

Teil 1 – Einführung

- Was sind Exoplaneten?
- Geschichtlicher Abriss der Vorstellung von unserer Heimat im Universum
- Gängige Theorie der Entstehung unseres Sonnensystems

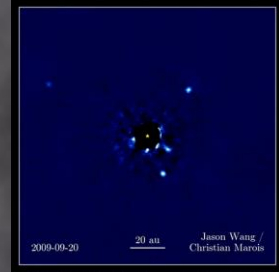
Teil 2 – Die Suche nach Exoplaneten

- Die Ziele der Exoplanetenforschung
- Nachweismethoden – Vor- und Nachteile verschiedener Methoden
- Missionen und Instrumente in der Exoplanetenforschung
- Wo und wonach wir suchen – Sterne, habitable Zone
- Was sich mit heutigen Instrumenten nachweisen läßt
- Die Suche nach extraterrestrischem Leben – Biomarker, Technomarker

Teil 3 – Ergebnisse

- Statistiken, Klassifizierungen
- Beispiele fremder Sonnensysteme und extremer oder lebensfreundlicher Exoplaneten
- Fazit und Bedeutung für gängige Theorien zur Entwicklung von Planeten und -systemen

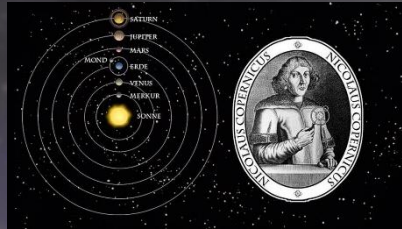
Teil 4 – Quellen und weiterführende Literatur



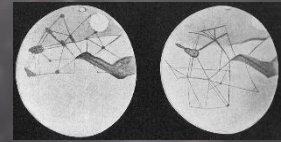
- Planeten und unsere Vorstellung von der Welt
 - Planeten in der Antike
 - Kopernikus, Gallilei und Kepler
 - Bruno und Kant
 - Phantasie und Wirklichkeit

- Moderne Astronomie
 - Pioneer und Voyager I & II
 - Lander, Rover und Co

- Entdeckungsgeschichte der Exoplaneten
 - Erste Entdeckungen
 - Gezielte Suche
 - Timeline



Kopernikanisches Weltbild



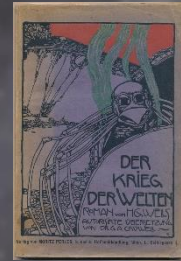
Marskanäle nach P. Lowell



Giordano Bruno



Immanuel Kant



Krieg der Welten

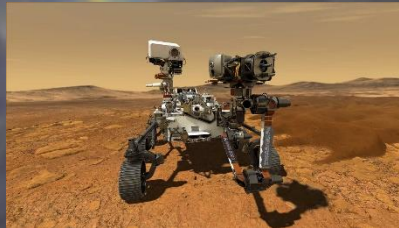
- Planeten und unsere Vorstellung von der Welt
 - Planeten in der Antike
 - Kopernikus, Gallilei und Kepler
 - Bruno und Kant
 - Phantasie und Wirklichkeit
- Moderne Astronomie
 - Pioneer und Voyager I & II
 - Lander, Rover und Co
- Entdeckungsgeschichte der Exoplaneten
 - Erste Entdeckungen
 - Gezielte Suche
 - Timeline



Raumsonde Voyager



Jupiter



Marsrover Perseverance



Jupiter - Detail

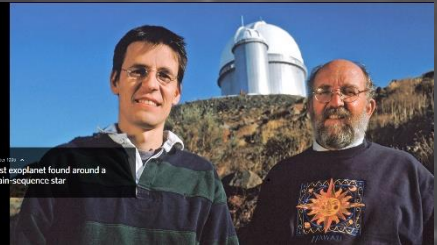
- Planeten und unsere Vorstellung von der Welt
 - Planeten in der Antike
 - Kopernikus, Gallilei und Kepler
 - Bruno und Kant
 - Phantasie und Wirklichkeit

- Moderne Astronomie
 - Pioneer und Voyager I & II
 - Lander, Rover und Co

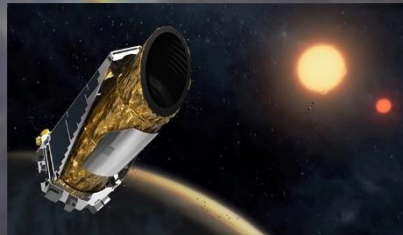
- Entdeckungsgeschichte der Exoplaneten
 - Erste Entdeckungen
 - Gezielte Suche
 - Timeline



51 Pegasi b



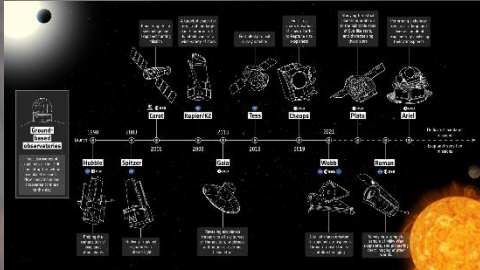
Michel Mayor und Didier Queloz



Kepler - Teleskop



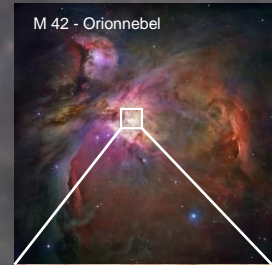
Carmenes - Spektrograf



- Entdeckungsgeschichte der Exoplaneten
 - Erste Entdeckungen
 - Gezielte Suche
 - Timeline

TIMELINE

- 1984 – Erste planetare Scheibe um einen Stern (Beta Pic) entdeckt
- 1992 – Entdeckung von 2 Planeten die einen Pulsar (PSR B1 / A. Wolszczan u. D. Frail) umkreisen
- 1995 – Entdeckung eines Planeten um einen sonnenähnlichen Stern (51 Peg / D. Queloz, M. Mayor)
- 1999 – Erste Entdeckung mit Hilfe der Transitmethode (D. Charbonneau u. G. Henry)
- 1999 – Erstes Mehrfachsystem entdeckt (Ypsilon And)
- 2001 – Erster Planet innerhalb der habitablen Zone entdeckt (La Silla)
- 2003 – MOST (Erstes Weltraumteleskop, spezialisiert zur Transitmethode)
- 2003 – Spitzer gestartet (Infrarot-Satellit, der später auch zur Exoplanetensuche eingesetzt wurde)
- 2004 – Erstes Bild eines Exoplaneten (2M1207, VLT)
- 2006 – CoRoT (franz. Satellit) gestartet
- 2007 – Erste spektroskopische Beobachtung eines Exoplaneten mit Spitzer
- 2009 – Kepler wird gestartet
- 2011 – Erster Gesteinsplanet entdeckt (Kepler)
- 2013 – Start des Vermessungssatelliten GAIA (ESA)
- 2014 – Erster erdgroßer Planet in der habitablen Zone entdeckt (Kepler)
- 2016 – Nächster Exoplanet um Proxima Centauri entdeckt (VLT)
- 2017 – 7 erdgroße Planeten im System Trappist-1 gefunden (ESO / TRAPPIST-Süd)
- 2017 – 8-Planeten-System ähnlich unserem Sonnensystem um Kepler-90 entdeckt
- 2018 – TESS wird gestartet
- 2021 – Start des James Webb Space Teleskops



Protoplanetare Scheibe

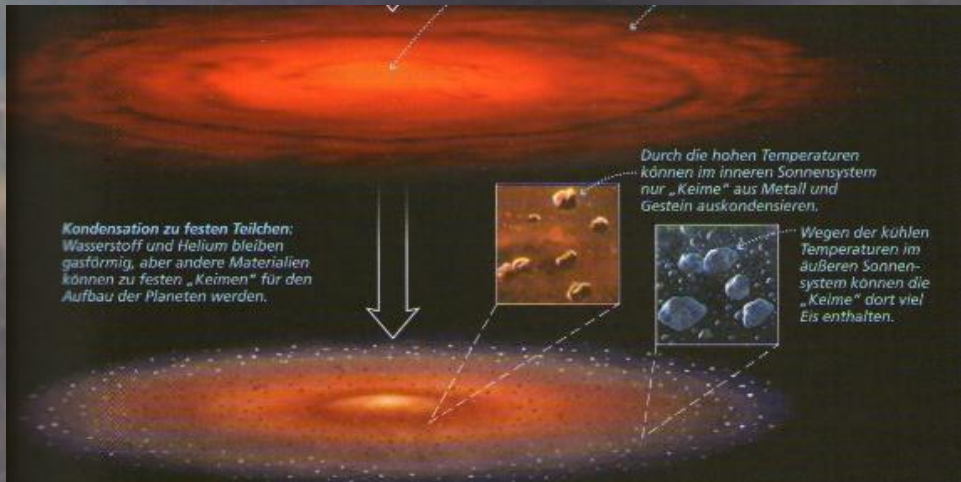
Abbildung 8.13: Zusammenfassung der Prozesse, durch die sich der Nebulartheorie der Planetenentstehung zufolge unser Sonnensystem gebildet hat

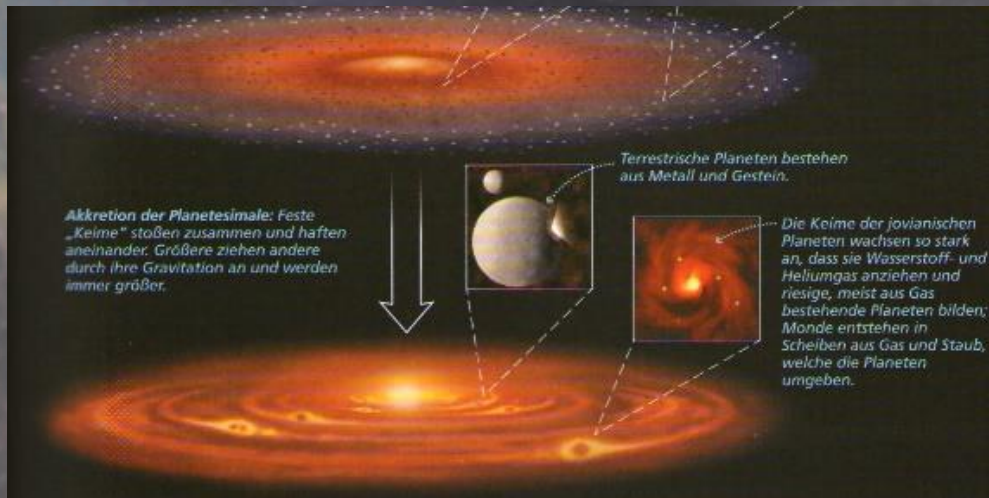
Kontraktion des solaren Urnebels:
Während der Kontraktion heizt sich die Scheibe auf, flacht ab und rotiert schneller. Sie wird zu einer rotierenden Scheibe aus Staub und Gas.

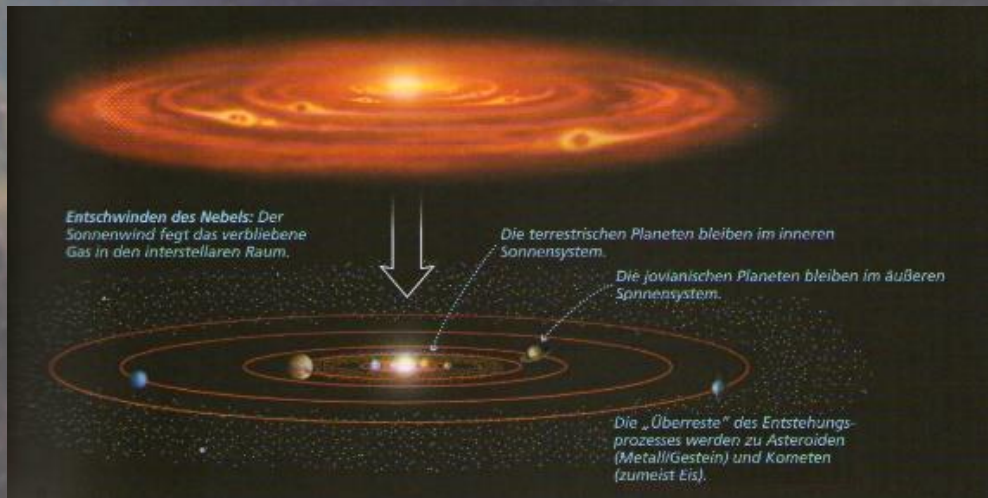
Eine große diffuse interstellare Gaswolke (der solare Urnebel) kontrahiert aufgrund ihrer Schwerkraft.

Im Zentrum wird die Sonne entstehen.

In der Scheibe werden die Planeten entstehen.



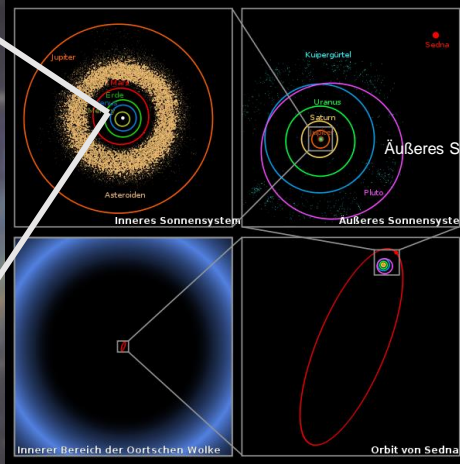






Erde ~ 12.750 km

Inneres Sonnensystem ~ 1 Mrd. km



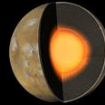
Äußeres Sonnensystem ~ 10 Mrd. km

Oortsche Wolke ~ 10 Billionen km ~ 1 Lichtjahr

MARS ♂



Durchmesser: 6792 km
 Mars - Sonne: 228 Mio. km
 Umlaufzeit: 687 Tage
 Monde: Phobos, Deimos



Kruste 50 km (Silikate, Oxide, fest)
 Mantel (Silikate, fest)
 Kern (Eisen, Schwefel, flüssig)

ERDE ♂



MOND
 Durchmesser: 3476 km
 Erde - Mond: 384000 km
 Umlaufzeit: 27,32 Tage



Durchmesser: 12756 km
 Erde - Sonne: 149,6 Mio. km
 Umlaufzeit: 365,25 Tage

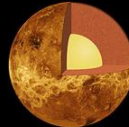


Kruste 35 km (Silikate, Oxide, fest)
 Oberer Mantel 500 km (Silikate, Oxide)
 Unterer Mantel 1500 km (Silikate, Oxide)
 Äußerer Kern (Eisen)
 Innerer Kern 1200 km (Eisen, Nickel)

VENUS ♀



Durchmesser: 12100 km (~0,95x Erde)
 Venus - Sonne: 108 Mio. km
 Umlaufzeit: 225 Tage

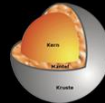


Kruste (Silikate, Oxide, fest)
 Mantel (Silikate, Oxide, zähplastisch)
 Kern (Eisen, Nickel, teilweise flüssig)

MERKUR ♀



Durchmesser: 4878 km (~0,38x Erde)
 Merkur - Sonne: 58 Mio. km
 Umlaufzeit: 88 Tage



JUPITER ♃



Durchmesser: 143000 km (~11,2x Erde)
 Entfernung - Sonne: 778 Mio. km
 Umlaufzeit: 11,86 Jahre
 Hauptmonde:
 Ganymed (5262km), Kallisto (4821km),
 Io (3643 km), Europa (3122km)

SATURN ♄



Durchmesser: 121000 km (~9,5x Erde)
 Entfernung - Sonne: 1427 Mio. km
 Umlaufzeit: 29,46 Jahre
 Größter Mond: Titan (5.150 km)



URANUS ♅

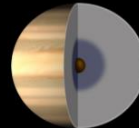


Durchmesser: 51000 km (4x Erde)
 Entfernung - Sonne: 2870 Mio. km
 Umlaufzeit: 84 Jahre
 Größter Mond: Titania (1.578 km)

NEPTUN ♆



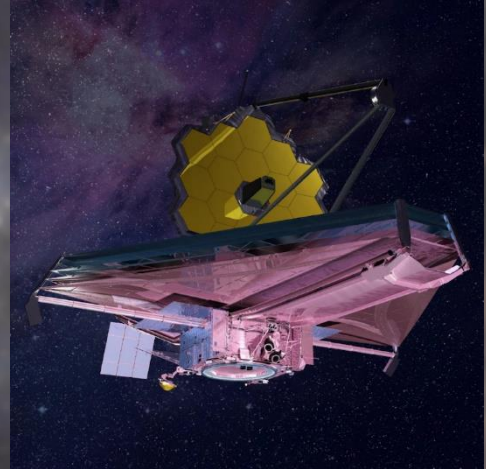
Durchmesser: 49000 km (3,9x Erde)
 Entfernung - Sonne: 4.498 Mio. km
 Umlaufzeit: 165 Jahre
 Größter Mond: Triton (2.707 km)



- molekularer Wasserstoff
- metallischer (flüssiger) Wasserstoff
- Kern aus Gerstein und Eis
- ~ 90 % Wasserstoff
- ~ 10 % Helium
- ~ 1 % Methan
- ~ 0,03 % Ammoniak

1. Grundlagenforschung
2. Verständnis der Entwicklung von Planetensystem und unseres eigenen Sonnensystems
3. Verständnis der Entwicklung von Planeten und deren Bedingungen und Einflußfaktoren
4. Anpassung und Verbesserung der Theorien
5. Rückschlüsse auf unsere Zukunft
6. Suche nach extraterrestischem Lebens
7. Klärung der Frage nach außerirdischer Intelligenz

1. Radialgeschwindigkeitsmessung
2. Transite und Bedeckungen
3. Astrometrisches Verfahren
4. Direkte Beobachtung
5. Microlensing

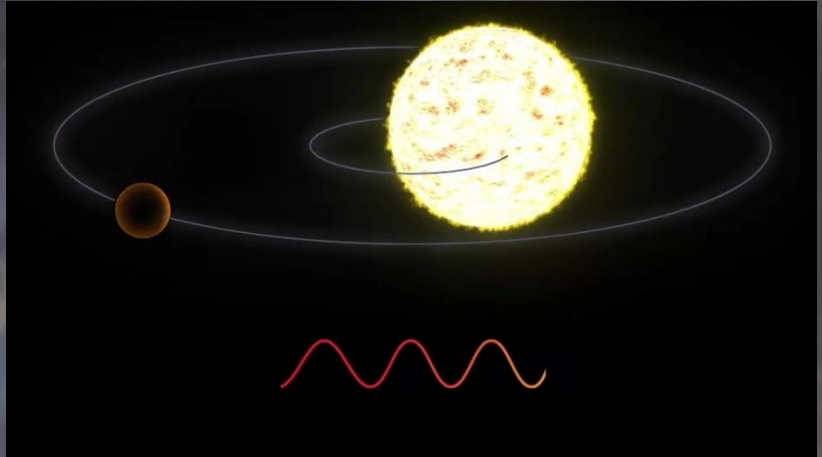


1. Radialgeschwindigkeitsmessung (Dopplerverfahren)
2. Transite und Bedeckungen
3. Astrometrisches Verfahren
4. Direkte Beobachtung
5. Microlensing

Eine der erfolgreichsten Methoden
Bislang ca 1050 Exoplaneten entdeckt

Vorteile:
Unabhängig von Entfernung
Kann von erdgebundenen Teleskopen beobachtet werden
Umlaufdauer, Bahnradius und Massenbestimmung möglich

Nachteile:
Genauigkeit abhängig von Inklination der Planetenbahn
Massenbestimmung liefert nur Mindestmasse
Abhängigkeit der Entdeckungshäufigkeit von der Masse
Aufwendige Spektroskopie erforderlich

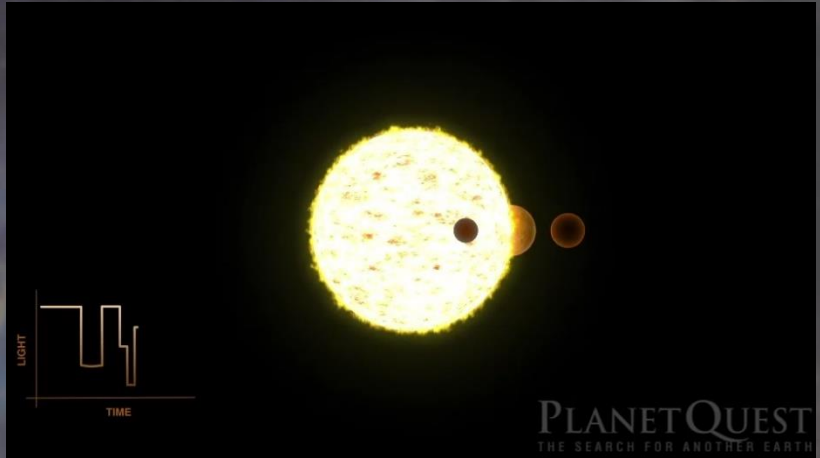


1. Radialgeschwindigkeitsmessung (Dopplerverfahren)
2. Transite und Bedeckungen
3. Astrometrisches Verfahren
4. Direkte Beobachtung
5. Microlensing

Erfolgreichste Methode
Bisher rund 4100 nachgewiesene Entdeckungen

Vorteile:
Weniger Aufwand
Umlaufdauer, Größe des Planeten und zusammen mit Spektroskopie Massenbestimmung und weiterer Parameter möglich
Leichtere Entdeckung von Mehrfachsystemen
Möglichkeit, Atmosphären der Planeten zu untersuchen

Nachteile:
Sinnvolle Nutzung nur vom Weltraum aus
Abhängigkeit von der Bahnneigung
Auswahleffekt durch Distanz Stern – Planet



1. Radialgeschwindigkeitsmessung (Dopplerverfahren)
2. Transite und Bedeckungen
3. Astrometrisches Verfahren
4. Direkte Beobachtung
5. Microlensing

Bisher nur 2 nachgewiesene Entdeckungen

Vorteile:

Weniger sensitiv gegenüber Bahnneigung

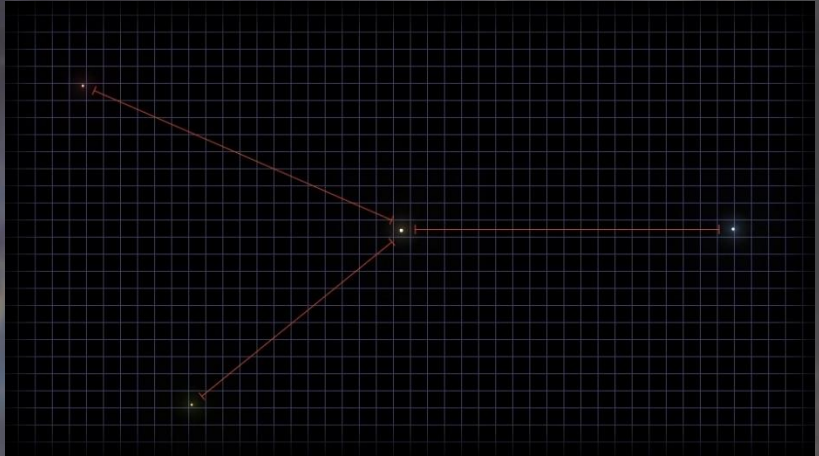
Nachteile:

Hochpräzise Messungen erforderlich

Beobachtung bislang nur mit Weltraumteleskop möglich

Abhängig von Entfernung des Systems

Abhängig von Massenverhältnis Stern – Planet



1. Radialgeschwindigkeitsmessung (Dopplerverfahren)
2. Transite und Bedeckungen
3. Astrometrisches Verfahren
4. **Direkte Beobachtung**
5. Microlensing

Bisher 67 Entdeckungen

Vorteile:

Direkter Nachweis

Unabhängig von Bahnneigung

Direkte Spektroskopie des Planeten möglich

Künftige Technologien z.B. Starshade für weltraumgestützte Beobachtung

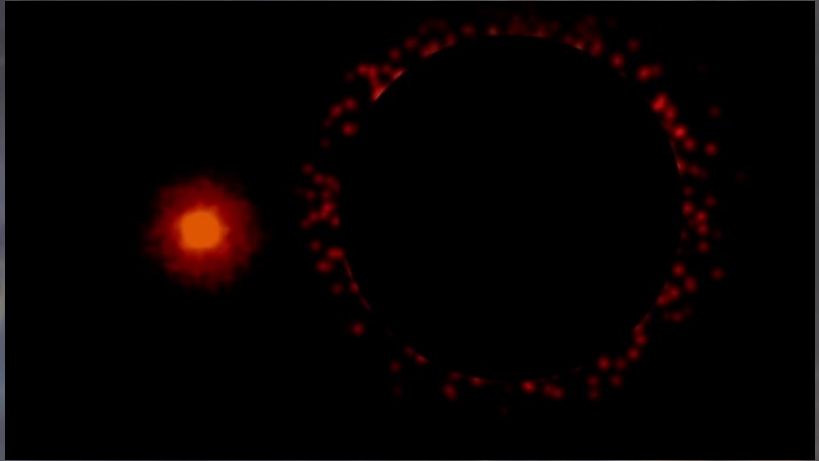
Nachteile:

Aufwändige Technik erforderlich (Koronograf)

Luftunruhe muss eliminiert werden (adaptive Optiken)

Abhängig von Entfernung des Systems und Größe des Planeten

[Koronograf](#)



1. Radialgeschwindigkeitsmessung (Dopplerverfahren)
2. Transite und Bedeckungen
3. Astrometrisches Verfahren
4. Direkte Beobachtung
5. **Microlensing**

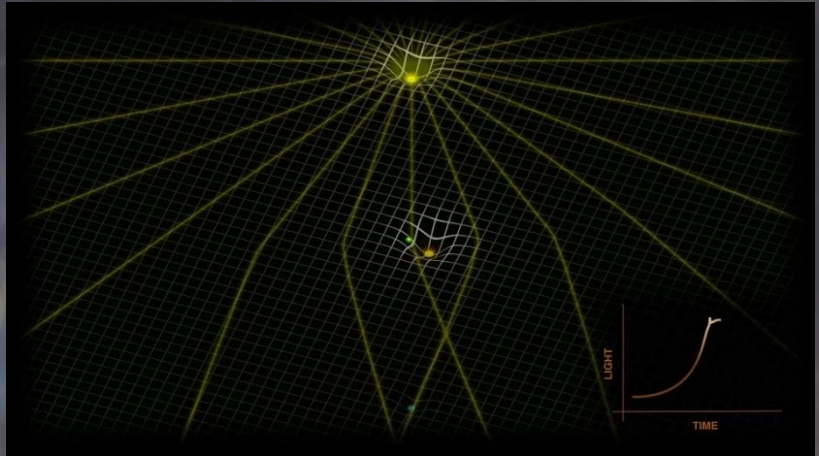
Bisher 200 Entdeckungen

Vorteile:

Beobachtung über große Distanzen
Entdeckung „dunkler“ Planeten möglich

Nachteile:

Beobachtung über große Himmelsareale/Zeiten nötig
Einmaliges Ereignis



Teleskope

Großteleskope:

3.6 m Teleskop La Silla
VLT
Keck I und II
Subaru
LBT
GTC, etc.

Teleskopverbund:

ALMA

Spezialisierte Teleskope:

TRAPPIST
SPECULOOS (Search for habitable Planets
EClipping ULtra-cOOl Stars)
ExTrA

Künftige Entwicklungen:

E-ELT
TMT (OWL)
GMT



Keck I und II, Mauna Kea



TRAPPIST Süd, La Silla

(Transiting Planets and
Planetesimals Small Telescope)



TMT

Instrumente (Spektrografen, Auswahl)

- HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher) – seit 2003
- CRIRES und CRIRES+ (CRYogenic high-resolution InfraRed Echelle Spectrograph) – 2006, VLT
- SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch instrument) – 2014, VLT
- CARMENES (Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Échelle Spectrographs) – 2016
- SPiRou – 2018, CFHT
- ESPRESSO (Echelle SPectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations) – 2018, VLT
- MAROON-X (Magellan Advanced Radial velocity Observer Of Neighboring exoplanets) – 2020, Gemini North
- NIRPS (wie HARPS für Infraroten Bereich) – 2022, La Silla



HARPS (Eso, La Silla)



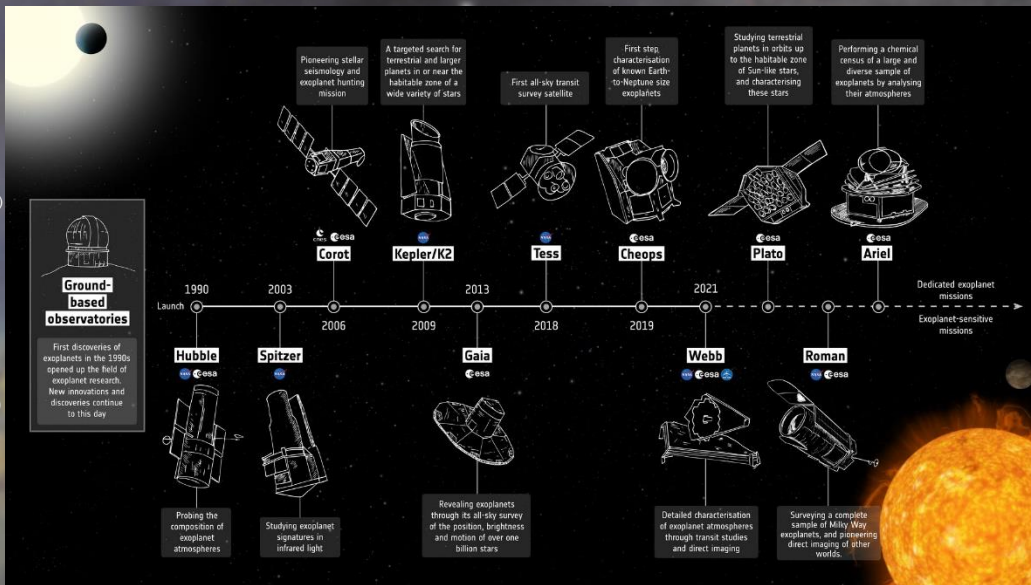
CRIRES (Eso, VLT)



CARMENES (Calar Alto)

Missionen

- MOST (2003)**
(Microvariability & Oscillations of Stars)
- Spitzer (2003-2020)**
- CoRoT (2006-2013)**
(COncvection, ROtation and planetary Transits)
- Kepler (2009–2018)**
- GAIA (2013)**
- TESS (2018)**
(Transiting Exoplanet Survey Satellite)
- CHEOPS (2019)**
(CHaracterising ExOPlanet Satellite)
- JWSP (2021)**
- PLATO (2026?)**
(PLAnetary Transits and Oscillation of stars)
- Roman (WFIRST) (Mitte 2020er)**
- ARIEL (2029?)**
(Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey)



Kepler und K2

2009–2018

NASA, 600 Mio \$

Typus: SCT mit 1,4 m Hauptspiegel und
0,95 m Schmidt-Platte

Gewicht rund 1 T

Photometer mit 42 CCD-Sensoren

Genauigkeit ca. 0,1 % Abdunklung

Das Teleskop beobachtete ein fixes Areal im Schwan mit ca. 190.000 Sternen, um extrasolare Planeten mit Hilfe der Transitmethode zu entdecken. Zielsetzung der Mission war die Entdeckung erdgrößer oder kleinerer und damit auch potenziell bewohnbarer Planeten.

Die Mission von Kepler war zuerst für dreieinhalb Jahre vorgesehen. Im November 2012 sollte sie um bis zu vier Jahre verlängert werden. Nach dem Ausfall von zwei Reaktionsrädern im Mai 2013 wurde die Beobachtungsmethode geändert und es folgte die Sekundärmission K2.

Kepler hat 4034 Exoplaneten gefunden, davon 2335 bestätigt.

Wichtige Entdeckungen:

Kepler 10b (2011) – kleinster bis dahin bekannter Gesteins-Exoplanet (1,47 Erdmassen)

Kepler 11b–g (2011) – Stern mit mindestens 6 Exoplaneten

Kepler 16b (2011) – erster beobachteter Transit bei einem Doppelstern

Kepler 22b (2011) – erster Planet innerhalb der habitablen Zone

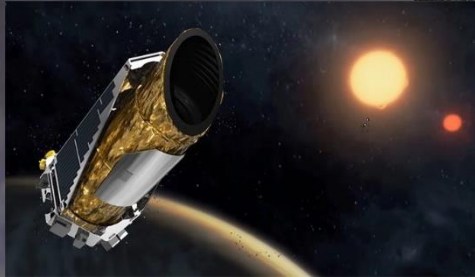
Kepler 37b (2013) – kleinster Planet mit ca. Erdmondgröße

Kepler 62e, f (2013) – zwei erdähnliche Planeten in der habitablen Zone

Kepler 10c (2014) – erste Super-Erde (Nachbeobachtung mit HARPS-N)

Kepler 452b (2015) – erster erdähnlicher Planet in der habitablen Zone um einen sonnenähnlichen Stern (G2)

Kepler 1625 (2016) – möglicherweise erster Planet mit einem Mond



Zielsetzung

- Abschätzung der Anzahl der Planeten und Planetensysteme in unserer Galaxis
- Verteilung der Planetentypen
- Abschätzung der Anzahl erdähnlicher Planeten in der habitablen Zone
- Suche nach erdähnlichen, bewohnbaren Planeten in der Umgebung der Sonne
- Suche nach Biomarkern in den Atmosphären solcher Planeten und bei Monden jovianischer Planeten
- Beantwortung der großen Frage: SIND WIR ALLEIN?

Sterntypen

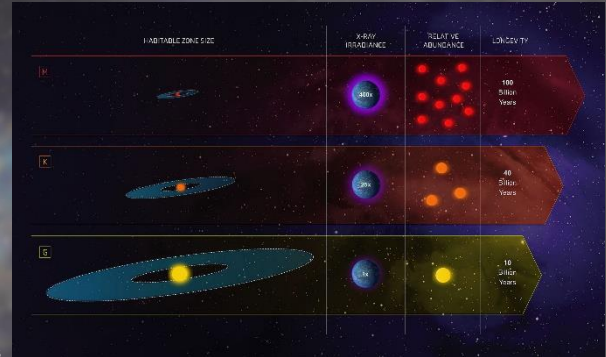
Sterne, die eine lange Entwicklungszeit garantieren, um Leben, insb. höher entwickeltes, zu ermöglichen

Sterne dürfen nicht zu intensive Strahlung aufweisen

Chemische Zusammensetzung für die Entstehung komplexer Moleküle muss gegeben sein

Hauptreihensterne (sonnenähnliche Sterne der Spektralklassen G, F und K)

Rote Zwerge (sehr häufig, Nachweis von Planeten leichter, aber problematisch für die Entwicklung höheren Lebens)



Vergleich verschiedener Sterntypen, deren habitabler Zone, Lebensdauer und relativer Häufigkeit

(Quelle: <https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/stars/>)

Zielsetzung

- Abschätzung der Anzahl der Planeten und Planetensysteme in unserer Galaxis
- Verteilung der Planetentypen
- Abschätzung der Anzahl erdähnlicher Planeten in der habitablen Zone
- Suche nach erdähnlichen, bewohnbaren Planeten in der Umgebung der Sonne
- Suche nach Biomarkern in den Atmosphären solcher Planeten und bei Monden jovianischer Planeten
- Beantwortung der großen Frage: SIND WIR ALLEIN?

Sterntypen

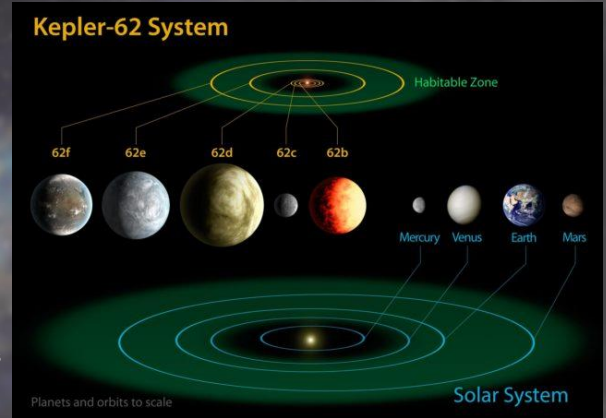
Sterne, die eine lange Entwicklungszeit garantieren, um Leben, insb. höher entwickeltes, zu ermöglichen

Sterne dürfen nicht zu intensive Strahlung aufweisen

Chemische Zusammensetzung für die Entstehung komplexer Moleküle muss gegeben sein

Hauptreihensterne (sonnenähnliche Sterne der Spektralklassen G, F und K)

Rote Zwerge (sehr häufig, Nachweis von Planeten leichter, aber problematisch für die Entwicklung höheren Lebens)



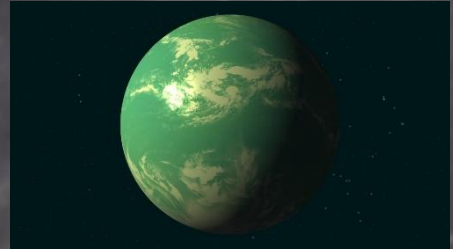
Vergleich der habitablen Zonen (grüne Bereiche) um den roten Zwergstern Kepler 62 zur Sonne

Nachweisbare Parameter und Eigenschaften

- Bahndaten
- Größe, Masse und Dichte von Exoplaneten
- Typus, deren Verteilung und Verhältnis zu Mutterstern
- Oberflächentemperatur, Temperaturgradienten
- Spezifische Elemente in den Atmosphären
- Potentielle Lebensfreundlichkeit

Aber!

- Bestimmte Eigenschaften lassen sich nicht immer bestimmen, sodass die Daten unvollständig bleiben
- Exoplaneten mit hinreichend kurzer Umlaufperiode lassen sich einigermaßen sicher bestimmen
- Heutige Instrumente einschließlich JWST noch nicht in der Lage genügend hoch aufgelöste Spektren zu erstellen, um qualitative Aussagen über Oberflächenbeschaffenheit oder Atmosphären zu treffen
- Bisher nur ganz wenige und bruchstückhafte Nachweise von bestimmten Elementen oder Molekülen geglückt
- Auswahleffekte zeigen ein verschobenes Bild bzw. können kein vollständiges Bild zeichnen, quantitative Aussagen daher noch nicht möglich. Statistiken unvollständig, nur vorsichtige Abschätzung möglich
- Beantwortung der Frage nach Lebensfreundlichkeit nicht nur von einigen wenigen Eigenschaften abhängig.
Planeten sind äußerst komplexe Gebilde und die Bedingungen für Leben hängen von vielen weiteren Faktoren ab.



Kepler 22b
Supererde mit 2,4 Erdradien ($\sim 9 M_{\oplus}$)
in der habitablen Zone
Könnte von einem Ozean umgeben
sein, oder aber hohe Anteile an Gas
aufweisen
(Quelle: <https://exoplanets.nasa.gov/eyes-on-exoplanets/?destinations=/alien-worlds/strange-new-worlds/#>)

Planeten sind äußerst komplexe Gebilde und die Bedingungen für Leben hängen von vielen weiteren Faktoren ab.

- Bisher keine definitive Definition von extrat. Leben getroffen
- Ein erdgroßer Gesteinsplanet in der habitablen Zone bedeutet noch nicht, dass er Leben birgt (siehe Venus, Mars)
- Habitable Zone nicht unbedingt Voraussetzung für Leben (siehe Eismonde)

Wonach also suchen? – Biomarker

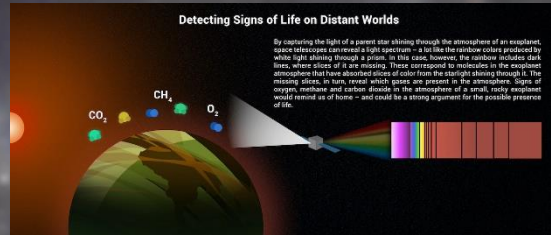
Bislang vereinzelt nachgewiesene Moleküle in Exoplanetenatmosphären:

- H₂O Flüssiges Wasser an der Oberfläche gilt als eine Voraussetzung – Nachweis von Wasserdampf in der Atmosphäre könnte ein Hinweis sein
- O₂ und O₃ könnten durch Leben bedingt sein, ebenso
- Methan (CH₄) und
- Kohlendioxyd (CO₂)
- K, Na zwar lebensnotwendig, aber noch kein Nachweis

Keines der angeführten Elemente taugt für sich als Nachweis für Leben, da das Aufkommen sehr wahrscheinlich auch natürlichen Ursprungs sein kann. Am ehesten weist die Kombination solcher Spuren auf Leben hin (zB oxygene Photosynthese)

Moleküle, die von Lebensprozessen herrühren, finden sich nicht unbedingt in den Atmosphären bzw. weit unter der Nachweisgrenze
ZB (CH₃)₂S durch Phytoplankton

Bisher unklar, welche sonstige Spuren sicher auf Leben schließen lassen.



Planeten sind äußerst komplexe Gebilde und die Bedingungen für Leben hängen von vielen weiteren Faktoren ab.

- Bisher keine definitive Definition von extrat. Leben getroffen
- Ein erdgroßer Gesteinsplanet in der habitablen Zone bedeutet noch nicht, dass er Leben birgt (siehe Venus, Mars)
- Habitable Zone nicht unbedingt Voraussetzung für Leben (siehe Eismonde)

Wonach also suchen? – Technomarker

- Radiowellen, Lasersignale – können auch aus interferierenden irdischen Quellen stammen
- Luftverschmutzung – unklar, welche Signaturen eindeutig künstlichen Ursprung haben
- Dyson Spheres, ausgedehnte technische Gebilde im räumlichen Umfeld von Planeten – sehr spekulativ

Finding signs of intelligent life

Evidence of technological civilizations elsewhere in the galaxy – technosignatures – could take many forms that are potentially detectable from Earth. A few often-cited examples:

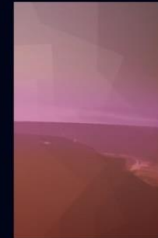
Electromagnetic Signal

Radio, or some other electromagnetic signal, that is clearly engineered and artificial.



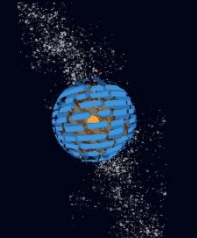
Atmospheric Pollution

Chemicals that only can be generated artificially, such as pollution, could be observed in atmospheric readings from planets around other stars.



Dyson Spheres

A speculative idea, known as "Dyson spheres," involves large structures around stars, used by advanced civilizations to collect their energy. These would leave a distinctive infrared radiation signature.



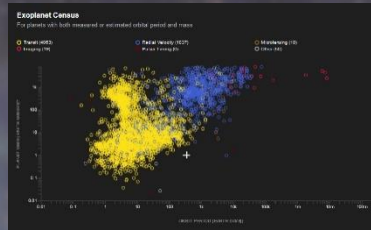
Statistiken

Bislang (Stand 15. Juli 2023) wurden 5470 Exoplaneten in 4207 Systemen bestätigt. Weitere 9720 unbestätigte mögliche Planeten



Anzahl der Exoplaneten nach Typ

Jupiterähnliche	1724
Neptunähnliche und Minineptune	1881
Super Erden	1661
Gesteinsplaneten (erdähnliche)	198



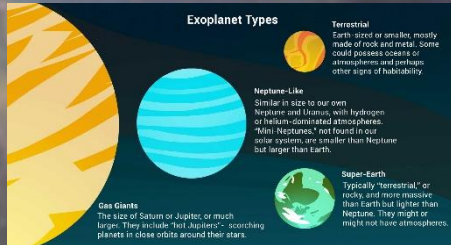
Verteilung von Masse (M_E) und Umlaufzeiten (d)
 (weißes Kreuz definiert Erde)



Entdeckungen nach Methoden

Typen von Exoplaneten

Exoplaneten weisen eine Vielzahl unterschiedlicher Erscheinungsformen auf. Darunter solche, die in unserem Sonnensystem nicht existieren. ZB Supererden und „hot Jupiters“



Anzahl der Exoplaneten nach Typ	
Jupiterähnliche	32%
Neptunähnliche	34%
Super Erden und Minineptune	30%
Gesteinsplaneten (erdähnliche)	4%

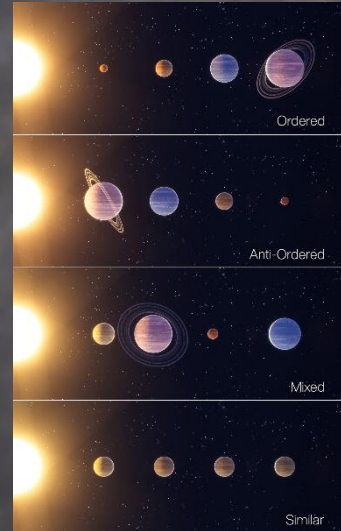
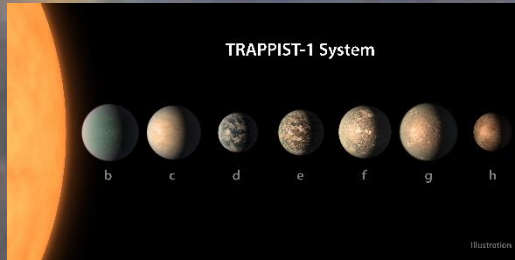
1. Große Gasplaneten ähnlich Jupiter und Saturn, teils erheblich größer und sehr oft in einer engen Umlaufbahn und sehr kurzer Umlaufperiode. Dadurch können sie extreme Temperaturen aufweisen (hot Jupiters). Sie können relativ leicht mit der Transit-Methode entdeckt werden, entsprechend hoch ist ihre Entdeckungsrate.
2. Neptunähnliche Gasplaneten. Sie haben eine ähnliche Zusammensetzung (Wasserstoff, Helium). Dazu zählt auch die Unterklasse „Minineptune“, die kleiner als Neptun aber wesentlich größer als die Erde sind.
3. Super Erden. Sie kommen im Sonnensystem nicht vor, weisen ähnliche Dichten wie unsere Erde auf, erreichen aber wesentlich höhere Massen.
4. Terrestrische Planeten. Gesteinsplaneten wie unsere Erde, teils kleiner. Sie werden hauptsächlich im Umfeld roter Zwergsterne gefunden, wo ihre Signaturen leichter zu entdecken sind.

Exoplanetensysteme

Die Anordnung von Exoplaneten in ihrem System scheint nicht dem Beispiel unseres Sonnensystems zu folgen. Sie können ungeordnet oder sogar konträr zum Sonnensystem gereiht sein.

Es gibt Systeme, die aus ausschließlich terrestrischen Planeten bestehen, zB das System TRAPPIST-1.

Dies wirft weitere Fragen zu unserem Verständnis von der Entstehung solcher Systeme auf.

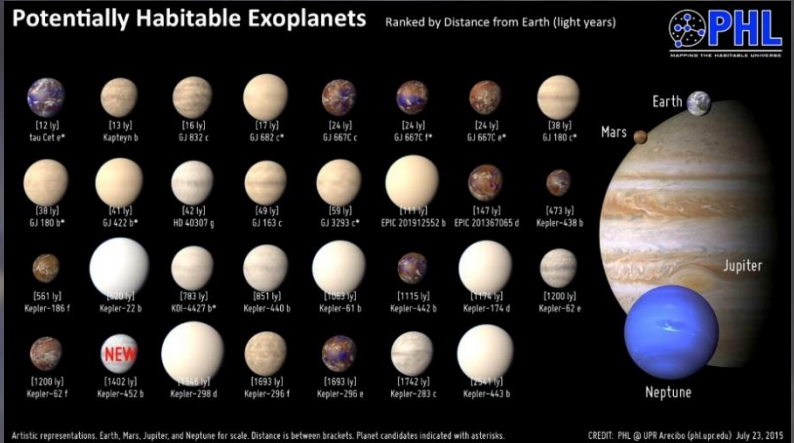


Erdähnliche Exoplaneten in habitabler Zone

Trotz der hohen Anzahl gefundener Exoplaneten ist der Anteil erdähnlicher, also in Größe und Masse vergleichbarer Gesteinsplaneten, innerhalb der habitablen Zone gelegenen Planeten sehr klein. Je nach Definition werden derzeit nur 15 davon mit einem ESI (Earth Similarity Index) von über 80% eingestuft. Unter Einbeziehung von Supererden, die aufgrund ihrer hohen Schwerebeschleunigung an der Oberfläche für Menschen unbewohnbar sind, kämen 6 weitere hinzu. Zum Vergleich Venus und Mars haben einen ESI von 44 bzw. 69 Prozent.

ESI nicht wirklich aussagekräftig genug, die tatsächliche Bewohnbarkeit zu bestimmen.

[Liste potentiell bewohnbarer Planeten](#)

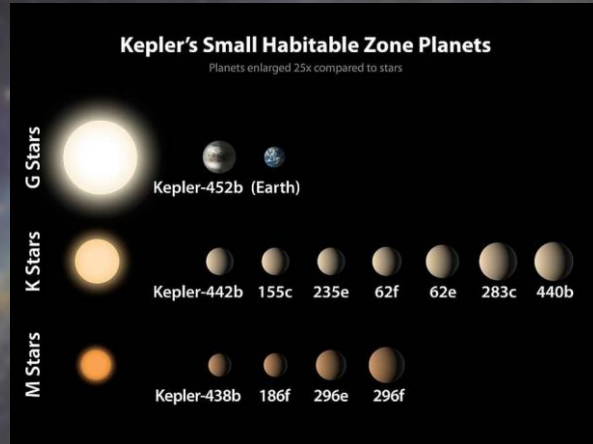


Erdähnliche Exoplaneten in habitabler Zone

Trotz der hohen Anzahl gefundener Exoplaneten ist der Anteil erdähnlicher, also in Größe und Masse vergleichbarer Gesteinsplaneten, innerhalb der habitablen Zone gelegenen Planeten sehr klein. Je nach Definition werden derzeit nur 15 davon mit einem ESI (Earth Similarity Index) von über 80% eingestuft. Unter Einbeziehung von Supererden, die aufgrund ihrer hohen Schwerebeschleunigung an der Oberfläche für Menschen unbewohnbar sind, kämen 6 weitere hinzu. Zum Vergleich Venus und Mars haben einen ESI von 44 bzw. 69 Prozent.

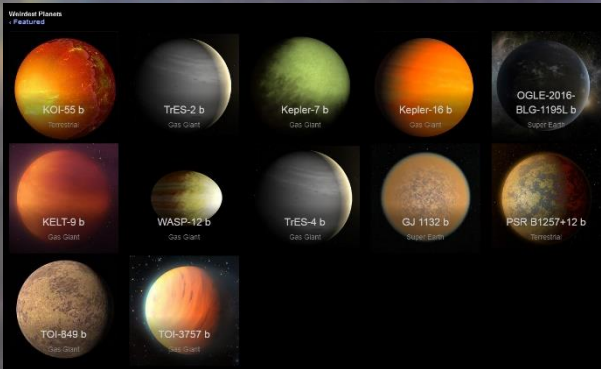
ESI nicht wirklich aussagekräftig genug, die tatsächliche Bewohnbarkeit zu bestimmen.

[Liste potentiell bewohnbarer Planeten](#)



Extreme Beispiele von Exoplaneten

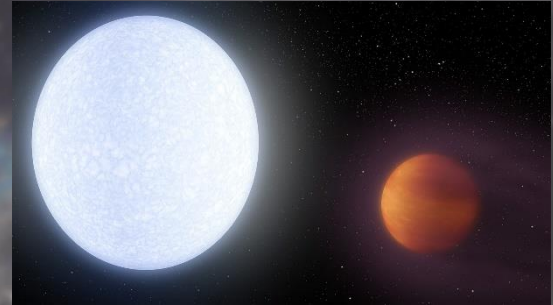
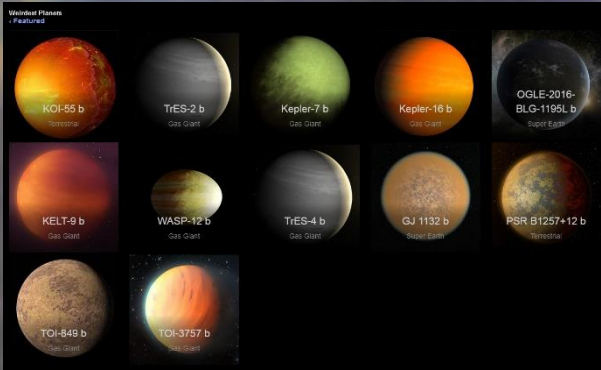
Für das Verständnis der Bedingungen und die Entwicklung von Planeten und Systemen ist es wichtig, auch extreme Beispiele zu untersuchen. Die Erde im Zustand von vor zwei Mrd. Jahren wäre uns sehr lebensfeindlich vorgekommen.



Kepler 16b war der erste Planet, der in einem Doppelsternsystem entdeckt wurde. Entgegen der bis dahin verbreiteten Annahme, dass wegen der instabilen Bahnverhältnisse solche Planeten nicht existent sein dürften, wurde unser Verständnis dahingehend revolutioniert.

Extreme Beispiele von Exoplaneten

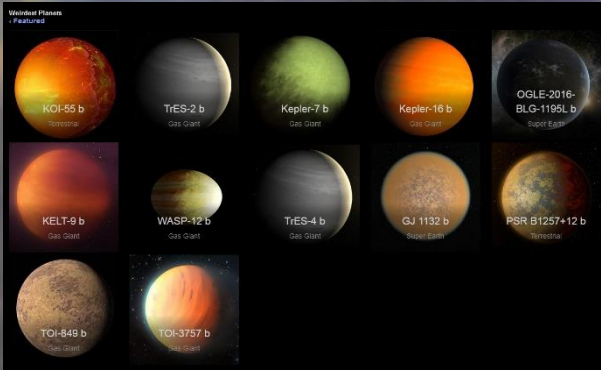
Für das Verständnis der Bedingungen und die Entwicklung von Planeten und Systemen ist es wichtig, auch extreme Beispiele zu untersuchen. Die Erde im Zustand von vor zwei Mrd. Jahren wäre uns sehr lebensfeindlich vorgekommen.



Kelt 9b umkreist einen erst 300 Mio. Jahre alten B-Stern in einer gebundenen Rotation auf enger Bahn. Er ist damit heißer als die meisten Sterne.

Extreme Beispiele von Exoplaneten

Für das Verständnis der Bedingungen und die Entwicklung von Planeten und Systemen ist es wichtig, auch extreme Beispiele zu untersuchen. Die Erde im Zustand von vor zwei Mrd. Jahren wäre uns sehr lebensfeindlich vorgekommen.



WASP-12b ist fast doppelt so groß wie unser Jupiter und ein Gasriese mit einer Temperatur von etwa 2200 Grad Celsius auf einer engen Bahn mit nur 1,1 Tagen Umlaufzeit. Die enormen Gezeitenkräfte dehnen den Planeten in die Form eines Eies und werden ihn vermutlich in den nächsten Mio. Jahren zerreißen.

[Weitere Beispiele finden Sie hier](#)

Einige Aussagen über Exoplaneten

Eine Auswertung der bisher entdeckten Exoplaneten, hauptsächlich aus den Daten der Kepler-Mission, ergibt folgendes Bild:

- In unserer Milchstraße beherbergt fast jeder Stern mindestens einen oder auch mehrere Planeten. Das sind somit viele Milliarden Planeten. Der Anteil erdähnlicher Planeten ist noch nicht endgültig bestimmt.
- Planeten können auch in Mehrfachsystemen vorkommen.
- Entstehung von Planetensystemen ist ein „normaler“ Prozess bei der Bildung neuer Sterne.
- Planetenformation geschieht in kürzerer Zeit als bislang angenommen.
- Planeten wurden nicht nur an ihrem ursprünglichen Entstehungsort gefunden. Es scheint eine häufige Migration außen gelegener Planeten zum Systemzentrum zu geben.
- Die gängigen Theorien zur Entstehung und Entwicklung von Planetensystemen dürften in den Grundzügen stimmen, benötigen aber eine Anpassung an die beobachteten Phänomene.
- Es bedarf einer Verfeinerung und Weiterentwicklung von Modellrechnungen, um einerseits beobachtete Bedingungen erklären zu können, andererseits um Vorgaben für die Entwicklung künftiger Instrumente und Missionen zu erstellen.

Fazit

Trotz der hohen Anzahl möglicher bewohnbarer Planeten wurde bislang keine Welt gefunden, die unserer Erde gleicht.

Ein Nachweis für Leben auf gefundenen habitablen Planeten ist noch nicht möglich. Es ist aber zu erwarten dass Nachfolgeprojekte in den 30er Jahren empfindlich genug sind, einen solchen Nachweis erbringen zu können.

Für diese Präsentation wurden folgende Quellen genutzt:

- Webseite der NASA zu Exoplaneten <https://exoplanets.nasa.gov/eyes-on-exoplanets>
- Interaktive Datenbank der NASA <https://exoplanets.nasa.gov/discovery/exoplanet-catalog/>
- NASA Exoplanet Archive des CalTech <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>
- Webseite der ESA zu Exoplaneten und Missionen https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Exoplanets
- ESO Webpages zu Teleskopen und Instrumenten <https://www.eso.org/public/teles-instr/>
- PHL-Seite der University of Puerto Rico at Arecibo <https://phl.upr.edu/home>
- Wikipedia https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_potentiell_bewohnbarer_Planeten
- Spektrum der Wissenschaft KOMPAKT über Exoplaneten, Folge 1 – 4
- Astronomie – Die kosmische Perspektive, 5. Auflage, Pearson Studium, 2010

Alle verwendeten Abbildungen und Videos wurden den frei zugänglichen Materialien der oben angeführten Webseiten entnommen

[Webseite AZM-Archiv](#)