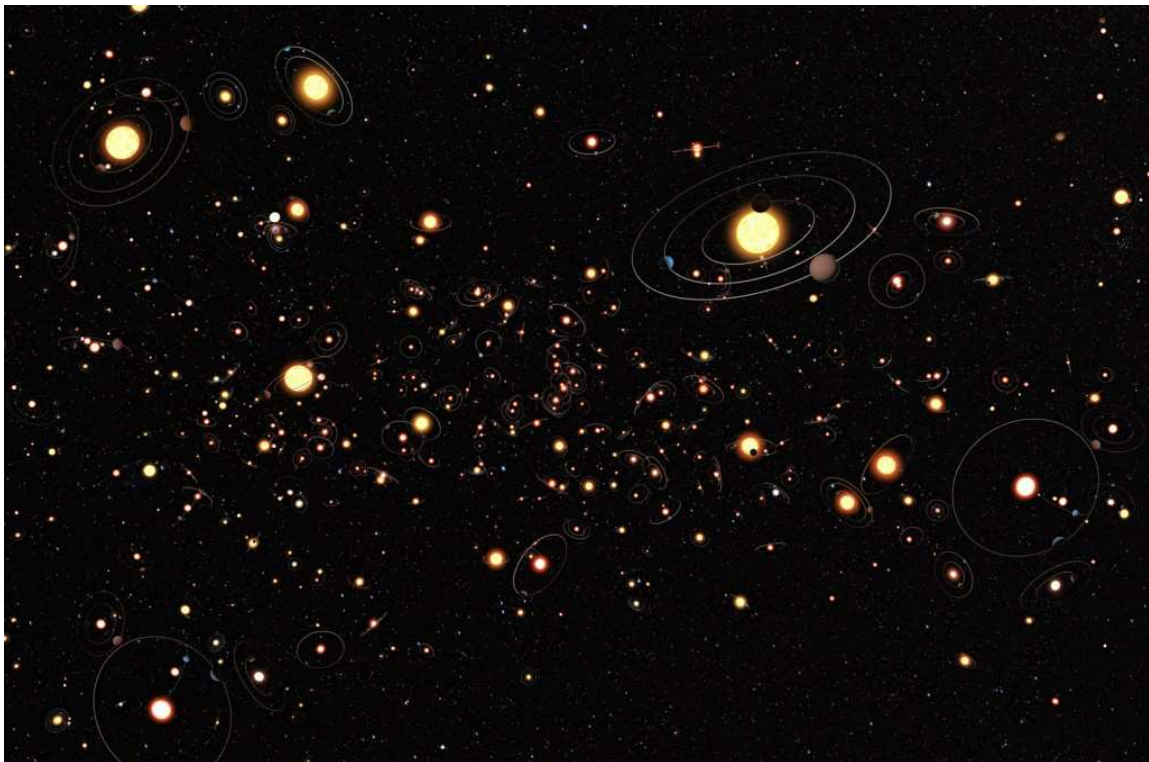


Astronomie und Astrophysik

Extrasolare Planeten

von

Andreas Schwarz



Stand: 28.11.2017

0.0 Inhaltsverzeichnis

1.0 Einleitung.....	4
2.0 Die Entstehung der Planeten.....	6
2.1 Die Entstehung des Sonnensystems.....	7
2.2 Die Entstehung der Sonne.....	7
2.3 Die solare proto-planetare Scheibe	8
2.4 Die Entstehung der Planeten des Sonnensystems.....	10
2.5 Die Entwicklung des Sonnensystems.....	10
2.6 Die Entstehung der Extrasolaren Planeten und ihrer Systeme.....	11
3.0 Die Beobachtung und der Nachweis von Extrasolaren Planeten.....	13
3.1 Radialgeschwindigkeitsmethode.....	13
3.2 Astrometrische Methode.....	14
3.3 Tansitmethode.....	14
3.4 Mikrolinsenmethode.....	15
3.5 Berechnung gestörter Planetenbahnen.....	17
3.6 Lichtlaufzeit-Methode.....	17
3.7 Der direkte Nachweis von Extrasolaren Planeten.....	17
4.0 Beobachtungstechnik und Missionen.....	19
4.1 Die aktuellen Systeme und Teleskope.....	19
4.2 Geplante Missionen von Weltraumteleskopen.....	21
4.3 Geplante Riesenteleskope auf der Erde.....	23
5.0 Die Klassen von Extrasolaren Planeten.....	25
5.1 Supererden.....	26
5.2 Heiße Jupiter.....	29
5.3 Die Monde der Extrasolaren Planeten.....	31

6.0 Mögliches Leben auf Extrasolaren Planeten.....	33
6.1 Astrobiologie.....	33
6.2 Extrasolare Planeten und mögliches Leben.....	34
7.0 Schlusswort.....	37
8.0 Literatur und Bilderverzeichnis.....	38

1 Einleitung

Extrasolare Planeten sind Planeten in anderen Sternsystemen und nicht Teil unseres Sonnensystems. Die mutmaßlichen Nachweise von Extrasolaren Planeten in der Vergangenheit erwiesen sich alle als falsch. Bis anfang der 1990er Jahre war daher unklar, ob das Sonnensystem eine Ausnahme oder ein Normalfall ist. Die Messtechnik ermöglichte erst dann den Nachweis von Planeten außerhalb des Sonnensystems. Der erste Extrasolare Planet, welcher einen Neutronenstern umkreist, wurde im Jahre 1992 entdeckt. Im Jahre 1995 wurde der erste Extrasolare Planet entdeckt, welcher einen Stern umkreist. Dieser Planet umkreist den sonnenähnlichen Stern 51 Pegasi im Sternbild Pegasus und wird als 51 Pegasi b bezeichnet. Nachgewiesen wurde 51 Pegasi b von den Astronomen Michel Mayor und Didier Queloz, welche ihre Entdeckung am 06. Oktober 1995 offiziell bekanntgaben.

Mittlerweile werden regelmäßig weitere Extrasolare Planeten bzw. extrasolare Planetensysteme entdeckt, so dass die Anzahl der bekannten Extrasolaren Planeten bzw. von extrasolaren Planetensystemen in die Tausende geht. Heute ist klar, dass die Existenz von Extrasolaren Planeten ein Normalfall und keine Ausnahme ist. Die Planetenentstehung ist mit der Sternentstehung assoziiert und damit ein Nebenprodukt der Entstehung von Sternen. Allein in unserer Galaxis gibt es rund 300 Milliarden Sterne. Die Anzahl der Extrasolaren Planeten in der Galaxis wird auf etwa 400 Milliarden geschätzt. Doch auch in anderen Galaxien dürfte es entsprechend viele Extrasolare Planeten geben. Neben den gravitativ an einen Stern gebundenen Extrasolaren Planeten gibt es auch nicht gebundene, welche sich frei durch den Weltraum bewegen und Planemos genannt werden.

Zunächst konnten vor allem jupiterähnliche und massereiche Planeten nachgewiesen werden, welche sich in einer Umlaufbahn sehr nah am Stern befinden. In diesen Fällen wird auch von sogenannten heißen Jupitern gesprochen. Mittlerweile können auch von ihrer Masse her erdähnliche Planeten nachgewiesen werden, wobei die Verifizierung, ob terrestrischer Planet oder Gasplanet, noch schwierig ist. Aufgrund der derzeitigen Messtechnik lassen sich Systeme mit bestimmten Eigenschaften, etwa massereiche Planeten mit Umlaufbahnen sehr nahe am Stern, leichter nachweisen als andere Systeme. Daher könnte der Eindruck entstehen, dass diese Systeme vorherrschend sind. Dies sind allerdings nur Auswahlwirkungen aufgrund der derzeitigen Messtechnik. Noch sind keine fundierten Aussagen über die Verteilung von extrasolaren Planetensystemen mit bestimmten Eigenschaften, etwa Anzahl, Umlaufbahnen und Massen der Extrasolaren Planeten, möglich.

Die Suche nach Extrasolaren Planeten erfolgt schwerpunktmäßig im infraroten Bereich. In diesem Bereich ist der Kontrast von Planet zum Stern etwas besser, da Planeten vorwiegend im infraroten Bereich leuchten. Aus diesem Grund ist die Beobachtung eines Extrasolaren Planeten im optischen Bereich sehr schwierig. Es gibt verschiedene Nachweismethoden für extrasolare Planeten. Bei der astrometrischen Nachweismethode wird eine charakteristische Pendelbewegung des Sterns gemessen, welche durch den Umlauf eines massereichen Planeten verursacht wird.

Eine andere Methode ist die Variation der Radialgeschwindigkeit aufgrund von Planeten. Sterne haben neben einer messbaren horizontalen und vertikalen Eigenbewegung auch eine messbare Bewegung auf uns zu oder von uns weg. Dies wird Radialbewegung genannt. Bewegt sich ein Stern auf uns zu, sind seine Spektrallinien zum kurzwelligen Bereich im Spektrum hin verschoben, also in den blauen Bereich. Im umgekehrten Fall sind die Spektrallinien zum langwelligen Bereich hin verschoben, also in den roten Bereich des Spektrums. Ein Planet um einen entsprechenden Stern erzeugt eine periodische Variation der Radialgeschwindigkeit, die gemessen werden und als Nachweis dienen kann.

Sternbedeckungen stellen eine weitere Nachweismöglichkeit dar. Wenn der Planet sich vor den Stern schiebt, fällt die Sternhelligkeit entsprechend ab. Aufgrund des Verlaufs der Lichtkurve kann auf einen Planeten geschlossen werden. Allerdings hat diese Messmethode auch Unsicherheiten

aufgrund von möglichen Sternflecken und stellaren Variationen. Mit Hilfe von Satellitenmissionen soll die Messqualität entsprechend verbessert werden. Aus den Beobachtungen des Planetentransits vor dem Stern kann auch auf die Atmosphäre des Planeten geschlossen und ihre chemische Zusammensetzung mit Hilfe der astrophysikalischen Spektroskopie analysiert werden.

Weitere Beobachtungsmöglichkeiten nutzen den Microlensing-Effekt und das Einstein-Beaming. Ersterer Effekt tritt allerdings, wenn überhaupt, nur einmal auf und ist wegen der Nichtreproduzierbarkeit kein besonders geeignetes Beobachtungsverfahren. Beim Einstein-Beaming wird ebenfalls ein relativistischer Effekt genutzt. Planet und Stern bewegen sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt. Auf diese Weise pendelt der Stern, bewegt sich periodisch auf uns zu und von uns weg. Aufgrund des Einstein-Beaming-Effekts wird der Lichtstrahl relativistisch fokussiert, er erscheint auf uns zu bewegt heller.

Die Suche und Beobachtung von Extrasolaren Planeten erfolgt sowohl erdgebunden als auch von Satelliten aus. Noch ist die Messtechnik allerdings in vielen Fällen zu ungenau, um zweifelsfrei terrestrische Extrasolare Planeten nachzuweisen.

Für Extrasolare Planeten mit bestimmten Massen haben sich Bezeichnungen etabliert, welche jedoch widersprüchlich sind. Als Supererden werden Planeten bezeichnet, welche mindestens eine Erdmasse, jedoch weniger als die Masse des Planeten Uranus (14,5 Erdmassen) haben. Nach dieser Definition liegt der Massenbereich einer Supererde zwischen einer und vierzehn Erdmassen. Andere Definitionen grenzen die obere Grenzmasse auf 10 Erdmassen ein. Bei Extrasolaren Planeten von mehr als 14 Erdmassen wird von einer Mega-Erde gesprochen. Diese Begriffe sind jedoch verwirrend, da sie nichts über die tatsächliche Erdähnlichkeit eines Extrasolaren Planeten aussagen. Es wird bei dieser Bezeichnung nur auf die Masse des Extrasolaren Planeten abgezielt, wobei schon der definierte Massenbereich streng genommen nicht unbedingt erdähnlich ist. Unter dieser Definition fallen nämlich auch Gasplaneten, die vom Aufbau her mit Uranus und Neptun vergleichbar sind.

In den meisten Fällen kann bisher nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden, ob es sich bei Supererden auch tatsächlich um einen terrestrischen Extrasolaren Planeten handelt. Für eine konkrete Bestimmung wird auch die mittlere Dichte des Planeten benötigt. Mit ihr kann bestimmt werden, ob es sich um einen terrestrischen Planeten oder einen Gasplaneten handelt. Ein Gasplanet hat im Vergleich zu einem terrestrischen Planeten eine deutlich geringere Dichte. Zweifelsfrei nachgewiesen wurden unter anderem als terrestrische Extrasolare Planeten die Objekte CoRo T-7b und Kepler-10b.

Die Messgenauigkeit wird sich steigern und die Liste der bekannten terrestrischen Extrasolaren Planeten wird zunehmen. Des Weiteren eröffnet sich mit der Astrobiologie ein weiterer Forschungsbereich bezüglich der Extrasolaren Planeten. Hierbei wird der Frage nachgegangen, unter welchen Bedingungen Leben auf Planeten und sonstigen astronomischen Objekten entstehen kann. So muss ein Planet einen geeigneten Stern in einem habitablen Abstand umlaufen, so dass auf diesem flüssiges Wasser existieren kann. Des Weiteren muss der Planet eine ausreichend große Masse haben, um eine dichte Atmosphäre halten zu können. Allerdings darf die Masse auch nicht zu groß werden, damit mögliche Kontinente nicht aufgrund der stärkeren Gravitation unterhalb des Wasserspiegels der planetaren Ozeane liegen. Des Weiteren könnten die Planetenatmosphären aufgrund einer stärkeren Atmosphäre zu dicht werden und die lebensnotwendige Sternstrahlung zu stark abschirmen.

2 Die Entstehung von Planeten

Dass die Entstehung von Planeten ein gewöhnlicher Vorgang ist, wurde bereits früh postuliert. Allerdings scheiterten bis in die 1990er Jahre alle Versuche, Planeten außerhalb des Sonnensystems nachzuweisen. Bis dahin war im Ergebnis unklar, ob das Sonnensystem eine Ausnahme oder die Entstehung von Planeten die Regel ist. Der Nachweis des ersten Extrasolaren Planeten gelang im Jahre 1992. Allerdings umkreist dieser Planet einen Neutronenstern. Der Neutronenstern ist ein Endprodukt der Sternentwicklung und entsteht bei einer Supernova (Sternexplosion). Nach der vorherrschenden Auffassung würde ein Planet bei einer Supernova zerstört werden. Es wird daher spekuliert, ob dieser Planet erst nach dieser Sternexplosion aus dem Supernovaüberrest entstanden ist. Die Entdeckung des ersten Planeten um einen gewöhnlichen Stern gelang im Jahre 1995. Seitdem wurden Tausende Extrasolare Planeten und ihre Systeme entdeckt. Wir haben ein gut ausgefeiltes Modell, welches die Entstehung des Sonnensystems mit der Sonne, den Planeten, Zwergplaneten, Kleinplaneten, Meteoroiden und Kometen folgerichtig erklärt. Unser Sonnensystem ist recht strukturiert aufgebaut. Alle Planeten bewegen sich in regelmäßigen Abständen auf annähernd kreisförmigen Bahnen, welche sich weitgehend in einer Ebene befinden, um die Sonne. Das innere Sonnensystem besteht aus vier terrestrischen Gesteinsplaneten mit Massen zwischen 0,055 und einer Erdmasse, das äußere Sonnensystem aus vier jovianischen (jupiterähnlichen) Gasplaneten mit Massen zwischen 14 und 318 Erdmassen. Zwischen den terrestrischen und den jovianischen Planeten befindet sich der Kleinplanetengürtel. Außerhalb des achten und bisher letzten bekannten Planeten Neptun befindet sich der Kuipergürtel, welcher aus Zwergplaneten und Kleinkörpern besteht. Diese Objekte bestehen aus einem Gemisch von Eis und Gestein. Dieser Gürtel ist die Quelle der kurzperiodischen Kometen. Viel weiter außerhalb schließt sich die Oort'sche Wolke an, welche aus gefrorenen Objekten besteht und die Quelle der langperiodischen Kometen ist. Die Kleinkörper (Kleinplaneten, Kometen und Meteoroiden) sind Überbleibsel aus der Entstehungszeit des Sonnensystems.

Im Falle der Extrasolaren Planeten und ihrer Systeme gibt es jedoch große Abweichungen vom Aufbau des Sonnensystems. In der Einleitung wurden bereits die Begriffe „Supererde“ und „Megaerde“ eingeführt. Bei den Supererden handelt es sich um Planeten mit Massen zwischen einer Erdmasse und einer Uranusmasse (14 Erdmassen). Das können im unteren Massebereich noch Gesteinsplaneten sein, im oberen Grenzbereich wohl Gasplaneten. Eine genaue Grenze lässt sich hierbei noch nicht ziehen. Des Weiteren ist es noch schwierig zu evaluieren, ob es sich um einen Gesteinsplaneten oder um einen Gasplaneten handelt. Bei den Megaerden handelt es sich um Planeten, welche über 14 Erdmassen haben. Im Falle der Extrasolaren Planeten sind Supererden oder auch Megaerden vorherrschend, im Falle des Sonnensystems gibt es diese Art der Planeten überhaupt nicht. Das ist ein wahrnehmbarer Unterschied zwischen dem Sonnensystem und vielen Systemen von Extrasolaren Planeten. Die ersten Extrasolaren Planeten, welche nachgewiesen wurden, haben sehr große Massen von mehreren Jupitermassen und Umlaufbahnen in extremer Nähe zum Stern. Im Vergleich zu unserem Sonnensystem liegen die Bahnen dieser Planeten noch deutlich innerhalb der Merkurbahn, dem sonnennächsten Planeten, und haben Umlaufzeiten von nur einigen Tagen. Im Vergleich hierzu benötigt der Merkur 88 Tagen für einen Sonnenumlauf. Natürlich gibt es bei diesen Nachweisen auch Auswahlwirkungen. Mit der in der Einleitung dargestellten Radialgeschwindigkeitsmethode ist der Nachweis umso eindeutiger, je größer die Planetenmasse und je kleiner die Umlaufbahn um den Stern ist. Allerdings gibt es eine Vielzahl derartiger Systeme, die sich stark vom Aufbau des Sonnensystems unterscheiden. Nach den gängigen Entstehungsmodellen des Sonnensystems können sich jovianische Planeten nicht in der Nähe des Sterns bilden. Diese Planeten bestehen hauptsächlich aus den Gasen Wasserstoff und Helium. Diese Gase können sich nur bei ausreichend niedrigen Temperaturen, jenseits einer sogenannten Eisgrenze, um einen massereichen Kern von mehreren Erdmassen anreichern. In Sternnähe sind die Temperaturen zu hoch dafür. Das Entstehungsmodell des Sonnensystems erklärt, weshalb das innere Sonnensystem aus Gesteinsplaneten und das äußere aus Gasplaneten mit den entsprechenden Massen besteht. Des Weiteren erklärt das Entstehungsmodell des Sonnensystems

die regelmäßigen Abstände der Planetenbahnen sowie die annähernd kreisförmigen Planetenbahnen in einer Ebene. Eine Vielzahl der Extrasolaren Planeten befindet sich hingegen in extremer Nähe zum Stern mit Umlaufzeiten von wenigen Tagen. Des Weiteren kommen extreme Bahnellipsen mit extremen Bahnneigungen oder sogar retrograde Umlaufbewegungen vor.

Im Ergebnis können die gängigen Entstehungsmodelle des Sonnensystems nicht ohne Weiteres auf die Extrasolaren Planeten und ihre Systeme übertragen werden. Allerdings ist es beim gegenwärtigen Stand der Forschung auch noch zu früh zu sagen, wie die konkrete Verteilung von bestimmten Arten von Extrasolaren Planeten und bestimmten extrasolaren Planetensystemen ist. Die grundlegende Entstehung der extrasolaren Planetensysteme dürfte wie im Falle des Sonnensystems verlaufen sein. Bei der Sternentstehung bildet sich eine sogenannte Akkretionsscheibe aus, welche in ihren äußeren Bereichen eine proto-planetare Scheibe bildet. In dieser entstehen die Planeten. Allerdings gibt es dann wohl Mechanismen, welche für die beschriebenen Unterschiede verantwortlich sind. Daher soll in den folgenden Unterkapiteln zunächst auf die Entstehung des Sonnensystems ausführlich eingegangen werden. Danach wird auf Modelle und Thesen eingegangen, welche zusätzlich die hiervon abweichenden Eigenschaften von extrasolaren Planetensystemen erklären könnten.

2.1 Die Entstehung des Sonnensystems

Eine Theorie über die Entstehung des Sonnensystems muss folgende Systemeigenschaften erklären können:

- Die Objekte des Sonnensystems bewegen sich, von Ausnahmen abgesehen, grundsätzlich in einer Ebene.
- Die Bahnen sind, von Ausnahmen abgesehen, annähernd kreisförmig.
- Die Umläufe und die Rotationen der Objekte haben fast alle den gleichen Drehsinn (prograd).
- Das Abstandsgesetz „Titius-Bode-Reihe“: $a = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$. Mit a wird die große Halbachse der Bahnellipse in AE angegeben, der Exponent n steht, beginnend bei Merkur, für einen Wert der Folge $-\infty, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$.
- Die Sonne besitzt 99,87 Prozent der Gesamtmasse, jedoch nur 0,54 Prozent des Gesamtdrehimpulses vom gesamten Sonnensystem.
- Die Struktur des Sonnensystems: Innere terrestrische Planeten aus Gestein und Metallen, mit relativ wenig Masse und relativ hohen Dichten, relativ langsamen Rotationen, kleinen Durchmessern und keinen bis wenigen Monden. Äußere Gas-Planeten aus Wasserstoff und Helium (sonnenähnliche Zusammensetzung) mit einem Kern aus Silikaten und Metallen, relativ hohen Massen und relativ geringen Dichten, relativ schnellen Rotationen, großen Durchmessern und vielen Monden.
- Die Rotationsachsen der Planeten (Drehimpulsvektoren) und Satellitensysteme sind in etwa parallel zum Gesamtdrehimpulsvektor.

Heute ist allgemein anerkannt, dass die Planetenentstehung eng mit dem Sternbildungsprozess verbunden und ein normaler Vorgang im Universum ist. Entsprechende Vorgänge können auch bei anderen Sternen beobachtet werden. Immer mehr sogenannte Extrasolare Planeten werden entdeckt. Insofern ist das Sonnensystem astrophysikalisch betrachtet nichts Besonderes.

2.2 Die Entstehung der Sonne

Die Sonne entstand vor zirka 4,56 Milliarden Jahren aus einer Wolke aus kaltem molekularem Wasserstoff H_2 (Anteil etwa: 75 Prozent), Helium He (23 Prozent), schwereren Elementen (2 Prozent) und Staub. Elemente schwerer als Helium werden in der Astrophysik als Metalle

bezeichnet, auch wenn sie es im physikalisch-chemischen Sinne nicht sind. Gasdruck und Gravitationsdruck waren in der Wolke im Gleichgewicht. Durch eine Supernova kam es zu einer Stoßwelle, welche zu einer lokalen Erhöhung der Dichte in der Wolke führte. An der verdichteten Stelle stieg auch die Gravitation an, was zu einer weiteren Ansammlung von Materie führte.

Damit die Wolke weiter kollabieren kann, müssen ihr Drehimpuls und ihre Temperatur verringert werden. Dazu stehen verschiedene Mechanismen zur Verfügung. Im Falle des Drehimpulsabbaus geschieht dies durch Wechselwirkungen mit dem interstellaren Magnetfeld, die Fragmentierung (Herausbildung von eigenständigen Wolkenfragmenten, welche weiter kollabieren) oder durch die Ausbildung eines Kerns („bulk“) mit rotierender abgeflachter Gasscheibe. Im letzten Fall überträgt sich der Drehimpuls auf die Gasscheibe, während der Kern den Drehimpuls entsprechend verliert und weiter kollabieren kann. Die hier beschriebene Herausbildung der Drehimpulsverteilung findet sich auch in unserem Sonnensystem wieder. Auch für die Kühlung der Wolken sind zunächst Magnetfelder wichtig. Elektronen werden entlang der Magnetfeldlinien beschleunigt und strahlen sogenannte Synchrotronstrahlung ab, welche den kollabierenden Kern verlassen kann und damit zum Abbau der thermischen Energie beiträgt. Auch durch die Streuung von thermisch bewegten Elektronen an Photonen wird Energie auf letztere übertragen, welche den Kern bzw. die Wolke ebenfalls verlassen. Durch Zusammenstöße von thermisch bewegten Atomen werden diese angeregt (Stoßanregung), indem deren Elektronen auf ein höheres Energieniveau angehoben werden. Beim Zurückkehren der Elektronen in den ursprünglichen Zustand wird Strahlung frei, welche den Wolkenkern verlässt und damit ebenfalls thermische Energie abführt. Zu guter Letzt werden Moleküle durch Stoßanregung in Rotations- und Schwingungszustände versetzt, welche zur Aussendung von Infrarotstrahlung führen, die ebenfalls den Kern bzw. die Wolke verlässt. Auf diese Weise kann die Wolke von etwa 1.000 K auf etwa 10 K abgekühlt werden.

Im weiteren Verlauf der Entwicklung (siehe Abhandlungen: „Die Sonne“ sowie „Die Geburt, das Leben und der Tod der Sterne“) kollabierte der Kern über mehrere Zwischenstufen, bis Dichte und Druck eine Temperatur von 10 Millionen Kelvin generierten. Ab dieser Temperatur setzte die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium ein. Damit war die Sonne entstanden bzw. als Stern geboren. Die Entwicklung der Planeten bzw. des Sonnensystems fand parallel zur Entstehung der Sonne statt.

2.3 Die solare proto-planetare Scheibe

Die Herausbildung der proto-planetaren Scheibe erfolgt aufgrund der Drehimpulserhaltung. Aufgrund des gravitativen Kollapses der Wolke verstärken sich die nichtradiellen Geschwindigkeitskomponenten der Wolkenteilchen und zwingen sie um eine Umlaufbewegung um den Kern. Dadurch entwickelt sich der zunächst kugelsymmetrische Kollaps zunehmend zu einer abgeflachten Form. Bei der konkreten Ausformung der sogenannten Akkretionsscheibe dürften auch Magnetfelder eine Rolle spielen. Besonders im Kernbereich entsteht ein Plasma (positive Atomkerne bzw. Atomrümpfe und Elektronen), so dass es dort zu Wechselwirkungen mit Magnetfeldern kommt. Die Herausbildung dieser Scheibe stabilisierte die sich herausbildende, rotierende Sonne, so dass diese nur noch parallel zu ihrer Rotationsachse kontrahieren konnte. Die Materie von außen fiel nun nicht mehr von überall auf die Oberfläche der sich herausbildenden Sonne, sondern wurde im Bereich ihrer Äquatorebene durch Akkretion zugeführt. Die Akkretionsscheibe wurde wiederum von außen aus der proto-solaren Wolke gespeist. Durch den Vorgang der Akkretion verloren die Wolkenteilchen Drehimpuls und konnten so von der sich bildenden Sonne aufgenommen werden. Ohne diesen Drehimpulsverlust durch Akkretion hätten die Materieteilchen nie die sich herausbildende Sonne erreichen können.

Die Akkretionsscheibe ging in eine proto-planetare Scheibe über, aus der sich über mehrere Zwischenschritte die Planeten herausbildeten.

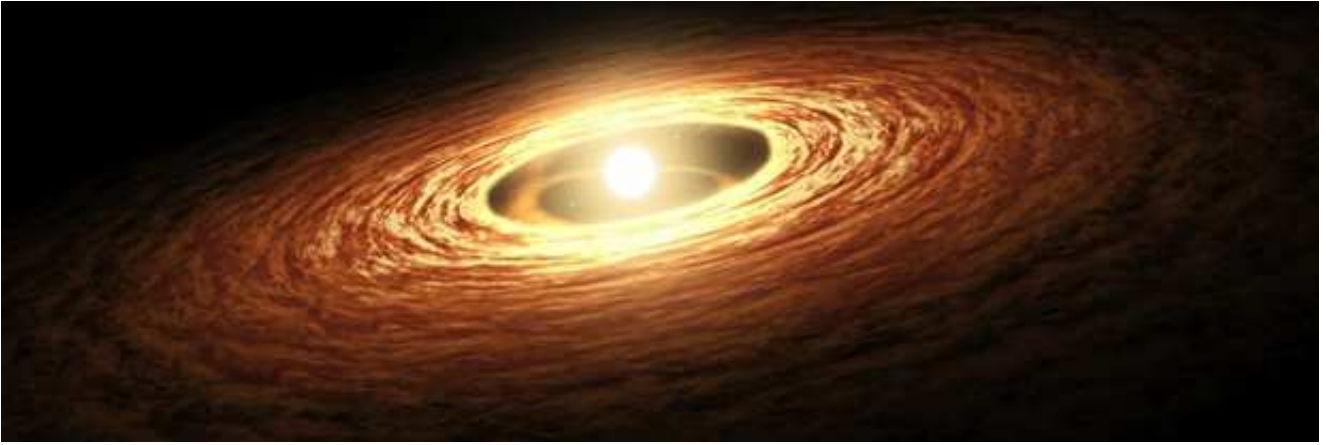


Bild 1: Protoplanetare Scheibe / NASA / JPL

Grundsätzlich bewegen sich die Bestandteile einer proto-stellaren Scheibe nach den Keplerschen Gesetzen um den sich bildenden Stern. So war es auch im Falle der proto-solaren Scheibe. Die Bahngeschwindigkeit der Partikel hängt nur vom ihrem Abstand r zum Zentrum ab, wobei ihre Relativgeschwindigkeit zueinander bei gleichem Abstand r gleich null ist. In diesem Fall würde es jedoch zu keinen Zusammenstößen kommen. Allerdings gibt es Effekte, die zu Störungen dieser Keplerbewegungen führen:

- Die Gaspartikel der proto-planetaren Scheibe reagieren zusätzlich zur Gravitation noch auf den sogenannten Gasdruck, welcher radial nach außen gerichtet ist und zur radialen Ausdehnung der Scheibe beiträgt. Damit muss die Fliehkraft die Gravitationskraft nicht vollständig ausgleichen, so dass sich die Gaspartikel etwas langsamer bewegen, als es ihrer Keplergeschwindigkeit entsprechen würde.
- Staubteilchen spüren keinen Gasdruck und sind durch elektrostatische Kräfte eng an die Gaspartikel gebunden. Durch diese Kopplung an das Gas werden sie auf eine bestimmte Geschwindigkeit gezwungen, welche mit keiner stabilen Bahn für sie verbunden ist. Infolgedessen driften die Staubteilchen beständig nach innen.
- Festkörper in Metergröße, als Felsen bezeichnet, unterliegen weder den Druckkräften noch einer Kopplung an die Gaspartikel und haben damit ziemlich genau die Keplergeschwindigkeit. Diese ist allerdings für einen bestimmten Abstand r schneller als die Geschwindigkeit der Gas- und Staubteilchen.

Im Ergebnis kommt es zu regelmäßigen Kollisionen der Felsen mit Staubteilchen. Wenn diese haften bleiben, wächst der Felsen. Dieser Prozess wird Koagulation genannt. Die Wachstumsrate hängt von der Änderung der Geschwindigkeit der Gasteilchen, der Anzahldichte der Felsen und von der Klebefähigkeit der Staubteilchen an den Felsen ab. Letztere ist für viele Materialien nur unzureichend bekannt und daher schwierig abzuschätzen. Ein wichtiger Aspekt ist, dass die Relativgeschwindigkeiten von Felsen und Staubteilchen nur einen kleinen Wert haben. Anderenfalls würden die Kollisionen destruktiv laufen, d.h. die Staubteilchen blieben nicht haften und der Felsen könnte nicht wachsen. Jedoch begünstigen die kleinen Relativgeschwindigkeiten den Prozess von Koagulation (Ankleben) und Agglomeration (Anwachsen). Dieser Prozess führt zu Objektgrößen von etlichen Kilometern. Solche Objekte werden Planetesimale genannt. Der Prozess des Wachstums von Felsen plus Staubteilchen zu Planetesimalen muss relativ schnell verlaufen, da im Laufe der Zeit die destruktiven Prozesse aufgrund der oben beschriebenen Änderung der Geschwindigkeit der Gaspartikel die Oberhand gewinnen. Dadurch wird der weitere Prozess der Koagulation und der Agglomeration ineffizient, so dass keine größeren Objekte mehr entstehen könnten. Da jedoch Planeten existieren, dürfte der Prozess der Planetenbildung wohl in Zeiträumen ablaufen, welche deutlich kürzer als die Lebensdauer der proto-planetaren Scheibe ist.

2.4 Die Entstehung der Planeten des Sonnensystems

Der weitere Prozess des Anwachsens läuft im Prinzip nach dem oben dargestellten Schema ab. Allerdings wechselwirken jetzt fast ausschließlich die Planetesimale untereinander. Die Staub- und Gasteilchen der protoplanetaren Scheiben werden damit irrelevant. Doch mit zunehmender Masse des Objektes wird der Effekt der gravitativen Fokussierung relevant. Planetesimale werden in der Nähe von größeren gravitativ beeinflusst und in ihre Richtung abgelenkt. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit eines Zusammentreffens, was zu einer weiteren Koagulation führen kann. Dadurch entstehen massereichere Objekte mit größeren Durchmessern. Deren Koagulationsrate steigt signifikant an, je massereicher desto höher die Rate. Dabei werden kleinere Planetesimale abgelenkt und koagulieren mit den massereicheren größeren Objekten. Auf diese Weise werden die Umlaufbahnen der größeren Körper von den kleineren Körpern zunehmend leer geräumt. Das Ende der Entwicklung ist erreicht, wenn die Umgebung eines großen Körpers weitgehend von Kleinkörpern leer geräumt ist. Damit war die Bildung der terrestrischen Planeten weitgehend abgeschlossen. Der gesamte Entstehungsprozess dauerte etwa 100 Millionen Jahre.

Die Entstehung der jovianischen Gasplaneten muss anders verlaufen sein. Hier gibt es zwei konkurrierende Modelle, welche die mögliche Entstehung von Gasplaneten zu erklären versuchen. Im Rahmen des Akkretionsmodells könnte der Entstehungsprozess zunächst wie im Falle der terrestrischen Planeten verlaufen sein, nur dass sie noch mehr anwachsen und eine größere Masse, deutlich oberhalb einer Erdmasse, haben müssten. In diesem Fall wäre die Gravitation stark genug, damit sich die leichten Gase anlagern und die relativ dicken Atmosphären bilden könnten. Demnach würde der Kern der jovianischen Gasplaneten aus einem terrestrischen Planeten bestehen. Nach dem Modell der Gravitationsinstabilität hätten sich die Gasplaneten direkt aus der Gasscheibe heraus gebildet, ohne dass sich zuvor ein fester massereicher Kern gebildet hätte. Dieses Szenario ist am wahrscheinlichsten in der Frühphase der Entstehung des Sonnensystems, in den äußeren Bereichen der proto-planetaren Scheibe, wo die Temperatur relativ gering ist. Dann könnte es zu einem entsprechenden Kollaps in der Gasscheibe kommen, woraus im Ergebnis der Planet entstehen würde. Allerdings dürfte die Effizienz der Kühlmechanismen nicht ausreichend sein, damit es in einem geeigneten Zeitraum zum Kollaps kommen könnte. Daher findet das Akkretionsmodell die größere Akzeptanz. Der Unterschied zwischen den Planeten Jupiter und Saturn sowie Uranus und Neptun dürften auf die Temperaturabhängigkeit der proto-planetaren Scheibe zurückgegangen sein. Letztere Planeten bilden als sogenannte Eisplaneten eine Untergruppe der Gasplaneten. Sie verfügen über dicke Eisschichten. Unter niedrigem Druck kann Wassereis nur bei einer Temperatur von zirka 150 bis 180 K existieren, was daher nur im Bereich der äußeren Scheibe der Fall sein kann.

2.5 Die Entwicklung des Sonnensystems

Die Zwergplaneten und Kleinkörper im Sonnensystem haben verschiedene Entstehungsursachen. Im Falle der Kleinkörper im Gürtel zwischen Mars und Jupiter bewirkte der gravitative Einfluss des Jupiters, der nach bestimmten Modellen sogar Wanderbewegungen in den Bereich der Kleinplaneten durchgeführt haben könnte, dass der oben beschriebene Planetenbildungsprozess nicht stattfinden konnte. Sie stellen daher Objekte aus der Entstehungszeit des Sonnensystems dar. Die Kometenkerne dürften aus nicht verbrauchter Materie der proto-planetaren Scheibe entstanden sein. Sie sind einmal im Kuipergürtel jenseits der Neptunbahn lokalisiert, welche sich in einem Entfernungsbereich von 30 bis 50 AE von der Sonne befindet und einmal in der Oort'schen Wolke, welche sich in einem Entfernungsbereich von 30.000 bis 100.000 AE von der Sonne befindet. Einige werden in das Innere des Sonnensystems gelenkt, wo sie sich in relativer Nähe zur Sonne zu den bekannten Kometen mit Koma und Schweif entwickeln. Damit gehören insbesondere die Kometen zu den ursprünglichen Objekten des Sonnensystems.

Innerhalb von Planetensystemen gibt es weiterhin Wechselwirkungen. So kam es in der Anfangszeit zu vielen Impakten mit nicht verbrauchten Kleinkörpern. Die Häufigkeit der Impakte nahm vor etwa 3,8 Milliarden Jahren signifikant ab. Durch eine hinreichend massereiche Gasscheibe kann Bahndrehimpuls von den Planeten auf die Gasscheibe übertragen werden, wodurch die Planeten nach innen wandern. Das dürfte der Grund dafür sein, dass viele der gefundenen extra-solaren Planeten relativ nahe am Stern sind. Damit ließen sich insbesondere die sogenannten heißen Jupiter in Sternnähe erklären, welche ja nicht dort entstanden sein können. Des Weiteren dürfte es auch zu Wechselwirkungen der Planeten des Sonnensystems mit den übrig gebliebenen Planetesimalen gekommen sein. Bestimmten Modellen zufolge hatten die Planeten Saturn, Uranus und Neptun deutlich kleinere Bahnradien und sind aufgrund von Zusammenstößen mit Planetesimalen nach außen gewandert. Einigen Modellen zufolge haben Uranus und Neptun ihre Positionen getauscht. Nach diesen Modellen kam es zur Migration von Planeten. Die ungewöhnlich geneigten Rotationsachsen von Venus und Uranus könnten ihre Ursache ebenfalls in Zusammenstößen mit Planetesimalen haben. Streuprozeesse und Zusammenstöße zwischen Planeten dürften sehr selten sein, sind jedoch möglich. Dies könnte zu extremen Bahnformen mit hohen Bahnexzentrizitäten führen, welche ja nicht aus einer kreisförmigen proto-planetaren Scheibe herrühren können. Es gibt Indizien für einen möglichen neunten Planeten mit etwa 10 Erdmassen, der in einem Entfernungsbereich zwischen 400 und 1.500 AE eine entsprechende Bahnform beschreiben könnte. Er würde vom Aufbau her vergleichbar mit Uranus und Neptun sein.

2.6 Die Entstehung der Extrasolare Planeten und ihrer Systeme

Die Entstehungsmodelle für das Sonnensystem dürften auch grundsätzlich für die Entstehung der Extrasolaren Planeten und ihrer Systeme sein. Allerdings reichen diese Modelle nicht alleine aus, um die Vielfalt an besonderen Eigenschaften von Extrasolaren Planeten und ihrer Systeme zu erklären. Folgende Eigenschaften müssen Entstehungsmodelle für Extrasolare Planeten und ihre Systeme zusätzlich erklären können:

- Nach derzeitigem Beobachtungsstand sind 60 % der Extrasolaren Planeten Supererden;
- Extrasolare Planeten, welche nicht gravitativ an einen Stern gebunden sind;
- Jovianische Planeten in extremer Sternnähe, sogenannte heiße Jupiter;
- Extreme Bahnellipsen und extreme Bahnneigungen;
- Sehr kleine Bahnradien um den Stern mit Umlaufzeiten von wenigen Tagen.

Die jovianische Planeten dürften sich ursprünglich nicht in der Nähe des Sterns gebildet haben. Vielmehr haben sich diese Planeten, wie im Falle des Sonnensystems, in den äußeren Bereichen der extrasolaren proto-planetaren Scheibe gebildet. Aufgrund der Gravitationswirkung durch den entstehenden Stern könnten sich in der Akkretionsscheibe bzw. in der extrasolaren proto-planetaren Scheibe dichteren Zonen gebildet haben. Dies führten in den betreffenden Zonen zu einem erhöhten Strömungswiderstand, welcher die Planeten nach innen in die Nähe zum Mutterstern driften ließ. In diesen Fällen wird von Planetenmigration gesprochen. Dieses Migrationsmodell würde sowohl die heißen Jupiter als auch die extrem kleinen Bahnradien von Extrasolaren Planeten um ihren Mutterstern erklären. Auch während der Entstehungsphase des Sonnensystems soll es zu Migrationsbewegungen gekommen sein. Demnach soll sich der Jupiter im Bereich des heutigen Kleinplanetengürtels gebildet und sich zunächst nach innen in die Nähe der Marsbahn bewegt haben. Danach müsste der Jupiter wieder zurückgependelt sein, in seine heutige Position. Infolgedessen wurde die Entstehung eines Planeten zwischen Mars und Jupiter verhindert. Aus den Resten der solaren proto-planetaren Scheiben hat sich dann der Kleinplanetengürtel gebildet. Auch die Planeten Uranus und Neptun sollen aufgrund von Migrationsbewegungen ihrer Positionen im Sonnensystem getauscht haben. Für die Migrationshypothese spricht auch die sogenannte Resonanzstabilisierung von bestimmten Planetenbahnen. Diese tritt auf, wenn die Umlaufzeiten von

Planeten in ganzzahligen Verhältnissen zueinander stehen. So stehen zum Beispiel der Planet Neptun und der Zwergplanet Pluto in einem solchen Verhältnis. Wenn Neptun genau drei Umläufe um die Sonne vollzogen hat, dann hat der Pluto genau zwei derartiger Umläufe vollzogen.

Der Positionstausch zwischen Planeten bzw. ihren Umlaufbahnen könnte auf eine gravitative Wechselwirkung mit den in der Anfangszeit noch zahlreich vorhandenen Planetesimalen in der proto-planetaren Scheibe zurückzuführen sein. Sowohl zwischen Planetesimalen als auch zwischen bereits entstandenen Planeten und Planetesimalen kam es zu gravitativen Wechselwirkungen, in deren Folge es neben dem Positionstausch von Planeten auch zur Ausprägung von extremen Ellipsenbahnen und Bahnneigungen gekommen sein könnte. Auch die nicht gravitativ gebundenen Extrasolaren Planeten könnten auf diese Weise entstanden sein. Hierbei dürfte auch die Dichteverteilung in der Akkretionsscheibe bzw. proto-planetaren Scheibe eine Rolle spielen. Es könnte sein, dass der Typ des entstehenden Sterns auch die Art der Akkretionsscheibe bzw. der proto-planetaren Scheibe beeinflusst. Doch hier ist die Forschung noch im vollen Fluss und es sind viele Fragen noch nicht geklärt. So muss geklärt werden, unter welchen Aspekten der Übergang von einem Gesteinsplaneten zu einem Gasplaneten stattfindet. Wenn Supererden Gasplaneten sein sollten, ist auch zu klären, warum sie nicht zu noch massereicheren Gasplaneten anwuchsen.

Es wurden auch ein System mit Extrasolaren Planeten entdeckt, welche die mehrfache Jupitermasse haben und sich in nahezu kreisförmigen Bahnen in Entfernungen um den Stern bewegen, welche jenseits der Distanzen von Saturn und Neptun zur Sonne liegen. In diesem Fall dürfte wohl keine Migration stattgefunden haben. Unklar ist jedoch, wie in solch großer Entfernung zum Stern die Planeten soviel Masse aufnehmen konnten. Nach der gängigen Entstehungstheorie des Sonnensystems können sich solch massereiche Planeten nicht so weit entfernt vom Stern in der proto-planetaren Scheibe gebildet haben. Nach einer Hypothese kann es bei einer entsprechend hohen Gas- und Staubbichte und niedrigerer Temperatur am äußeren Rand der Akkretionsscheibe zu einem Gravitationskollaps kommen. Bei diesem Kollaps muss es allerdings Mechanismen geben, welche die dabei auftretende Wärme effizient abführen.

Folgendes vorläufiges Fazit kann gezogen werden: Die Entstehung der Planeten in rotierenden Akkretionsscheiben bzw. extrasolaren proto-planetaren Scheiben um junge Sterne muss chaotisch und daher sehr komplex zugegangen sein. Daraus dürfte dann die Vielfalt an Eigenschaften von Extrasolaren Planeten und ihrer Systeme resultieren. Sowohl die theoretische Forschung bezüglich geeigneter Modelle zur Entstehung von Extrasolaren Planeten und ihrer Systeme als auch die Beobachtung dieser stehen noch am Anfang. Daher können noch keine abschließenden bzw. fundierten Aussagen zur Entstehung von Extrasolaren Planeten und ihren Systemen getroffen werden.

3 Die Beobachtung und der Nachweis von Extrasolaren Planeten

Die Beobachtung und der Nachweis von Extrasolaren Planeten sind sehr schwierig. Zunächst leuchten Extrasolare Planeten nicht selbst, sondern reflektieren das Licht des zugehörigen Sterns. Der Stern hat natürlich im Vergleich zu den ihn umgebenen Extrasolaren Planeten eine sehr viel höhere Leuchtkraft und überstrahlt diese daher. Aus diesem Grund erfolgt der Nachweis dieser Planeten in der Regel indirekt. Nur in wenigen Fällen ist bisher der direkte Nachweis eines Extrasolaren Planeten möglich. Es gibt verschiedene indirekte Nachweismethoden. Jede einzelne hat charakteristische Stärken und Schwächen, so dass diese häufig kombiniert werden. Nachfolgend werden die einzelnen Nachweismethoden vorgestellt.

3.1 Radialgeschwindigkeitsmethode

Die Radialgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeitskomponente eines astronomischen Objektes, welche sich auf uns zu oder von uns weg bewegt. Wenn sich eine Lichtquelle (z.B. Stern) auf uns zubewegt, dann werden die ausgesendeten Lichtwellen gestaucht. D.h. in einem bestimmten Raumabschnitt bzw. Zeitabschnitt befinden sich dann mehr Wellen als sich bei der gleichen Quelle in einem nicht bewegten Zustand befinden würden. Infolgedessen verkleinert sich die Wellenlänge bzw. vergrößert sich die Frequenz der Strahlung und damit vergrößert sich im Ergebnis auch ihre Energie. Spektrallinien werden dann zum kurzwelligeren Ende eines Spektrums verschoben. Ein optisches Spektrum besteht aus den Regenbogenfarben Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett. Rot ist der langwelligere Bereich, blau der kurzwelligere. Entsprechend hat blaues Licht eine höhere Energie als rotes. Im Falle einer Bewegung einer Lichtquelle auf den Beobachter zu werden die Spektrallinien eines Spektrums in den blauen Bereich verschoben, was als Blauverschiebung bezeichnet wird.

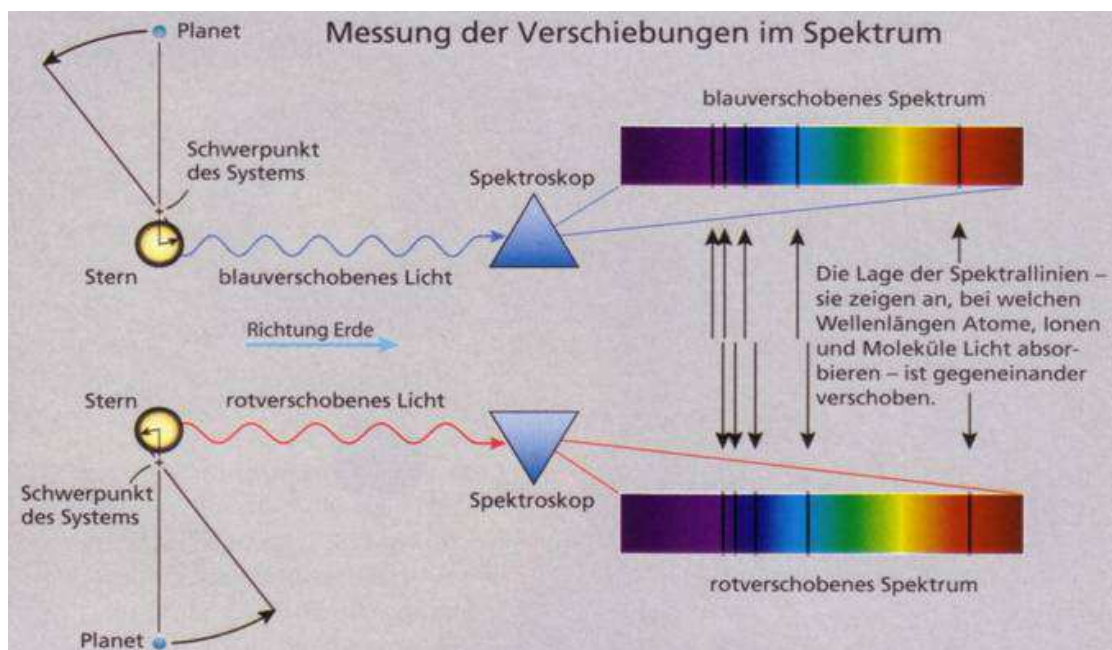


Bild 2: Die Radialgeschwindigkeitsmethode / Quelle: <http://www.mgvoss.de>

Umgekehrt verhält es sich, wenn sich eine Lichtquelle von uns wegbewegt. In diesem Fall werden die ausgesendeten Lichtwellen gestreckt. Pro Raumabschnitt bzw. Zeitabschnitt befinden sich dann weniger Wellen, als sich bei der gleichen Quelle in einem nichtbewegten Zustand befinden würden. Infolgedessen vergrößert sich die Wellenlänge bzw. verkleinert sich die Frequenz und damit verkleinert sich auch ihre Energie. Im Falle einer Bewegung einer Lichtquelle von einem Beobachter weg werden die Spektrallinien eines Spektrums in den roten Bereich verschoben. Dies wird als Rotverschiebung bezeichnet. Der beschriebene Effekt wird als Dopplereffekt bezeichnet.

und kommt auch in der Akustik vor. Bei einem Polizeiwagen mit eingeschalteter Sirene wird der Ton höher, wenn sich dieser auf einen Beobachter bzw. Hörer zubewegt. Wenn der Polizeiwagen am Beobachter bzw. Hörer vorbeigefahren ist bzw. sich von ihm wegbewegt, dann wird der Ton tiefer.

Mit Hilfe des optischen Dopplereffekts kann die Radialgeschwindigkeit eines Sterns gemessen werden. Dies kann zum Nachweis von Extrasolaren Planeten verwendet werden. Faktisch bewegen sich die Planeten um den Stern. Streng genommen ist dies nicht richtig. Planet und Stern bewegen sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt. Dieser Schwerpunkt liegt zwar im sehr viel massereicheren Stern, nicht jedoch exakt im Zentrum des Sterns. Aufgrund der Bewegung des Sterns um den gemeinsamen Schwerpunkt führt dieser eine kleine Taumelbewegung aus. Wenn diese in Richtung Erde erfolgt zeigt sich eine kleine Radialbewegung des Sterns einmal auf die Erde zu und einmal von ihr weg. Ihr genauer zeitlicher Verlauf hängt von der Masse des Planeten bzw. der Planeten ab. Die Radialbewegung des Sterns spiegelt sich in dessen Spektren wieder und kann so gemessen werden. Durch die Messung ihres zeitlichen Verlaufes kann auf Extrasolare Planeten und deren Massen geschlossen werden.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass diese Messung gegenüber atmosphärischen Störungen unempfindlich ist und damit auch auf weit entfernte Sterne angewandt werden kann, sofern ihre Helligkeit für eine Messung ausreicht. Der Nachteil ist allerdings, dass durch die Geschwindigkeitsmessung nur auf die untere Massengrenze der Extrasolaren Planeten geschlossen werden kann. Für die obere Massengrenze, welche auch für eine Abgrenzung zwischen einem Gesteins- oder Gasplaneten relevant ist, werden andere Messverfahren benötigt. Helligkeitsschwankungen des Sterns selbst können bei Anwendung der Radialgeschwindigkeitsmethode zu falschen Messwerten führen. Der erste Extrasolare Planet Pegasi 51 b wurde mit Hilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckt.

3.2 Astrometrische Methode

Bei der Astrometrischen Methode wird auch der Schwerpunkt des Systems Stern – Planet herangezogen. Allerdings wird statt der Radialbewegung nun die Bewegungskomponente quer zur Sichtlinie gemessen. Diese Bewegung wird bei Sternen Eigenbewegung genannt. Aufgrund der Gravitationswirkung des Planeten scheint der Stern vor weit entfernten Hintergrundsternen etwas hin und her zu wackeln. Wenn die Masse des Sterns bekannt ist, kann aus seiner Bewegung die Masse des Extrasolaren Planeten bestimmt werden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass sie relativ unempfindlich gegenüber Helligkeitsschwankungen des Sterns ist. Allerdings ist sie im Gegensatz zur Radialgeschwindigkeitsmethode nur für relativ nahe Sterne geeignet und anfällig gegenüber atmosphärischen Störungen. Auch kleinste Veränderungen an Teleskopen können zu einer Verfälschung der Messergebnisse führen. So beruhen die vermeintlich in der Vergangenheit entdeckten Extrasolaren Planeten um Barnards Pfeilstern durch den Astronomen Peter van de Kamp (1901 – 1995) auf entsprechenden Messfehlern.

3.3 Transitmethode

Die Transitmethode wird auch als Durchgangsmethode bezeichnet. Es handelt sich hierbei um den Vorübergang des dunklen Planeten vor der helleren Sternscheibe. Es wird in diesem Fall auch von einer Bedeckung gesprochen. Im Ergebnis sinkt die Sternhelligkeit durch den Vorübergang des Extrasolaren Planeten etwas ab, was gemessen werden kann. Allerdings kommt es nur dann zu einem Transit, wenn vom Beobachter aus die Bahn des Extrasolaren Planeten vor dem Stern vorbeiführt. Von einem Beobachter auf der Erde aus muss hierbei direkt seitlich auf die Bahnebene des Extrasolaren Planeten geschaut werden. Bei einem regelmäßigen Transit eines Extrasolaren Planeten vor seinem Mutterstern kommt es zu einer periodischen Absenkung der Gesamthelligkeit dieses Sterns. Der Abfall der Sternhelligkeit hängt vom Größenverhältnis des Planetenscheibchens zur Sternscheibe ab. Dieses Größenverhältnis hängt wiederum von den Durchmessern des Planeten

und des Sterns sowie von ihrem Abstand zueinander ab. Um allerdings eine derart geringe Helligkeitsänderung überhaupt messen zu können bedarf es einer hochgenauen Fotometrie.

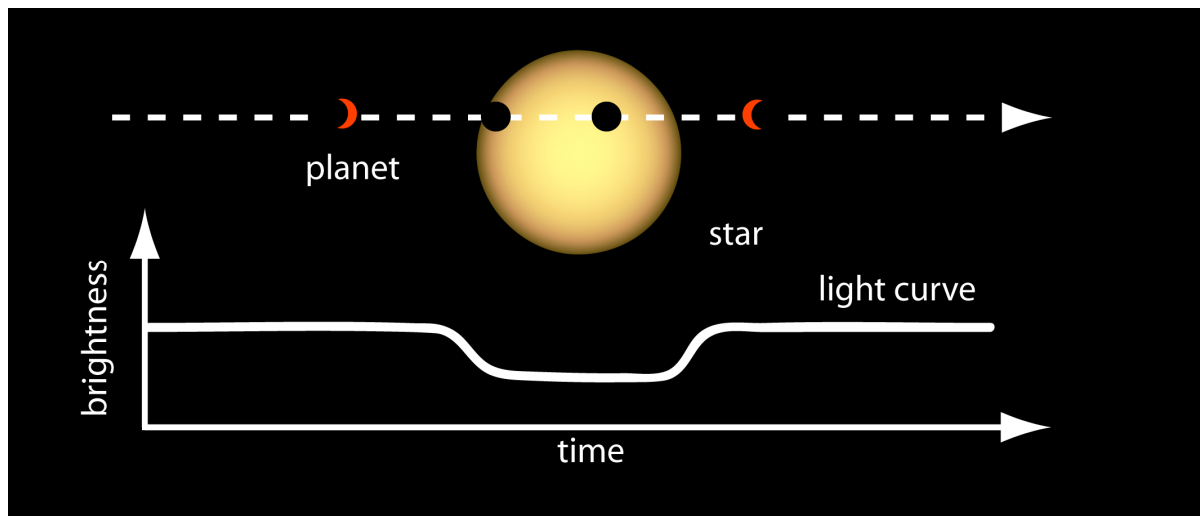


Bild 3: Die Transitmethode / Quelle: NASA /JPL

In unserem Sonnensystem kommen derartige Bedeckungen der Sonne von der Erde aus gesehen durch den Mond, den Merkur und die Venus vor. Im Falle des Mondes kann es hierbei sogar zu einer vollständigen Bedeckung der Sonne durch diesen kommen. Merkur und Venusdurchgänge vor der Sonne kommen relativ selten vor, da die einzelnen Planetenbahnen gegenüber der Erdbahnebene leicht geneigt sind. Nur in den Punkten, in denen sich die Bahnebenen schneiden, kommt es auch zum Planetentransit. Die Venus schwächt das Sonnenlicht nur etwa um ein Tausendstel gegenüber ihrer Normalleuchtkraft ab. Die Venus ist von Aufbau und Größe vergleichbar mit der Erde. Ein Beobachter in einem anderen Sternsystem würde diesen Helligkeitsabfall wohl nicht messen können. Der massereichste und größte Planet im Sonnensystem, der Jupiter, wäre hierfür geeigneter. Er würde bei einer Bedeckung die Sonnenleuchtkraft um etwa ein Prozent herabsetzen. Allerdings würde für einen äußeren Beobachter ein Jupitertransit vor der Sonne nur etwa alle rund 12 Jahre stattfinden, da der Jupiter für einen Sonnenlauf entsprechend lange braucht.

Die Transitmethode ist dennoch geeignet, recht kleine Planeten nachzuweisen. Bei Extrasolaren Planeten mit kurzen Umlaufzeiten, welche durch andere Methoden entdeckt wurden, kann die Transitmethode zusätzliche Informationen liefern. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Transitmethode ist, dass das Sternlicht hierbei durch eine mögliche Atmosphäre des Extrasolaren Planeten durchscheint. In diesen Fällen kann eine Spektralanalyse Informationen über die Zusammensetzung einer möglichen Atmosphäre liefern.

Der Nachteil dieser Methode ist, dass nur in einem von Hundert Fällen die Bahnebene des Planeten von der Erde aus gesehen so angeordnet ist, dass ein Planetentransit beobachtet werden kann. Daher muss eine große Anzahl von entsprechenden Systemen beobachtet werden. Hinzu kommt, dass ein möglicher Transit Stunden dauern kann. In diesen Fällen muss eine lückenlose weltweite Beobachtung oder die Beobachtung durch ein Weltraumteleskop gewährleistet sein. Trotz ihrer Nachteile ist diese Methode sehr erfolgreich.

3.4 Mikrolinsenmethode

Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie krümmen Massen die vierdimensionale Raumzeit. Diese Krümmung soll nun veranschaulicht werden, in dem wir uns diese vierdimensionale Raumzeit als zweidimensionale Gummimatte vorstellen. Legen wir auf diese Gummimatte Metallkugeln mit

unterschiedlicher Masse, so drücken diese Kugeln die Gummimatte in Abhängigkeit von ihrer Masse bzw. ihrem Gewicht mehr oder weniger stark ein. Diese Eindrücke in der Gummimatte repräsentiert in unserem anschaulichen Beispiel die gekrümmte vierdimensionale Raumzeit. Licht bzw. Strahlung folgt bei ihrer Fortbewegungen der Raumkrümmung. Daher sind die Sterne in der unmittelbaren Nähe der Sonnenscheibe bei einer totalen Sonnenfinsternis in ihren Positionen verschoben. Große Massen führen zu entsprechend größeren Krümmungen der vierdimensionalen Raumzeit und damit auch zu einer entsprechend großen Ablenkung des Sternlichts bzw. der Sternstrahlung. Durch diesen Effekt kann sogar Sternstrahlung gebündelt werden, wenn sich zwischen einem Stern und der Erde eine große Masse schiebt bzw. eine große Masse vorhanden ist. In diesem Fall wird von Gravitationslinseneffekt gesprochen. Durch diese Bündelung scheint das Sternlicht etwas heller. Der Körper, welcher durch seine Masse bzw. Gravitation diese Bündelung hervorruft, wird als Gravitationslinse bezeichnet.

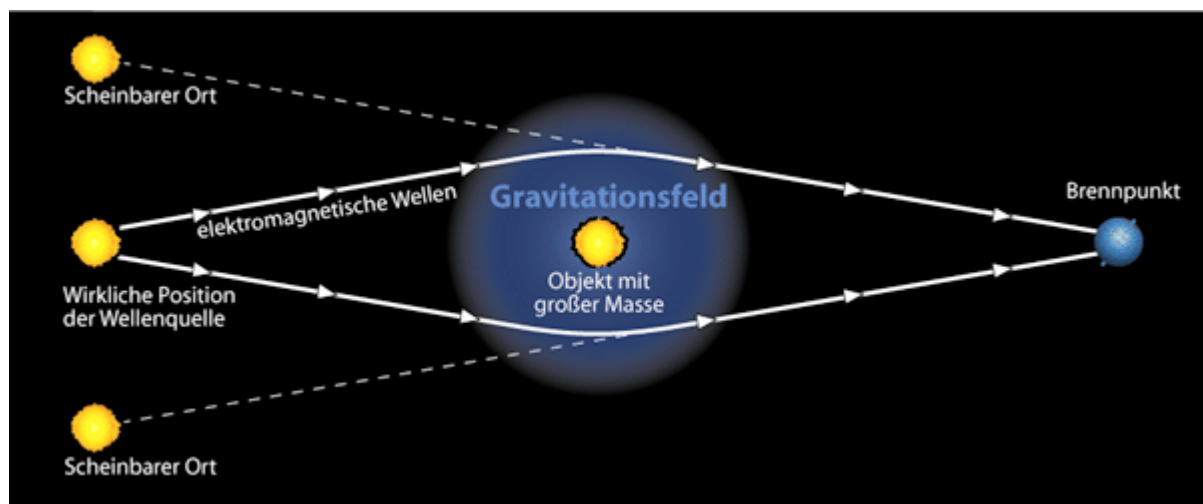


Bild 4: Gravitationslinsen / Quelle: <http://www.mgvoss.de>

Bei den Messungen von Gravitationslinsen wird der Transit eines Sterns vor weit entfernten Hintergrundsternen genutzt. Schiebt sich der Transitstern vor den Hintergrundstern, wird die Helligkeit des betreffenden Hintergrundsterns aufgrund der Strahlenbündelung etwas heller. Wenn dieser Transitstern ohne Planeten ist, nimmt die Helligkeit des Hintergrundsterns systematisch zu, wenn der Transitstern seine Passage vor dem Hintergrundstern beginnt. Das Maximum der Helligkeit des Hintergrundsterns wird beim Höhepunkt des Transits erreicht. Danach fällt diese Helligkeit ebenfalls systematisch wieder ab. In Abhängigkeit von der Masse des Transitsterns als Gravitationslinse kann ein entsprechendes Ereignis zwischen Tagen und Wochen dauern.

Wenn der Transitstern allerdings über Planeten verfügt, dann wird die oben beschriebene systematische Helligkeitsentwicklung in charakteristischer Weise gestört. In der Helligkeitsverlaufskurve taucht dann eine charakteristische Spitze auf. Ein solches Ereignis wurde auch bereits beobachtet. Auf diese Weise lässt sich ein unsichtbarer Begleiter des Transitsterns, ein Extrasolarer Planet, identifizieren, so dass auch isolierte dunkle Körper aufgespürt werden können.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass damit auch sehr kleine Planeten und isolierte Planeten nachgewiesen werden können. Bei kleinen Planeten könnte es sich also um terrestrische Planeten handeln, welche in Aufbau und Größe mit der Erde vergleichbar sind. Damit ist die Methode besonders für Planeten geeignet, welche in Aufbau und Größe mögliche Kandidaten für Leben sind. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass mit ihr statistische Aussagen zur Häufigkeit von Extrasolaren Planeten getroffen werden können. Diese Methode lässt auch noch bei weit entfernten Sternen anwenden, was ebenfalls ein Vorteil ist.

Der Nachteil dieser Methode ist, dass der Transitstern von der Erde aus gesehen in einer Achse mit dem Hintergrundstern liegen muss. Des Weiteren muss der Transitstern so nahe am Hintergrundstern vorbeiziehen, so dass dessen Licht durch eine entsprechende Bündelung deutlich verstärkt wird. Eine derartige Anordnung ist äußerst zufällig, so dass für ein entsprechendes System nur eine Messung möglich ist und ein auf diese Weise gefundener Planet sich nicht weiter untersuchen lässt. Nur durch eine große Anzahl an Sternbeobachtungen lässt sich unter einer Millionen Stern ein entsprechendes Ereignis finden.

3.5 Berechnung gestörter Planetenbahnen

Bei dieser Methode geht es um mögliche Bahnstörungen, welche Extrasolare Planeten durch gegenseitige gravitative Wechselwirkungen aufeinander ausüben. Auch im Sonnensystem wechselwirken die Planeten untereinander gravitativ, was entsprechende Bahnstörungen zur Folge hat. Aufgrund von Störungen der Bahnbewegung des Uranus durch den Neptun konnte im Jahre 1846 die Existenz des letztgenannten Planeten berechnet und er auch auf Basis dieser Berechnungen gefunden werden. Eine entsprechende Methodik lässt sich auch bei Extrasolaren Planeten anwenden. Allerdings setzt die Methode der Berechnung gestörter Planetenbahnen schon den Nachweis von Extrasolaren Planeten durch andere Methoden voraus. Dann kann wie im Falle des Uranus und des Neptuns von möglichen Bahnstörungen auf bekannte Extrasolare Planeten auf weitere unbekannte Extrasolare Planeten und ihre Massen geschlossen werden.

3.6 Lichtlaufzeit-Methode

Bezugspunkt dieser Methode ist der genaue Zeitpunkt des Eintreffens eines periodischen Signals, welches von einem Zentralstern oder einem zentralen Doppelstern ausgesendet wird. Wenn ein entsprechender Stern von Planeten umgeben wird, kommt es aufgrund der Bewegungen um den gemeinsamen Schwerpunkt zu einer entsprechenden Bewegung des Zentralsterns bzw. Verschiebung des Schwerpunktes des zentralen Doppelsternsystems. Dadurch kommt es auch zu einer zeitlichen Verschiebung von periodischen Signalen. Periodische Signale werden von Pulsaren und von pulsationsveränderlichen Sternen sowie im Falle von bedeckungsveränderlichen Sternen ausgesandt. Das Phänomen tritt bei pulsationsveränderlichen Sternen in deren Pulsationsmaxima und bei bedeckungsveränderlichen Sternen bei deren Minima auf. Die Lichtlaufzeit-Methode ist abhängig von der Entfernung des entsprechenden Sterns bzw. Sternensystems von der Erde und wird stark von der Genauigkeit des periodischen Signals beeinflusst. Mit Hilfe dieser Methode wurde der Planet PSR 1275+12 b gefunden, welcher einen Pulsar umläuft.

3.7 Direkter Nachweis von Extrasolaren Planeten

Der direkte Nachweis eines Extrasolaren Planeten ist möglich, jedoch extrem schwierig. Zunächst muss die direkte Beobachtung im infraroten Bereich erfolgen. In diesem Bereich strahlt der Extrasolare Planet am hellsten und ist der Kontrastunterschied zwischen dem Planeten und seinem Mutterstern am Größten. Des Weiteren wird das störende Sternlicht durch eine Blende abgedeckt. Mit diesem Prinzip arbeiten bereits seit langem Sonnenteleskope. Die Blende funktioniert nach dem Prinzip einer Sonnenfinsternis. Statt durch den Mond wird die Sonne nun durch eine Blende abgedeckt. Auf diese Weise lassen sich die Sonnenkorona und Sonnenprotuberanzen beobachten.

Die technischen Herausforderungen bei einer direkten Methode sollen an einem konkreten Beispiel erläutert werden. Auf ein von der Erde reflektiertes Photon (Lichtteilchen) kommen zehn Milliarden Photonen direkt aus der Photosphäre der Sonne. Im infraroten Bereich kommen auf ein reflektiertes Erdphoton immer noch zehn Millionen Photonen direkt von der Sonne. Dennoch ist es mit höchst sensibler Messtechnik möglich, die vom Planeten reflektierten Photonen zu detektieren und Bilder von Extrasolaren Planeten zu erhalten. Bei der Beobachtung von der Erde aus muss mit adaptiver Optik (Erklärung: Kap. 4) gearbeitet werden, um die Störungen durch die Erdatmosphäre zu verringern. Entsprechende Beobachtungen werden unter anderem mit dem Very Large Telescope

(VLT) der Europäischen Südsternwarte (ESO) durchgeführt. Alternativ kann mit Weltraumteleskopen beobachtet werden, wie etwa mit dem Hubble-Weltraumteleskop. Am besten direkt nachweisen lassen sich Extrasolare Planeten, welche sich in einem größeren Abstand um ihren Mutterstern bewegen. Des Weiteren lassen sich besonders junge Extrasolare Planeten nachweise, welche gerade entstanden sind. Sie sind dann noch nicht abgekühlt und strahlen im Infraroten dann wesentlich heller.

Der erste direkte Nachweis eines Extrasolaren Planeten wurde von der ESO am 10. September 2004 bekanntgeben. Die Aufnahme zeigt einen Planeten, welcher gravitativ an den Braunen Zwergen 2M1207 gebunden ist. Dieser Braune Zwerg ist 225 Lichtjahre von der Sonne entfernt. Im Jahr 2006 konnte das Hubble-Weltraumteleskop die Existenz dieses Planeten bestätigen. Eine weitere Entdeckung wurde am 31. März 2005 von einer Arbeitsgruppe des Astrophysikalischen Instituts der Universitätssternwarte Jena bekanntgegeben. Hierbei handelt es sich um einen Planeten mit der ein- bis zweifachen Masse des Jupiters. Dieser umkreist den sonnenähnlichen Stern GQ Lupi, welcher allerdings mit einem Alter von etwa zwei Millionen Jahren erheblich jünger als die Sonne ist. Am 14. November 2008 wurde ein relativ guter direkter Nachweis eines Extrasolaren Planeten durch das Hubble-Weltraumteleskop bekanntgeben. Auf zwei seiner Aufnahmen aus den Jahren 2004 und 2006 zeigt sich ein sich bewegendender Lichtpunkt auf einer Keplerbahn (Bahnellipse). Hierbei handelt es sich um den Planeten Formalhaut b, welcher seinen Mutterstern in einer Entfernung von 113 Astronomischen Einheiten (AE) umkreist. Eine AE entspricht der mittleren Entfernung Erde – Sonne von 149 597 870,700 km. Etwa zur gleichen Zeit meldeten die Astronomen des Gemini-Nord- und des Keck-Observatoriums den direkten Nachweis eines ganzen extrasolaren Planetensystems um den 130 Lichtjahre entfernten Stern HR 8799 im Sternbild Pegasus. Die Aufnahmen wurden in infraroten Bereich und mit adaptiver Optik gewonnen und zeigen drei Extrasolare Planeten, deren Massen sieben bis zehn Jupitermassen betragen. Sie umkreisen ihren Mutterstern in einem Abstand von 25, 40 und 70 AE. Das geschätzte Alter des Planetensystems liegt bei 60 Millionen Jahren, womit das System noch jung genug ist, damit die Planeten noch nicht vollständig abgekühlt sind und daher noch Wärmestrahlung abgeben.

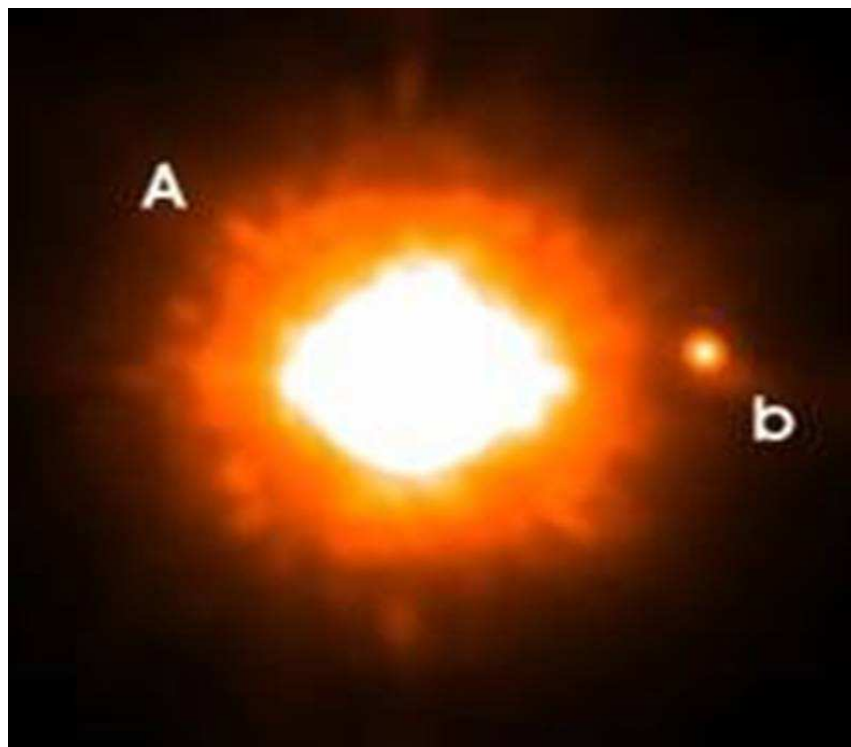


Bild 5: Ein direkt abgebildeter Extrasolarer Planet / Quelle: ESO

4 Beobachtungstechnik und Missionen

Mit der Entdeckung des ersten Extrasolaren Planeten stieg das Interesse an diesen Planeten stark an, zumal auch die Suche nach möglichen Leben mit der Existenz von Planeten und Monden verbunden ist. Heute werden Extrasolare Planeten mit Großteleskopen auf der Erde und mit Weltraum-Teleskopen, wie etwa das Hubble-Teleskop, nachgewiesen. Diese Beobachtungstechnik wird seitdem immer mehr entwickelt und verfeinert, um auch Einzelheiten über diese Planeten zu erfahren. Eines dieser Großteleskope ist das „Very Large Telescope“ („VLT“) der „Europäischen Südsternwarte“ („ESO“) auf der Erde. Es befindet sich in den chilenischen Anden. An den Ort, wo ein Teleskop aufgestellt wird, werden hohe Ansprüche gestellt. Die Luft sollte möglichst trocken sein und nur wenige Turbulenzen (Luftunruhe) aufweisen. Des Weiteren muss der Ort frei von Licht- und Luftverschmutzung sein und darf auch nicht im Bereich einer Route von Flugzeugen liegen. Entsprechende Orte auf der Erde zu finden ist nicht leicht. Die aktuelle Generation von Großteleskopen hat Spiegeldurchmesser von etwa 10 Metern. Die nächste Generation soll Spiegeldurchmesser im Bereich von 40 Metern und mehr aufweisen. Solche Spiegel können natürlich nicht mehr in einem Stück angefertigt werden, wie es noch im Falle des 1948 fertig gestellten Fünfmeterspiegelteleskops auf dem Mount Palomar (Palomar Observatorium) war. Heute bestehen die Spiegel aus vielen Segmenten, welche sich alle einzeln steuern lassen. Es wird in diesem Fall von adaptiver Optik gesprochen, da sich die einzelnen Spiegelsegmente entsprechend der Beobachtungsbedingungen einstellen lassen. So kann z.B. die Luftunruhe bei der Beobachtung ausgeglichen werden. Nun sollen ein paar einzelne Beobachtungseinrichtungen vorgestellt werden.

4.1 Die aktuellen Systeme, Teleskope und Missionen

Die System „**NAOS-CONICA**“ (abgekürzt: NACO“) steht für zwei Systembestandteile: „Nasmyth Adaptive Optic System“ („NAOS“) ist ein System zur Bildverbesserung mit adaptiver Optik und „Coude`Near Infrared Camera“ („CONICA“) eine Kombination aus Infrarotkamera und Spektrograf. Eine Weiterentwicklung ist **SPHERE**, was eine Abkürzung für „Spectro Polarimetric High-contrast Exoplanet Research“ ist. Alle genannten Systeme befinden sich am VLT im Einsatz und dienen der Beobachtung von Extrasolaren Planeten. Mit dem SPHERE soll der höchstmögliche Kontrast zwischen einem Extrasolaren Planeten und seinem Zentralstern erreicht werden, so dass auch eine direkte Beobachtung dieser Planeten ermöglicht werden soll.

Eine wichtige Nachweismethode bleibt die Radialgeschwindigkeitsmethode, so dass auch auf diesem Gebiet die Beobachtungstechnik zunehmend verfeinert wird. Der „High Accuracy Radial velocity Planet Searcher“ („**HARPS**“) ist ein Echelle-Spektrograf. Bei diesem Spektrograf wird ein spezielles Beugungsgitter verwendet, welche große Beugungseffizienzen in hohen Beugungsordnungen besitzen. Konkret stellt dieser Spektrograf ein kontinuierliches Spektrum in Form einzelner Zellen her. Durch den Vergleich mit einem Referenzspektrum sind unerwünschte Verschiebungen der dunklen Absorptionslinien im Sternspektrum, welche durch die Kosmische Strahlung oder Temperaturänderungen hervorgerufen werden, zu erkennen. Damit können diese Linien als Ursache durch Extrasolare Planeten ausgeschlossen werden, so dass es zu keinen falschen Ergebnissen kommt. Ein Vorgängersystem mit dem Kosenamen „Elodie“ wurde bereits im Jahr 1994 für die Suche nach dem ersten entdeckten Extrasolaren Planeten 51 Pegasi b eingesetzt. Die erreichte Messgenauigkeit für die Radialgeschwindigkeit mit den aktuellen Systemen liegt bei 1 m/s, womit HARPS eines der genauesten ist. Unterstützt mit diesem System werden erdgebundene Observatorien und spezielle Weltraumobservatorien wie CoRoT und Kepler. Außerhalb der störenden Erdatmosphäre verbessern sich die Beobachtungsmöglichkeiten erheblich.

Das **Hubble-Weltraumteleskop (Hubble Space Telescope)** ist eine gemeinsame Mission von ESA und NASA und seit dem Jahr 1990 im Einsatz. Es ist das erste Weltraumteleskop und wurde nach dem Astronomen Edwin Hubble (1889 - 1953) benannt. Sein Beobachtungsspektrum reicht vom UV-Bereich, über den optischen Bereich, bis in den Infrarotbereich. Sein Hauptspiegeldurchmesser

beträgt 2,4 Meter, doch befinden sich noch andere Instrumente am Bord. Das Hubble-Weltraumteleskop ist immer noch in Betrieb und soll voraussichtlich im Frühjahr 2019 durch das James Webb Weltraumteleskop (James Webb Space Telescope) abgelöst werden.

Die französische Weltraumagentur CNES startete im Jahre 2006 das Weltraumobservatorium **CoRoT** („Convection, Rotation and Planetary Transits“). Übersetzt bedeutet dies „Konvektion, Rotation und Transits von Extrasolaren Planeten“. Das Teleskop sucht nach Helligkeitsveränderungen bei Sternen, welche durch den Transit von Extrasolaren Planeten hervorgerufen werden und damit deren Nachweis dienen. Die weltraumgestützte Mission entdeckte im März/April 2007 ihren ersten Extrasolaren Planeten. Bis November 2012 wurden 14 weitere Extrasolare Planeten entdeckt. Dann setzte ein Computerdefekt der Beobachtung ein Ende, so dass das Weltraumobservatorium im Jahre 2014 abgeschaltet wurde.

Das Weltraumteleskop **Kepler** wurde von der NASA im März 2009 gestartet und erfüllte seine Mission als bisher erfolgreichste bis zum Jahr 2013. Ebenso wie CoRoT arbeitete Kepler mit der Transitmethode. Dabei beobachtete Kepler einen festen Himmelsausschnitt mit 190.000 Sternen im Sternbild Schwan. Ziel der Kepler-Mission war der Nachweis von terrestrischen Planeten und damit potentiell habitablen Welten. Im Januar 2010 gab die NASA den Nachweis der ersten fünf Extrasolaren Planeten im Rahmen der Kepler-Mission bekannt. Nachdem die Planeten Kepler-1b bis 3b bereits vor dem Start bekannt waren, erhielten die fünf neu entdeckten Extrasolaren Planeten die Bezeichnungen Kepler 4b bis Kepler 8b. Diese Planeten bewegen sich in einem Abstand von nur 0,1 AE um den Zentralstern und dürften daher aufgrund ihrer hohen Oberflächentemperaturen als Kandidaten für Leben ausscheiden. Schon im Juni 2010 wurden von der NASA die Daten von 306 Extrasolaren Planeten veröffentlicht. Insgesamt gab es zu diesem Zeitpunkt 706 nachgewiesene Extrasolare Planeten. Im Januar 2011 konnte die NASA dann die Entdeckung des bis dahin kleinsten Gesteinsplaneten vermelden, welcher die Bezeichnung Kepler-10 b erhielt. Kurz danach erfolgte die Entdeckung von Kepler-37b, welcher noch kleiner als Kepler-10 b ist. Bereits im Februar 2011 betrug die von Kepler entdeckte Anzahl der Kandidaten für Extrasolare Planeten 1.235. Von diesen bewegen sich 54 in einer habitablen Zone um ihren Zentralstern und fünf davon sind fast so groß wie die Erde. Zu diesem Zeitpunkt gab die NASA bekannt, dass 288 Supererden und 662 Extrasolaren Planeten von der Größe des Neptuns ermittelt wurden. Dazu gesellen sich noch die Entdeckungen von 165 Extrasolaren Planeten von etwa der Größe des Jupiters und weiteren 19 Exoplaneten, welche größer als Jupiter sind. Im Dezember 2011 gab die NASA die Entdeckung des ersten Extrasolaren Planeten bekannt, welcher sich in einer habitablen Zone um einen sonnenähnlichen Stern bewegt. Zu diesem Zeitpunkt hat sich die Zahl der Kandidaten für Extrasolare Planeten bereits auf 2.226 erhöht. Von diesen sind 207 so groß wie die Erde, 680 Supererden, 1.181 neptunähnliche Planeten, 203 jupiterähnliche Planeten und 55 Planeten größer als Jupiter. Die Keplermission war auf 3,5 Jahre ausgelegt und wurde im November 2012 um bis zu vier Jahre verlängert. Allerdings versagte bereits ab Juli 2012 die Lagestabilisierung des Teleskops im Raum, so dass die NASA im August 2013 in ihrer bisherigen Form aufgeben musste. Allerdings wurde im November 2013 ein alternativer Weg zur Missionsverlängerung vorgelegt, so dass die NASA die Mission ab 2014 unter geändertem Modus und mit der Bezeichnung „K2“ weiterlaufen lassen konnte. So konnten mit der Verbesserung der Analysemethoden weitere 715 Extrasolare Planeten entdeckt werden. Darunter die Entdeckung des erdähnlichen Planeten Kepler-186 f in einer habitablen Zone um seinen Zentralstern. Des Weiteren die Entdeckung von Kepler-10 c, der ersten Mega-Erde. Bei den Mega-Erden handelt es sich um Extrasolare Planeten mit mehr als 14 Erdmassen.

Das „**Super Wide Angle Search for Planets**“ („**SuperWASP**“) ist ein automatisches Suchsystem für Extrasolare Planeten. Es besteht aus zwei selbstständigen und unabhängig voneinander arbeiten Observatorien. Das eine befindet sich am Roque-de-los-Muchachos-Observatorium auf La Palma und das andere am South African Astronomical Observatory in Südafrika. Super Wide Angle

bedeutet übersetzt „besonders großes Bildfeld am Himmel“. Mit Hilfe von acht Teleobjektiven von je 0,2 Metern Durchmesser wird der Himmel beobachtet. An diesen Teleobjekten sind CCD-Kameras mit Sensoren von 2.048 mal 2.048 Pixeln Bildfläche angeschlossen, wobei das Kamerafeld 8 mal 8 Grad am Himmel misst. In einer Nacht können bis zu 800 Aufnahmen mit je 35 Sekunden Belichtungszeit erstellt werden, um insgesamt rund 50 Millionen Messungen von Sternhelligkeiten durchzuführen. Der Nachweis der Extrasolaren Planeten erfolgt mit Hilfe der Transitmethode. Bisher sind durch das Projekt SuperWASP über 100 Extrasolare Planeten entdeckt worden.

Im Jahre 2015 wurde das „**Next Generation Transit Survey**“ („NGTS“) der ESO in Betrieb genommen. Hierbei handelt es sich um 12 Teleskope mit Spiegeldurchmessern von je 0,2 Metern. Es befindet sich in unmittelbarer Nähe des Paranal-Observatoriums im Norden Chiles und sucht vollkommen automatisch nach den Transits von Extrasolaren Planeten vor ihren Zentralsternen. Die Suche erfolgt, in den die Helligkeiten von mehreren 100.000 vergleichbar hellen Sternen am Südhimmel vermessen werden. Es soll bei den Helligkeitsmessungen eine relative Genauigkeit von einem Tausendstel erreicht werden, was bisher bei erdgebundenen großflächigen Beobachtungen nicht erreicht wurde. Die mit dem NGTS entdeckten Extrasolaren Planeten werden anschließend mit größeren Teleskopen untersucht. Ziel des Projektes mit dem NGTS ist die Entdeckung von kleinen Planeten, welche einen so großen Helligkeitsunterschied verursachen, dass sich daraus die Planetenmasse genau bestimmen lässt. Mit Hilfe der Werte für die Masse und die Größe der Planeten soll zunächst deren Dichte bestimmt werden, um daraus Hinweise über die Zusammensetzung der Planeten zu erlangen. Bei einem Transit eines Extrasolaren Planeten vor der Sternscheibe wäre es auch möglich die Atmosphäre des Planeten zu untersuchen, da das uns erreichende Sternlicht zuvor die Planetenatmosphäre durchläuft und wir daher eine spektroskopische Untersuchung durchführen können.

Das „**Large Binocular Teleskop**“ besteht aus zwei Spiegeln mit jeweils 8,4 Metern Durchmesser, welche zusammengeschaltet einen effektiven Spiegeldurchmesser von 11,8 Metern ergeben. Dieses seit dem Jahr 2005 im Betrieb befindliche Teleskop hat seinen Sitz auf dem 3.267 Meter hohen Mount Graham im US-Bundesstaat Arizona.

4.2 Geplante Missionen von Weltraumteleskopen

Die Erfolge von CoRoT und Kepler veranlassten die ESA und die NASA zu Studien über Nachfolgemissionen. So wollte die europäische Raumfahrtagentur ESA im Jahre die Mission „**Darwin**“ starten. Vier Satelliten sollten dazu in eine Umlaufbahn um die Erde gebracht werden. Drei Satelliten wären mit Infrarotteleskopen mit Hauptspiegeldurchmessern von drei bis vier Metern ausgerüstet worden, der vierte hätte den Empfänger getragen. Im Rahmen dieser Mission wäre nicht nur nach Extrasolaren Planeten, sondern erstmals auch konkret nach sogenannten Biomarkern in den Atmosphären dieser Planeten gesucht worden. Bei Biomarkern handelt es sich um charakteristische chemische Stoffe, welche hauptsächlich bei biologischen Prozessen entstehen. Das Projekt wurde eingestellt und nicht umgesetzt.

Eine ähnliche Aufgabe hätte auch der „**Terrestrial Planet Finder**“ („TPF“) der NASA gehabt. Neben der Suche nach Extrasolaren Planeten stand bei dieser Mission die Untersuchung von Gas- und Staubscheiben um junge Sterne im Vordergrund. Für diese Mission sollte TPF über ergänzende Satellitenteleskope verfügen: Ein großes optisches Teleskop mit rund der zehnfachen Trennschärfe des Hubble-Weltraumteleskops und vier Infrarotteleskope mit Hauptspiegeldurchmessern von drei bis vier Metern. Die Auflösung der Infrarotteleskope sollte durch deren interferometrische Zusammenschaltung noch gesteigert werden können. Mit den Instrumenten sollten etwa 150 Sterne in einem Entfernungsbereich von bis zu 50 Lichtjahren untersucht werden. Der Missionsplan sah einen Start des optischen Teleskops im Jahre 2014, dass der Infrarotteleskope noch vor dem Jahr 2020 vor. Nach dem Jahr 2020 sollte ein Nachfolgeprojekt unter den Namen „Planet Imager“ zum

Einsatz gebracht werden. Dieses hätte die Reichweite der Beobachtungen durch die Kombination mehrerer TPF-Systeme noch gesteigert. Aufgrund von Budgetkürzungen bei der NASA wurden sowohl der TPF und ein mögliches Nachfolgeprojekt aufgegeben.

Als Alternativprojekt zu den gestoppten Missionen möchte die ESA einen Satelliten mit der Bezeichnung „**CHEOPS**“ starten. Diese Mission soll nach Angaben der ESA zwar kleiner und günstiger, nicht jedoch weniger erfolgreich sein. Die Bezeichnung „CHEOPS“ steht für „**Characterising Exoplanets Satellite**“. Im Rahmen dieser Mission sollen nahe Sterne mit der Transitmethode beobachtet werden, welche nachweislich von mindesten einen bereits entdeckten Planeten umlaufen werden. Dabei sollen die Radien der Planeten bestimmt werden. Aus den mit Hilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode bestimmten Massen dieser Planeten und ihrer Radien können die Dichten der betreffenden Extrasolaren Planeten berechnet werden. Mit Hilfe dieser Daten sollen Informationen erlangt werden, wie diese Planeten entstanden sein könnten. Der Satellit soll die Erde bei einer geplanten Missionsdauer von 3,5 Jahren in 800 km Höhe umrunden.

Etwa sieben Jahre nach der Mission CHEPOS könnte die ESA-Mission „**PLATO**“ erfolgen, wobei die Abkürzung für „**Planetary Transits and Oscillation of stars**“ steht. Diese Mission soll 34 kleine Teleskope und Kameras umfassen, welche zusammengeschaltet werden können. PLATO soll die Erde in 1,5 Millionen km Entfernung, in einem der Lagrange-Punkte zwischen Erde und Sonne, umrunden. Dieser Punkt bildet mit der Erde und der Sonne ein gleichseitiges Dreieck. In diesem Punkt heben sich die gegenseitigen Gravitationskräfte der beiden Himmelskörper auf. Die Missionsdauer ist auf sechs Jahre angelegt und soll bei rund einer Million Sternen nach kleinen Planeten suchen.

Ebenfalls in einem dieser Lagrange-Punkte möchte die ESA im Jahre 2024 ein weiteres Teleskop für die Suche nach Extrasolaren Planeten in Position bringen. Es trägt die Bezeichnung „**Echo**“, was die Abkürzung für „**Exoplanet Characterisation Observatory**“. Mit einem optischen Teleskop von 1,2 – 1,5 Meter Hauptspiegeldurchmesser und hochauflösenden Spektrografen sollen im Bereich von verschiedenen Wellenlängen die Atmosphärenbestandteile, das Albedo (Rückstrahlungsvermögen) und die Temperatur von bekannten Extrasolaren Planeten untersucht werden. Im Falle der Untersuchung der Atmosphärenbestandteile soll auch nach Biomarkern gesucht werden. Mit Hilfe der Daten sollen Modelle des inneren Aufbaus von Extrasolaren Planeten aufgestellt werden. Mit Hilfe dieser Modelle soll das Verständnis verbessert werden, wie Extrasolare Planeten entstehen und sich entwickeln. Des Weiteren soll auch nach extrasolaren Monden gesucht werden.

Bereits zwischen März und Juni 2018 plant die NASA den Start der Mission „**TESS**“, wobei die Abkürzung für „**Transiting Exoplanet Survey Satellite**“ steht. Im Rahmen dieser Mission sollen mehr als 500.000 Sterne in einer Entfernung bis 100 Lichtjahren untersucht werden. Auf der Basis von Computersimulationen soll TESS mehr als 3.000 Transits von Extrasolaren Planeten vor ihrem Zentralstern und darunter etwa erdgroße Planeten nachweisen können.

Für das Jahr 2023 plant die NASA die Mission „**FINESSE**“, was für „**Fast Infrared Exoplanet Spectroscopy Survey Explorer**“ steht. Im Rahmen dieser Mission sollen die Atmosphären der Extrasolaren Planeten im infraroten Bereich untersucht werden. Konkret soll evaluiert werden, welche Prozesse für die Zusammensetzung der extrasolaren Planetenatmosphären verantwortlich sind. Des Weiteren soll geklärt werden, wie sich unser Sonnensystem in die ständig wachsende Zahl der entdeckten extrasolaren Systeme einordnen lässt.

Das „**James Webb Space Telescop**“ („**JWST**“) wurde im Jahr 2002 nach dem ehemaligen Leiter der NASA James Edwin Webb (1906 – 1992) benannt und soll die Nachfolge des Hubble-Weltraumteleskops antreten. Es ist ein gemeinsames Projekt von der NASA, der ESA und der CSA

(Canadian Space Agency). Voraussichtlich im Jahr 2018 soll das 6,2 Tonnen schwere Weltraumteleskop gestartet werden. Mit einem Hauptspiegeldurchmesser von 6,5 Metern wird es bis dato das größte Weltraumteleskop sein. Der Hauptspiegel besteht aus 18 sechseckigen Segmenten, welche sich wegen der Größe der Gesamtspiegelfläche erst im All entfalten. Während das Hubble-Weltraumteleskop hauptsächlich im optischen Bereich arbeitet, wird das JWST im infraroten Bereich beobachten und ist damit für die Suche nach Extrasolaren Planeten besonders geeignet. Aus diesem Grunde müssen das Teleskop und die Zusatzinstrumente vor der eigenen Infrarotstrahlung sowie der von der Erde, dem Mond und der Sonne ausgesandten besonders abgeschirmt werden. Zu diesem Zweck werden die Instrumente auf -220°C abgekühlt und die Unterseite des Satelliten mit einem großen mehrlagigen Sonnenschild geschützt. Das JWST wird in einem der Lagrange-Punkte in 1,5 Millionen Kilometer Entfernung von der Erde positioniert werden. Auf diese Weise soll gewährleistet werden, dass die störenden Infrarotquellen Erde und Sonne vom Teleskop aus gesehen etwa in der gleichen Richtung liegen. So kann das Sonnenschild des JWST entsprechend ausgerichtet und effektiv eingesetzt werden. In den anderen Richtungen ist dann ein ungestörter Blick des Teleskops möglich. Das JWST verfügt über vier Spezialinstrumente: NIR-Cam (Near Infrared Camera), MIRI (Mid Infrared Instrument), NIRSpec (Near Infrared Spectrograph) und FGS (Fine Guidance Sensor). Mit diesen Instrumenten soll folgendes erforscht werden:

- Das Licht von den ersten Sternen und Galaxien, welche nach dem Urknall entstanden;
- die Strukturen und die Entwicklung von Galaxien;
- die Struktur von Sternen und planetaren Systemen;
- die planetaren Systeme und der Ursprung des Lebens.

4.3 Geplante Riesenteleskope auf der Erde

Neben den Weltraumteleskopen sind auch neue Riesenteleskope auf der Erde geplant, welche die bisherigen deutlich übertreffen sollen. Zwar sind Weltraumteleskope wegen der fehlenden Atmosphäre vorteilhafter, können jedoch nicht ohne Weiteres beliebig groß gebaut werden. Die modernen Teleskope auf der Erde können sich aufgrund neuer Spiegelmaterialien, moderner Bauweisen und ausgefeilter optischer Methoden heutzutage mit dem Hubble-Weltraumteleskop messen lassen. Als Beispiel hierfür soll das „Very Large Telescope“ („VLT“) der „Europäischen Südsternwarte“ („ESO“) und die auf Hawaii betriebenen Keck-Teleskope mit ihren zwei baugleichen Zehnmeter-Spiegeln aufgeführt werden. Bereits diese vorhandenen Systeme leisten einen erfolgreichen Beitrag zur Erforschung der Extrasolaren Planeten. So ist für die weitere Erforschung dieser Planeten eine Entwicklung von noch größeren erdgebundenen Teleskopen folgerichtig. Die nächsten Großteleskope auf der Erde sollen Spiegeldurchmesser von bis zu 40 Metern haben. Im Bau befindliche bzw. geplante Teleskope sind das „European Extremely Large Telescope“ („E-ELT“), das „Thirty Meter Telescope“ („TMT“) und das „Giant Magellan Telescope“ („GMT“)

Das „**European Extremely Large Telescope**“ („E-ELT“) befindet sich seit dem Jahr 2014 im Bau und soll im Jahr 2024 fertig gestellt werden. Es befindet sich in der chilenischen Atacamawüste, wo die Sichtbedingungen zu den besten auf der Welt zählen. Konkret befindet es sich auf dem 3.064 Meter hohen Cerro Armazones, welcher nur zwanzig Kilometer vom VLT auf dem Berg Cerro Paranal entfernt liegt. Das Teleskop mit einem Spiegeldurchmesser von 39 Metern wird sich in einer Kuppel von 86 Meter Durchmesser und 74 Meter Höhe befinden. Der Spiegel wird aus 798 sechseckigen Spiegelsegmenten von je 1,42 Meter Durchmesser zusammengesetzt sein und mit adaptiver Optik arbeiten. Jedes der einzelnen Spiegelsegmente wird einzeln steuerbar sein. Sie können nach oben oder unten sowie auch um zwei Achsen kippen. Damit können atmosphärische Störungen aus den Beobachtungsbildern korrigiert und damit eine optimale Bildqualität erreicht

werden. Das E-ELT sammelt 26-mal mehr Licht als eines der Hauptteleskope des VLT, so dass sich am Sternhimmel 15-mal so viele Details ausfindig machen wie mit dem Hubble-Weltraumteleskop. Das ist mehr Lichtsammlung als durch alle bisherigen Teleskope zusammen. Durch das neue Teleskop sollen Planeten von bis zu einer Erdmasse durch die von diesen hervorgerufen Sternschwankungen indirekt erfasst und große Extrasolare Planeten direkt abgebildet werden.

Das „**Thirty Meter Telescope**“ („TMT“) wird einen Hauptspiegeldurchmesser von 30 Metern haben, wie es der Name aussagt. Dies von US-amerikanischen und kanadischen Instituten geplante Großteleskop wird auch von China, Japan und Indien mitfinanziert werden. Wie bereits die beiden Keck-Teleskope wird es seinen Platz auf dem 4.050 Meter hohen Mauna Kea auf Hawaii erhalten. Der Baustart war im Oktober 2014, im Jahre 2022 soll es seinen Betrieb aufnehmen. Der Hauptspiegel wird aus 492 sechseckigen, einzeln steuerbaren Segmenten von je 1,4 Metern Durchmesser bestehen. Damit wird das Teleskop über eine adaptive Optik verfügen. Das TMT wird ein Beobachtungsspektrum vom nahen UV bis zum mittleren Infrarotbereich abdecken.

Das „**Giant Magellan Telescope**“ („GMT“) wird mit sieben Primärspiegeln von je 8,4 Metern Durchmesser arbeiten, so dass sich durch das Zusammenschalten dieser Spiegel ein effektiver Spiegeldurchmesser von 24,5 Metern ergibt. Dieses Teleskop arbeitet ebenfalls mit adaptiver Optik. Die ersten Teile des Teleskops wurden bereits im Jahr 2012 erstellt. Im gleichen Jahr begannen ebenfalls erste vorbereitende Baumaßnahmen auf dem Gelände der Las-Campanas-Sternwarte im Hochland von Chile, wo das Teleskop in 2.516 Meter Höhe über dem Meeresspiegel errichtet wird und bis zum Jahr 2020 fertig gestellt sein soll. Vom Aufbau vergleichbar ist das GMT mit dem Large Binocular Telescope. Nachdem das GMT kalibriert ist, soll es eine bis zu zehnmals bessere Trennschärfe als das Hubble-Weltraumteleskop haben. Sein Beobachtungsspektrum reicht vom nahen Infrarotbereich in den optischen Bereich.

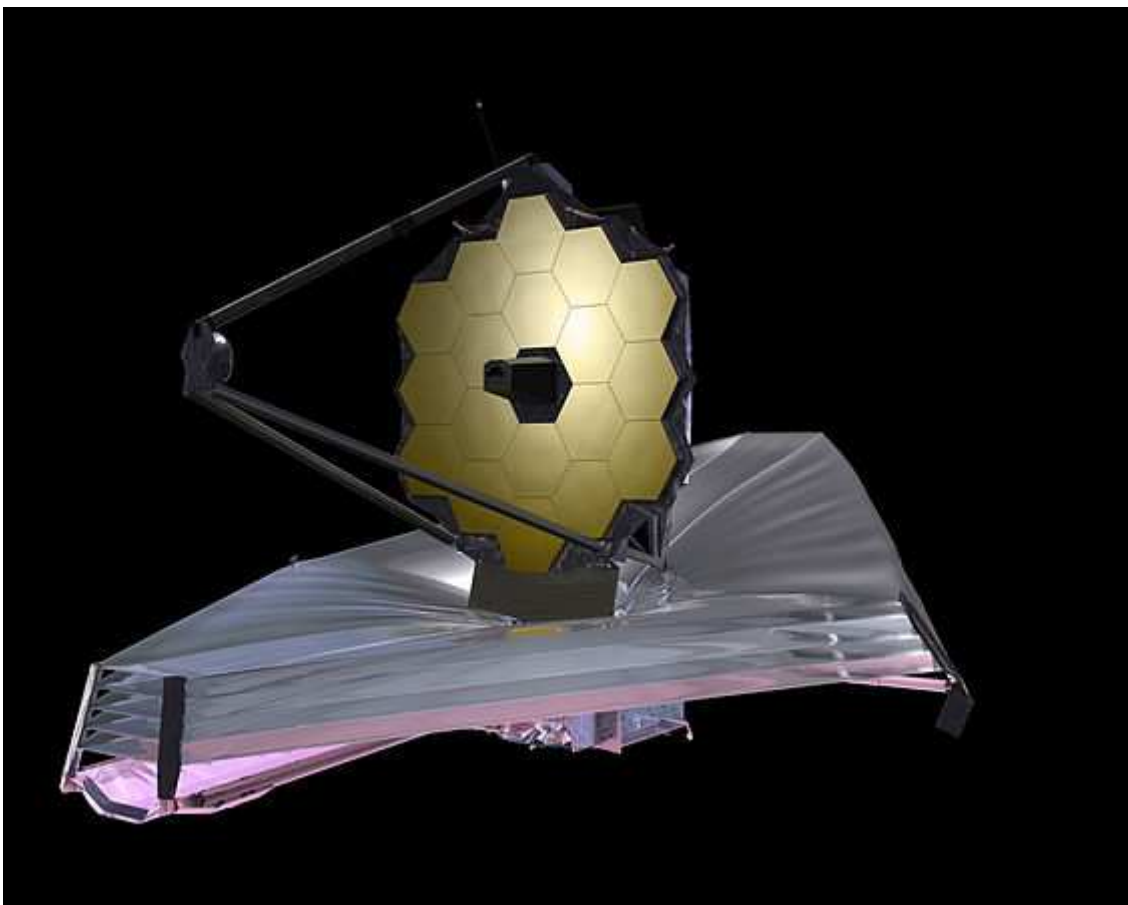


Bild 6: Das James Webb Space Telescope / Bild: Wikipedia.org

5 Die Klassen der Extrasolaren Planeten

Vorweg soll auf die Benennung der Extrasolaren Planeten eingegangen werden, die unabhängig von der Art (den Klassen) dieser Exoplaneten ist. Die Extrasolaren Planeten werden mit dem Namen bzw. der Katalogbezeichnung ihres zugehörigen Zentralsterns sowie einen angehängten Kleinbuchstaben in der Reihenfolge ihrer Entdeckung versehen. Hierbei wird der Kleinbuchstabe a für den Zentralstern reserviert, so dass die Zählung mit b beginnt. Ein Extrasolarer Planet mit dem Kleinbuchstaben b ist also der erste entdeckte Planet eines bestimmten Systems, der Kleinbuchstabe c bezeichnet dann den zweiten entdeckten Extrasolaren Planeten dieses Systems, usw. Dies soll an ein paar Beispielen erläutert werden. Der Name „CoRoT-4 b“ für einen Extrasolaren Planeten bedeutet, dass es sich um den ersten Extrasolaren Planeten handelt, welcher um den vierten von dem Weltraumobservatorium CoRoT untersuchten Stern kreist. Der Planet „Kepler-10b“ ist der erste entdeckte Extrasolare Planet, welcher um den Stern Kepler-10 kreist. Der Stern Kepler-10 ist der zehnte Stern im Kepler Input Catalog, welcher die Beobachtungsdaten des Kepler-Weltraumteleskops enthält. Bei dem Planeten „Gliese 876d“ handelt es sich um den dritten entdeckten Extrasolaren Planeten, welcher sich um den Stern mit der Bezeichnung 876 im von Wilhelm Gliese (1915 – 1993) verfassten Katalog bewegt. Der erste sich um einen bestimmten Pulsar bewegende Extrasolare Planet wird mit PSR 1257+12 b bezeichnet. Hierbei steht PSR für Pulsar und die Zahlenwerte für seine astronomische Koordinaten (Rektaszension $12^h 57^m$ und Deklination +12). Die tatsächliche Reihenfolge der Abstände der Extrasolaren Planeten von ihrem Mutterstern wird bei ihrer Bezeichnung nicht berücksichtigt. Dafür ist die Messtechnik wohl noch nicht ausgereift genug. Allerdings wäre eine Bezeichnung in der Reihenfolge der Abstände der Extrasolaren Planeten systematischer.

Bei den Klassen handelt es sich um die verschiedenen Arten von Extrasolaren Planeten. So gibt es im Sonnensystem zwei Arten bzw. Klassen von Planeten: Die terrestrischen (erdähnlichen) Gesteinsplaneten und die jovianischen (jupiterähnlichen) Gasplaneten. Im Falle der Gasplaneten besteht im Sonnensystem noch die Untergruppe der Eisplaneten, zu denen Uranus und Neptun gehören. Die Eisplaneten verfügen über eine deutlich dickere Eisschicht als die Gasplaneten Jupiter und Saturn. Das Sonnensystem hat einen klar strukturierten Aufbau. Bei den inneren vier Planeten handelt es sich um Gesteinsplaneten, bei den äußeren vier um Gasplaneten. Die terrestrischen Planeten haben Massen von 0,055 Erdmassen bis zu einer Erdmasse, die Gasplaneten von 14 bis 318 Erdmassen. Die grundsätzliche Unterteilung zwischen Gesteins- und Gasplaneten findet sich auch bei den Extrasolaren Planeten wieder. Allerdings ist das Massenspektrum deutlich breiter. So werden als Supererden diejenigen Planeten bezeichnet, welche Massen von einer bis 14 Erdmassen haben. Sie bewegen sich also in einem Massenbereich zwischen einer Erdmasse und einer Uranusmasse. Nach einer anderen Definition liegt die obere Massengrenze bei 10 Erdmassen. Allerdings ist unklar, bei welchen Massen eine Supererde als Gesteins- oder Gasplanet vorliegt. Auch die Unterteilung der Gasplaneten in jovianische Planeten und Eisplaneten (Neptunähnlich) findet sich im Prinzip wieder. So wird bei den besonders sternnahen jovianischen Extrasolaren Planeten und Eisplaneten von „Hot Jupiters“ und „Hot Neptunes“ gesprochen. Sie bewegen sich in extrem kleinen Bahnradien in wenigen Tagen um ihren Stern.

Im Falle der Extrasolaren Planeten ist die grobe Unterteilung in Gesteins- und Gasplaneten nicht differenziert genug, so dass es folgende Klassen von Extrasolaren Planeten gibt:

- **Metallosilikatische Planeten** (Planeten, vergleichbar mit dem Aufbau von Erde und Merkur im Sonnensystem).
- **Silikatische Planeten** (Diese Planeten sind vergleich im Aufbau mit dem Erdmond und den Jupitermonden Europa und Io).
- **Hydrosilikatische Planeten** (Diese Planeten haben einen ähnlichen Aufbau wie der Jupitermond Ganymed und der Saturnmond Titan).

- **Eisplaneten** (Diese Planeten ähneln dem Saturnmond Enceladus, welcher aus Eis mit nur einem geringen Anteil an Silikaten besteht).
- **Gasriesen** (Vergleichbar mit Jupiter und Neptun im Sonnensystem). Im Falle der Gasriesen erfolgt in Abhängigkeit von der Wolkenzusammensetzung in der Atmosphäre (z.B. Ammoniak, Methan oder Wasserdampf) und der Temperatur in der oberen Atmosphäre eine Einteilung in weitere Untergruppen.

Es gibt noch einen Sonderfall unter den Extrasolaren Planeten mit der Bezeichnung „Planemos“. Dies ist die Abkürzung der englischen Bezeichnung „Planetary Mass Objects“, was übersetzt „Körper von planetarer Masse“ bedeutet. Die Masse dieser Objekte entspricht in etwa denen der Planeten im Sonnensystem, wobei die obere Massegrenze bei 13 Jupitermassen liegt. Über dieser Massengrenze fängt der Bereich der Braunen Zwerge an. Bei den Planemos handelt es sich um Objekte, welche sich frei bewegen und nicht an einen Stern gebunden sind. Im sichtbaren Licht sind diese Objekte schwer nachweisbar, im infraroten Bereich können sie aufgrund ihrer eigenen Wärmestrahlung besser nachgewiesen werden. Es wird davon ausgegangen, dass es etwa doppelt so viele Planemos wie Sterne in der Galaxis gibt. Über deren Entstehung können noch keine abschließenden Aussagen getroffen werden. Wahrscheinlich sind sie als gewöhnliche Extrasolare Planeten im Rahmen der Sternentstehung entstanden und waren auch um den betreffenden Stern gebunden. Aufgrund von gravitativen Wechselwirkungen mit der extrasolaren proto-planetaren Scheibe oder mit anderen Planeten wurden sie aus der Umlaufbahn geworfen und verließen so das Gravitationsfeld des betreffenden Sterns.

5.1 Supererden

Der Begriff Supererde beschreibt ausschließlich Planeten in einem Massenbereich zwischen einer und 14 (oder alternativ 10) Erdmassen. Über die Erdähnlichkeit sagt diese Bezeichnung überhaupt nichts aus. Aufgrund der zunehmend besseren Forschungsmethoden und Messtechniken lassen sich nach derzeitigem Stand drei Klassen von Supererden unterscheiden:

- **Die Gesteinplaneten:** Diese umkreisen ihren Zentralstern in geringer Entfernung, befinden sich jedoch gerade noch in einer habitablen Zone. Die felsige Oberfläche dieser Planeten dürfte bei fehlendem Wasser konturlos und wüst sein. Beim Vorhandensein von Wasser könnten sich Oberflächenstrukturen und Leben ausbilden, wobei mögliches Leben eine zusätzliche Oberflächen gestaltende Wirkung haben dürfte. Ein Gesteinsplanet dürfte einen vergleichbaren Aufbau wie die Erde haben. Demnach sollte es einen Kern, einen aus Silikaten bestehenden Mantel und eine Kruste geben, wobei der Mantel wahrscheinlich dichter als der irdische sein könnte. Ob eine Plattentektonik vorhanden ist, dürfte von den Schwerkrafteinflüssen des Zentralsterns und den Eigenschaften des Planetenkerns abhängen. Wahrscheinlich besteht der Planetenkern ähnlich dem Erdkern hauptsächlich aus Eisen.
- **Lebensfreundliche Supererden:** Diese Planeten befinden sich wie die Erde in der Mitte der habitablen Zone. In diesem Fall sind Sternstrahlung und Wärme in dem Maße vorhanden, um Wasser flüssig zu halten. Wie im Falle der Erde wäre die Planetenkruste unter den Ozeanen dünner als unter den Kontinenten. Die Kruste unter den Ozeanen würde aus dichteren Gesteinsarten bestehen, wie Basalt. Die kontinentale Kruste würde hingegen aus felsigem Gestein wie Quarz bestehen. Am Dicksten wäre der Mantel, welcher aus eisen- und magnesiumreichen Silikaten bestehen sollte. Der Kern wäre zweigeteilt in einen festen inneren und einen äußeren flüssigem Kern, wie im Falle der Erde. Auch der Aufbau aus Eisen und Nickel sollte vergleichbar mit dem Aufbau des Erdkerns sein. Die Atmosphäre sollte aus Gasen bestehen und gemäßigte Temperaturen ermöglichen, so dass die Entstehung von Leben möglich wäre. Eine entsprechende Atmosphäre ermöglicht einen Temperaturengleich, welcher extreme Temperaturunterschiede zwischen der Tag- und Nachtseite des Planeten verhindert. Dies ist besonders in Falle einer gebundenen Rotation

erforderlich, wo der Planet dem Stern immer dieselbe Seite zuwendet. Die habitable Zone um einen Roten Zwergstern wäre so nahe am Stern, dass sich aufgrund der starken Gezeitenwirkung eine gebundene Rotation einstellt.

- **Wasserwelten:** Bei diesen Planeten besteht ein Großteil ihrer Masse aus Wasser. So dürfte die Oberfläche aus einem Eispanzer bestehen. Unterhalb des Eispanzers könnte es eine Schicht aus flüssigem Wasser geben. Bei wärmeren Wasserwelten kann es zur Verdunstung von Wasser kommen, wobei der dabei entstehende Wasserdampf einen starken Treibhauseffekt generieren kann. Wahrscheinlich bestehen Planeten dieser Art aus zwei Schichten, einem inneren Felsmantel und einem äußeren Eismantel. Das Eis dieses äußeren Mantels muss allerdings nicht die niedrigen Temperaturen haben wie irdisches Eis. Wasserwelten können einen felsigen Kern umschließen, wobei dicke Schichten aus Wasserstoff und Helium hinzukommen könnten. Es kann sich auch um Planeten mit Hüllen aus Wasserstoff und Helium, mit Wasser und Methan als weiteren Hauptbestandteilen handeln, welche wiederum von einem dicken Eispanzer umgeben sind.

Die Frage, ob eine Supererde ein Gesteins- oder ein Gasplanet ist, dürfte vom Ort der Entstehung abhängen. Nach der vorherrschenden These bestehen die jovianischen Planeten im Sonnensystem in ihrem Innern aus einem Kern mit mehreren Erdmassen, welcher im Prinzip ein Gesteinsplanet ist bzw. war. Diese Kerne sind zunächst ebenfalls genauso entstanden wie die Gesteinsplaneten durch Koagulation (Ankleben) und Agglomeration (Anwachsen) von Materie aus der proto-planetaren Scheibe. Im äußeren Bereich der Scheibe war es ausreichend kühl, damit sich dort die flüchtigen Gase wie Wasserstoff und Helium ansammeln konnten. Die massereichen Gesteinskerne konnten diese Gase gravitativ an sich binden und bildeten so die gewaltigen Gashüllen, wie sie typisch für Gasplaneten sind. Die Extrasolaren Gasplaneten dürften entsprechend entstanden sein. Wenn sich allerdings ein Gesteinsplanet bzw. Gesteinskern mit mehreren Erdmassen im inneren Bereich einer extrasolaren proto-planetaren Scheibe bildet, also näher am Zentralstern, dann sind die Temperaturen für flüchtige Gase wie Wasserstoff und Helium zu hoch. An dieser Stelle der Scheibe können sich diese Gase nicht halten und verflüchtigen sich. Damit kann ein möglicher Gesteinskern auch keinen Wasserstoff und kein Helium aufnehmen und so keine dichte Gashülle bilden. In diesem Fall entsteht anstelle eines Gasplaneten ein Gesteinsplanet mit mehreren Erdmassen. Eine Supererde kann also je nach den Rahmenbedingungen bei ihrer Entstehung ein Gesteins- oder ein Gasplanet sein. Im Falle eines Gasplaneten könnte es sich um Planeten wie Jupiter und Saturn oder im Eisplaneten wie Uranus und Neptun handeln. Eine messtechnische Unterscheidung zwischen einem Gesteins- und einem Gasplaneten ist noch recht schwierig, dennoch in einigen Fällen allerdings gelungen. Mit fortschreitender Messtechnik dürfte auch die Unterscheidungsmöglichkeit immer besser werden.

Supererden verfügen in der Regel über mehrere Erdmassen. Dies dürfte auch Einfluss auf ihren Aufbau haben. Zunächst ist aufgrund der größeren Masse auch der Druck im Innern einer Supererde viel höher. Damit ist die Materie dichter zusammengepresst und im Ergebnis die Dichte des Extrasolaren Planeten auch höher. Felsgestein auf einer Supererde kann aufgrund des höheren Drucks härter werden als Diamant. Die geologischen Vorgänge auf einer Supererde dürften intensiver ablaufen als auf der Erde und werden wohl keinesfalls statisch sein wie zum Beispiel auf dem Mars. Auf der Erde ist der obere Mantel aufgrund der Energiefreisetzung durch Radioaktivität aufgeschmolzen und es kommt zu Konvektionsströmungen. Wie in einem Kochtopf steigt heißere Mantelmaterie auf und kühlere sinkt wieder nach unten. Oberhalb des Mantels befindet sich die relativ dünne Erdkruste, welche in einzelne Platten zerbrochen ist. Diese Platten werden durch die Mantelkonvektion angetrieben. Dabei reiben sie einander. Die Folge sind die Bildung von Gebirgen und Gräben sowie Erdbeben und Vulkanismus. Gesteins-Supererden weisen wahrscheinlich eine noch höhere Konzentration von radioaktiven Wärmequellen auf. Aufgrund der höheren Wärmefreisetzung ist die Mantelkonvektion wesentlich stärker. Infolgedessen sind die Krusten-Platten dünner als auf der Erde. Dem aufsteigenden Material bleibt nicht genügend Zeit, um

ausreichend abzukühlen, damit es sich an den Platten anlagern kann. Dünnere Platten können wiederum leichter verformt werden. Durch die stärkere Gravitation auf der Supererde wirkt ein stärkerer Druck auf die geologischen Verwerfungen, so dass im Ergebnis die Plattentektonik auf einer Supererde intensiver als auf der Erde sein dürfte.

Eine erhöhte Plattentektonik ist im Ergebnis geeignet, die Bewohnbarkeit einer Supererde zu erhöhen. Bereits auf der Erde wird die Atmosphäre durch geologische Aktivität, besonders durch Vulkanismus, ständig mit Kohlenstoffdioxid und anderen Gasen angereichert. Mit Kalziumsilikat reagiert Kohlenstoffdioxid zu Kalziumcarbonat und Siliziumoxid. Die entstandenen Stoffe gelangen schließlich als Sedimente auf dem Meeresboden. Auf dem Meeresboden ist die Kruste noch dünner. Dort kommt es zur sogenannten Subduktion. Bei diesem Vorgang wird die Platte mit der höheren Dichte unterhalb der Platte mit der geringeren Dichte geschoben, während sich diese Platten aufeinander zubewegen und zusammenstoßen. Dabei gelangen die Sedimente in den Mantel, welcher wieder mit Kohlenstoff angereichert wird. Später wird dieser Kohlenstoff dann wieder in Form von Kohlenstoffdioxid freigesetzt, wo er in die Planetenatmosphäre gelangt. Der beschriebene Kreislauf wird als Kohlenstoff-Silikat-Zyklus bezeichnet. Dieser Zyklus erneuert zum einen das Krustenmaterial und zum anderen wird wie mit einem Thermostat die Temperatur reguliert. Denn Kohlenstoffdioxid ist ein Treibhausgas und seine Konzentration in der Planetenatmosphäre hat Einfluss auf die Oberflächentemperatur. Auf diese Weise kann über sehr lange Zeiträume von über Milliarden von Jahren die Temperatur in einem Bereich konstant gehalten werden, in dem Wasser flüssig ist. Auf diese Weise kann es im Ergebnis zu einer chemischen und biologischen Evolution kommen. Des Weiteren liefert die Plattentektonik ständig auch andere Mineralien und Gase, welche für mögliches Leben wichtig sind. Hierbei seien insbesondere energiereiche Chemikalien wie Schwefelwasserstoff hervorgehoben. Dieser Stoff könnte vor der Herausbildung einer Photosynthese als Energielieferant dienen, wie es möglicherweise auch im Falle der Erde gewesen ist.

Die stärkere Mantelkonvektion auf einer Supererde bewirkt eine kürzere zeitliche Entwicklung der Krustenplatten. So entstehen diese schneller und werden auch schneller wieder vernichtet. Der Kohlenstoff-Silikat-Zyklus verläuft ebenfalls schneller. Daraus könnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass diese Supererden dann noch bessere Rahmenbedingungen für mögliches Leben aufweisen. Eine größere Masse verhindert auch ein mögliches Entweichen der Atmosphäre und von wichtigen chemischen Bestandteilen, wie etwa Wasser. Dies ist besonders wichtig für Supererden ab einer bestimmten Nähe zum Zentralstern. Allerdings kann aufgrund der größeren Planetenmasse die Atmosphäre auch stärker anwachsen und möglicherweise zu dicht für die Durchlässigkeit der notwendigen Sternstrahlung werden. Auch könnten sich bei einer zu großen Planetenmasse die Kontinente wegen der stärkeren Gravitation möglicherweise unterhalb des Ozeanspiegels befinden, was für die mögliche Entstehung von Leben am Land ein Problem wäre.

Eine Gesteins-Supererde würde wohl auf den ersten Blick wie ein terrestrischer Planet im Sonnensystem aussehen. Aufgrund der vorhandenen Mantelkonvektion dürften in etwa die gleichen geophysikalischen Aktivitäten wie auf der Erde vorkommen, so dass es Kontinente, Ozeane, Gebirge, Vulkane sowie eine Atmosphäre mit klimatologischen und meteorologischen Erscheinungen geben sollte. Aufgrund der stärkeren Gravitation können sich allerdings die Gebirge nicht so hoch auftürmen. Wahrscheinlich ist daher die Landschaft auf einer Supererde im Vergleich zur Erde eher hügelig. Doch könnten aus dem gleichen Grunde die Kontinente tiefer liegen und sogar überwiegend unter dem Ozeanspiegel liegen. Aufgrund der stärkeren Mantelkonvektion laufen alle geologischen Entwicklungen, etwa die Bildung von Gebirgen und Erosionsvorgänge, schneller ab. Die Kontinentaldriftgeschwindigkeit der Krustenplatten ist bis zu zehnmal höher als auf der Erde.

Die Atmosphäre auf einer Supererde dürfte sich in ihren physikalischen Eigenschaften und in ihrer chemischen Zusammensetzung von der der Erde unterscheiden. Aufgrund des intensiveren Vulkanismus wird die Atmosphäre einer Supererde stärker mit Gasen angereichert. Auf der anderen Seite können wegen der stärkeren Gravitation Atmosphärenbestandteile noch schwerer entweichen, so dass die Atmosphäre auf einer Supererde deutlich dichter sein könnte. Ein hoher Anteil an Treibhausgasen könnte überdies Temperaturen generieren, welche flüssiges Wasser ausschließen.

Vieles von dem hier Dargestellten beruht auf gut begründeten Spekulationen. Doch erst wenn ausreichend viele Messergebnisse über mögliche Eigenschaften und Zusammensetzungen von Atmosphären der Supererden vorliegen, können eindeutigere Aussagen getroffen werden. Dies wird mit der zunehmenden Verbesserung der Messtechnik wohl auch erreicht werden. Das Kepler-Weltraumobservatorium hat während seiner Mission von 2009 bis 2013 knapp 700 Supererden entdeckt, von denen 50 Prozent als potentiell lebensfreundlich gelten.

Bei der Frage, wie erdähnlich ein Extrasolarer Planet ist, hilft natürlich nur der direkte Vergleich mit der Erde. Aus diesem Grunde wurde der Erdähnlichkeitsindex (Earth Similarity Index, kurz ESI) eingeführt. Bei diesem Index geht es vor allem um die Frage, wie wahrscheinlich die Entstehung von Leben auf diesem Planeten ist oder ob die Entstehung von Leben möglicherweise bereits stattgefunden hat. Erfasst werden hierfür unter anderem Größen wie Massen, Radien und Oberflächentemperaturen sowie das Vorhandensein von Flüssigkeiten und eines festen Gesteinskerns. Der Index kann Werte zwischen 0 bis 1 annehmen. Hierbei bedeutet der Index 1 zu 100 Prozent erdähnlich. In diesem Fall hätten wir einen extrasolaren Erdzwilling vorliegen. In diesem Schema wäre der Planet Mars mit einem Index von 0,7 am erdähnlichsten im Sonnensystem. Die Venus, vergleichbar in Masse und Größe mit der Erde, kommt wegen ihrer hohen Oberflächentemperatur von rund 480°C auf einen Index von 0,44.

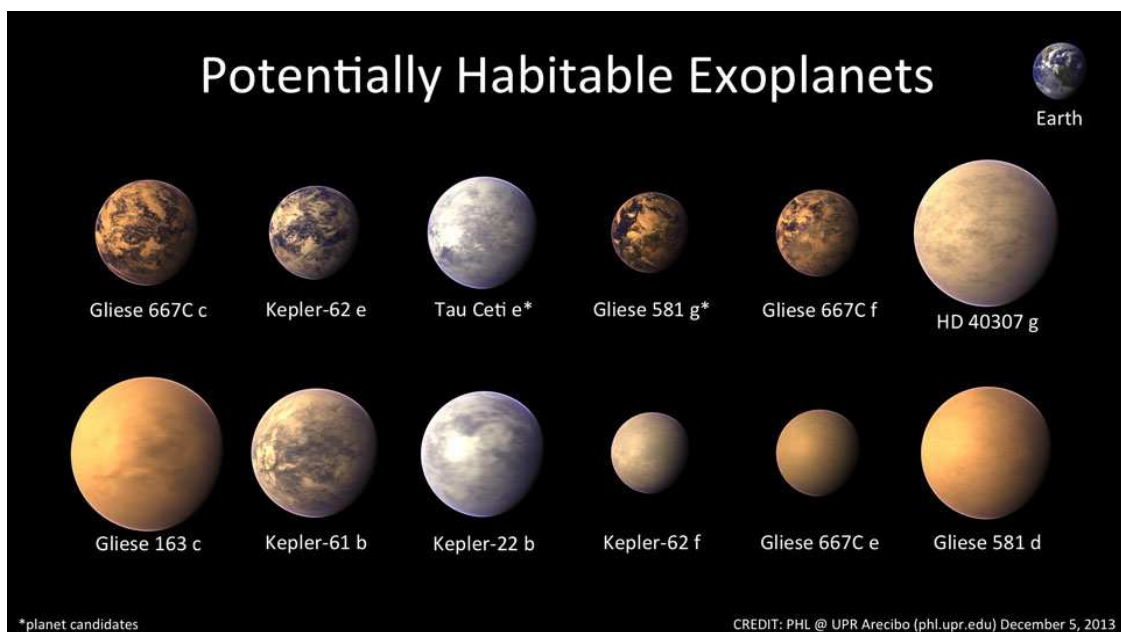


Bild 7: Extrasolare Planeten in einer habitablen Zonen um ihren Stern

5.2 Heiße Jupiter

Der erste entdeckte Extrasolare Planet 51 Pegasi b hat etwa 150 Erdmassen bzw. 0,46 Jupitermassen. Für einen Umlauf um seinen Zentralstern benötigt er etwa vier Tage. Daraus resultiert eine Entfernung zwischen 51 Pegasi b und seinem Zentralstern 51 Pegasi von nur 7,5 Millionen Kilometern bzw. 0,05 AE. Zum Vergleich: Der sonnennächste Planet im Sonnensystem, Merkur, hat eine mittlere Entfernung von 56 Millionen Kilometer bzw. 0,40 AE zur Sonne.

Aufgrund seiner großen Nähe zum Stern dürfte 51 Pegasi b eine Oberflächentemperatur von knapp 1.000°C haben. Wenn es ein Gesteinsplanet wäre, dürfte dieser kaum über eine Atmosphäre verfügen. Der Druck auf der Planetenoberfläche wäre extrem niedrig, so dass bei der gegebenen Temperatur das planetare Eisen schmelzen und auf der Nachtseite des Planeten glühendes Eisen wieder herabregnen würde. Aufgrund der großen Nähe zum Stern ist 51 Pegasi b starken Gezeitenkräften ausgesetzt, so dass dieser Planet seinem Zentralstern immer die gleiche Seite zuwendet.

Nach mehrheitlicher Auffassung ist 51 Pegasi b jedoch kein Gesteinsplanet, sondern ein Gasriese wie der Jupiter im Sonnensystem. Dies lässt sich aus seiner Masse schließen. Die derzeit plausibelste Annahme ist, dass zunächst ein Gesteinskern mit mehreren Erdmassen entstanden ist, welcher große Mengen an flüchtigen Gasen, hauptsächlich Wasserstoff und Helium, akkretiert hat. Dies setzt voraus, dass dieser Planet zunächst im äußeren Bereich der extrasolaren proto-planetaren Scheibe entstanden ist. Durch die Wechselwirkung mit dem Restmaterial dieser Scheibe diffundierte der Gasplanet nach innen, in große Nähe zum Zentralstern. Dieser Vorgang wird als Planeten-Migration bezeichnet und soll auch in unserem Sonnensystem stattgefunden haben. Nach einer alternativen Theorie kam es zu Wechselwirkungen unter den großen Gasplaneten selbst, so dass einige von ihnen in Sternnähe gerieten. Allerdings hat diese Theorie Schwächen. So könnte es auch zu Zusammenstößen zwischen den einzelnen astrophysikalischen Objekten kommen, daher wird die Migrationsthese favorisiert.

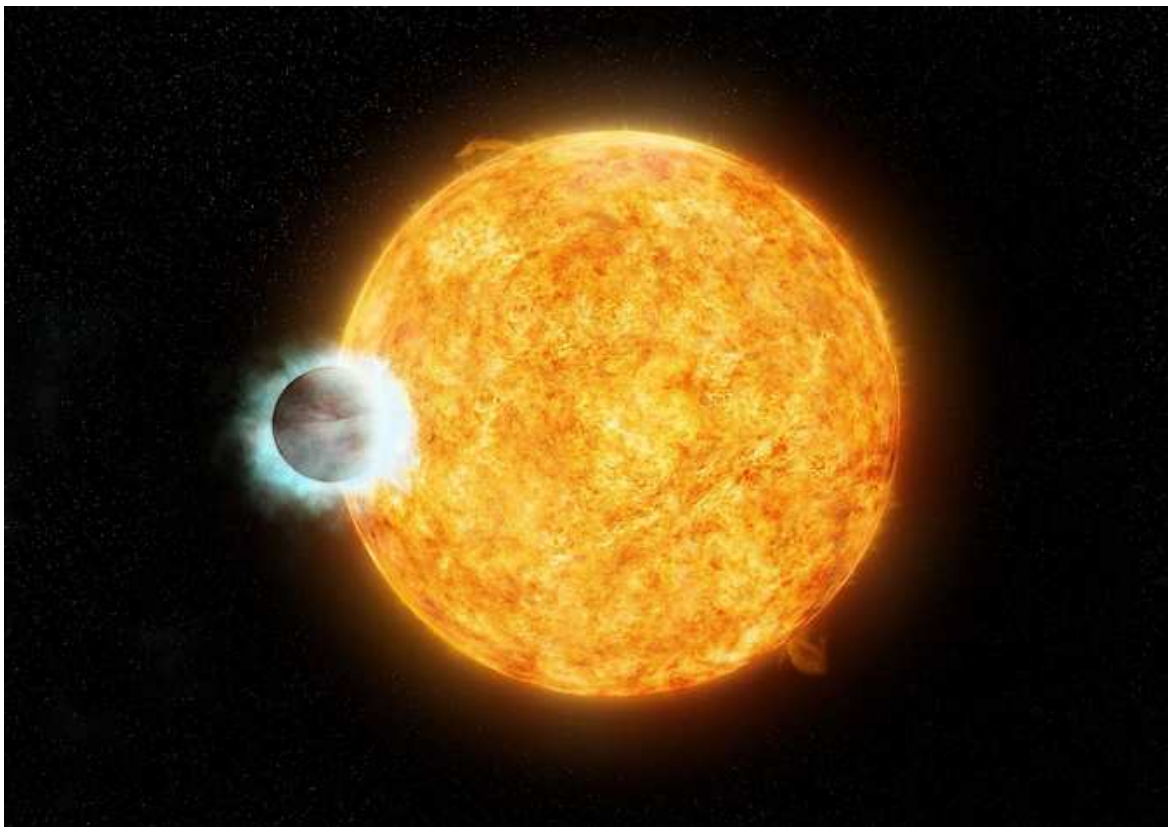


Bild 8: Darstellung eines Hot Jupiters / Quelle: NASA

Ein jovianischer (jupiterähnlicher) Extrasolarer Planet in extremer Nähe zum Stern wird als „Heißer Jupiter“ bzw. als „Hot Jupiter“ bezeichnet. Ein entsprechender Planet verfügt über hohe Temperaturen und dürfte aufgrund der starken Gezeitenwirkung durch den nahen Zentralstern auch stark verformt sein. Die grundlegenden Eigenschaften lassen sich sowohl theoretisch als auch aufgrund der Beobachtung ableiten:

- Aufgrund der relativ großen Masse bzw. des großen Durchmessers und der extrem engen Umlaufbahn um den Zentralstern lassen sich „Heiße Jupiter“ von der Erde aus mit der Transitmethode am wahrscheinlichsten nachweisen als dies bei Extrasolaren Planeten mit kleineren Massen oder größeren Bahnradien der Fall ist.
- Im Vergleich zu anderen Extrasolaren Planeten lassen sich „Hot Jupiters“ mit der Radialgeschwindigkeitsmethode am besten nachweisen. Aufgrund der relativ großen Masse und der engen Umlaufbahn des Hot Jupiters ist die Oszillation des Muttersterns um den gemeinsamen Schwerpunkt am stärksten ausgeprägt und kann daher am leichtesten gemessen werden.
- Einige Heiße Jupiter umlaufen ihren Zentralstern in einem Abstand von nur einem Sternradius. Dadurch kommt es zu starken Wechselwirkungen zwischen dem Heißen Jupiter und seinem Zentralstern. Die Heißen Jupiter bewegen sich dann durch die äußeren Schichten der Sternatmosphäre und sind dadurch in eine ausgedehnte Gaswolke gehüllt. Vom Stern aus wird sogenannter Sternwind, eine Teilchenstrahlung ausgesandt. Sie besteht hauptsächlich aus positiv geladenen Wasserstoff- und Heliumkernen. Dabei wird Energie auf die Atmosphäre des Heißen Jupiters übertragen, so dass sie sich stark erhitzt. In Folge der Erhitzung kann die Atmosphäre das Gravitationsfeld des Extrasolaren Planeten überwinden und sich in den Weltraum verflüchtigen.
- Die Massen eines Heißen Jupiters übersteigen selten die zweifache Jupitermasse, was einer Grenzmasse von etwa 636 Erdmassen entspricht. Für einen Umlauf um ihren Zentralstern benötigen Heiße Jupiter zwischen etwa einem Tag und fünf Tagen.
- Aufgrund der großen Nähe zum Zentralstern und des starken Einfalls von Sternstrahlung dürften Heiße Jupiter nur eine geringe Dichte haben.
- Heiße Jupiter unterliegen einer starken Gezeitenwirkung durch ihren Zentralstern. Daher drehen diese Planeten ihrem Zentralstern immer dieselbe Seite zu. Damit dauert die Rotation eines Heißen Jupiters genauso lange wie sein Umlauf um den Zentralstern.

Neben den Heißen Jupitern gibt es auch sogenannte Heiße Neptuns bzw. Hot Neptunes. Hierbei handelt es sich dann um Eisplaneten als Unterklasse der Gasplaneten, wie es im Falle des Sonnensystems die Planeten Uranus und Neptun sind. Bei den Heißen Neptuns verhält es sich analog wie bei den Heißen Jupitern.

5.3 Die Monde der Extrasolaren Planeten

Wenn das Sonnensystem als Referenz verwendet wird, dann dürften auch Extrasolare Planeten über Monde bzw. Trabanten verfügen. Es ist sogar sehr plausible anzunehmen, dass Extrasolare Planeten über Monde verfügen. Allerdings konnte bisher kein extrasolarer Mond nachgewiesen werden. Denn die extrasolaren Monde leuchten deutlich schwächer als ihre extrasolaren Mutterplaneten und sind daher noch viel schwieriger nachzuweisen. Noch ist die Messtechnik nicht empfindlich genug, um extrasolare Monde nachzuweisen. Allerdings wird theoretisch von folgenden Klassen der extrasolaren Monde ausgegangen:

- **Heiße extrasolaren Monde:** Diese Monde sind gravitativ an einen Extrasolaren Planeten gebunden, welcher sich sehr nahe an dem zugehörigen Zentralstern befindet. Die durchschnittliche Temperatur auf dem Mond dürfte daher über dem Siedepunkt von Wasser liegen. Damit käme ein solcher Mond auch nicht für Leben in Frage.
- **Bewohnbare extrasolaren Monde:** Diese sind gravitativ an einen extrasolaren Planeten gebunden, welcher sich um eine habitablen Zone um den Zentralstern bewegt. Entsprechend liegt auch die Bahn des extrasolaren Mondes in dieser habitablen Zone. In diesem Fall kann

auf dem Mond flüssiges Wasser existieren. Allerdings ist hierfür eine geeignete Atmosphäre mit einem ausreichend hohen Druck erforderlich. Dies setzt wiederum eine entsprechende Masse des Mondes voraus, damit diese Atmosphäre gravitativ an diesen Mond gebunden bleibt. Unter diesen Rahmenbedingungen könnte Leben entstehen oder existieren.

- **Schneeball-extrasolare Monde:** Diese sind gravitativ an einen Extrasolaren Planeten gebunden, welcher sich am Rande des extrasolaren Planetensystems um den Zentralstern bewegt. Diese Monde dürften vergleichbar wie die entsprechenden Jupitermonde von einer dichten Eisschicht überzogen sein. Durch die Gezeitenwirkung des extrasolaren Mutterplaneten könnten sich die inneren Schichten des Mondes erwärmen und unter dessen Eisschicht daher flüssiges Wasser existieren. Trotzdem dürften diese Monde für Leben eher nicht geeignet sein.
- **Veränderliche extrasolare Monde:** Diese Trabanten haben eine große elliptische Umlaufbahn um ihren Mutterplaneten, so dass sich ihr Abstand zum Planeten im Verlauf eines Umlaufs verändert. Während des Großteils ihrer langen Umlaufzeit könnten derartige Monde habitabel sein. Wenn ihre Entfernung zum Zentralstern dabei allerdings zu groß oder zu klein wird, dann scheiden sie als Orte für mögliches Leben aus.

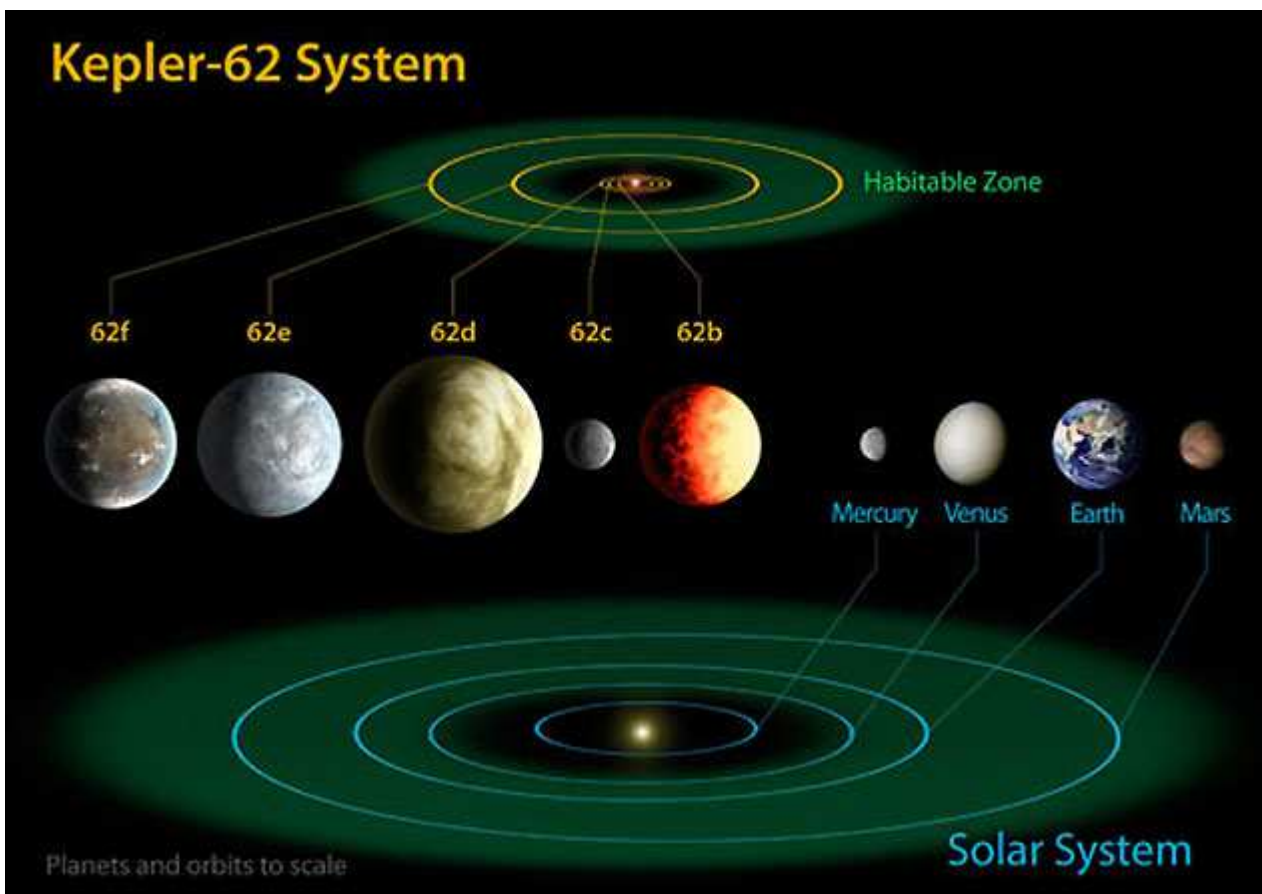


Bild 9: Das Kepler-62-System im Vergleich zum Sonnensystem / Quelle: NASA /JPL

6 Mögliches Leben auf Extrasolaren Planeten

Leben benötigt geeignete Rahmenbedingungen für seine Existenz und Entwicklung. Eine wichtige Voraussetzung ist also die Existenz eines Extrasolaren Planeten oder Mondes. Wenn die Rahmenbedingungen stimmen, könnte wie auf der Erde auch auf einem extrasolaren Himmelskörper Leben entstehen oder entstanden sein. Mit dieser Thematik beschäftigt sich die Astrobiologie. Es geht hierbei einmal um die Frage, was Leben überhaupt ist und in welchen Erscheinungsformen es auftreten kann. Zu anderen geht es um die Rahmenbedingungen, unter welchen Leben entstehen und existieren kann. Dazu gehört auch die Frage, über welche Eigenschaften die Extrasolaren Planeten hierfür verfügen müssen. Zum Thema „Astrobiologie“ gibt es eine ausführliche gleichnamige Abhandlung von mir. Hier soll daher nur das Wichtigste zusammengefasst werden.

6.1 Astrobiologie

Die Astrobiologie (Astronomie + Biologie) erforscht die Möglichkeit von Leben auf Planeten und anderen astronomischen Objekten im Weltraum. Hierbei kann es sich um Objekte im Sonnensystem oder in anderen Sternensystemen handeln. Die Frage, ob prinzipiell Leben auf astronomischen Objekten möglich ist, kann bereits positiv beantwortet werden, da nachweislich Leben auf der Erde existiert. Bisher ist außerhalb des Planeten Erde jedoch noch kein Leben auf anderen Planeten bzw. anderen astronomischen Objekten nachgewiesen worden. Grundlegende Fragen der Astrobiologie sind, unter welchen Rahmenbedingungen Leben entsteht und wie wahrscheinlich diese Entstehung ist.

Als Referenz für Leben steht uns bisher nur das Leben auf der Erde zur Verfügung. Dieses ist auf Kohlenstoff aufgebaut und nutzt für seine Entwicklung Wasser als Lösungsmittel. Kohlenstoff und Wasser sind besonders geeignete Grundlagen für Leben. Leben könnte theoretisch auch auf einer anderen Grundlage beruhen, etwa Silizium. Des Weiteren könnte auch ein anderes Lösungsmittel als Wasser zur Entwicklung des Lebens dienen. Doch dürften Alternativen zu Kohlenstoff und Wasser nach dem gegenwärtigen Forschungsstand zumindest weniger gut geeignet und damit unwahrscheinlicher sein. Somit wird bei der Suche nach außerirdischen Lebensformen in erster Linie nach Leben auf Kohlenstoffbasis und nach flüssigem Wasser gesucht.

Dies führt uns zu dem Begriff der habitablen Zonen. Das ist der Abstandsbereich eines astronomischen Objekts von einem Stern, bei dem flüssiges Wasser existieren kann. Diese hängt allerdings nicht nur vom Abstand zum Stern ab, sondern auch von der Atmosphäre des astronomischen Objektes. So haben unter anderem auch der Atmosphärendruck und die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre, etwa der Anteil an Treibhausgasen, Einfluss auf den Aggregatzustand des Wassers. Auf einem astronomischen Objekt können auch lokale bzw. planetare habitable Zonen bestehen, etwa aufgrund einer inneren Wärmequelle. Darüber hinaus dürfte es auch eine galaktische habitable Zone geben. Weder zu nah am Zentrum der Galaxis noch in ihren Außenbereichen dürfte die Entwicklung von Leben wahrscheinlich sein.

Wie wahrscheinlich sind die Existenz und die Entwicklung von Leben? Diese Frage ist noch völlig offen, Gegenstand der Forschung und von Spekulationen. Vielleicht kann erst der Nachweis von Leben außerhalb der Erde darauf eine Antwort geben. Der Nachweis von möglichem Leben auf astronomischen Objekten kann auf drei Arten erfolgen. Zum Ersten durch die direkte Untersuchung von astronomischen Objekten, was den Untersuchungsbereich derzeit auf das Sonnensystem beschränkt. Zum Zweiten durch den Nachweis von bestimmten Molekülen, die als biologische Indikatoren geeignet sind. Im Falle einer kulturell-technisch entwickelten außerirdischen Zivilisation, die der Kommunikation fähig ist, kann zum Dritten nach künstlichen elektromagnetischen Signalen oder Artefakten dieser Zivilisation gesucht werden.

Wenn eine kulturell-technisch hoch entwickelte außerirdische Zivilisation besteht, könnte diese uns mit Hilfe einer entsprechend technisch entwickelten Raumfahrt besuchen oder haben derartige Besuche bereits stattgefunden? Die direkte Kommunikation zwischen der Menschheit und einer außerirdischen Zivilisation wäre wohl nur in diesem Fall möglich. In allen anderen Fällen dürfte eine direkte, zeitnahe Kommunikation ausgeschlossen sein. Denn die Kommunikation kann höchstens mit Lichtgeschwindigkeit erfolgen. Im Durchschnitt dürften außerirdische Zivilisationen, wenn sie existieren, zwischen 100 und 1.000 Lichtjahre von uns entfernt sein. Entsprechend lange würde eine Kommunikation dauern. Die Frage nach der Möglichkeit einer interstellaren Raumfahrt, etwa durch entsprechend fortschrittliche kulturell-technisch hochentwickelte außerirdische Zivilisationen, muss aus heutiger Sicht offen bleiben. Es gibt bisher keine Beweise für Besuche von kulturell-technisch hochentwickelten Zivilisationen auf der Erde.

6.2 Extrasolare Planeten und mögliches Leben

Voraussetzung für die Entstehung von Leben ist unter anderem eine geeignete Flüssigkeit als Lösungsmittel. Hierbei kommt vor allem flüssiges Wasser in Betracht. Wasser hat alle notwendigen Eigenschaften und diente auf der Erde als wichtiges Kriterium für die Entwicklung von Leben. Die Existenz von flüssigem Wasser setzt entsprechende Rahmenbedingungen voraus: Eine geeignete Atmosphäre und Größe des Himmelskörpers sowie die hierfür notwendigen Temperaturen. Der Aggregatzustand von Wasser hängt vom Druck und von der Temperatur ab. Die Atmosphäre eines Himmelskörpers muss daher eine entsprechende Dichte haben, um einen geeigneten Druck aufzubauen. Dies setzt auch eine angemessene Größe bzw. Masse des astronomischen Objekts voraus, damit eine entsprechende Atmosphäre mit geeigneter Dichte stabil existieren kann. Der notwendige Massenbereich für einen entsprechenden Planeten dürfte zwischen 0,8 und 2 Erdmassen liegen. Unter einem Massenbereich von 0,8 Erdmassen dürfte sich keine stabile, ausreichend dichte Atmosphäre herausbilden können. Bei einer Masse von über zwei Erdmassen dürfte die planetare Schwerkraft so stark werden, dass mögliche Kontinente sich nicht über die Oberfläche eines Ozeans erheben könnten.

Die Temperatur auf der Oberfläche des Himmelskörpers hängt zum Einen von seiner Atmosphäre und zum Anderen von seiner Entfernung zu einem Stern ab. Der Abstandsbereich von einem Stern, in dem flüssiges Wasser existieren kann, wird solare bzw. stellare habitable Zone genannt. In unserem Sonnensystem liegt der Bereich derzeit zwischen 0,9 Astronomische Einheiten (AE) und 1,2 AE. Nur die Erde bewegt sich in diesem Bereich um die Sonne.

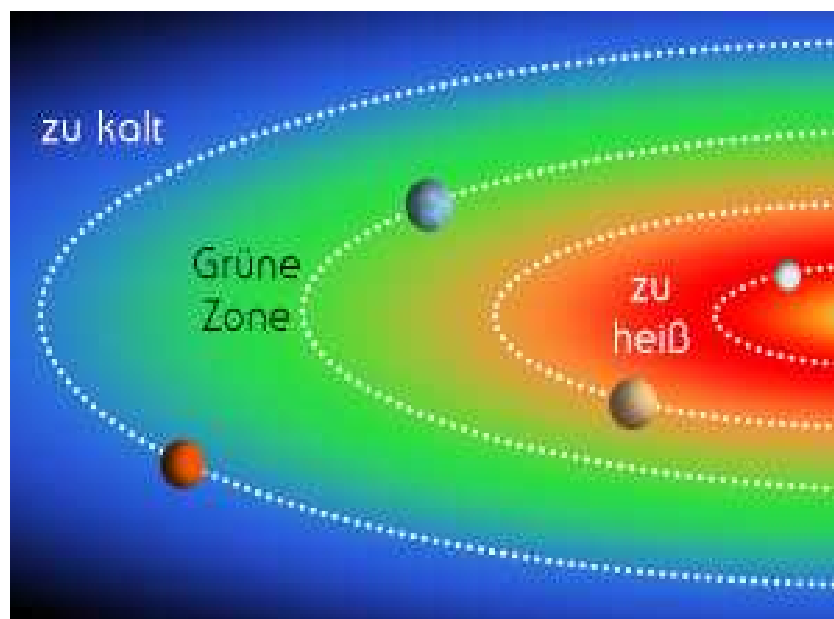


Bild 10: Die habitable Zone um einen Stern / <https://astrokramkiste.de/ptolemaeus/38-planetologie>

Außerhalb dieser habitablen Zone kann es auf Himmelskörpern noch lokale bzw. planetare habitable Zonen geben. So können Drücke oder eine innere Wärmequelle eines Himmelskörpers lokale habitable Zonen erzeugen, in denen flüssiges Wasser existieren kann. Die habitable Zone in unserem Sonnensystem oder in einem anderen Sternensystem hängt von den Eigenschaften des dem System zugehörigen Sterns ab. Allerdings ist die Größe auch dann keine Konstante, da der Stern eine zeitliche Entwicklung durchmacht. Die Leuchtkraft eines Sterns erhöht sich im Laufe seiner Entwicklung. Damit verschiebt sich auch die habitable Zone weiter nach außen. Unsere Sonne wird am Ende ihres Hauptreihenstadiums, das ist der Bereich, in dem ein Stern seine Energie ausschließlich durch die Fusion von Wasserstoff zu Helium erzeugt, eine etwa doppelt so große Leuchtkraft haben wie heute. Aufgrund dieser Entwicklung dürfte der habitable Bereich des Sonnensystems immer enger werden, bis es in zirka 1 – 2 Milliarden Jahren keinen mehr geben wird. D.h. neben einer räumlichen habitablen Zone gibt es auch einen begrenzten habitablen Zeitbereich. Die Entwicklung von Leben erfolgt also in einer begrenzten räumlichen und zeitlichen habitablen Zone. Dies setzt einen geeigneten Stern voraus, der möglichst lange und stabil auf der Hauptreihe verweilt. Sterne werden nach ihrer Farbe bzw. ihrer Oberflächentemperatur und dem Aussehen ihres Spektrums in Spektralklassen eingeteilt. Diese werden mit Buchstaben gekennzeichnet. Die wichtigsten Spektralklassen sind: O, B, A, F, G, K, und M.



Bild 11: Die Spektralklassen / <http://www.gym-vaterstetten.de/faecher/astro/Sterne/Sterne.HTM>

Die Leuchtkraft eines Sterns hängt von seiner Masse ab. Je mehr Masse ein Stern hat, desto größer ist seine Energieproduktion und desto kleiner ist seine Lebenszeit bzw. Verweilzeit als Hauptreihenstern. Die Spektralklassen sind von O bis M nach abnehmender Masse und Temperatur der Sterne geordnet. O-Sterne sind bläuliche Sterne mit Oberflächentemperaturen von 30.000 bis 50.000 Kelvin (K) und haben typischer Weise 60 Sonnenmassen. M-Sterne hingegen sind rötliche Sterne mit Oberflächentemperaturen von 2.000 bis 3.350 K und haben typischer Weise 0,3 Sonnenmassen. Unsere Sonne gehört dem Spektraltyp G an und hat eine Oberflächentemperatur von 5.500 K. O-Sterne haben eine Lebensdauer von mehreren Millionen Jahren, während die der M-Sterne bis zu 100 Milliarden Jahre beträgt. G-Sterne wie unsere Sonne haben eine Lebensdauer von rund 10 Milliarden Jahren. Damit sich habitable Zonen mit ausreichender Lebensdauer herausbilden können, kommen daher vor allem G-, K- und M-Sterne in Frage. Das begrenzt die

obere Massengrenze von geeigneten Sternen auf rund zwei Sonnenmassen. F-Sterne fallen daher bereits heraus, da ihre Verweilzeit auf der Hauptreihe weniger als eine Milliarde Jahre beträgt. M-Sterne kommen zwar am häufigsten vor, doch rückt die habitable Zone aufgrund ihrer geringen Leuchtkraft in die Nähe des Sterns. In Sternnähe dürften die Wechselwirkungen zwischen Himmelskörper und Stern, etwa durch mögliche Sternausbrüche (z.B. Flareausbrüche) oder Gezeitenkräfte, zu stark sein und die Entwicklung von Leben behindern. Daher dürften bevorzugt Sterne mit einem Spektraltyp zwischen F und K für die Herausbildung von geeigneten habitablen Zonen in Frage kommen.

Auf der Ebene der Galaxis, welche etwa 300 Milliarden Sterne hat, dürfte ebenfalls eine habitable Zone bestehen. Zu nah am galaktischen Zentrum ist die Sterndichte höher und es kommt häufiger zu Supernovae. Dies dürfte sich negativ auf die mögliche Entwicklung von Leben auswirken. Zu weit vom galaktischen Zentrum entfernt ist der Gehalt an Elementen schwerer als Helium (in der Astrophysik Metalle genannt) zu gering. Damit können sich keine festen Himmelskörper bilden. Des Weiteren fehlen damit auch die Basisstoffe für die Entstehung und Entwicklung von Leben, etwa Kohlenstoff und Wasser.

Eine weitere Voraussetzung für die Entstehung von Leben dürften Einzel-Sterne sein, damit sich stabile Planetenbahnen herausbilden können. In der Regel entstehen aus einer kollabierenden kalten Wolke aus Wasserstoffgas jedoch mehrere Sterne, welche dann Bestandteile von Zweifach- und Mehrfachsystemen sind. Die Sonne als Einzelstern ist daher nicht der Regelfall.

In unserer Galaxis gibt es etwa 300 Milliarden Sterne. Von diesen sind etwa 15 Prozent Einzelsterne. In einem geeigneten Massenbereich befinden sich etwa 5 Prozent der Sterne der Galaxis. Etwa 10 Prozent der Sterne befinden sich stabil in der galaktischen habitablen Zone. Aus diesen Zahlenwerten, welche allerdings mit Unsicherheiten behaftet sind, lässt sich die Gesamtzahl der für die Entstehung und Entwicklung von Leben geeigneten Sterne abschätzen: Es sind 0,075 Prozent der Sterne der Galaxis, was rund 225 Millionen Sternen entspricht.

Allerdings sagt diese Zahl noch nichts über die mögliche Anzahl von Planeten aus, auf denen Leben entstanden sein könnte. Denn es muss auch ein hierfür geeigneter Planet vorhanden sein und nicht jeder geeignete Stern dürfte über einen für Leben geeigneten Planeten verfügen. Neben dem bereits oben beschriebenen geeigneten Massenbereich eines Planeten zwischen 0,8 und 2 Erdmassen dürften weitere Eigenschaften notwendig sein, damit der Planet Leben tragen kann. So sollte er sich in einem geeigneten Abstand zum Stern befinden und über eine Plattentektonik verfügen. Des Weiteren dürfte Radioaktivität und ein flüssiger Planetenkern eine weitere wichtige Voraussetzung sein, damit sich ein planetarisches Magnetfeld aufbauen kann. Dieses schützt mögliches Leben auf den Planeten vor der zerstörerischen Kosmischen Strahlung. Ohne diesen Schutz kann Leben auf der Oberfläche des Planeten nicht existieren. Die Stabilität der Rotationsachse des Planeten ist ebenfalls eine wichtige Voraussetzung für eine ungestörte Entwicklung von möglichem Leben. Diese Stabilität wird in der Regel durch einen großen planetaren Mond gewährleistet. Doch auch der Schutz vor Impakten ist für die Entwicklung von Leben nicht außer acht zu lassen. Dieser Schutz kann durch jupiterartige Planeten im Außenbereich eines Planetensystems gewährleistet werden. Die großen, massereichen Planeten lenken mögliche Impaktkörper von den inneren, möglicherweise Leben tragenden Planeten durch ihre Gravitationswirkung ab.

Die für Leben notwendigen Eigenschaften der Planeten dürften die Anzahl von möglicherweise Leben tragenden astronomischen Objekten in der Galaxis noch einmal deutlich verringern. Allerdings sind hier Abschätzungen über die mögliche Anzahl von für Leben geeigneten Planeten noch nicht möglich, da wir hier erst am Anfang der Forschung stehen. Jedoch zeigt sich, wie komplex die Voraussetzungen für mögliche planetare, stellare und galaktische habitable Zonen sind.

7 Schlusswort

Diese Abhandlung über Extrasolare Planeten stellt eine Literaturrecherche dar. Die hierfür verwendete Literatur ist im Literaturverzeichnis angegeben und eignet sich auch für die weitere Vertiefung der Thematik. In der „Enzyklopädie der extrasolaren Planeten“ unter „exoplanet.eu“ finden sich ausführliche Informationen zu den Extrasolaren Planeten. Unter anderem auch eine Liste mit allen bisher entdeckten Extrasolaren Planeten und ihren Daten. Des Weiteren findet sich dort eine umfangreiche Bibliografie der erscheinenden Publikationen zum Thema.

Heute wissen wir, dass die Existenz von Extrasolaren Planeten normal ist und daher die Existenz unseres Sonnensystems keine Ausnahme darstellt. Damit dürften wir auch einen Schritt weiter in der Annahme sein, dass auch die Entstehung und Entwicklung von Leben auf anderen Planeten ein gewöhnlicher Vorgang ist. Doch noch sind viele Fragen offen. Grundsätzlich ist klar, dass die Entstehung von Planeten ein Nebenprodukt der Sternentstehung sein dürfte. Unklar ist jedoch, warum es so große Unterschiede zwischen dem solaren Planetensystem und vielen extrasolaren Planetensystemen gibt. Zum Teil beruhen diese Unterschiede auf Auswahlwirkungen, da mit unserer Messtechnik bestimmte Systemarten bevorzugt entdeckt werden. Dennoch bleiben auch bedeutende Unterschiede bestehen. So nehmen die sogenannten Supererden einen bedeutenden Anteil an den Extrasolaren Planeten ein, welche Massen in einem Bereich von einer Erdmasse bis vierzehn Erdmassen haben. Vergleichbare Planeten fehlen im Sonnensystem. Alle Planeten im Sonnensystem sind relativ weit von der Sonne entfernt. Sie bewegen sich hierbei in regelmäßigen Abständen auf annähernd kreisförmigen Bahnen, welche sich alle weitgehend in einer Ebene befinden, um die Sonne. Im Falle der Extrasolaren Planeten gibt es Systeme mit extremen Bahnellipsen und Bahnneigungen. Nicht wenige der Extrasolaren Planeten befinden sich viel näher am Stern als der Merkur der Sonne und bewegen sich in wenigen Tagen um den Stern, so auch die heißen Jupiter. Entstanden sein müssen diese Planeten allerdings in relativ großer Entfernung zum Stern. Es bleiben zurzeit viele Fragen noch offen. Die Beobachtungs- und Nachweistechnologie entwickelt sich ständig weiter, so dass auch immer kleinere und erdähnlichere Planeten nachgewiesen werden. Selbst mögliche Atmosphären dieser Planeten können bei einem Transit vor ihrem Stern untersucht werden. Dabei kann auch nach sogenannten Biomarkern gesucht werden, welche auf Leben hindeuten können. Überhaupt hängt das letzte große Rätsel der Menschheit an der Erforschung der Extrasolaren Planeten, nämlich die Frage ob wir allein sind. Die nächste Generation an erdgebundenen Riesenteleskopen und modernsten Weltraumteleskopen befindet sich bereits in der Entwicklung oder sogar im Bau. Mit dieser Beobachtungstechnologie wird sich der Horizont beträchtlich erweitern.

Im Bereich der Amateur-Astronomie ist ein Nachweis von Extrasolaren Planeten und ihre direkte Beobachtung ausgeschlossen. Dennoch kann auch mit der modernsten Beobachtungstechnik aus dem Amateurbereich ein Beitrag zur Erforschung der Extrasolaren Planeten geleistet werden, indem die Helligkeitsschwankungen von Sternen beobachtet werden. Zur Planung und Auswertung der eigenen Beobachtungen sei die „Exoplanet Transit Database“ („ETB“) unter <http://var2.astro.cz/ETB/> empfohlen.

Diese Abhandlung wäre ohne die Mitwirkung von Freunden und Kollegen nicht möglich gewesen. Ein besonderer Dank gilt auch demjenigen, der diese Abhandlung Korrektur gelesen hat. Doch auch meinen treuen Leserinnen und Lesern möchte ich sehr danken.

8 Literatur- und Bilderverzeichnis

Folgende Literatur fand bei der Erstellung dieser Abhandlung Verwendung und kann zur Vertiefung der Thematik empfohlen werden:

- 1) Bernhard Mackowiak; Die Erforschung der Exoplaneten; 2015.
- 2) Mathias Scholz; Astrobiologie; 2015.
- 3) Mathias Scholz; Planetologie extrasolarer Planeten; 2013.
- 4) Arnold Hanslmeier; Einführung in die Astronomie und Astrophysik; 2013.
- 5) Kevin W. Plaxco, Michael Groß; Astrobiologie für Einsteiger; 2012.

Bilderverzeichnis:

Titelbild: [Künstlerische Darstellung: Europäische Südsternwarte \(ESO\) / M. Kornmesser](#)

Bild 1: NASA / JPL

Bild 2: <http://www.mgvoss.de>

Bild 3: NASA / JPL

Bild 4: <http://www.mgvoss.de>

Bild 5: Europäische Südsternwarte (ESO)

Bild 6: www.wikipedia.org

Bild 7: <http://www.starobserver.org/>

Bild 8: NASA

Bild 9: NASA / JPL

Bild 10: <https://astrokramkiste.de/ptolemaeus/38-planetologie>

Bild 11: <http://www.gym-vaterstetten.de/faecher/astro/Sterne/Sterne.HTM>