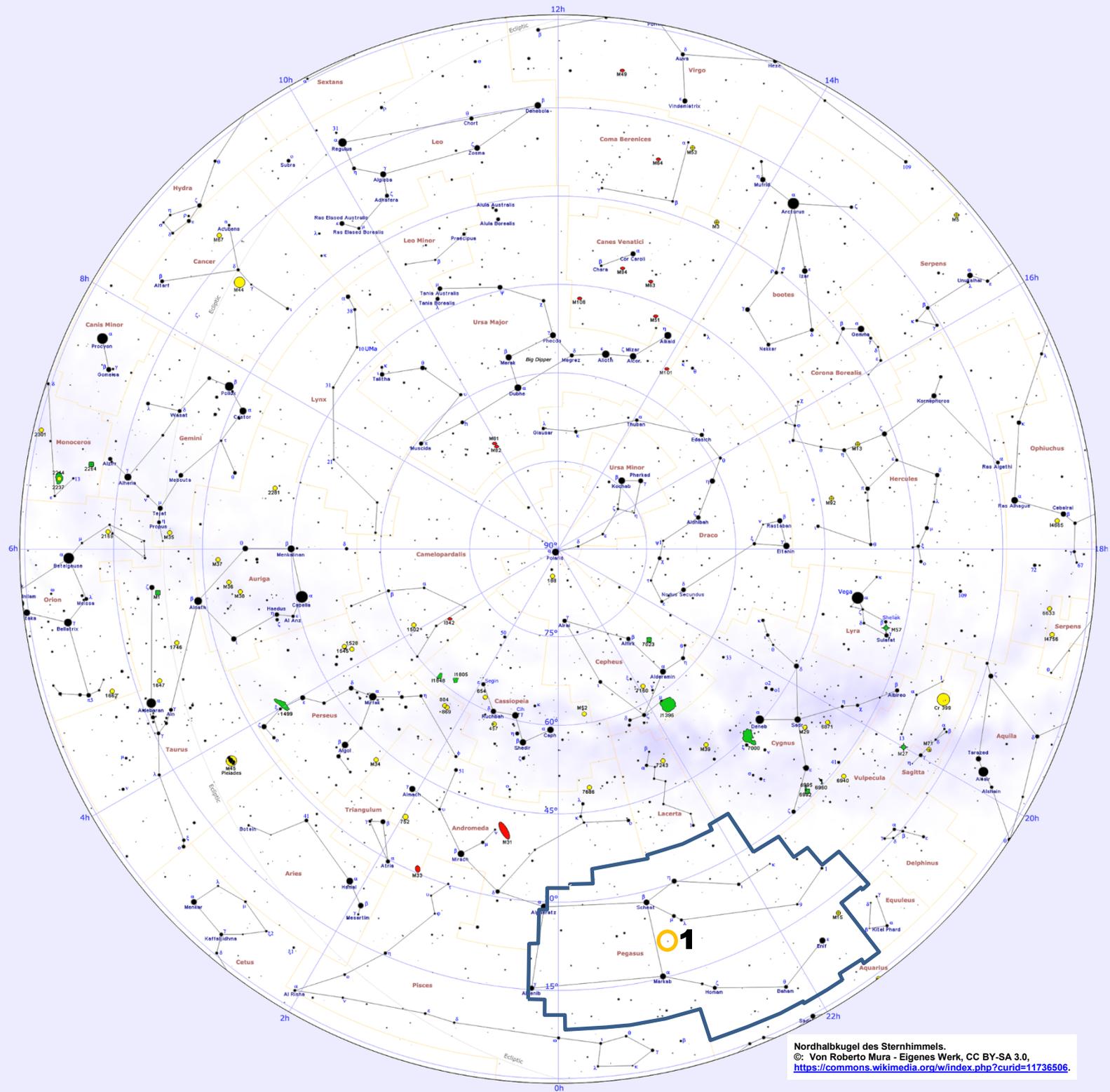


STATION 1: Die “Nobelpreisentdeckung”



Nordhalbkugel des Sternhimmels.
 ©: Von Roberto Mura - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11736506>.

Exoplanetentour durch den Sternhimmel

- Station 1:** Sternbild Pegasus → 51 Pegasi b – die “Nobelpreis-Entdeckung”
- Station 2:** Sternbild Zwillinge → Pollux b – Wie man die (Grenz-)Masse ermittelt
- Station 3:** Sternbild Föchschen → HD 189733 b – vielleicht ein “Glasregenplanet”
- Station 4:** Sternbild Drache → HD 147379 b – einen Exoplaneten entdecken
- Station 5:** Sternbild Haar der Berenike → HD 110067 b,c,d,e,f,g – die “Harmoniker”
- Station 6:** Sternbild Krebs → 55 Cancri e – ein möglicher “Diamantplanet”
- Station 7:** Sternbild Schlangenträger → GJ 1214 b – womöglich ein “Ozeanplanet”
- Station 8:** Sternbild Widder → Teegarden b, c – Planeten in der habitablen Zone
- Station 9:** Sternbild Schwan → Kepler 16 b – Planet mit zwei “Sonnenn”
- Station 10:** Sternbild Kleine Bärin → Gaia 3 b – der Exzentrische

Aufgaben:

- 1.) Wie haben Mayor und Queloz den ersten Exoplaneten um einen Stern gefunden? Beschreibt kurz ihre Methode.
- 2.) Stellt kurz die Forscher vor und berichtet über die Zeit kurz vor Bekanntmachung der Entdeckung und die Bewertung ihrer Arbeit.
- 3.) Wann kann 51 Peg an deinem Heimatort am Sternhimmel beobachtet werden?

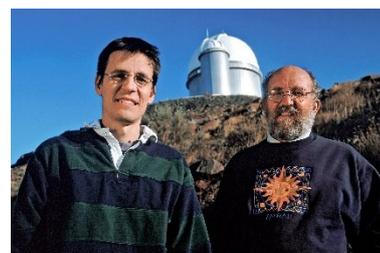
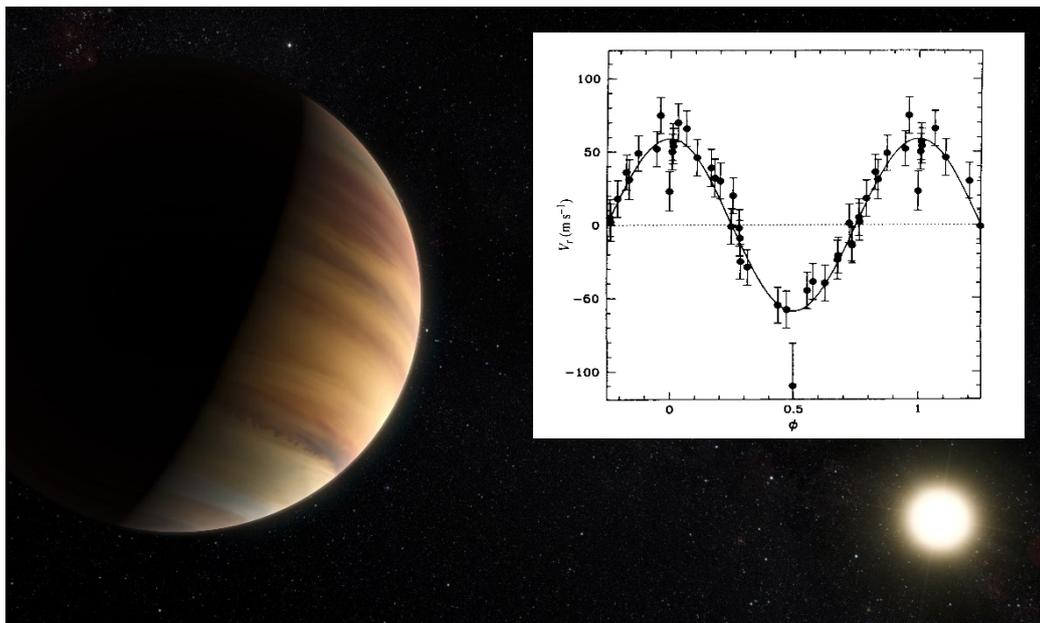
51 Pegasi b - Daten:

Entdeckung: Radialgeschwindigkeitsmethode, 1995

Typ: heißer Jupiter (Gasriese)

Mutterstern: 51 Peg; $m \approx 5,5$ mag
 $\approx 22^{\text{h}} 57^{\text{m}} 46^{\text{s}}$ ($\approx +20^{\circ} 46'$ (Pegasus); 51 Lj
Spektraltyp G2 IV, $T = 5768$ K
ca. 1,2 Sonnenmassen; ca. 1,2 Sonnenradien

Planet: $\geq 0,47$ Jupitermassen; $\approx 1,9$ Jupiterradien
Umlaufzeit: 4,2 Tage; $T = 1284$ K



Links: Künstlerische Darstellung des Exoplaneten 51 Pegasi b (Typ: Gasriese - heißer Jupiter) mit seinem Mutterstern 51 Peg im Hintergrund.
©: ESO/M. Kornmesser/Nick Risinger (skysurvey.org) - ESO website, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=39719418>.
Das Einschubbild zeigt die Radialgeschwindigkeitskurve von 51 Peg. ©: Nature volume 378, pages 355–359 (1995), Fig. 4

Rechts oben: Nobelpreis-Medaille. ©: By Photograph: JonathunderMedal: Erik Lindberg (1873-1966) - Derivative of File:NobelPrize.JPG, PD-US,
<https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=58432969>.

Rechts unten: Die mit dem Physik-Nobelpreis 2019 geehrten Entdecker des ersten Exoplaneten bei einem Stern Didier Queloz und Michel Mayor.
©: ESO, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=74207013>.

Etwas Wissenschafts-Geschichte: von <https://nccr-planets.ch/de/blog/2015/05/07/51-peg-b-streng-geheim/>

» Sommer 1995: Wie immer um zwölf Uhr unterbrachen die Astronomen im Genfer Observatorium ihre Arbeit zum Mittagessen in der Cafeteria. Unter ihnen war Didier Queloz. Er setzte sich zu einem Kollegen an den Tisch. „Hallo, ich glaube, wir sind auf der Spur von etwas Großem“, meinte er mit einem Hauch von Triumph in der Stimme. „Aber ich darf noch nichts sagen“, flüsterte er geheimnisvoll weiter. „Du hast schon zu viel gesagt, nun musst du alles erzählen“, entgegnete sein Kollege, der wie die meisten Leute im Observatorium fühlte, dass sich etwas Wichtiges anbahnte.

Nichts zu machen, obwohl die Aufregung spürbar war, erzählte Didier Queloz nicht weiter, fügte aber an, dass man bis zu einer Konferenz in Florenz warten müsse, um das Ende der Geschichte zu erfahren. Diese Aussage steigerte die Neugierde der Kollegen noch mehr, da niemand von diesem Kongress gehört hatte.

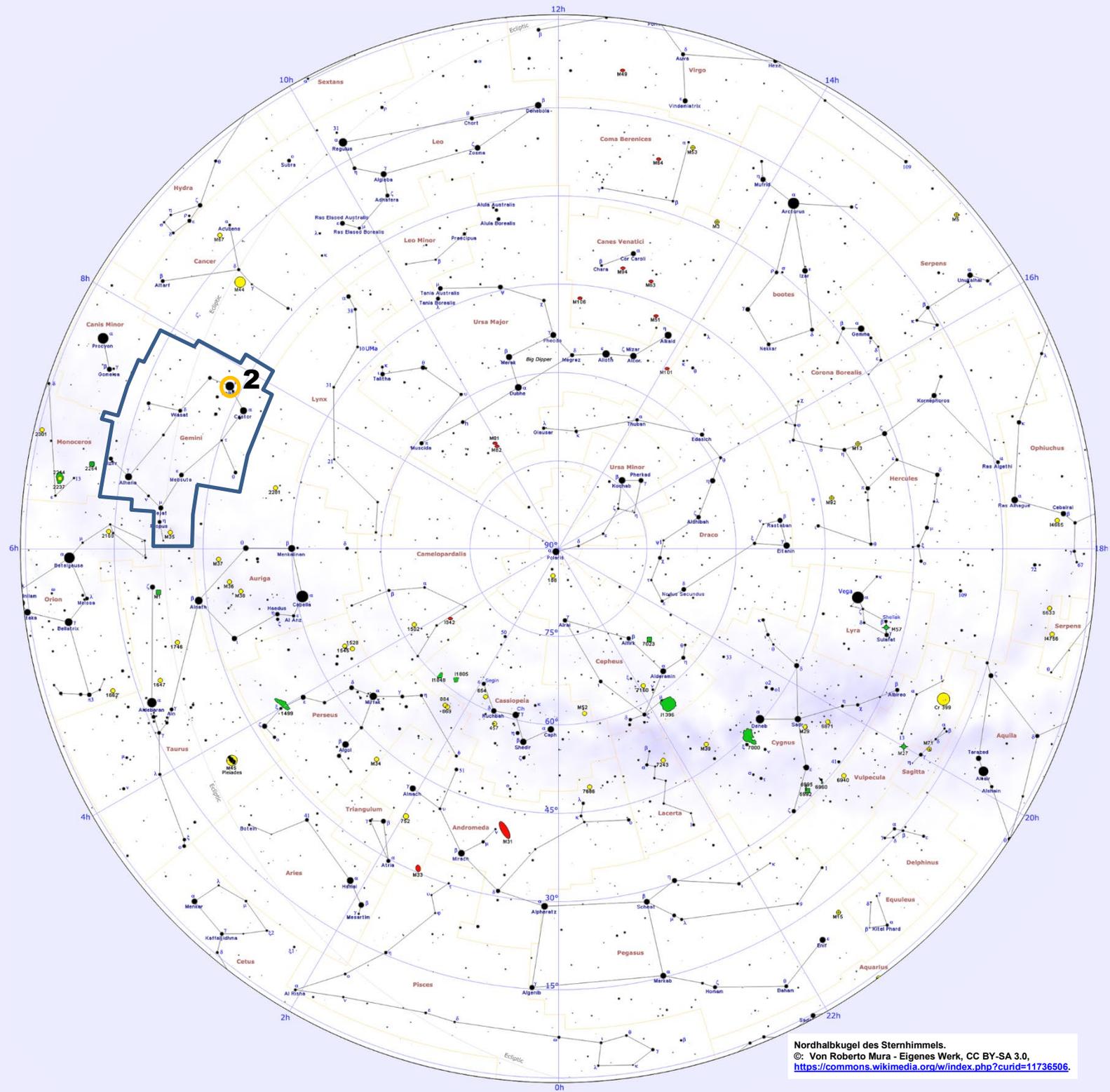
„Die Atmosphäre war tatsächlich etwas fieberhaft“, erinnert sich Luc Weber, der Informatiker, der den anspruchsvollen Computercode entwickelt hatte, den Didier Queloz für die Analyse der Sternspektren benützte. „Fieberhaft, aber freundlich“, versichert der Informatiker. „Es handelte sich um etwas völlig Neues. Wir sprachen noch nicht von einem Planeten, aber die Idee, dass wir eine Realzeitmessung von Radialgeschwindigkeiten mit einem extrem genauen Instrument hatten, motivierte uns enorm.“ Die Astronomen, Informatiker, Optikspezialisten und Ingenieure, die am Projekt ELODIE arbeiteten, drangen im Bereich der CCD- und Glasfaser-Technik tatsächlich auf unbekanntes Gebiet vor.

„Damals war ich im Büro von Didier Queloz“, erzählt Stéphane Udry. „Mit einer ziemlich einfachen Software suchte ich nach Sinuskurven in einem Wald voller Punkte.“ Didier Queloz bat Stéphane Udry zu testen, ob sich in den Messungen von Peg 51 mit dieser Software eine mögliche charakteristische Periode entdecken lasse. „Wir fanden sofort 4,2 Tage, aber Didier glaubte dies nicht. Du fantasierst, sagte er mir, und zweifelte an meiner geistigen Gesundheit und der Software“, amüsiert sich der Mann, der später Direktor des Genfer Observatoriums wurde. Je mehr Messungen sich anhäuferten, umso sicherer wurden Michel Mayor und Didier Queloz: Das kann nur ein Planet sein.

Während des ganzen Sommers 1995 arbeiteten sie intensiv, um sämtliche Fehlerquellen und alle übrigen physikalischen Phänomene außer der Existenz eines Planeten auszuschließen. „Sie wurden sehr zurückhaltend“, erinnert sich Daniel Schaerer, der soeben seine Doktorarbeit abgeschlossen hatte. „Sie zogen sich häufig zurück in ihre Büros, aus denen nichts verlautete“, sagt der heutige Experte für entfernte Galaxien.

Wie es weiterging, wissen wir: Die Bekanntgabe am Kongress in Florenz im Oktober 1995, die Bestätigung durch US-amerikanische Konkurrenten angeführt von Geoffrey Marcy und der Mediensturm. „Ich erinnere mich, dass die Marcel-Benoît-Stiftung ihren Preis schon 1996 an Michel Mayor verleihen wollte“, erklärt Stéphane Berthet, Vize-Rektor der Universität Genf; aber im Zug der Polemik, ausgelöst durch ein kanadisches Team, das behauptete, es handle sich nicht um einen Planeten, sondern um einen Sternfleck, entschied die Stiftung, die Preisverleihung aufzuschieben.“ Der Marcel-Benoît-Preis, der oft als Schweizer Nobelpreis bezeichnet wird, ging schließlich 1998 an Michel Mayor. (pb) «

STATION 2: Radialgeschwindigkeit und Planetenmasse



Exoplanetentour durch den Sternhimmel

- Station 1: Sternbild Pegasus** → 51 Pegasi b – die “Nobelpreis-Entdeckung”
- Station 2: Sternbild Zwillinge** → Pollux b – Wie man die (Grenz-)Masse ermittelt
- Station 3: Sternbild Föchschen** → HD 189733 b – vielleicht ein “Glasregenplanet”
- Station 4: Sternbild Drache** → HD 147379 b – einen Exoplaneten entdecken
- Station 5: Sternbild Haar der Berenike** → HD 110067 b,c,d,e,f,g – die “Harmoniker”
- Station 6: Sternbild Krebs** → 55 Cancri e – ein möglicher “Diamantplanet”
- Station 7: Sternbild Schlangenträger** → GJ 1214 b – womöglich ein “Ozeanplanet”
- Station 8: Sternbild Widder** → Teegarden b, c – Planeten in der habitablen Zone
- Station 9: Sternbild Schwan** → Kepler 16 b – Planet mit zwei “Sonnenn”
- Station 10: Sternbild Kleine Bärin** → Gaia 3 b – der Exzentrische

Aufgaben:

- Die Radialgeschwindigkeitskurve $v_r(t)$ kann für eine Kreisbahn durch eine Sinus- oder Cosinusfunktion beschrieben werden. Begründe dies mit Hilfe der untenstehenden Bilder. Markiere die Bahnpunkte 1 bis 4 auch in der Radialgeschwindigkeitskurve. Warum kann nur eine Mindestmasse für den Planeten angegeben werden? (siehe Kasten unten)
- Welchen Abstand a_{Stern} hätte Pollux zum gemeinsamen Schwerpunkt mit Pollux b, wenn er mit der im Diagramm ersichtlichen maximalen Radialgeschwindigkeit auch umlaufen würde? Wie ändert sich dieser Abstand, wenn die Umlaufgeschwindigkeit doch größer ist?
- Wann kann man die Sternbildregion der Zwillinge mit dem Stern Pollux an deinem Heimatort beobachten?

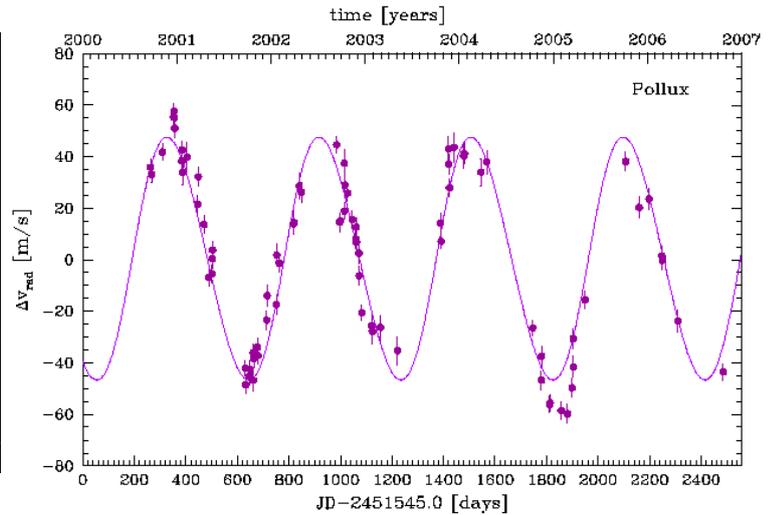
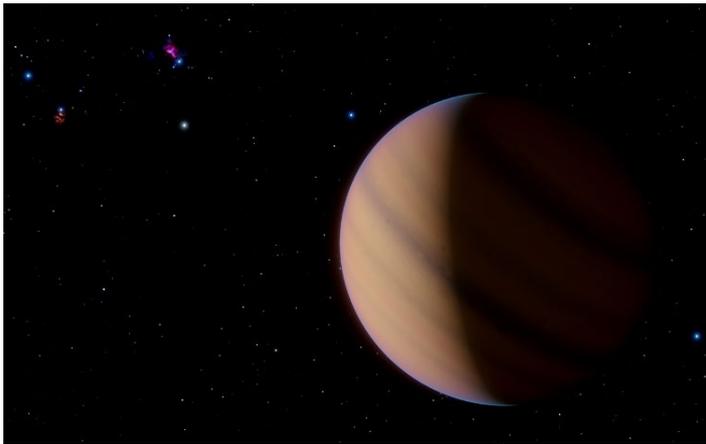
Pollux b - Daten:

Entdeckung: Radialgeschwindigkeitsmethode, 2006

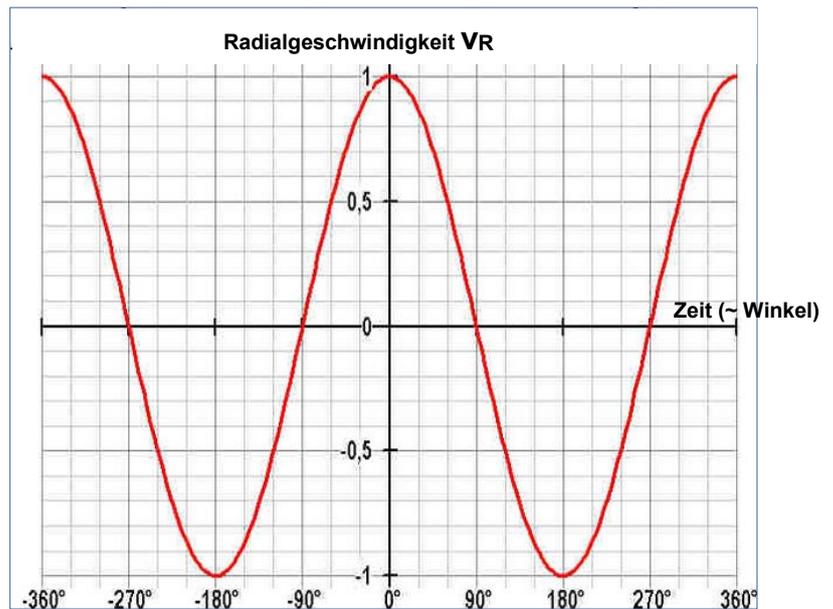
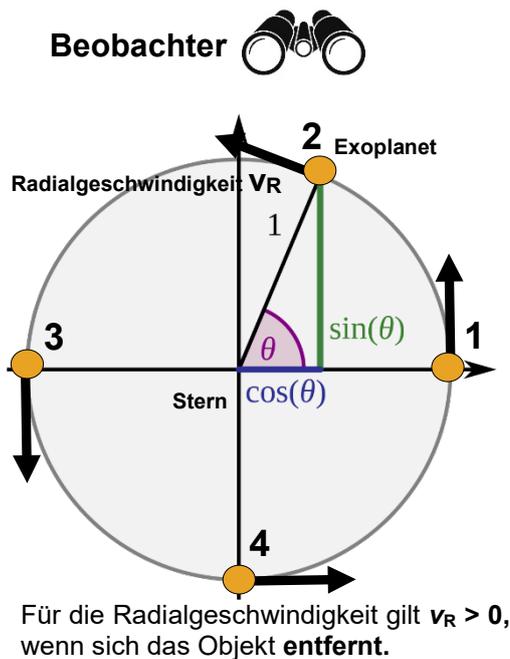
Typ: Gasriese

Mutterstern: Pollux; $m \approx 1,14 \text{ mag}$; ca. 34 Lj
 $\approx 7\text{h } 45\text{m}$; $\approx +28^\circ 1,5'$ (Zwillinge)
 Spektraltyp K0 III; $T = 4500 \text{ K}$
 1,86 Sonnenmassen
 9,14 Sonnenradien

Planet: $\geq 2,63 \text{ Jupitermassen}$
 Abstand: 1,61 AE
 Umlaufzeit $\approx 590 \text{ d}$



Links: Mittels der Simulationssoftware 'Space Engine' erstelltes Bild des Planeten Pollux b mit dem Orionnebel im Hintergrund.
 ©: By SvoHjott - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=129427226>.
 Rechts: Radialgeschwindigkeitskurve für Pollux. ©: Sabine Reffert; et al. (2006-07-07). "Precise Radial Velocities of Giant Stars II. Pollux and its Planetary Companion". *Astrophysical Journal*. 652 (1): 661–665.

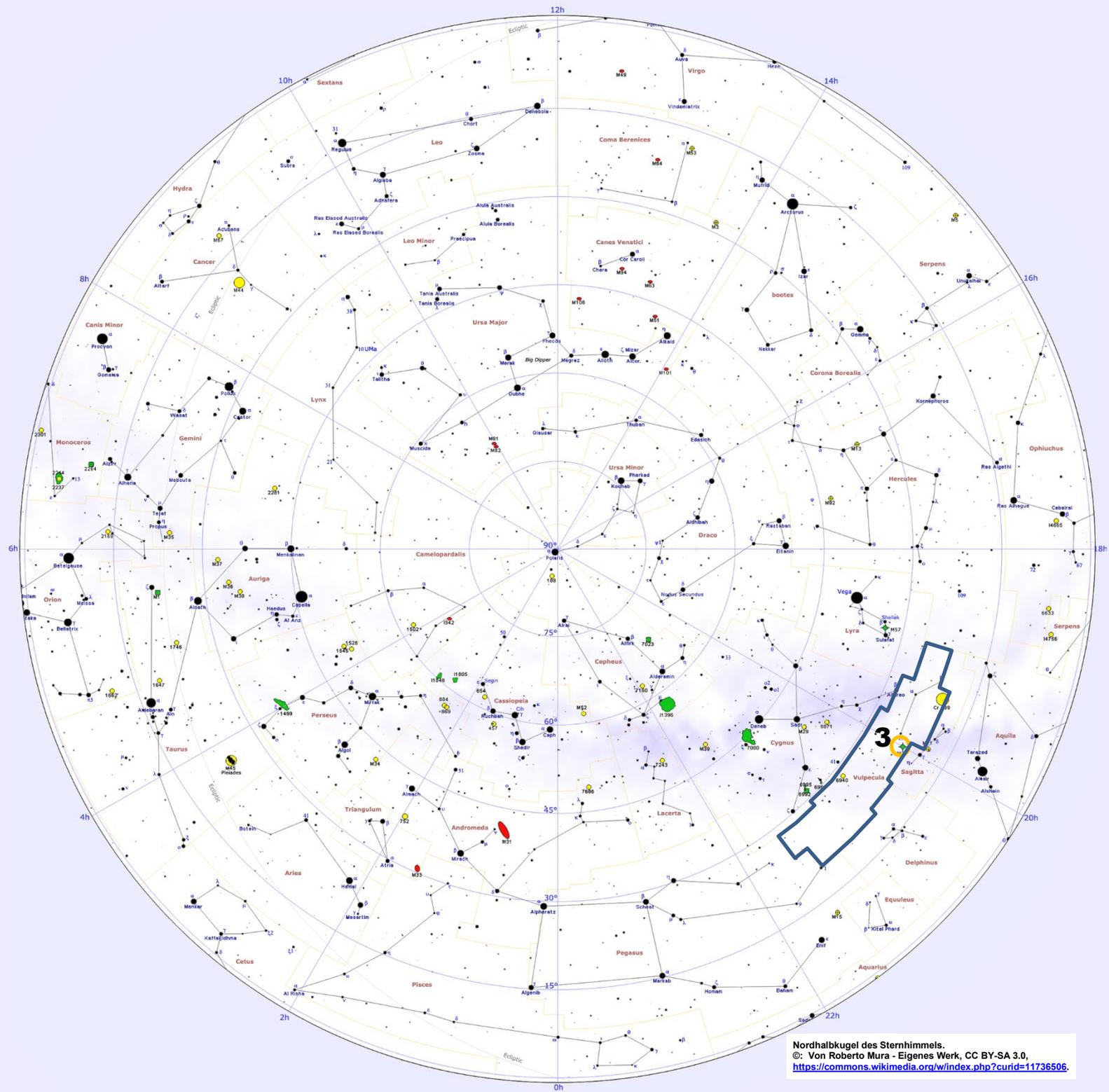


Massebestimmung für Exoplaneten

Mit den aus der Beobachtung gewonnenen Größen Umlaufzeit T und Radialgeschwindigkeit v_r kann bei Annahme der Sternmasse m_s die Masse des Exoplaneten m_p wie folgt berechnet werden:
 (i ... Neigungswinkel der Umlaufbahn um den gemeinsamen Schwerpunkt)

$$m_p \cdot \sin i = \frac{m_s^{2/3} \cdot T^{1/3} \cdot v_r}{(2\pi \cdot \gamma)^{1/3}}$$

STATION 3: der "Glasregenplanet"



Nordhalbkugel des Sternhimmels.
 ©: Von Roberto Mura - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11736506>.

Exoplanetentour durch den Sternhimmel

- Station 1: Sternbild Pegasus** → 51 Pegasi b – die "Nobelpreis-Entdeckung"
- Station 2: Sternbild Zwillinge** → Pollux b – Wie man die (Grenz-)Masse ermittelt
- Station 3: Sternbild Füchsen** → HD 189733 b – vielleicht ein "Glasregenplanet"
- Station 4: Sternbild Drache** → HD 147379 b – einen Exoplaneten entdecken
- Station 5: Sternbild Haar der Berenike** → HD 110067 b,c,d,e,f,g – die "Harmoniker"
- Station 6: Sternbild Krebs** → 55 Cancri e – ein möglicher "Diamantplanet"
- Station 7: Sternbild Schlangenträger** → GJ 1214 b – womöglich ein "Ozeanplanet"
- Station 8: Sternbild Widder** → Teegarden b, c – Planeten in der habitablen Zone
- Station 9: Sternbild Schwan** → Kepler 16 b – Planet mit zwei "Sonnenn"
- Station 10: Sternbild Kleine Bärin** → Gaia 3 b – der Exzentrische

Aufgaben:

- 1.) Bestimme aus der Transittiefe der unten gezeigten Lichtkurve von HD 189733 den Radius des Exoplaneten HD 189733 b (siehe Info-Kasten unten).
- 2.) Für HD 189733 b wird ein Atmosphärenverlust von 1000 t pro s angenommen. Angenommen, die Erdatmosphäre ($5,15 \cdot 10^{18}$ kg) würde diesen Verlust erleiden - wann wäre sie verschwunden?
- 3.) Aus welchen Gründen könnte das Licht von HD 189733 b kobaltblau erscheinen?
- 4.) Wann kann die Himmelsgegend von HD 189733 des nachts beobachtet werden?

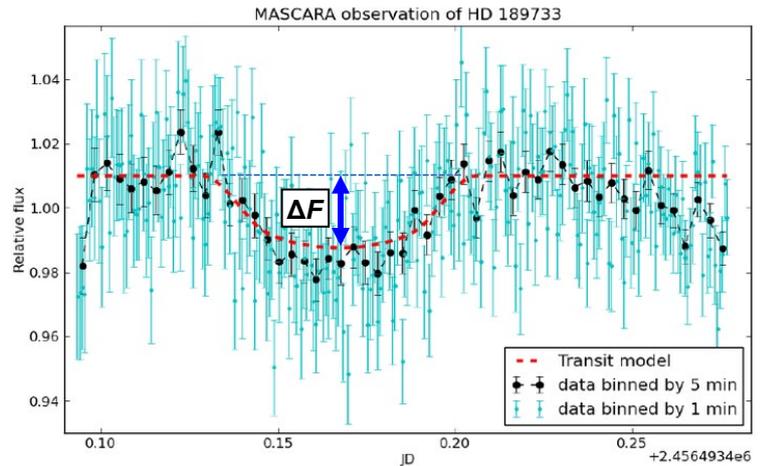
HD 189733 b - Daten:

Entdeckung: Transitmethode, 2005

Typ: Gasriese, heißer Jupiter

Mutterstern: HD 189733; $m \approx 7,65$ mag
20h 01m; +22° 43' (Füchschen); 64 Lj
Spektraltyp K2 V; $T = 5052$ K
0,79 Sonnenmassen; 0,75 Sonnenradien

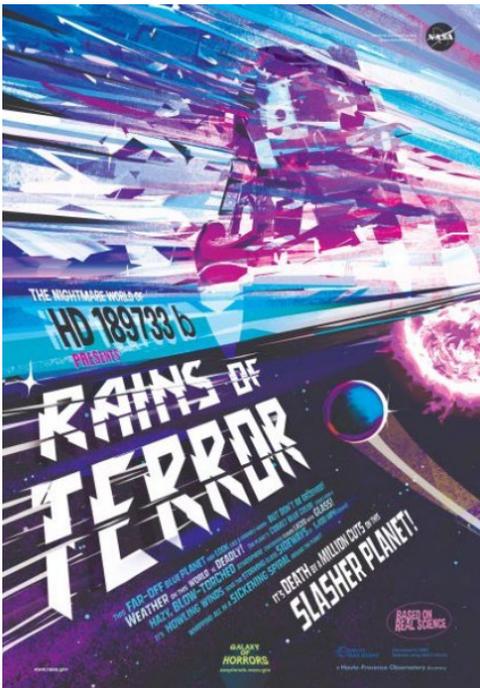
Planet: ca. 1,14 Jupitermassen
ca. 1,14 Jupiterradien
Abstand: 0,031 AE; Umlaufzeit ca. 2,22 d
 T bis zu 1000 °C



Oben links: Künstlerische Darstellung des Exoplaneten HD 189733 b und seines Muttersterns. Die Beobachtungen deuten auf einen starken Atmosphärenverlust bedingt durch Eruptionen auf dem Mutterstern hin. ©: NASA's Goddard Space Flight Center - <http://www.nasa.gov/topics/universe/features/exoplanet-atmosphere.html>, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26727187>.

Oben rechts: Transit-Lichtkurve von HD 189733. Die rot-gestrichelte Linie zeigt den berechneten Verlauf mit den bisher ermittelten Daten für die Radien von Stern und Planet. Die Ursache für den systematischen Abfall nach dem Transit ist noch zu klären. ©: file:///C:/Users/fischer/Downloads/spie2014_mascara-1.pdf.

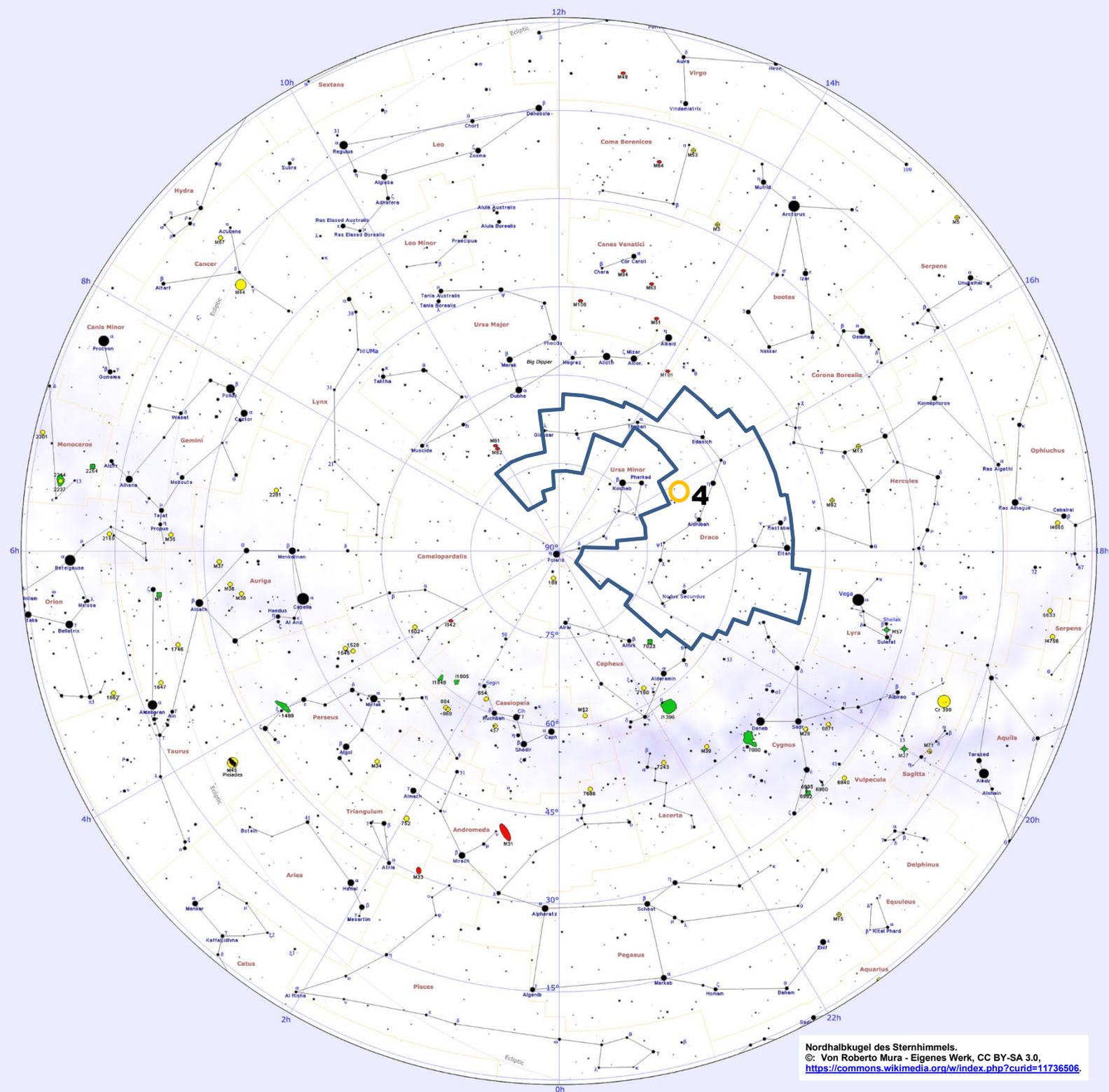
Unten: Poster des NASA Exoplanets Exploration Program's Exoplanet Travel Bureau. Der Exoplanet HD 189733 b erscheint dabei unter dem Titel "Rain of Terror" - "The Nightmare World of HD 189733 b". Beobachtungen haben ergeben, dass HD 189733 b kobaltblau erscheinen muss, wobei diese Farbe vermutlich auf die Lichtstreuung an Unmengen sehr kleiner glasiger, messerscharfer Silikateilchen in der Atmosphäre zurückzuführen ist. Zudem absorbiert das in der Atmosphäre enthaltene Methan den roten Lichtanteil. Die Teilchen werden von gigantischen Stürmen mit Windgeschwindigkeiten von etwa 2 km/s herumgeschleudert. ©: Von NASA/JPL-CalTech - https://exoplanets.nasa.gov/multimedia/exoplanet-travel-bureau/?page=0&per_page=25&order=pub_date+desc%2C+id+desc&search=&category=122%3A174, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=83600897>.



Info-Kasten

- Der relative Helligkeitsabfall ΔF (die Transittiefe) beim Transit ermöglicht die Bestimmung des Planetenradius R_{Planet} bei Annahme des Sternradius R_{Stern} wie folgt: $\Delta F = \frac{A_{\text{Planet}}}{A_{\text{Stern}}} = \frac{\pi R_{\text{Planet}}^2}{\pi R_{\text{Stern}}^2}$ (siehe auch Bild oben rechts).
- Mittlerweile sind die Forscher in der Lage, auch Daten über die Atmosphären von Exoplaneten zu gewinnen. HD 189733 b ist der erste Exoplanet, auf dem Methan-Gas nachgewiesen wurde. Desweiteren fand man auch Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid.
- Bei HD 189733 b wird aufgrund seiner über tausend Grad Celsius heißen Atmosphäre eine Art Regen aus Glas (geschmolzene und wieder erstarrte Silikatmineralien) erwartet.

STATION 4: einen Exoplaneten entdecken



Nordhalbkugel des Sternhimmels.
 ©: Von Roberto Mura - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11736506>.

Exoplanetentour durch den Sternhimmel

- Station 1:** Sternbild Pegasus → 51 Pegasi b – die “Nobelpreis-Entdeckung”
- Station 2:** Sternbild Zwillinge → Pollux b – Wie man die (Grenz-)Masse ermittelt
- Station 3:** Sternbild Föchschen → HD 189733 b – vielleicht ein “Glasregenplanet”
- Station 4:** Sternbild Drache → HD 147379 b – einen Exoplaneten entdecken
- Station 5:** Sternbild Haar der Berenike → HD 110067 b,c,d,e,f,g – die “Harmoniker”
- Station 6:** Sternbild Krebs → 55 Cancri e – ein möglicher “Diamantplanet”
- Station 7:** Sternbild Schlangenträger → GJ 1214 b – womöglich ein “Ozeanplanet”
- Station 8:** Sternbild Widder → Teegarden b, c – Planeten in der habitablen Zone
- Station 9:** Sternbild Schwan → Kepler 16 b – Planet mit zwei “Sonnen”
- Station 10:** Sternbild Kleine Bärin → Gaia 3 b – der Exzentrische

Aufgaben:

- 1.) Wann gilt ein Exoplanet als bestätigt entdeckt?
- 2.) Welche Umlaufzeit kann man aus dem Radialgeschwindigkeitsdiagramm unten für HD 147379 b ablesen?
- 3.) Die Spektraldaten zu HD 147379 wurden mit dem Spektrografen CARMENES gewonnen. Stelle diesen und alle weiteren für die Beobachtung technischen Notwendigkeiten für die Arbeit des Astronomen kurz vor.
- 4.) Wann kannst du die Himmelsregion von Kepler HD 147379 b an Sternhimmel sehen?

HD 147379 b - Daten:

Entdeckung: Radialgeschwindigkeitsmethode, 2017
Typ: Neptun
Mutterstern: HD 147379; ca. 35 Lj; $m \approx 8,9$ mag
 $\approx 16^{\text{h}} 17^{\text{m}}; \approx +67^{\circ} 14'$; (Drache)
0,58 Sonnenmassen; 0,57 Sonnenradien
Spektraltyp M1 V; $T = 4090$ K
Planet: HD 147379 b: Temperatur: -100 bis -70°C
 ≈ 25 Erdmassen
Umlaufzeit: ██████; mittl. Abstand: 0,32 AE

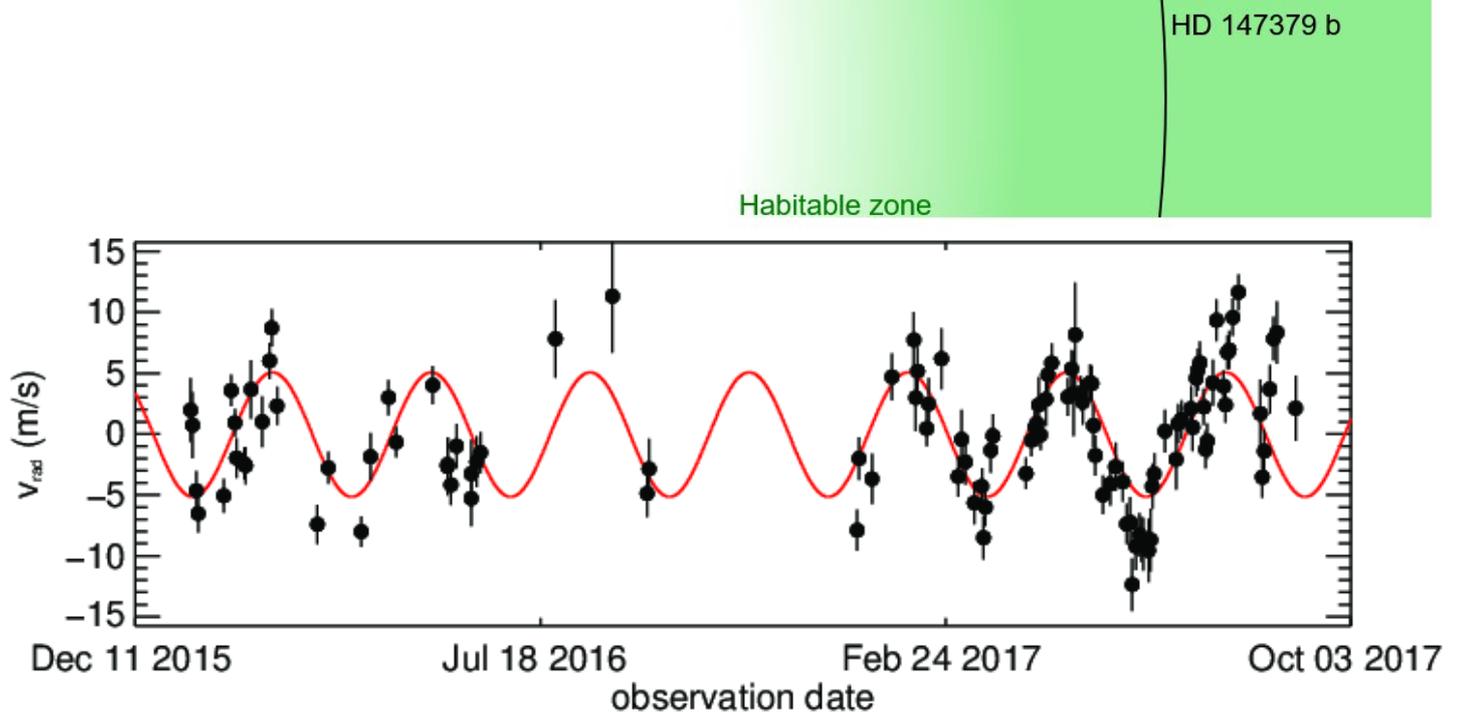


Bild oben: Schematische Darstellung eines Orbitausschnitts von HD 147379 b um seinen rot leuchtenden Stern. Mit den angenommenen Sterndaten befindet sich HD 147379 b in der habitable Zone seines Muttersterns HD 147379.

©: Open Exoplanet Catalogue, <https://www.openexoplanetcatalogue.com/planet/HD%20147379%20b/>.

Bild unten: Radialgeschwindigkeitskurve, die auf Grundlage der Daten des Spektrografen CARMENES ermittelt wurde.

©: Astronomy and Astrophysics, December 2017, Fig. 1, <file:///C:/Users/fischer/Downloads/1712.05797.pdf>

Info-Kasten

- **Exoplanetenentdeckung:** Um eine Fehlinterpretation auszuschließen, wartet man in der Regel drei Maxima oder Minima der Radialgeschwindigkeit (oder drei Transits) ab bis man die Existenz eines Exoplaneten als bestätigt betrachtet.
- **CARMENES** ist ein Akronym (ein Wort, das aus den Anfangsbuchstaben mehrerer Wörter gebildet wird) und bedeutet **C**alar **A**lto **h**igh-**R**esolution search for **M** dwarfs with **E**xoearths with **N**ear-infrared and optical **E**chelle Spectrographs. Die zentralen Bauelemente von CARMENES sind Beugungsgitter (Echelle-Gitter), die das Licht durch Beugung und Interferenz spektral zerlegen, und eine Kalibrationslampe (mit Zusatztechnik), die extrem viele Spektrallinien liefert, um die durch den Dopplereffekt bedingten, äußerst kleinen Linienverschiebungen im Sternspektrum durch Vergleich festzustellen.

CARMENES ist ein Instrument am 3,5-m-Teleskop des Calar-Alto-Observatoriums in

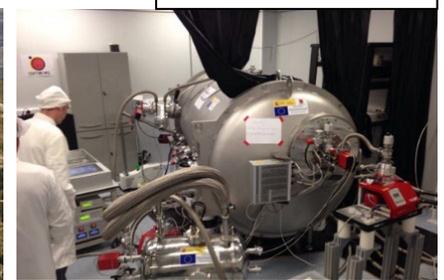
Spanien. Für eine erfolgreiche Beobachtung braucht ein Astronom die Hilfe von Teleskop-Ingenieuren und Technikern. Diese garantieren den reibungslosen Betriebsablauf. Dazu gehört z. B. die Bereitstellung von Kühlmitteln für die Detektoren, die ständige Wartung von Teleskop und Instrumenten und die regelmäßige Neubeschichtung der Teleskopspiegel.



Die größte Kuppel des Calar-Alto-Observatoriums beherbergt das 3,5-m-Teleskop. CARMENES ist eines der Instrumente für dieses Teleskop.

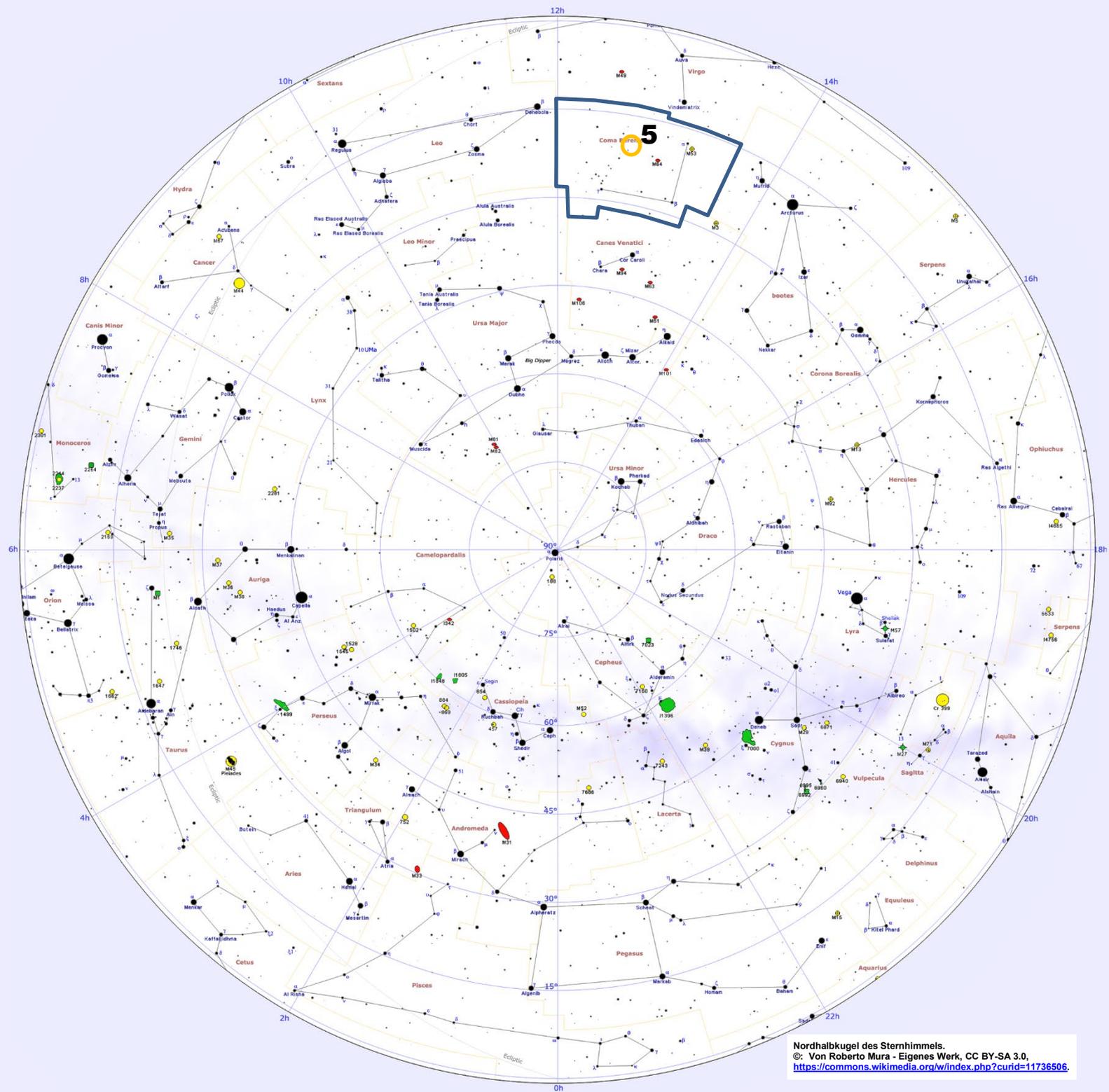


3,5-m-Spiegelteleskop auf dem Calar Alto mit dem angesetzten „front end“ (Pfeil) von CARMENES.



Das vom Teleskop gesammelte Licht wird vom „front end“ aus über ein Glasfaserkabel zum „back end“ von CARMENES mit dem Spektrografen im Inneren des Vakuumtanks geleitet.

STATION 5: die "Harmoniker"



Nordhalbkugel des Sternhimmels.
 ©: Von Roberto Mura - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11736506>.

Exoplanetentour durch den Sternhimmel

- Station 1: Sternbild Pegasus** → 51 Pegasi b – die "Nobelpreis-Entdeckung"
- Station 2: Sternbild Zwillinge** → Pollux b – Wie man die (Grenz-)Masse ermittelt
- Station 3: Sternbild Föchschen** → HD 189733 b – vielleicht ein "Glasregenplanet"
- Station 4: Sternbild Drache** → HD 147379 b – einen Exoplaneten entdecken
- Station 5: Sternbild Haar der Berenike** → HD 110067 b,c,d,e,f,g – die "Harmoniker"
- Station 6: Sternbild Krebs** → 55 Cancri e – ein möglicher "Diamantplanet"
- Station 7: Sternbild Schlangenträger** → GJ 1214 b – womöglich ein "Ozeanplanet"
- Station 8: Sternbild Widder** → Teegarden b, c – Planeten in der habitablen Zone
- Station 9: Sternbild Schwan** → Kepler 16 b – Planet mit zwei "Sonnenn"
- Station 10: Sternbild Kleine Bärin** → Gaia 3 b – der Exzentrische

Aufgaben:

- 1.) Warum ist die Entdeckung des Exoplanetensystems beim Stern HD 110067 so bedeutsam? (siehe Textkasten unten).
- 2.) Wie klingen die 6 Exoplaneten von HD 110067 in Töne übersetzt? Dem Planet d sei der Ton C4 (261,63 Hz) zugeordnet. Welche Töne lassen sich den Planeten b, c, e, f, g und welche Ton-Intervalle ihren Umlauffrequenzverhältnissen zuordnen? (siehe auch Textkasten unten)
Spiele deine Tonfolge ab. Nutze dazu auch das virtuelle Klavier z. B. unter <https://onlinepiano1.com/de/> oder <https://www.musicca.com/de/klavier>.
- 3.) Wann könnte HD 110067 an deinem Sternhimmel beobachtet werden?

HD 110067 b,c,d,e,f,g - Daten:

Entdeckung: Transitmethode, 2023

Typ: 6 Mini-Neptune

Mutterstern: HD 110067; 105 Lj

$\approx 12\text{h } 39\text{m}$; $\approx +20^\circ 02'$; (Haar der Berenike)

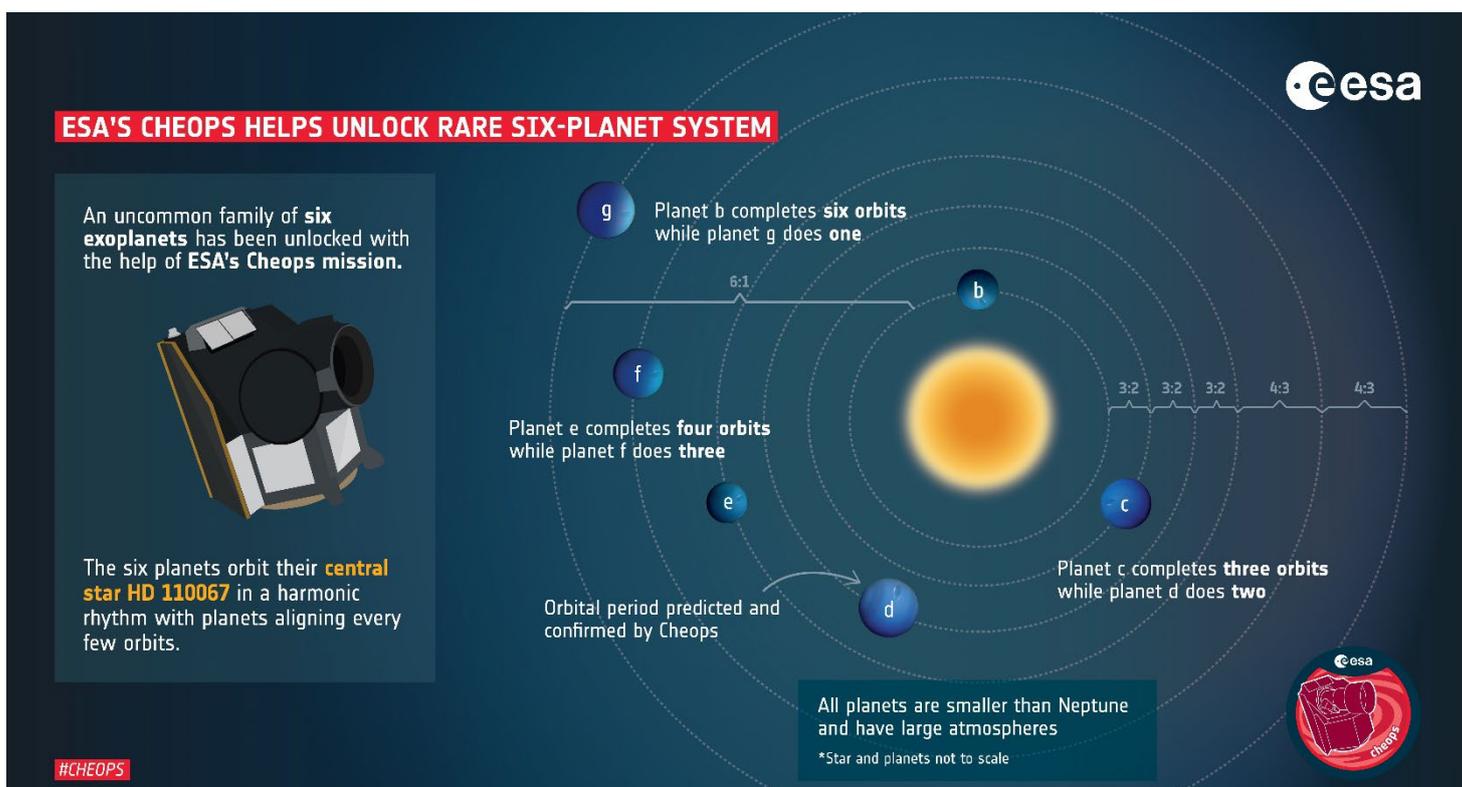
$m \approx 8,4 \text{ mag}$, Spektraltyp K0 V; $T = 5266 \text{ K}$

ca. 0,8 Sonnenmassen; ca. 0,79 Sonnenradien

Planeten:

- b: 5,7 m_E ; 2,2 r_E ; 0,079 AE; 9,1 d; 800 K
- c: <6,3 m_E ; 2,4 r_E ; 0,104 AE; 13,7 d; 699 K
- d: 8,5 m_E ; 2,8 r_E ; 0,159 AE; 20,5 d; 602 K
- e: <3,9 m_E ; 1,9 r_E ; 0,203 AE; 30,8 d; 533 K
- f: 5 m_E ; 2,6 r_E ; 0,215 AE; 41,1 d; 489 K
- g: <8,4 m_E ; 2,6 r_E ; 0,236 AE; 54,8 d; 440 K

(Masse in Erdmassen m_E , Radius in Erdradien r_E , Abstand, Umlaufzeit, Gleichgewichtstemperatur)



Darstellung der Planetenbahnen und der Orbitalresonanzen im Planetensystem von HD 110067 (ESA, 30. November 2023).

©: Von ESA, CC BY-SA IGO 3.0, CC BY-SA 3.0 igo, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=141636590>.

Sechs Planeten in Resonanz (die „Harmoniker“):

Alle sechs Planeten umlaufen ihren Wirtsstern in perfekter Orbitalresonanz (siehe Bild oben). Da nur ein Prozent der Planetensysteme laut der Autoren (Nature volume 623, pages 932–937 (2023)) diese Resonanz behalten, ist dieses System von besonderer Bedeutung. Der Erstautor Rafael Luque (University of Chicago) schrieb dazu:

“This discovery is going to become a benchmark system to study how **sub-Neptunes, the most common type of planets outside of the solar system**, form, evolve, what are they made of, and if they possess the right conditions to support the existence of liquid water in their surfaces.”

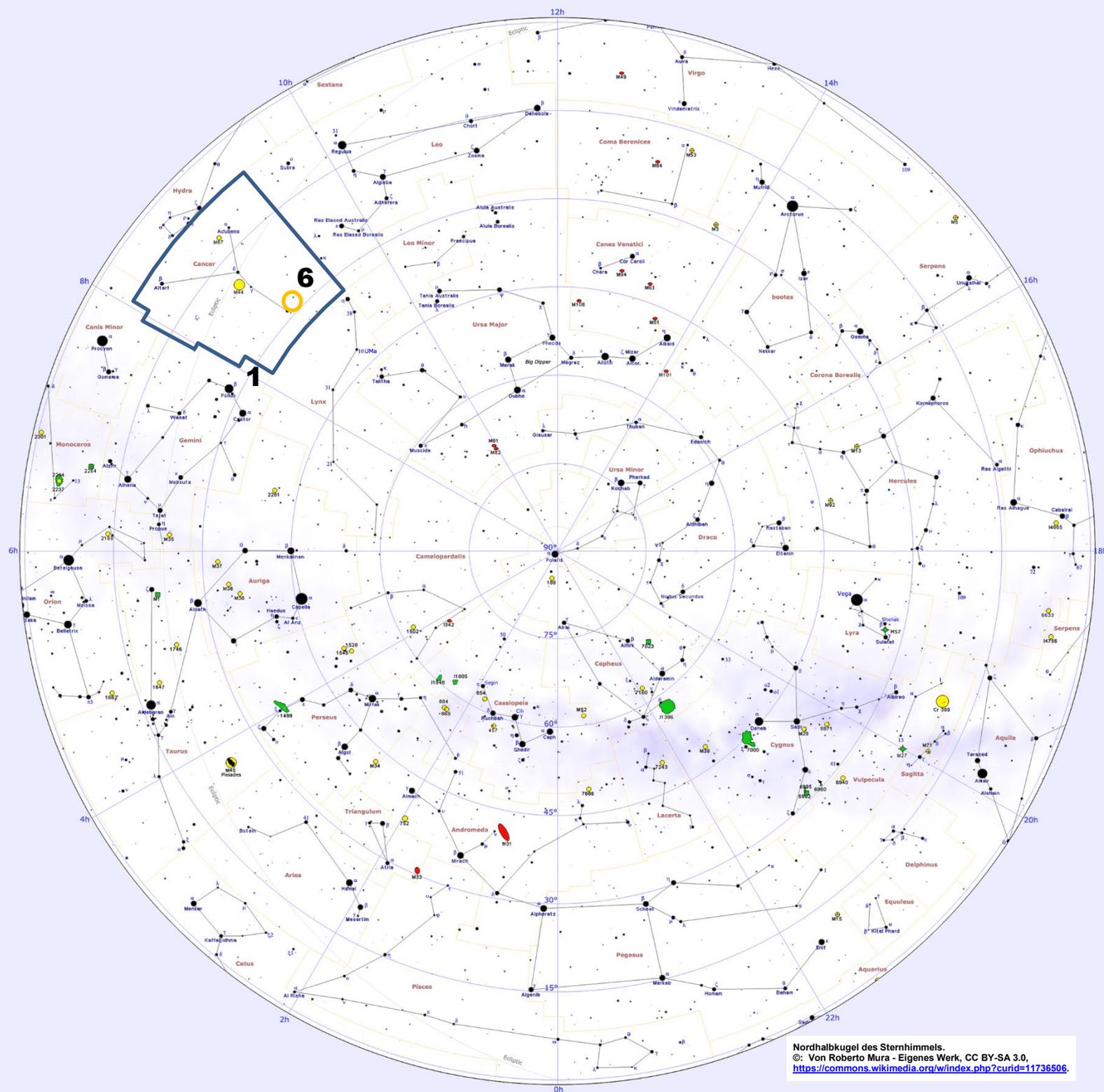
Tonleitern, Tonabstände (Intervalle) und Tonfrequenzen

Bestimmte Tonabstände (Intervalle) empfinden wir als wohlklingend (rein). Diese Intervalle entsprechen ganzzahligen Frequenzverhältnissen f_2/f_1 . Einige davon sind die Oktave ($f_2/f_1 = 2:1$), die Quinte (3:2), die Quarte (4:3) und die Terz (5:4).

Beim Aufbau einer Tonleiter hat man das Problem, dass ein Vielfaches von Quinten nicht exakt ein Vielfaches von Oktaven ergibt. Deshalb werden die zur obigen Aufgabe errechneten Frequenzen leicht von den in der rechten Tabelle angegebenen Frequenzen abweichen.

Noten-namen	Frequenzen Hertz (Hz)
A0	27,500
B0	30,868
C1	32,703
D1	36,708
E1	41,203
F1	43,654
G1	48,999
A1	55,000
H1	61,735
C2	65,406
D2	73,416
E2	82,407
F2	87,307
G2	97,999
A2	110,00
H2	123,47
C3	130,81
D3	146,83
E3	164,81
F3	174,61
G3	196,00
A3	220,00
H3	246,94
C4	261,63
D4	293,67
E4	329,63
F4	349,23
G4	392,00
A4	440,00
H4	493,88
C5	523,25
D5	587,33
E5	659,26
F5	698,46
G5	783,99
A5	880,00
H5	987,77
C6	1046,5
D6	1174,7
E6	1318,5
F6	1396,9
G6	1568,0

STATION 6: ein möglicher “Diamantplanet”



Nordhalbkugel des Sternhimmels.
 ©: Von Roberto Mura - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11736506>

Exoplanetentour durch den Sternhimmel

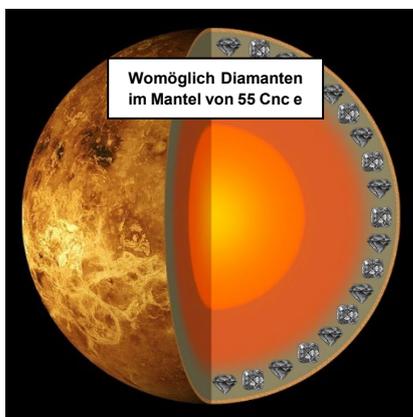
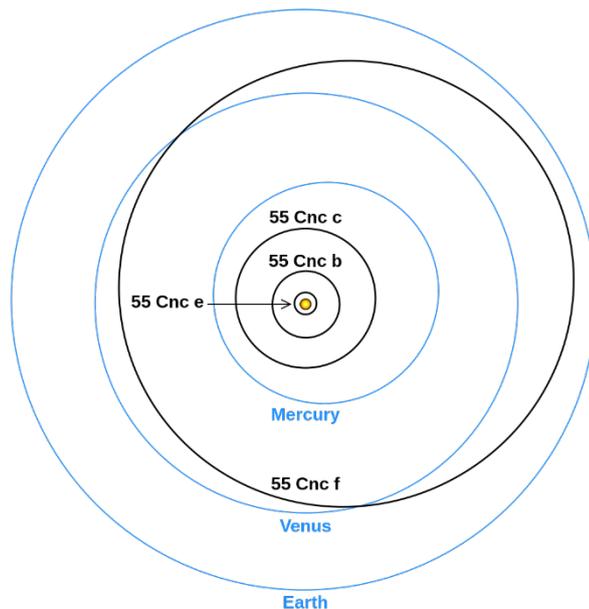
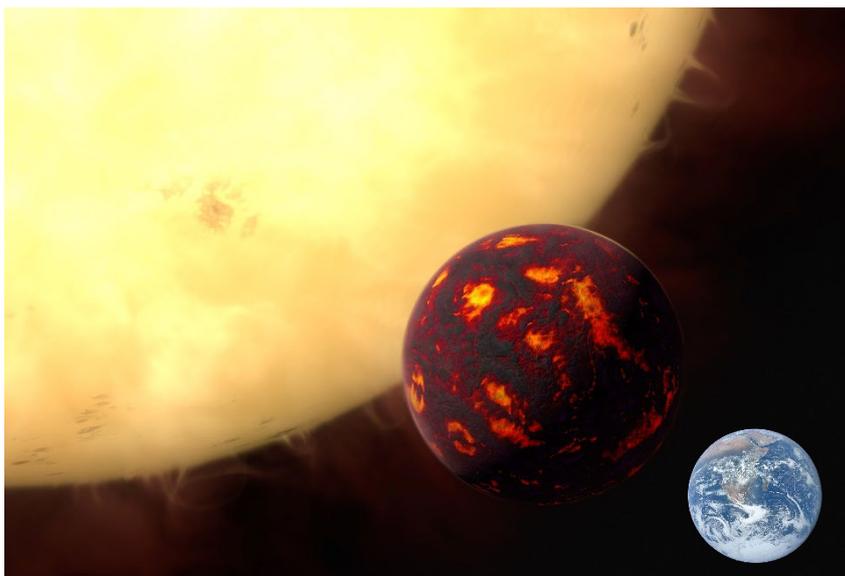
- Station 1:** Sternbild Pegasus → 51 Pegasi b – die “Nobelpreis-Entdeckung”
- Station 2:** Sternbild Zwillinge → Pollux b – Wie man die (Grenz-)Masse ermittelt
- Station 3:** Sternbild Föchschen → HD 189733 b – vielleicht ein “Glasregenplanet”
- Station 4:** Sternbild Drache → HD 147379 b – einen Exoplaneten entdecken
- Station 5:** Sternbild Haar der Berenike → HD 110067 b,c,d,e,f,g – die “Harmoniker”
- Station 6:** Sternbild Krebs → 55 Cancri e – ein möglicher “Diamantplanet”
- Station 7:** Sternbild Schlangenträger → GJ 1214 b – womöglich ein “Ozeanplanet”
- Station 8:** Sternbild Widder → Teegarden b, c – Planeten in der habitablen Zone
- Station 9:** Sternbild Schwan → Kepler 16 b – Planet mit zwei “Sonnenn”
- Station 10:** Sternbild Kleine Bärin → Gaia 3 b – der Exzentrische

Aufgaben:

- 1.) Aus welcher Beobachtung schließen die Forscher auf die Möglichkeit der Existenz von Kohlenstoffplaneten? (siehe engl. Textstelle unten)
- 2.) Berechne die mittlere Dichte von 55 Cnc e und vergleiche sie mit der der Erde ($5,51 \text{ g/cm}^3$).
- 3.) Kohlenstoff kommt in verschiedenen Modifikationen vor. Vergleiche Graphit und Diamant. Worum handelt es sich bei Siliziumkarbid? Welche C-Verbindungen könnten in der Atmosphäre vorkommen?
- 4.) Wann kannst du an deinem Heimatort die Umgebung von 55 Cnc e am Himmel beobachten?

55 Cancri e - Daten:

Entdeckung: Radialgeschwindigkeitsmethode, 2004
Typ: Supererde, Kohlenstoffplanet
Mutterstern: 55 Cancri A (Doppelsternkomponente A) Cancri B ist ca. 1000 AE von Cancri A entfernt $\approx 8\text{h } 52,5\text{min}$; $\approx +28^\circ 20'$ (Krebs); ca. 40 Lj $m \approx 5,9 \text{ mag}$; Spektraltyp K0 IV-V; $T = 5300 \text{ K}$ 0,97 Sonnenmassen; 0,96 Sonnenradien
Planet: 55 Cnc e ist innerster Planet von mind. fünf Exoplaneten (b,c,d,e,f) ca. 8 Erdmassen; ca. 1,9 Erdradien Umlaufzeit weniger als 18 h, $T \approx 1100 - 3500 \text{ }^\circ\text{C}$



Oben links: Künstlerische Darstellung der Supererde 55 Cancri e vor ihrem Mutterstern 55 Cancri. Zum Größenvergleich mit 55 Cnc e wird noch die Erde gezeigt.

©: Von Chaos syndrome in der Wikipedia auf Englisch - Übertragen aus en.wikipedia nach Commons., Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2641050>.

Oben rechts: Vergleich der jeweils inneren Planetenbahnen um 55 Cnc mit denen der solaren Planeten. Die Bahn von 55 Cancri d liegt für diesen Vergleich außerhalb der Jupiterbahn.

Unten: Der Planetenmantel eines hypothetischen Kohlenstoffplaneten könnte eine sehr diamantreiche Schicht enthalten.

Eine mögliche neue Klasse von Gesteinsplaneten - Kohlenstoffplaneten

Womöglich handelt es sich bei 55 Cnc e um einen Gesteinsplaneten mit einer extrem kohlenstoffreichen Zusammensetzung, der eine neue Klasse darstellt. Während die terrestrischen Planeten des Sonnensystems aus sauerstoffreichem Material (Silikate, Wasser) bestehen, würde ein Kohlenstoffplanet zu einem Drittel auf Kohlenstoff basieren. Im Inneren eines solchen Planeten könnte es Eisen, Kohlenstoff, Silizium oder auch Siliziumkarbid geben und die Oberfläche könnte evt. mit Graphit bedeckt sein. In etwas größeren Tiefen würden Druck und Temperatur schon ausreichen, um Diamanten zu bilden.

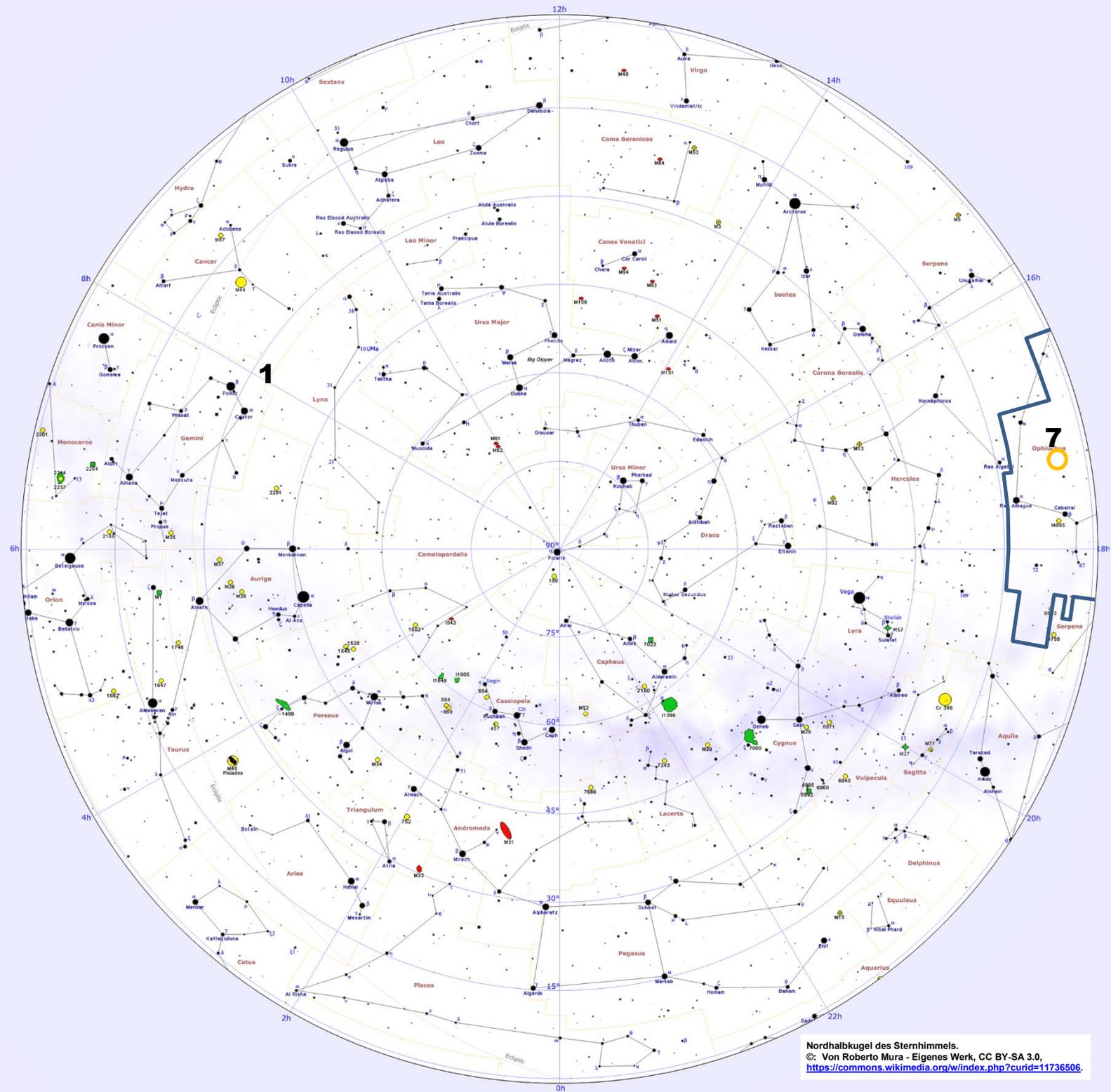
Die Erde könnte man als „Sauerstoffplaneten“ bezeichnen. Sie enthält auf die Masse bezogen insgesamt gesehen ca. 30 % Sauerstoff. (Im Erdmantel sind es sogar 44 %.)

„... However, previous studies have proposed that 55 Cancri e would be composed of materials different from those the terrestrial planets in the solar system are made of. Its host star presents carbon-rich features, and the planets would thus have formed in a protoplanetary disk depleted in oxygen-based materials like silicates or water.

Therefore, a study of a possible carbon-rich planet 55 Cancri e, using the recent estimates of the planet's physical parameters, is another step needed to understand the interior of this close neighbor to the solar system.“

(Quelle: Lunar and Planetary Science XLVIII (2017), <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2017/pdf/1833.pdf>)

STATION 7: womöglich ein Ozeanplanet



Nordhalbkugel des Sternhimmels.
 ©: Von Roberto Mura - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11736506>.

Exoplanetentour durch den Sternhimmel

- Station 1:** Sternbild Pegasus → 51 Pegasi b – die “Nobelpreis-Entdeckung”
- Station 2:** Sternbild Zwillinge → Pollux b – Wie man die (Grenz-)Masse ermittelt
- Station 3:** Sternbild Föchschen → HD 189733 b – vielleicht ein “Glasregenplanet”
- Station 4:** Sternbild Drache → HD 147379 b – einen Exoplaneten entdecken
- Station 5:** Sternbild Haar der Berenike → HD 110067 b,c,d,e,f,g – die “Harmoniker”
- Station 6:** Sternbild Krebs → 55 Cancri e – ein möglicher “Diamantplanet”
- Station 7:** Sternbild Schlangenträger → GJ 1214 b – womöglich ein “Ozeanplanet”
- Station 8:** Sternbild Widder → Teegarden b, c – Planeten in der habitablen Zone
- Station 9:** Sternbild Schwan → Kepler 16 b – Planet mit zwei “Sonne”
- Station 10:** Sternbild Kleine Bärln → Gaia 3 b – der Exzentrische

Aufgaben:

- 1.) Wo im Masse-Radius-Diagramm (siehe Bild unten) liegt der Datenpunkt für GJ 1214 b? Wie groß ist die mittlere Dichte von GJ 1214 b?
- 2.) Wie könnte es zu Ozeanplaneten kommen und welche Merkmale haben sie? (siehe auch Info-Kasten unten)
- 3.) GJ 1214 b rotiert gebunden. Was versteht man unter gebundener Rotation? Demonstriere diese mit einem einfachen selbst erdachten Modell.
- 4.) Wann kann die Region von GJ 1214 am Sternhimmel von dir beobachtet werden?

GJ 1214 b - Daten:

Entdeckung: Radialgeschwindigkeitsmethode, 2009
Typ: Mini-Neptun
Mutterstern: GJ 1214; 48 Lj; $m \approx 14,7 \text{ mag}$
 $\approx 17^{\text{h}} 15^{\text{m}}; \approx +4^{\circ} 58'$; (Schlangenträger)
Spektraltyp M4,5 V, $T = 3026 \text{ K}$
 $\approx 0,15 \text{ Sonnenmassen}; \approx 0,22 \text{ Sonnenradien}$
Planet: GJ 1214 b; 7 Erdmassen; $\approx 2,5 \text{ Erdradien}$
mittl. Abstand: 0,014 AE; **Umlaufzeit:** 38 h
Gleichgewichtstemperatur: zwischen 120°C und 280°C

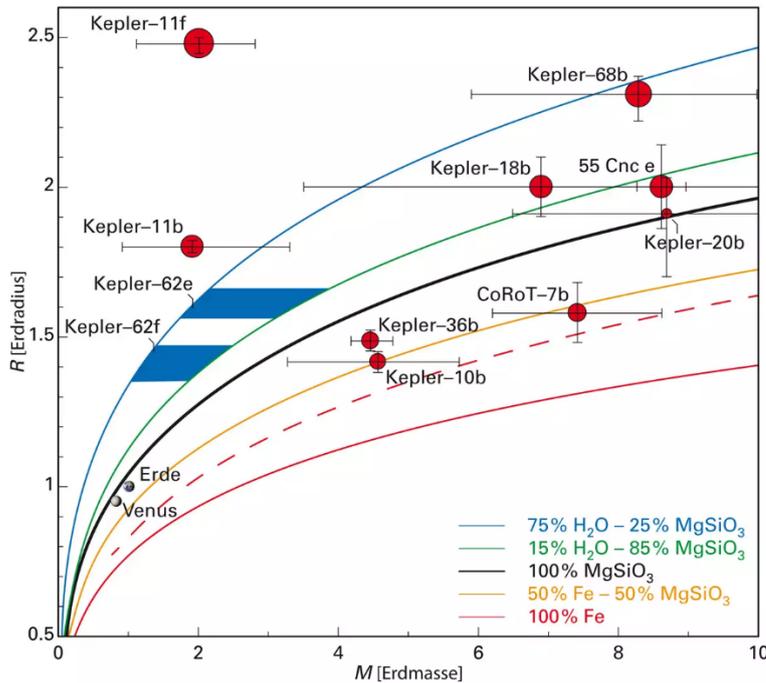
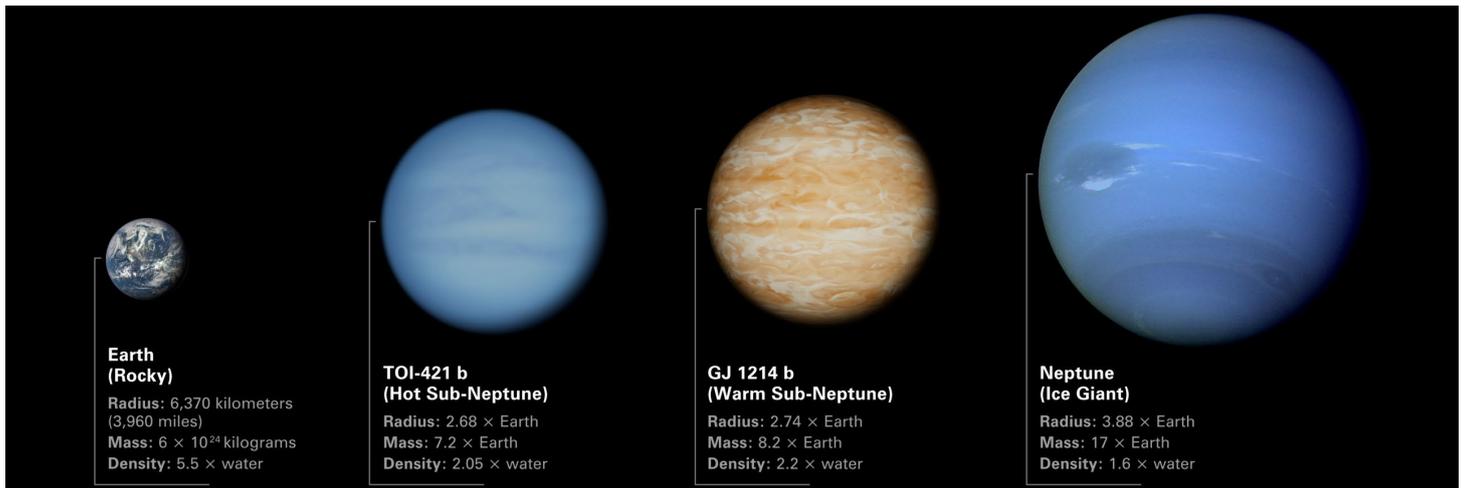


Bild oben: Die Sub-Neptune TOI-421 b und GJ 1214 b liegen hinsichtlich Radius und Masse zwischen Erde und Neptun. Die geringen Dichten der beiden Exoplaneten könnten auch dadurch zustande kommen, dass sie zu einem großen Teil aus Wasser bestehen. ©: NASA, ESA, CSA, Dani Player (STScI) - Comparison of TOI-421 b and GJ 1214 b to Earth and Neptune, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=128850524>.

Bild unten: Die eingezeichneten Kurven im Masse-Radius-Diagramm zeigen den Zusammenhang zwischen Masse und Radius (entspricht der mittleren Dichte) für verschiedene Sorten von Planeten. Die blaue Linie entspricht Planeten, die überwiegend (75%) aus Wasser bestehen, usw. ©: L. Kaltenegger (MPIA), <https://www.mpia.de/5254085/2013-05-Lebensfreundliche-Exoplaneten>.

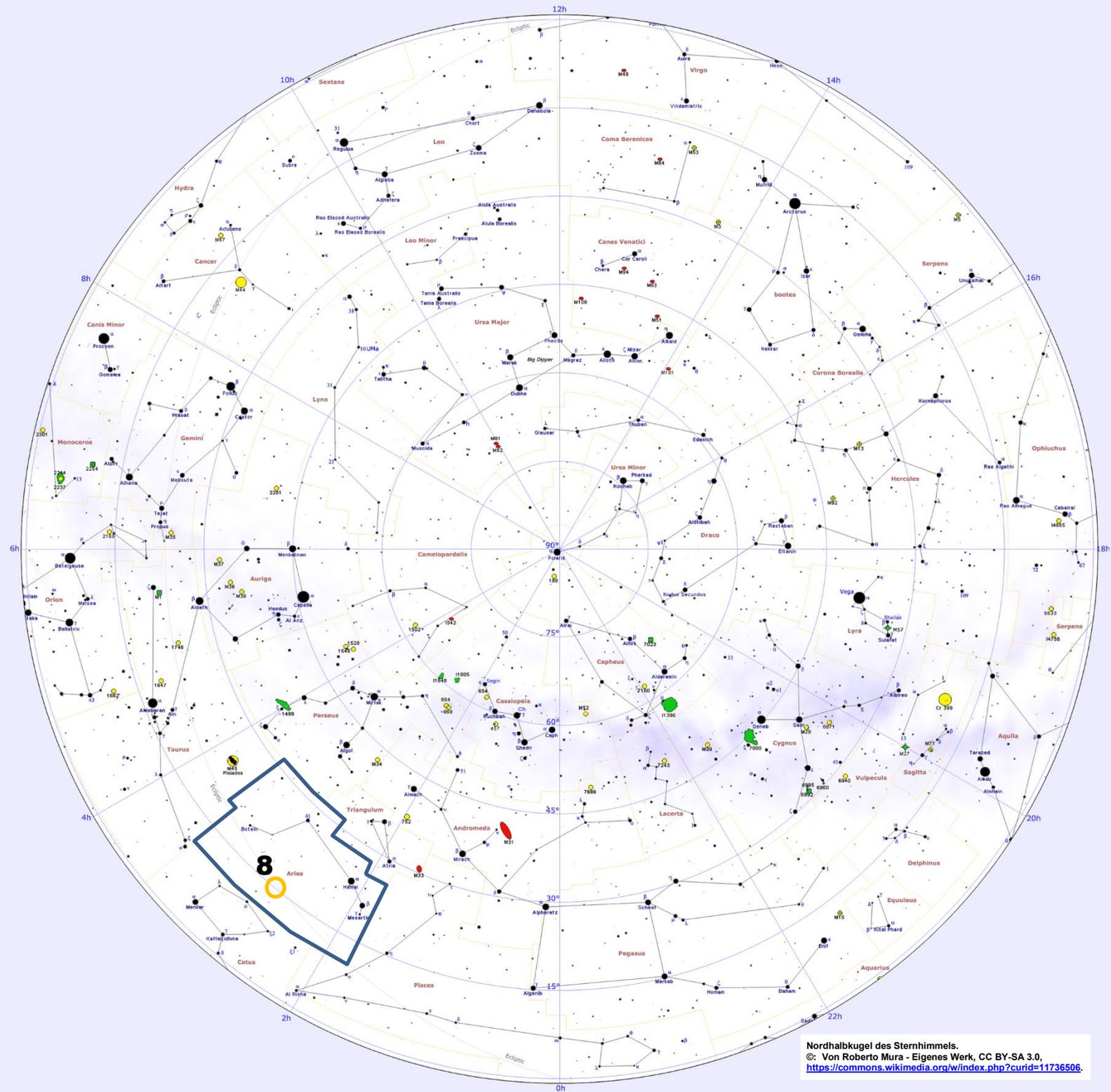
Gebundene Rotation

Dabei handelt es sich um einen durch Gezeitenreibung bedingten Zustand, bei dem die Rotationsperiode eines Himmelskörpers sich der Umlaufzeit um den meist massereicheren Zentralkörper anpasst. So z. B. rotiert der Erdmond gebunden, was sich darin äußert, dass wir immer nur die „Vorderseite“ des Mondes sehen.

Info-Kasten

- Für GJ 1214 b wurden Hinweise auf Wasserdampf und Methan in der Atmosphäre gefunden.
- GJ 1214 b rotiert gebunden – es handelt sich also um einen Planeten mit ewigem Tag und ewiger Nacht.
- Für GJ 1214 b wurde eine ungewöhnlich starke Reflexion festgestellt, die man auf eine Schicht in der oberen Atmosphäre des Planeten zurückführt. Die Natur des reflektierenden Materials ist bislang noch unbekannt.
- Planeten, die sich in den äußeren Bereichen einer protoplanetaren Staubscheibe bilden, können zu etwa 50 % aus Wasser und 50 % aus Silikaten bestehen. Es besteht die Möglichkeit, dass diese Planeten im Rahmen der Entwicklung des Planetensystems durch Drehimpulsaustausch ins Innere wandern. Das Wasser auf Ozeanplaneten kann den gesamten Planeten bedecken und viele hundert Kilometer tief sein. Der Druck am Grund wäre so hoch, dass sich dort „heißes Eis“ bilden würde.

STATION 8: habitable Planeten



Nordhalbkugel des Sternhimmels.
 ©: Von Roberto Mura - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11736506>.

Exoplanetentour durch den Sternhimmel

- Station 1:** Sternbild Pegasus → 51 Pegasi b – die “Nobelpreis-Entdeckung”
- Station 2:** Sternbild Zwillinge → Pollux b – Wie man die (Grenz-)Masse ermittelt
- Station 3:** Sternbild Föchschen → HD 189733 b – vielleicht ein “Glasregenplanet”
- Station 4:** Sternbild Drache → HD 147379 b – einen Exoplaneten entdecken
- Station 5:** Sternbild Haar der Berenike → HD 110067 b,c,d,e,f,g – die “Harmoniker”
- Station 6:** Sternbild Krebs → 55 Cancri e – ein möglicher “Diamantplanet”
- Station 7:** Sternbild Schlangenträger → GJ 1214 b – womöglich ein “Ozeanplanet”
- Station 8:** Sternbild Widder → Teegarden b, c – Planeten in der habitablen Zone
- Station 9:** Sternbild Schwan → Kepler 16 b – Planet mit zwei “Sonne”
- Station 10:** Sternbild Kleine Bärln → Gaia 3 b – der Exzentrische

Aufgaben:

- 1.) Beschreibe die im Bild unten räumlich dargestellte nähere Umgebung der Sonne. Welche der aufgeführten Sterne kennst du schon?
- 2.) Welcher Sterntyp kommt am häufigsten vor? Du kannst dich auch hier informieren:
https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_n%C3%A4chsten_extrasolaren_Systeme
- 3.) Was versteht man unter einer habitablen Zone? Wozu forscht die Astrobiologie? An welchen lebensfeindlichen Orten hat man schon Leben gefunden? (siehe auch Info-Kasten)
- 4.) Wie könnte die Oberfläche eines gebunden rotierenden Planeten beschaffen sein (siehe Bild unten rechts)?
- 5.) Wann kann die Himmelsregion mit Teegarden b an deinem Standort in der Nacht beobachtet werden?

Teegarden b, c - Daten:

- Entdeckung:** Radialgeschwindigkeitsmethode, 2019
- Typ:** erdähnliche Planeten
- Mutterstern:** Teegarden; 12,5 Lj; $m \approx 15,1$ mag $\approx 2^h 53^m$; $\approx +16^\circ 53'$; (Widder)
Spektraltyp M7 V; $T = 3034$ K
 $\approx 0,1$ Sonnenmassen; $\approx 0,12$ Sonnenradien
- Planeten:** Teegarden b: Temperatur: 301 K $\geq 1,05$ Erdmassen; Umlaufzeit: 4,91 d
mittl. Abstand: 0,025 AE
Teegarden c: Temperatur: 226 K $\geq 1,11$ Erdmassen; Umlaufzeit: 11,4 d
mittl. Abstand: 0,044 AE

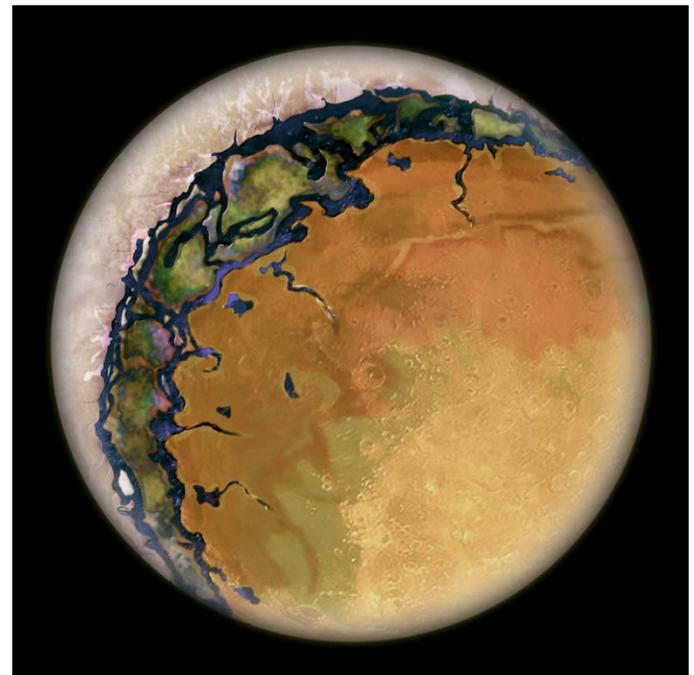
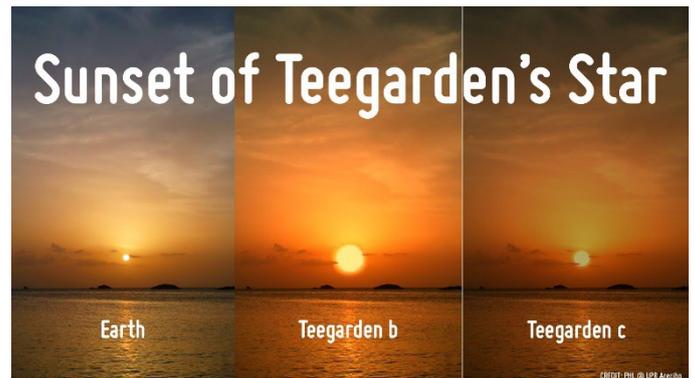
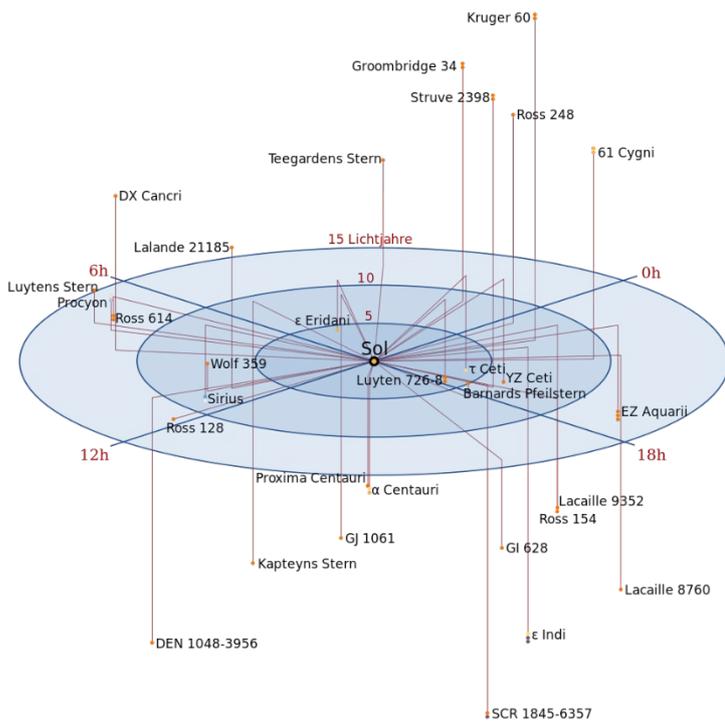


Bild oben links: Im Raumgebiet bis zu 14 Lichtjahren Entfernung von der Sonne sind einschließlich der Sonne 32 Sterne bekannt. Die meisten von ihnen sind M-Sterne. ©: Von User:Inductiveload, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=25130459>.

Bild oben rechts: Die scheinbare Größe (Winkelgröße) der Sternscheibe von Teegarden, wie man sie von Teegarden b und c aus sehen würde im Vergleich zur Größe der Sonnenscheibe (ca. $0,5^\circ$), wie wir sie von der Erde aus sehen. ©: Photomontage by A. Mendez (PHL).

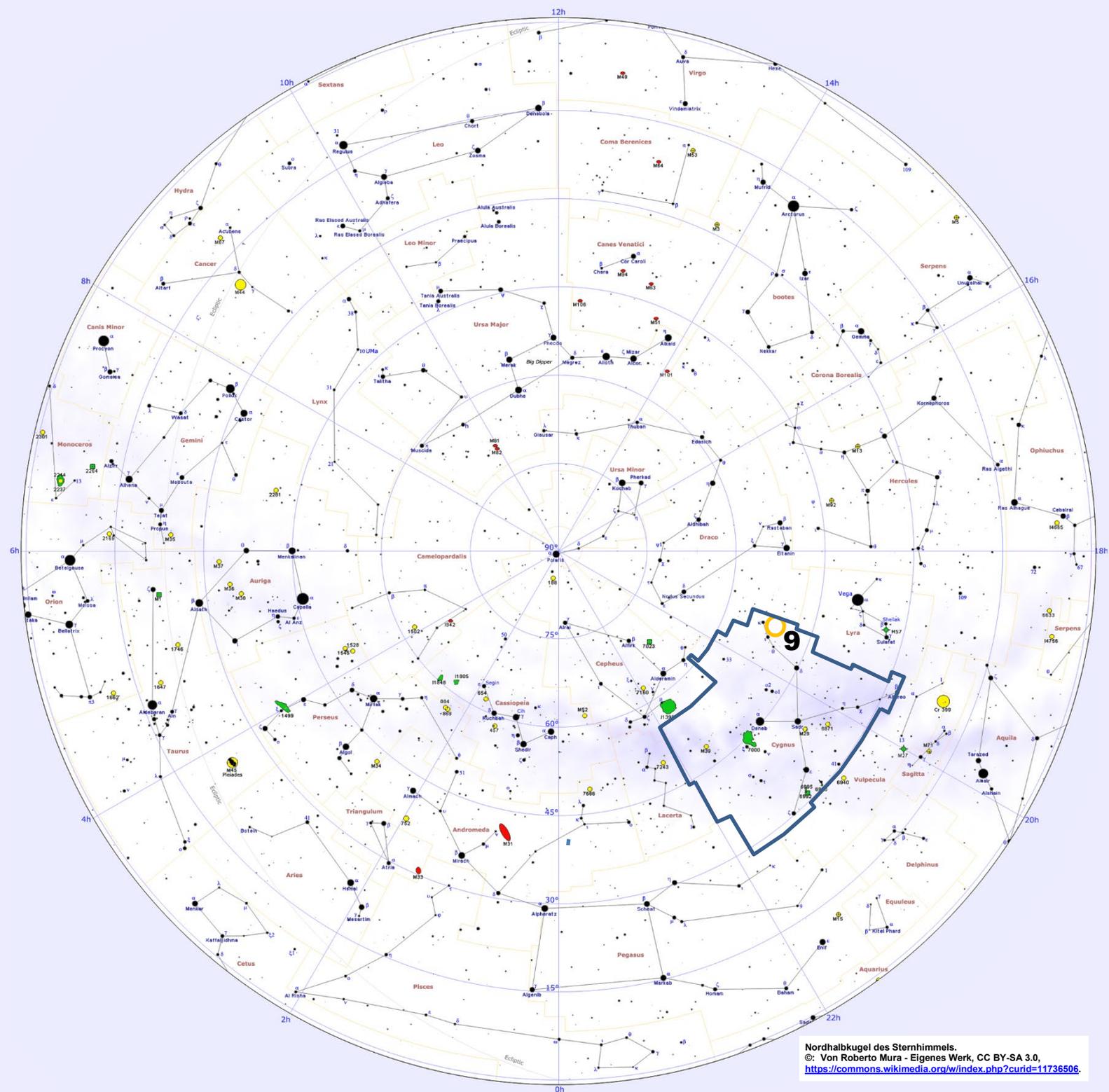
Bild unten: Künstlerische Darstellung der Oberfläche eines gebunden rotierenden Planeten mit einer sehr heißen „Wüste“ auf der Tagseite und einem Eispanzer auf der Nachtseite. Dazwischen könnte es einen Streifen mit flüssigem Wasser und Vegetation geben.

©: Beau.TheConsortium/Rare Earth Wiki, CC BY-SA 3.0.

Info-Kasten

- Teegarden hat neben Teegarden b und c in der habitablen Zone noch Teegarden d außerhalb davon.
- **Rote Zwerge** (Spektraltyp M) sind der häufigste Sterntyp* in der Galaxis. In unserer nahen Nachbarschaft gibt es etliche von diesen kleinen, kühlen Zwergsternen – und viele von ihnen besitzen Planeten. So wird der nur sechs Lichtjahre entfernte Barnards Stern von einer Supererde umkreist, der 40 Lichtjahre entfernte Rote Zwerg TRAPPIST-1 hat sogar sieben erdähnliche Planeten und auch der erdnächste Stern Proxima Centauri besitzt einen potenziell lebensfreundlichen Planeten. *Objekte mit noch geringerer Oberflächentemperatur sind keine Sterne mehr, sondern Braune Zwerge
- In der **habitablen Zone** um einen Stern kann ein Großteil des auf der Oberfläche eines Planeten vorhandenen Wassers dauerhaft in flüssiger Form als Voraussetzung für erdähnliches Leben vorkommen.
- Die **Astrobiologie** forscht u. a. über **Extremophile**. Dies sind Organismen, die sich extremen Umweltbedingungen angepasst haben, die im Allgemeinen als lebensfeindlich betrachtet werden (siehe: <https://de.wikipedia.org/wiki/Extremophilie>).

STATION 9: Planet mit zwei "Sonnenn"



Nordhalbkugel des Sternhimmels.
 ©: Von Roberto Mura - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11736506>.

Exoplanetentour durch den Sternhimmel

- Station 1:** Sternbild Pegasus → 51 Pegasi b – die "Nobelpreis-Entdeckung"
- Station 2:** Sternbild Zwillinge → Pollux b – Wie man die (Grenz-)Masse ermittelt
- Station 3:** Sternbild Füschen → HD 189733 b – vielleicht ein "Glasregenplanet"
- Station 4:** Sternbild Drache → HD 147379 b – einen Exoplaneten entdecken
- Station 5:** Sternbild Haar der Berenike → HD 110067 b,c,d,e,f,g – die "Harmoniker"
- Station 6:** Sternbild Krebs → 55 Cancri e – ein möglicher "Diamantplanet"
- Station 7:** Sternbild Schlangenträger → GJ 1214 b – womöglich ein "Ozeanplanet"
- Station 8:** Sternbild Widder → Teegarden b, c – Planeten in der habitablen Zone
- Station 9:** Sternbild Schwan → Kepler 16 b – Planet mit zwei "Sonnenn"
- Station 10:** Sternbild Kleine Bärin → Gaia 3 b – der Exzentrische

Aufgaben:

- 1.) Berechne die Abstände a_A und a_B der Doppelsternkomponenten A und B zum gemeinsamen Schwerpunkt ($a_A + a_B = a$) mittels des Schwerpunktsatzes ($m_A \cdot a_A = m_B \cdot a_B$) (ähnlich dem Hebelgesetz).
- 2.) Demonstriere die möglichen Bedeckungs-/Transitereignisse beim Blick auf die "Kante" der Umlaufebenen von Kepler 16 (AB) und Kepler 16 b mittels dreier Kugeln oder Kreisscheiben aus Pappe.
- 3.) Wie könnte man sich die Tage (und Nächte) auf Kepler 16 b aus Sicht eines hypothetischen Beobachters vorstellen? (Versuche auch eine künstlerische Darzustellen eines "Sonnenaufgangs" auf Kepler 16 b.)
- 4.) Wann könnte die Sternhimmelsregion, in der sich Kepler 16 b befindet, an deinem Heimatort beobachtet werden?

Kepler 16 b - Daten:

Entdeckung: Transitmethode, 2011

Typ: zirkumbinärer Saturn-Masse-Planet

Mutterstern: Kepler 16 (AB); Typ Algol; 245 Lj
enger spektroskopischer Doppelstern
 $\approx 19^{\text{h}} 16^{\text{m}}; \approx +51^{\circ} 45,5'$; (Schwan)
gemeinsam: Spektraltyp K7 V; $T = 4450 \text{ K}$
Kepler 16 A: Spektraltyp K V; $T = 4450 \text{ K}$
Kepler 16 B: Spektraltyp M V; $T = 3311 \text{ K}$
 $\approx 0,2$ Sonnenmassen; $\approx 0,65$ Sonnenradien
Abstand $a = 0,22 \text{ AE}$; Umlaufzeit 41 d

Planet: Kepler 16 b: Temperatur: -100 bis -70°C
 $\approx 0,75$ Jupiterradien, $\approx 0,33$ Jupitermassen
Umlaufzeit: 229 d; mittl. Abstand: $0,7 \text{ AE}$

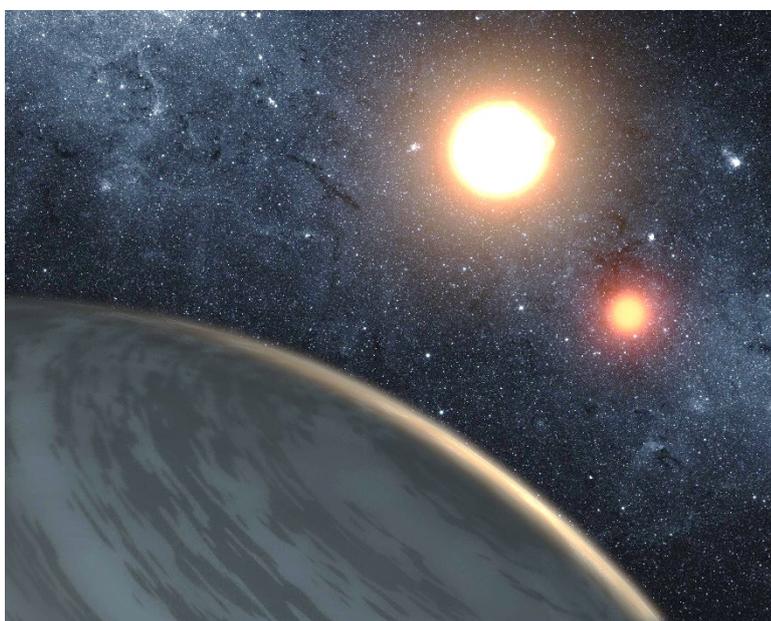
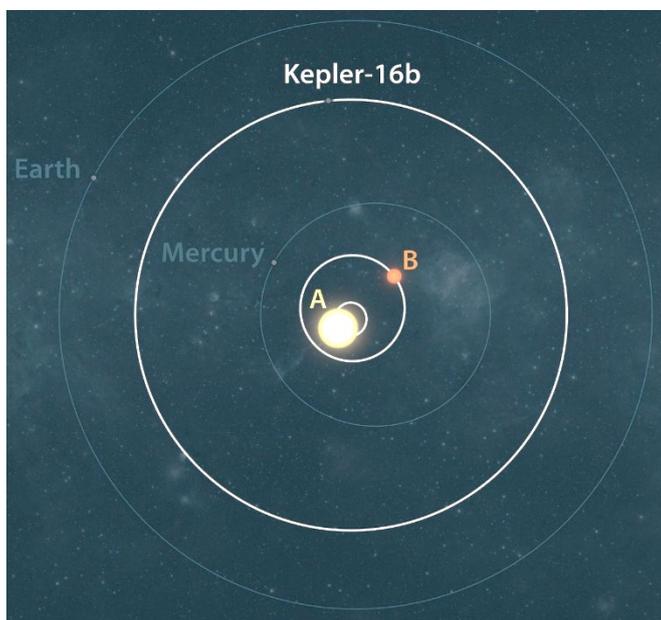
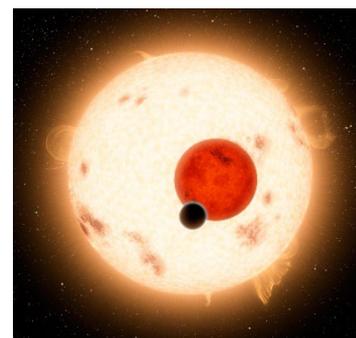


Bild oben links: Umlaufbahnen der Doppelsternkomponenten Kepler 16 A und Kepler 16 B um den gemeinsamen Schwerpunkt, um den auch der Exoplanet Kepler 16 b läuft (fiktiver Blick senkrecht auf die Doppelstern-Bahnebene. Die Bahnebene von Kepler 16 b liegt nahezu in der Bahnebene des Doppelsternsystems, was als Hinweis gilt, dass der Planet sich in der zirkumbinären Scheibe der Doppelsternkomponenten bildete. ©: NASA/Ames/JPL-Caltech.

Bild oben rechts: Künstlerische Darstellung des Anblicks der zwei Sonnen von Kepler 16 b aus dem Planetenorbit heraus. ©: NASA/JPL-Caltech/T. Pyle - http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/multimedia/images/Kepler-16_planet-pov-art.html, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=23048981>.

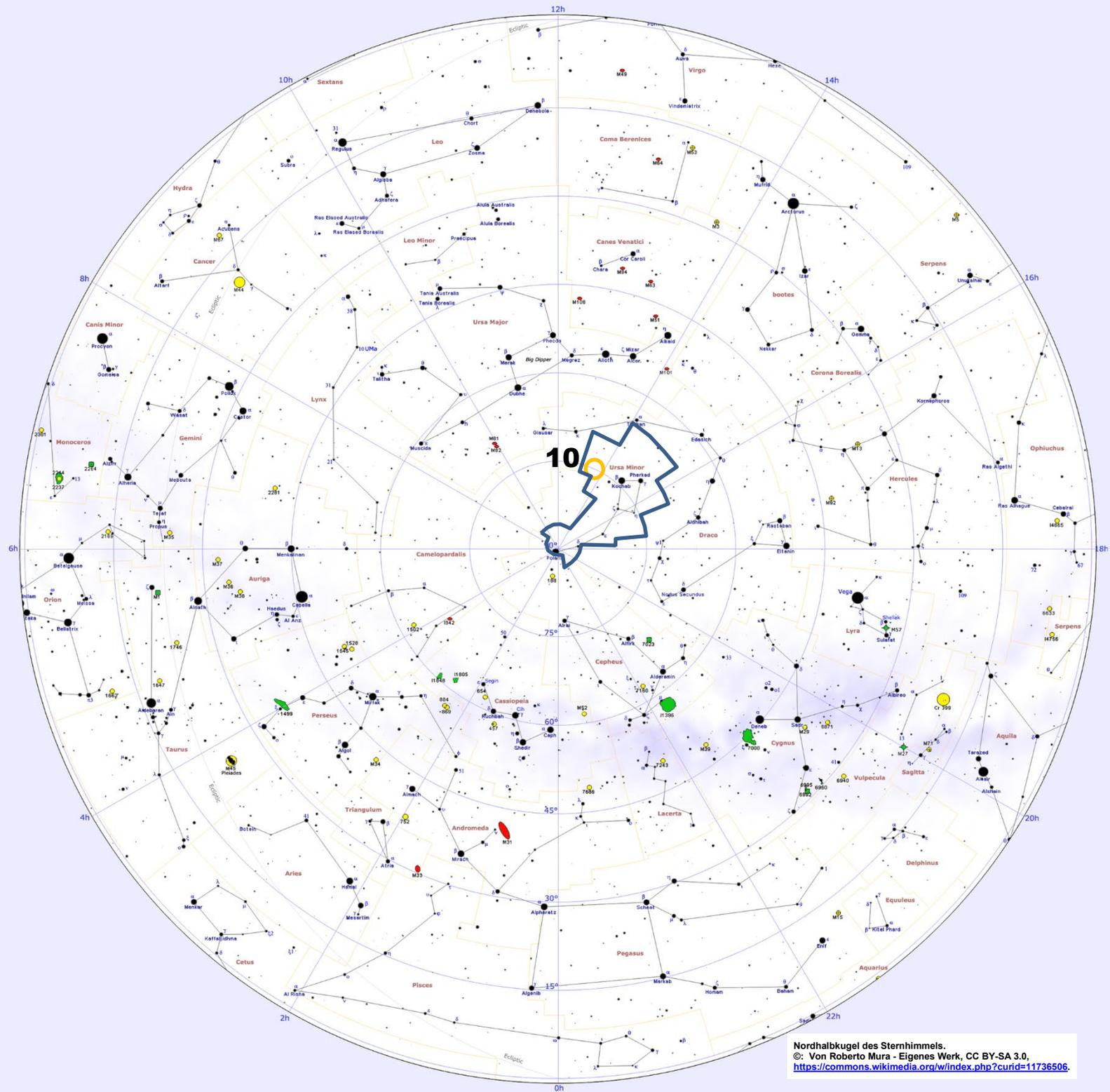
Bild unten: Die Sicht nahezu auf die Kante der Umlaufebenen hat verschiedene Bedeckungen/Transits zur Folge (künstlerische Darstellung). ©: Von NASA/JPL-Caltech - PIA14724: Where the Sun Sets Twice (Artist Concept), Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16505873>.



Info-Kasten

- **Kepler 16 b** ist ein Saturn-Masse-Planet, der je zur Hälfte aus Gas und Stein besteht.
- **Doppelsterne:** bewegen sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt, der immer auf der Verbindungslinie beider Sterne liegt. Der Abstand a der beiden Sterne zueinander ergibt sich aus den Teilabständen zum gemeinsamen Schwerpunkt: $a_A + a_B = a$. Es gilt der Schwerpunktsatz $M_A \cdot a_A = M_B \cdot a_B$, (der ähnlich aussieht, wie das Hebelgesetz). Hat man also die Gesamtmasse der Doppelsternsystems aus dessen relativer Umlaufbahn mittels des 3. Keplerschen Gesetzes ermittelt, so kann man die Einzelmassen der beiden Sterne berechnen.
- **Bedeckung und Transit:** Beim Vorbeiziehen eines auf die Winkelgröße bezogen größeren Himmelskörpers vor einem anderen Himmelskörper spricht man von einer **Bedeckung** (oder Verfinsternung). Im umgekehrten Fall spricht man von einem **Transit** (oder Durchgang).

STATION 10: der "Exzentrische"



Nordhalbkugel des Sternhimmels.
 ©: Von Roberto Mura - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11736506>.

Exoplanetentour durch den Sternhimmel

- Station 1:** Sternbild Pegasus → 51 Pegasi b – die "Nobelpreis-Entdeckung"
- Station 2:** Sternbild Zwillinge → Pollux b – Wie man die (Grenz-)Masse ermittelt
- Station 3:** Sternbild Föchschen → HD 189733 b – vielleicht ein "Glasregenplanet"
- Station 4:** Sternbild Drache → HD 147379 b – einen Exoplaneten entdecken
- Station 5:** Sternbild Haar der Berenike → HD 110067 b,c,d,e,f,g – die "Harmoniker"
- Station 6:** Sternbild Krebs → 55 Cancri e – ein möglicher "Diamantplanet"
- Station 7:** Sternbild Schlangenträger → GJ 1214 b – womöglich ein "Ozeanplanet"
- Station 8:** Sternbild Widder → Teegarden b, c – Planeten in der habitablen Zone
- Station 9:** Sternbild Schwan → Kepler 16 b – Planet mit zwei "Sonnenn"
- Station 10:** Sternbild Kleine Bär → Gaia 3 b – der Exzentrische

Aufgaben:

- 1.) Wie ist die (numerische) Exzentrizität einer Ellipse definiert (siehe Info-Kasten unten)?
- 2.) Zeichne in das Bild im Info-Kasten den kürzesten und den weitesten Abstand von Gaia 3 b zu seinem Mutterstern ein und berechne diese Abstände aus der Exzentrizität.
- 3.) Was verbirgt sich hinter der astrometrischen Methode? Wie genau kann Gaia Winkel messen (siehe Diagramm)? Bis zu welchem Abstand könnte Gaia die linke von der rechten Kante einer 1-Euro-Münze (23,25 mm) noch unterscheiden?
- 4.) Wann kannst du an deinem Heimatort die Himmelsgegend von Gaia 3 beobachten?

Gaia 3 b - Daten:

https://exoplanet.eu/catalog/gaia_3_b--8812/

Entdeckung: Astrometrische Methode, 2023

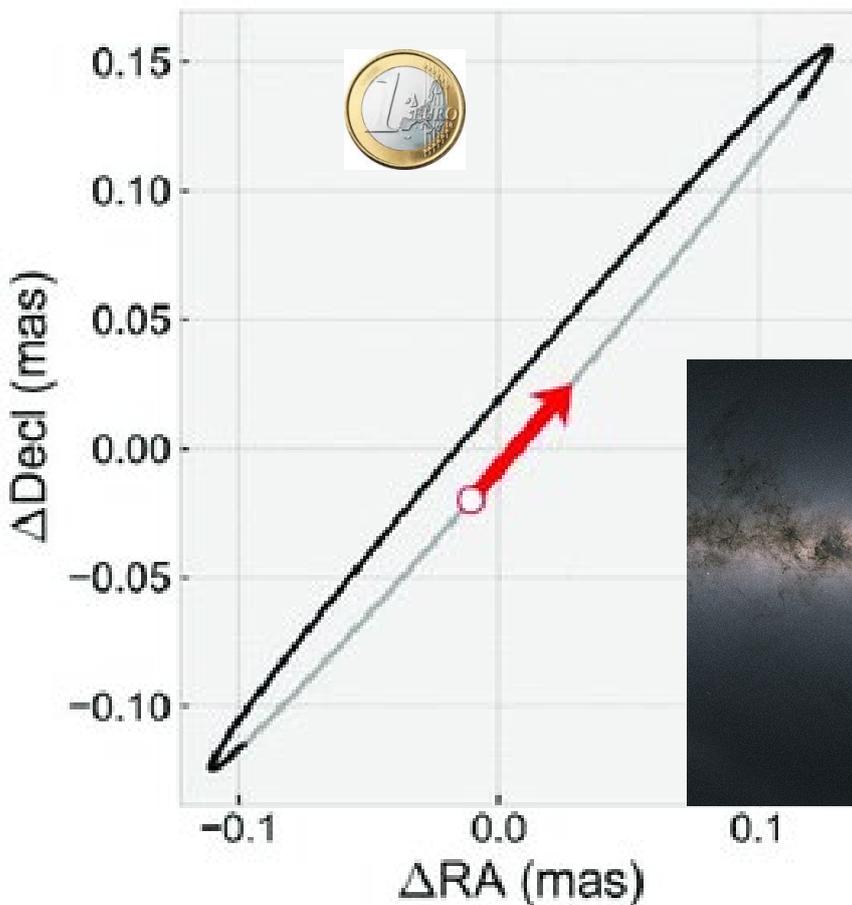
Typ: Gasriese, exzentrischer Jupiter

Mutterstern: Gaia 3 (auch HIP 66074); $m \approx 10,2$ mag
 $\approx 13\text{h } 33\text{m}; \approx +75^\circ 0,5'$; (Kleine Bärin)
 35,37 pc

Spektraltyp K V; $T = 4300$ K

0,705 Sonnenmassen; 0,69 Sonnenradien

Planet: $\geq 0,79$ Jupitermassen; Abstand: 0,799 AE
 Exzentrizität: 0,948; Umlaufzeit ca. 311 d



Links: Die auf Grundlage von Dopplerdaten simulierte Bahn des Exoplaneten Gaia 3 b um seinen Mutterstern. ©: Teil von Abb. 4 in The Astronomical Journal, 164:196 (21pp), 2022 November, file:///C:/Users/fischer/Downloads/Joint_Constraints_on_Exoplanetary_Orbits_from_Gaia.pdf.

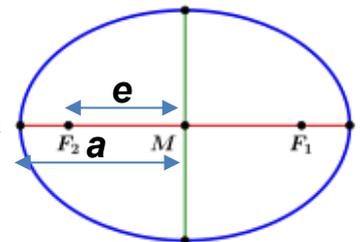
Rechts: Künstlerische Darstellung des Gaia-Satelliten, der Daten von mehr als 1,8 Mrd. Sternen gewonnen hat (Katalog: Gaia's Early Data Release 3). ©: By Spacecraft: ESA/ATG medialab; Milky Way: ESA/Gaia/DPAC. Acknowledgement: A. Moitinho., CC BY-SA IGO 3.0, CC BY-SA 3.0 igo, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=119243221>.



Info-Kasten

Exzentrizität ϵ :

Die **numerische Exzentrizität ϵ** gibt die Abweichung der Ellipse vom Kreis an. Während der Kreis nur seinen Mittelpunkt M hat, besitzt die Ellipse zudem noch die Brennpunkte F_1 und F_2 . Der Abstand zwischen Mittelpunkt und Brennpunkt wird als **lineare Exzentrizität e** bezeichnet. a bezeichnet die große Halbachse. Die (numerische) Exzentrizität ϵ bestimmt sich nun wie folgt: $\epsilon = e / a$.



Gaia und die astrometrische Methode:

Gaia 3 b ist der erste astrometrisch mit Hilfe von Gaia bestimmte Kandidat (mittlerweile bestätigt) für einen Exoplaneten. Gaia ist ein Weltraumteleskop der Europäischen Weltraumorganisation ESA. Mehr als eine Mrd. Sterne der Milchstraße werden dabei astrometrisch hochgenau vermessen (auch photometrisch und spektroskopisch). Die extrem genauen Positionsbestimmungen erlauben es, die Bewegung einiger Sterne um den gemeinsamen Schwerpunkt mit einem Planeten nachzuweisen und ihn somit astrometrisch zu entdecken.

