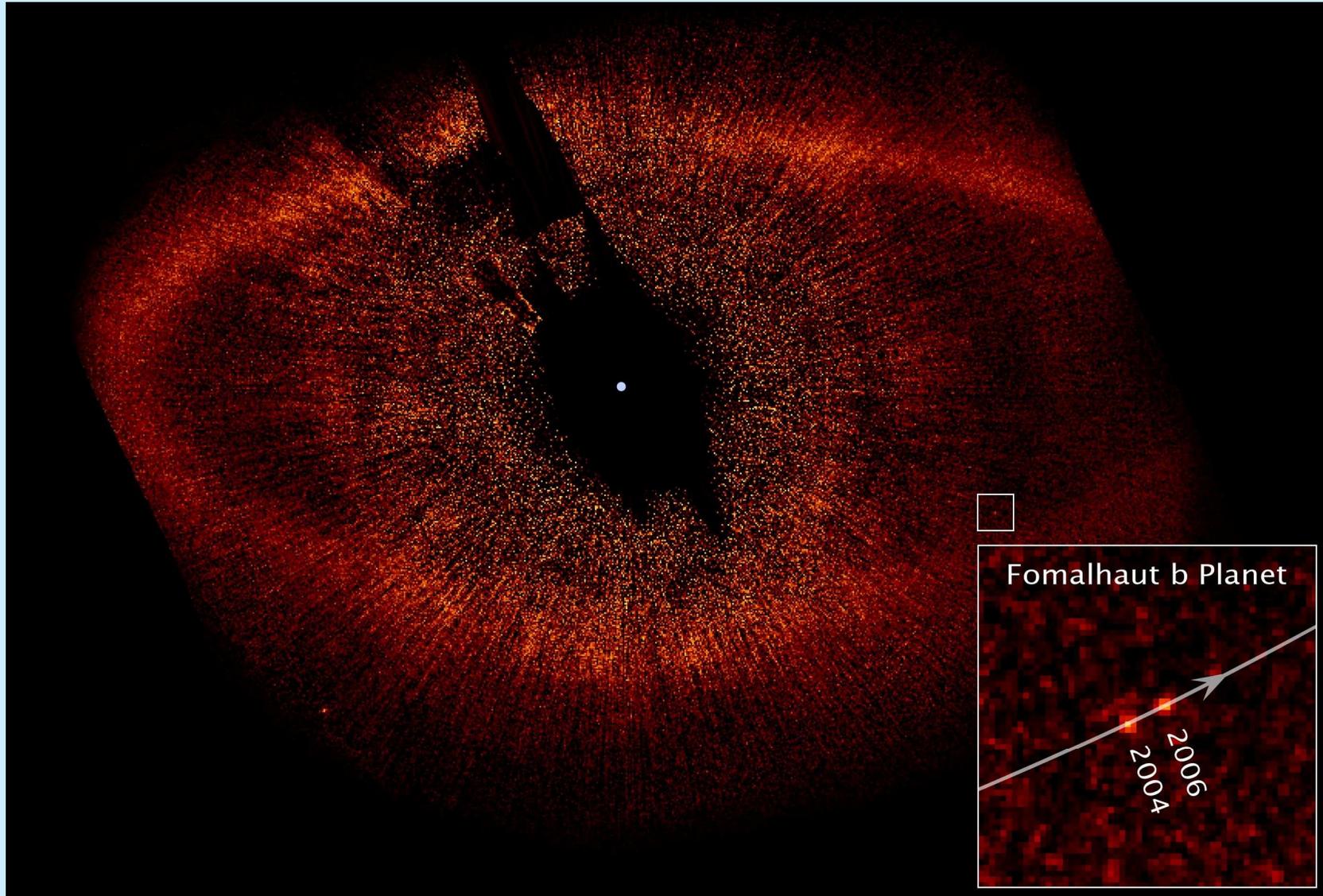


Weltraumteleskope

- kein Seeing
- keine Filterwirkung (z.B. auf UV-Bereich)
- Hubble (seit 1990) / James Webb (ca.2013)



Weltraumteleskope : Formalhaut b



Adaptive Optiken

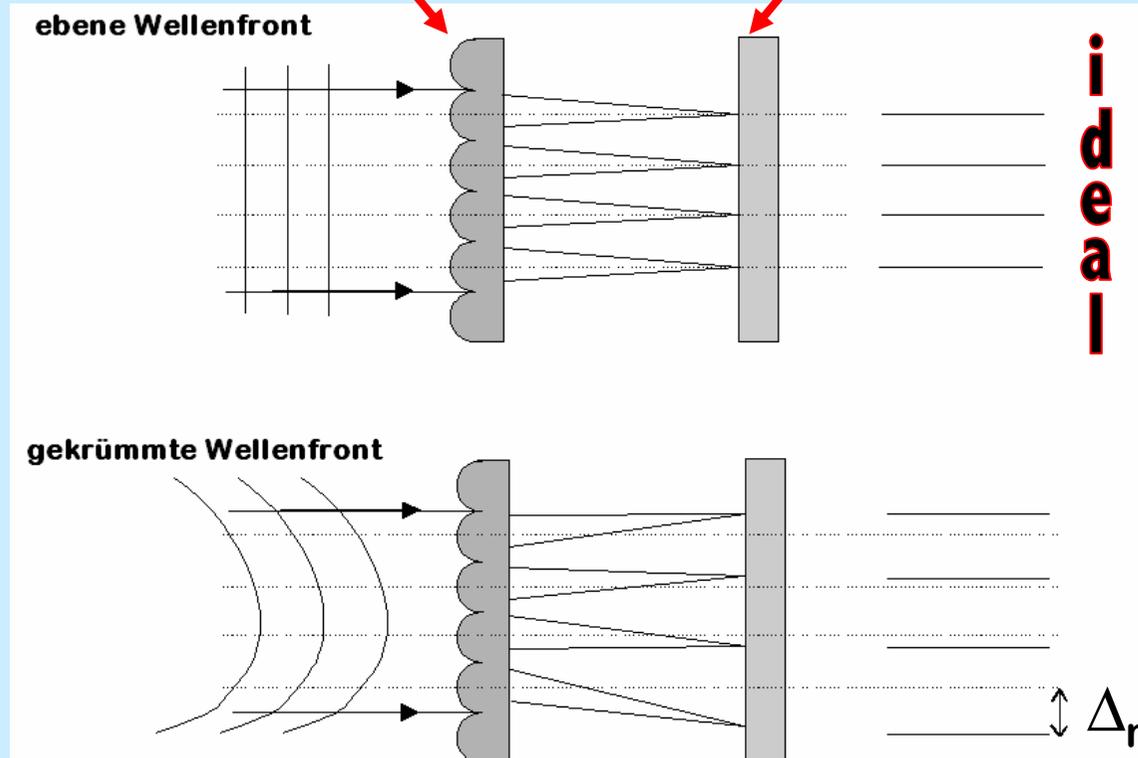
- entwickelt vom US-Militär in 70ern
- erste zivile Anwendungen ca. 20 Jahre später
- heute: weit verbreitet, u.a. am VLT (ESO)

- Prinzip : **geschlossener Regelkreis:**
 1. Wellenfrontsensor
 2. Rekonstruktionsrechner
 3. Aktives optisches Element

Adaptive Optiken : Hartmann-Shack-Sensor

Mikrolinsenarray

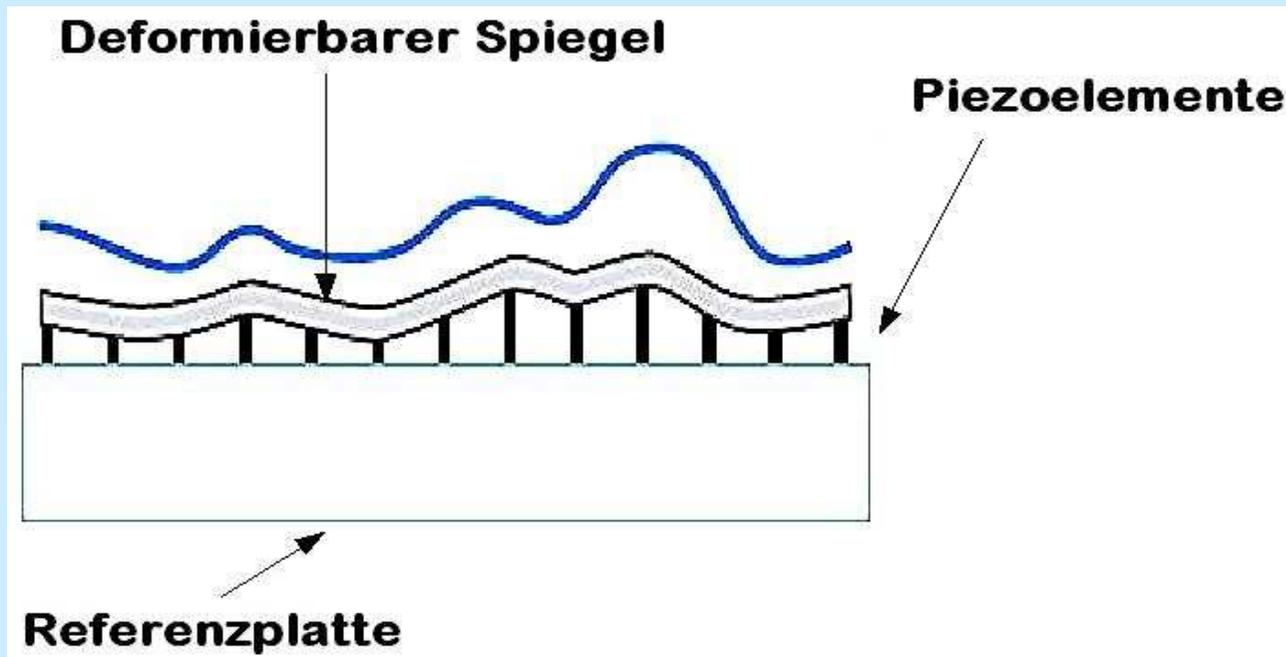
ortsempf. Detektor



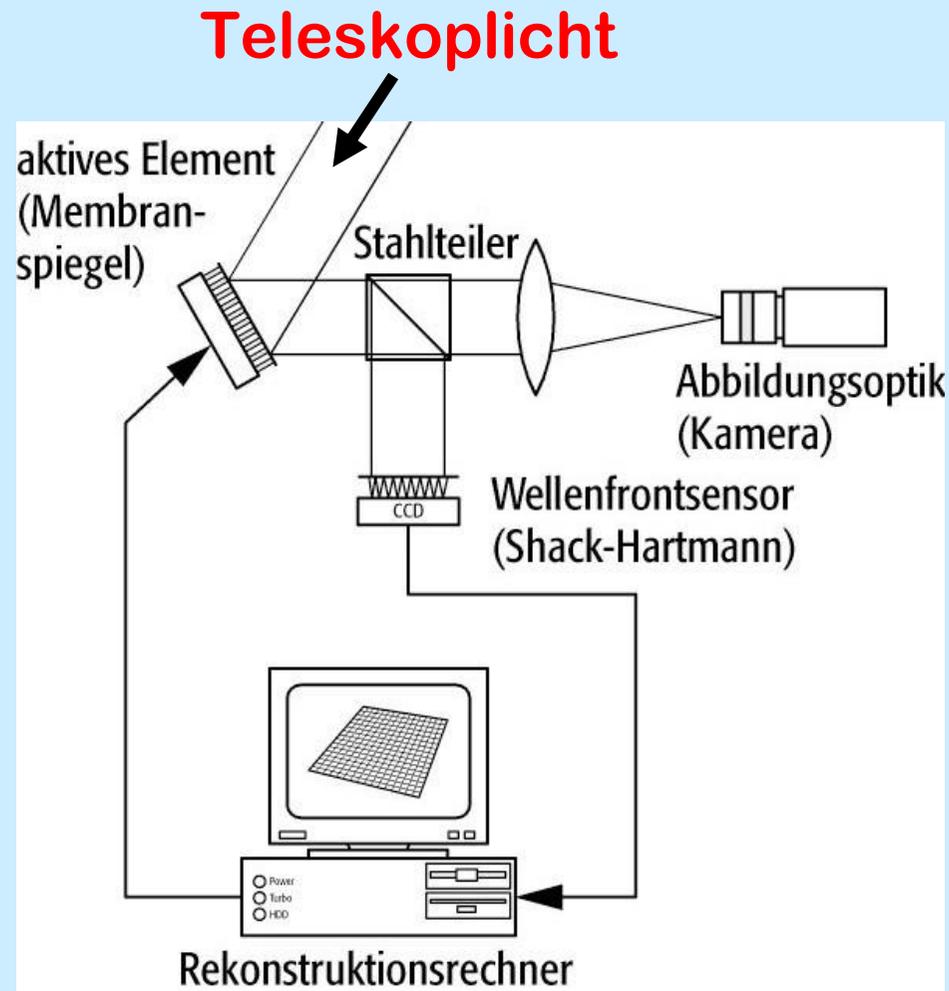
➤ Gradientenfeld der Welle!

Adaptive Optiken : Computer und Spiegel

- **Echtzeitcomputer :**
Datenverarbeitung und -weiterleitung
- **Membranspiegel :**



Adaptive Optiken : Gesamtaufbau



- mehrere 100mal pro Sekunde!

Adaptive Optiken : Beispiel

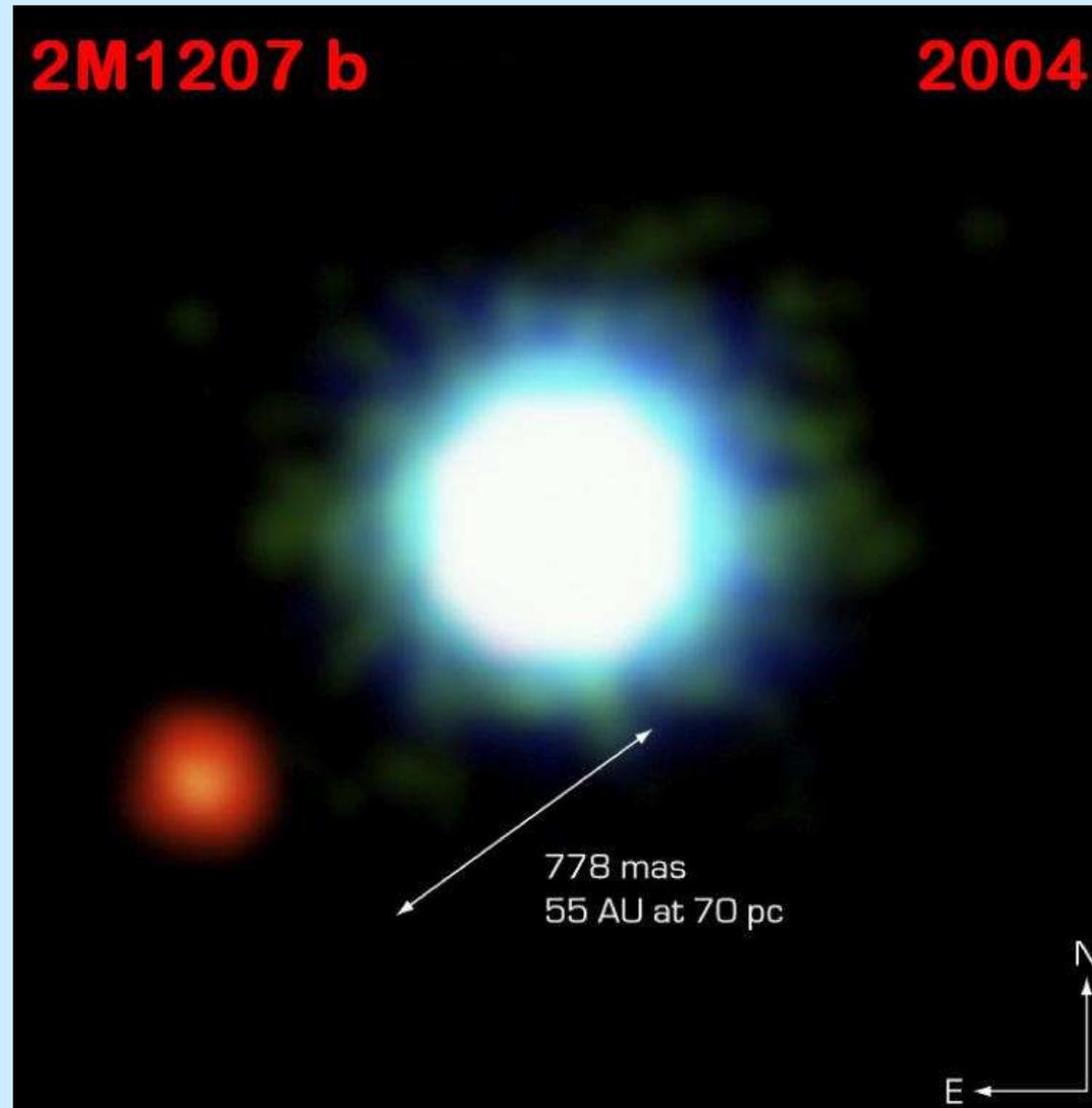
Ohne



26" = 45 km

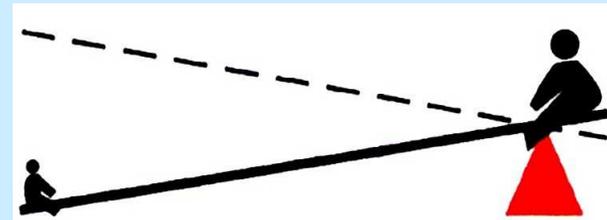
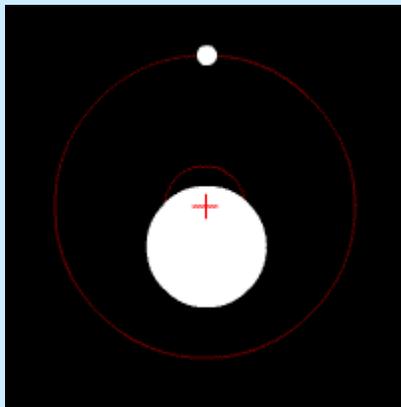
Mit

Adaptive Optiken : Erfolge



Radialgeschwindigkeitsmethode

- Planet und Stern bewegen sich um gemeinsamen Schwerpunkt

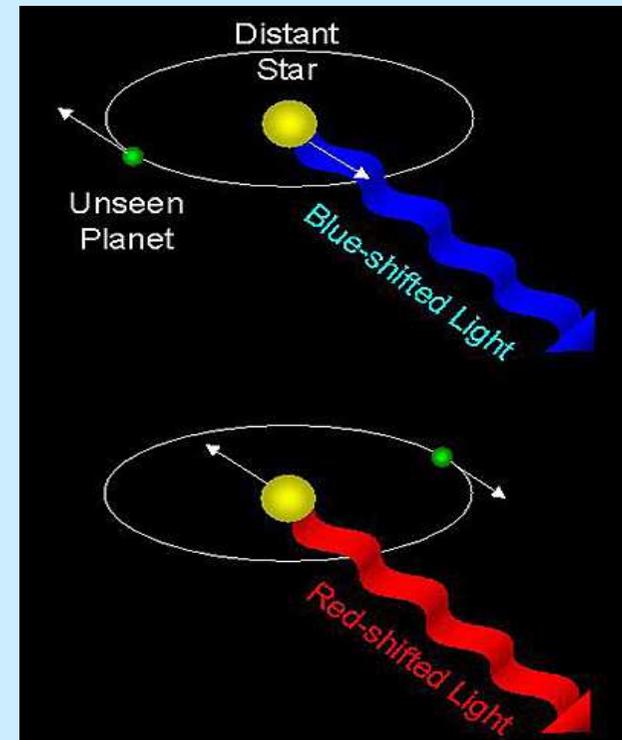
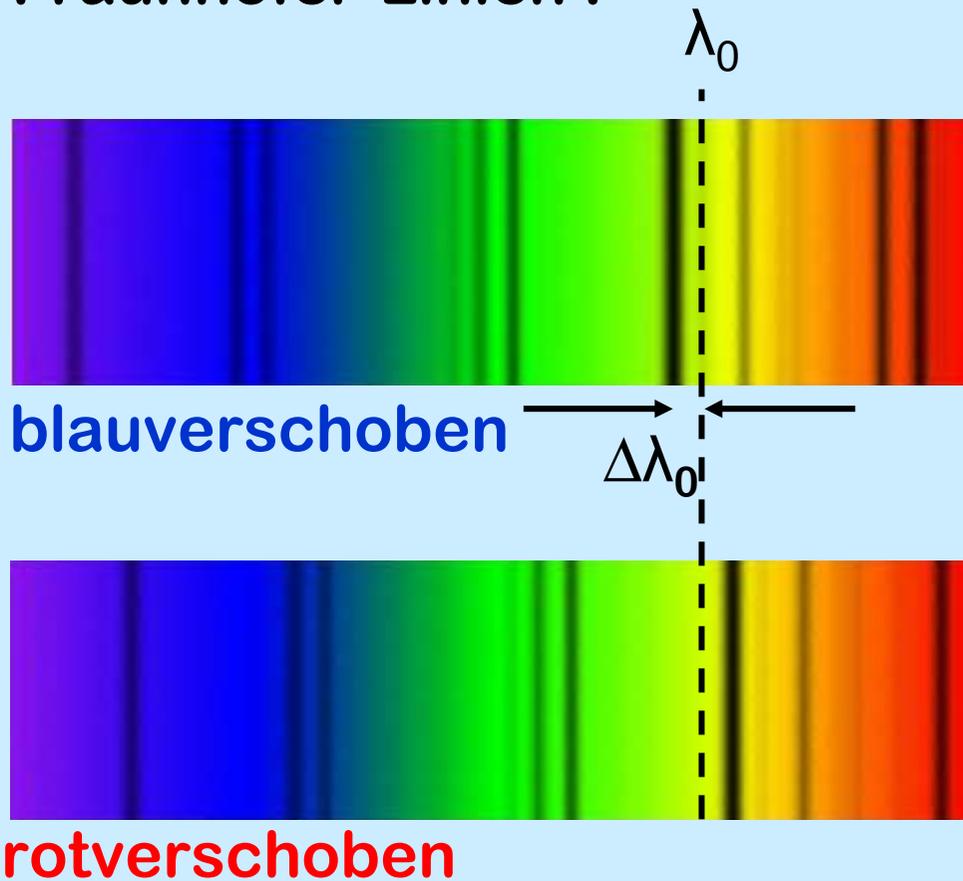


- Periodische Sternbewegung
- bewegter Sender von EM-Wellen !

Radialgeschwindigkeitsmethode

➤ Dopplereffekt: $\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$ messbar durch

➤ Fraunhofer-Linien :



Radialgeschw.-methode : Probleme mit Linien

➤ **Linienverbreiterung**

→ durch diffuse Atombewegung aufgrund T_{Stern}

➤ **v_* sehr gering**

→ Erde / Sonne : ≈ 9 cm/s ! Nur 1 m/s auflösbar !

→ oft nur $\frac{1}{1000}$ der Linienbreite !

➤ **Planeten mit langen Perioden**

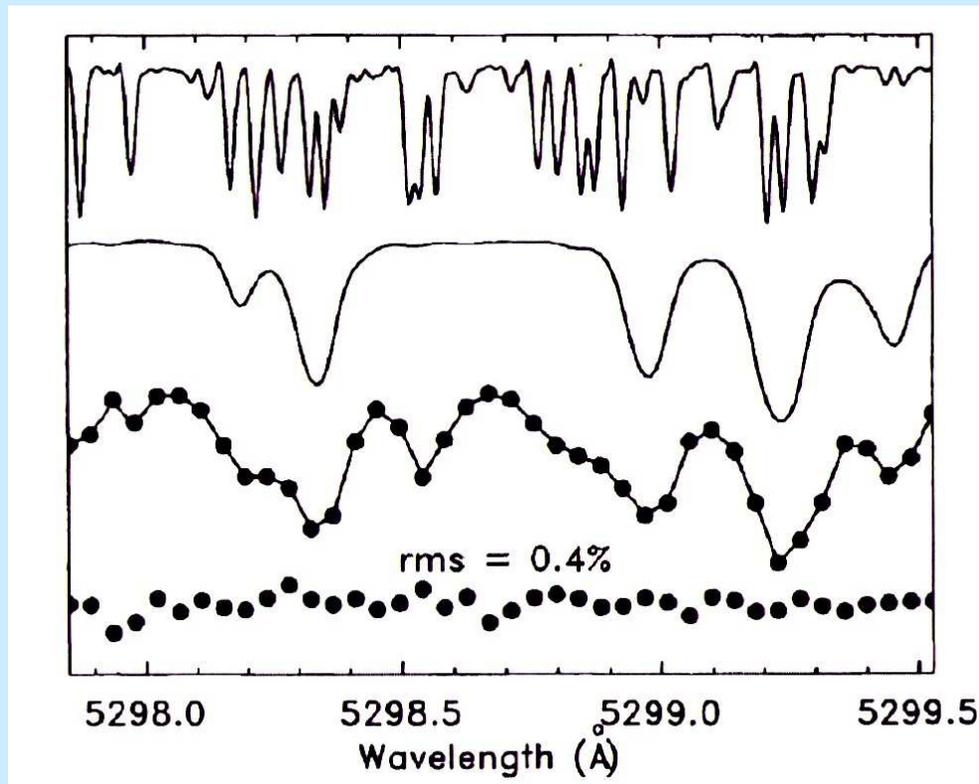
→ langzeitstabile Messung !

➤ **exakte Messung der Verschiebung schwierig**

→ keine feste Referenz

Radialgeschwindigkeitsmethode : Jodzelle

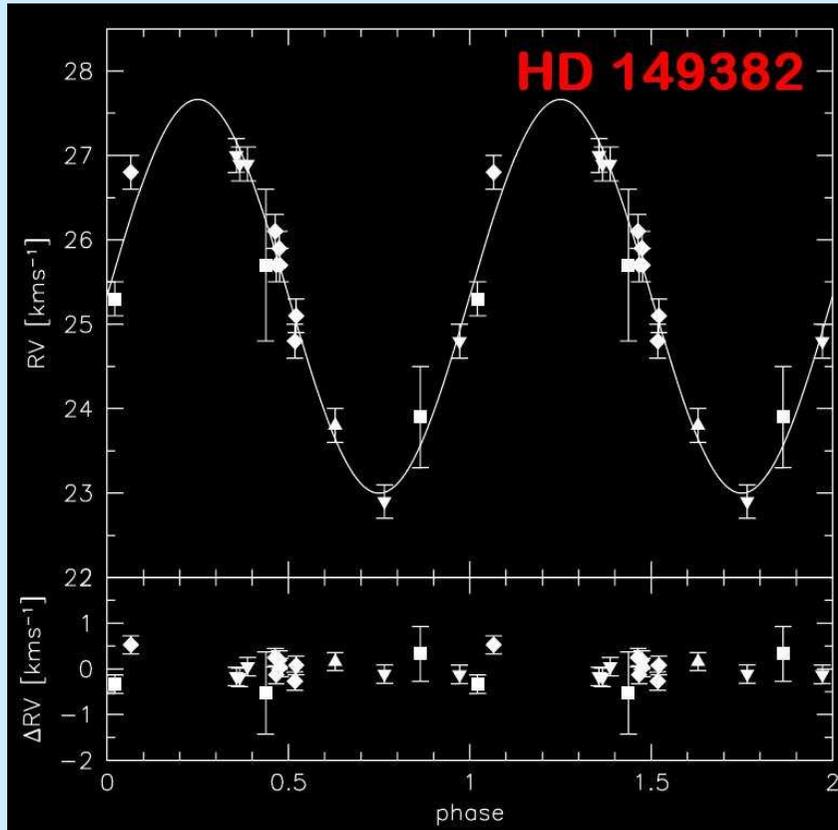
- Aufprägen von Referenzlinien : **Jodzelle**
- Linien : fest, schmal, langzeitstabil



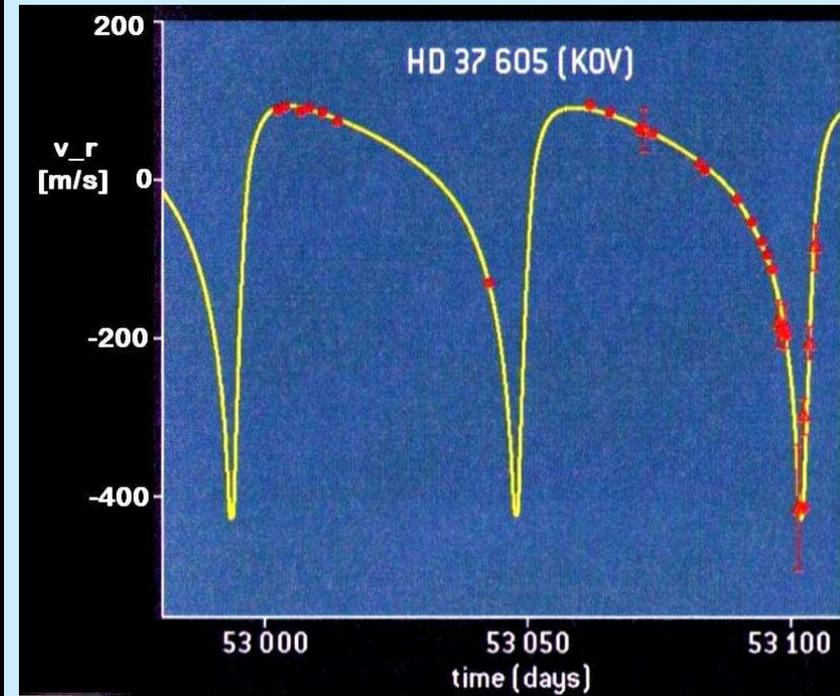
- Jodspektrum
- Sternspektrum
- **Messung (Punkte)**
- 10 x Abweichung

Radialgeschwindigkeitsmethode : $v_{\text{rad}}(t)$

Beispiele:



\approx Kreisbahn ($e \approx 0$)



$e \gg 0$

Radialgeschwindigkeitsmethode

➤ Gegeben : $v_{*\perp}$, P , M_*

$$a_* \ll a_{\text{Pl.}}, M_* \gg M_{\text{Pl.}}$$

➤ aus 3. Keplergesetz

→

$$a_{\text{Pl.}} = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_* \cdot P^2}{4\pi^2}}$$

➤ $F_Z = F_G$

→

$$v_{\text{Pl.}} = \sqrt{\frac{G \cdot M_*}{a_{\text{Pl.}}}}$$

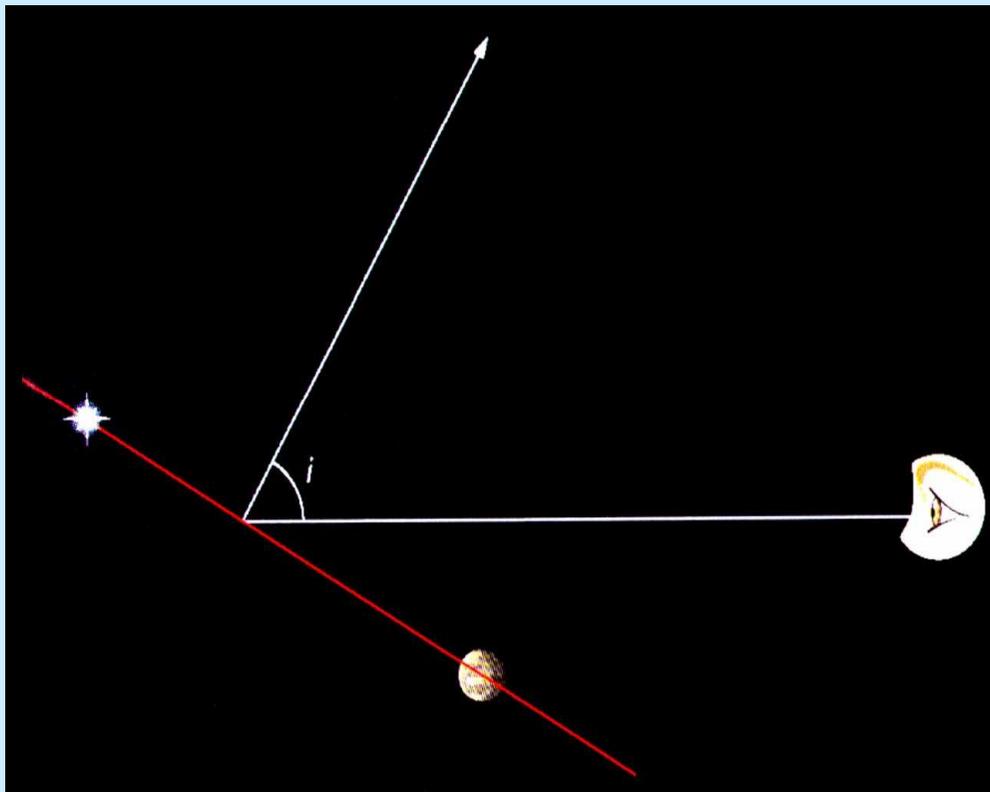
➤ Schwerpunktsatz :

→

$$M_{\text{Pl.}} = \frac{M_* \cdot v_*}{v_{\text{Pl.}}}$$

Radialgeschwindigkeitsmethode : Probleme

➤ $M_{\text{Pl.}} = \frac{M_* \cdot v_*}{v_{\text{Pl.}}}$ messe aber $v_{* \perp} = v_* \cdot \sin(i)$



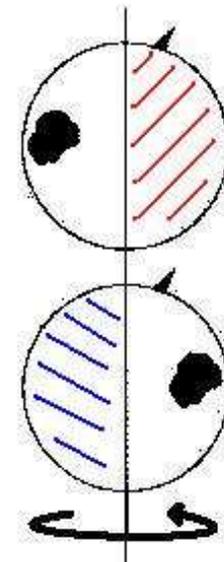
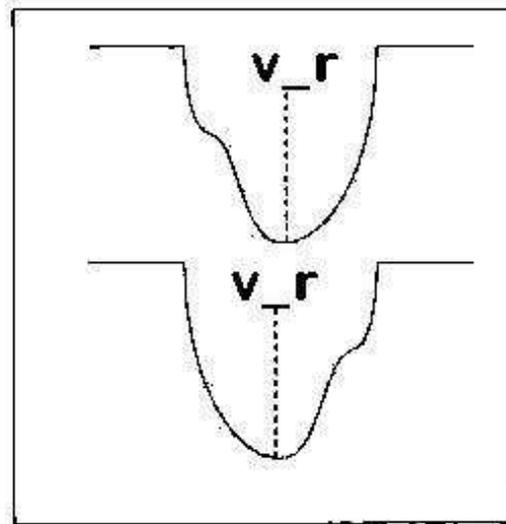
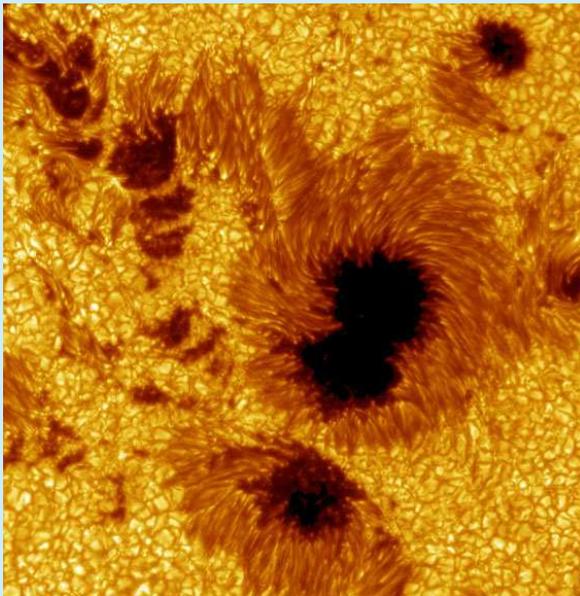
➤ **Unbekannte
Neigung i**

$$M_{\text{Pl.}} \cdot \sin(i) = \frac{M_* \cdot v_{* \perp}}{v_{\text{Pl.}}}$$

➤ **nur untere
Massengrenze
bestimmbar !**

Radialgeschwindigkeitsmethode : Probleme

➤ Pulsationen, Aktivitätszyklen, Sonnenflecken



→ periodisch ! → Exoplanet ???

Radialgeschwindigkeitsmethode : Erfolge

- 1995 : erster Exoplanet **51 Peg b**
- 1997 : erstes System **γ Andromedae (3 Pl.)**
- 2007 : evtl. in habitabler Zone

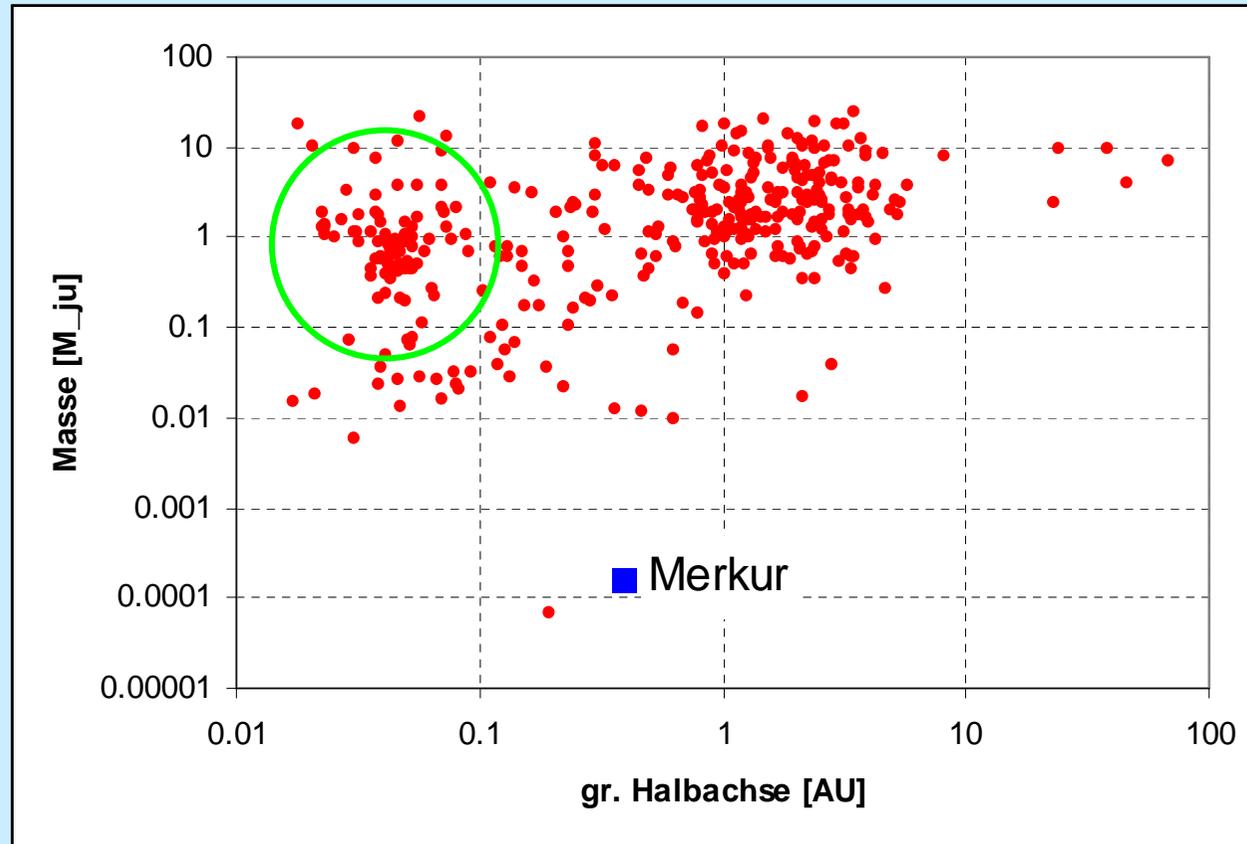
Gliese 581



Ergebnisse (Stand 27. Okt. 2009)

- **403 Exoplaneten** in **341 Systemen** bekannt
- **42 Systeme** mit mehr als einem Exoplaneten
- **~ 5% aller Systeme** mit Hinweis auf Planeten
→ **Exoplaneten eher die Regel !!!**

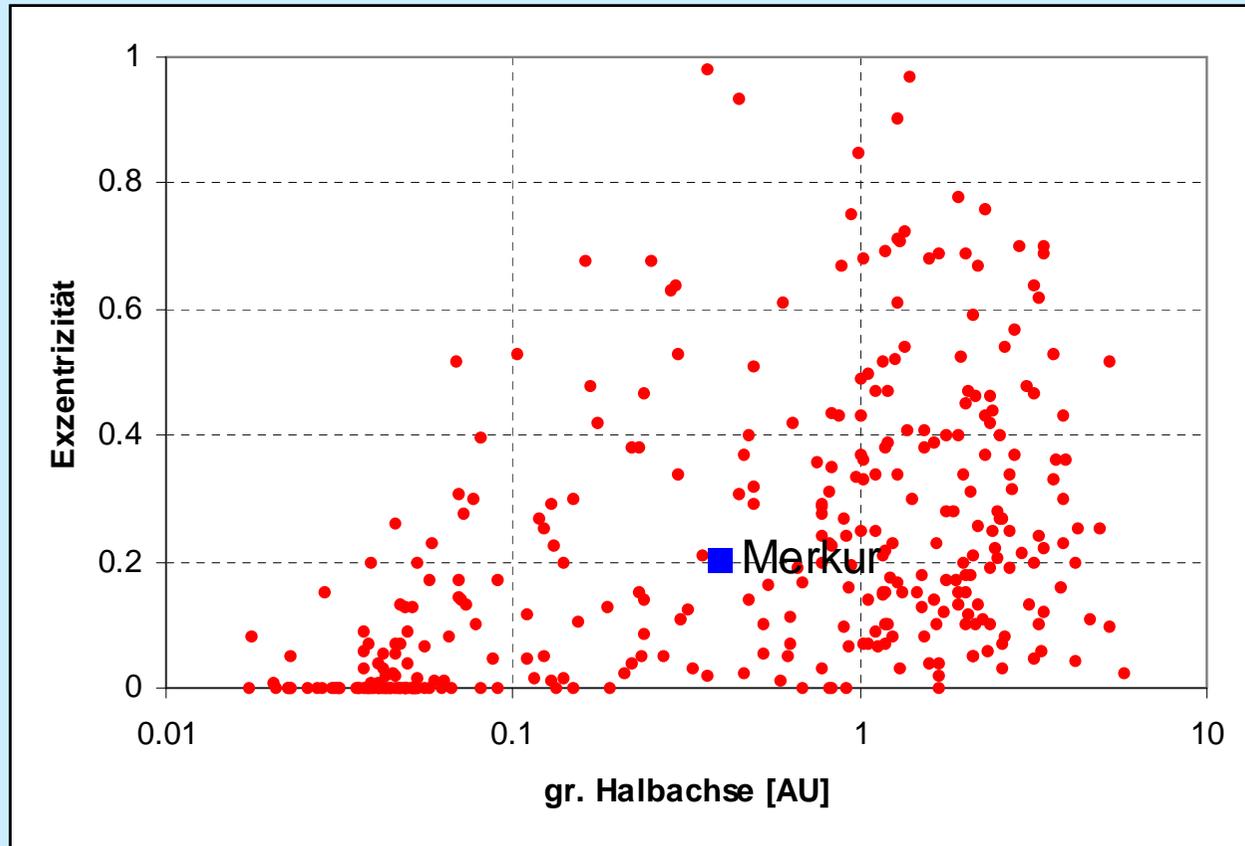
Ergebnisse (Stand 27. Okt. 2009)



➤ Viele **“Hot Jupiters”**

→ **“bevorzugte Planeten”** der Radialgesch.-Methode

Ergebnisse (Stand 27. Okt. 2009)



- Nahe am Stern : oft $e < 0.2$
- Weiter weg ($> 1\text{AU}$) : oft $e \gg 0$

Zusammenfassung

➤ Jetzt : Kenntnis über mehr als 1 Planetensystem !

➤ Koronographie

Nulling Interferometrie

Weltraumteleskope

Adaptive Optiken



wenige Erfolge

➤ Radialgeschwindigkeit



viele Erfolge

➤ Planetensystementstehung zukünftig erforschbar

Quellen

- “Auf der Suche nach Planeten um andere Sterne” (1997), *Wambsganß*
- “Extra-solar planets” (2000), *Perryman*
- “Extrasolar Planets” (2006), *Quirrenbach*
- “The new worlds - extrasolar planets” (2007), *Casoli & Encrenaz*
- www.wikipedia.de
- sonstige www-Seiten