

Habitable Zonen



Peter Stiller

15.02.2010

Inhaltsverzeichnis

1 Die habitable Zone	3
1.1 Einflüsse des Zentralsterns auf die Habitabilität	3
1.1.1 Abstand des Planeten vom Zentralstern	3
1.1.2 Entwicklungszustand und Masse des Zentralsterns	3
1.1.3 Metallizität	6
1.2 Wichtige Eigenschaften des Planeten	6
1.2.1 Gravitation	6
1.2.2 Planetendichte	6
1.2.3 Plattentektonik und Kohlenstoffkreislauf	7
1.2.4 Magnetfeld	7
1.2.5 Bahnstabilität	7
1.2.6 Einflüsse der Geodynamik	7
2 Galaktische habitable Zonen (GHZ)	9
3 Habitabilität in unserem Sonnensystem	10
3.1 Die Sonne	10
3.2 Unsere Erde	11
3.3 Die weiteren Planeten und ihr Einflüsse auf die Erde	12
4 47 Ursae Majoris	13
4.1 Eigenschaften	13
4.2 Habitabilität	13
5 Erforschung extrasolarer Sternsysteme und Planeten	16
5.1 Doppler-Spektroskopie	16
5.2 Transitmethode - COROT-Mission	17
5.3 Microlensing - Gravitationslinsenmethode	17
5.4 Methoden zu direkten Planetenbestimmung	18

1 Die habitable Zone

Schon seit langer Zeit liegt es im Interesse des Menschen Planeten zu finden, auf denen erdähnliches, hochentwickeltes Leben möglich ist. Durch immer neue Nachweis- und Beobachtungsmöglichkeiten wurden in den letzten Jahren viele neue Sternsysteme und Planeten entdeckt. Doch wie kann man nun entscheiden, ob auf einem Planeten erdähnliches Leben möglich ist oder war? Dafür definiert man die habitable Zone, ein Bereich um einen Zentralstern in dem Planeten vorhanden sind, die hochentwickeltes Leben hervorbringen können, aber nicht müssen. Jetzt stellt sich die Frage welche Bedingungen die Entwicklung von Leben benötigt. Wichtigstes Kriterium ist das Vorhandensein von flüssigem Wasser auf der Planetenoberfläche, den jeder uns bekannte Organismus benötigt in irgendeiner Weise flüssiges Wasser. Daher hängt die habitable Zone grundlegend vom Abstand und der Leuchtkraft des Zentralsterns ab. Natürlich gibt es noch weitere Kriterien für habitable Zonen, die von den Eigenschaften des Zentralsterns und des Planeten selber abhängen. Zuerst betrachten wir nun die Einflüsse auf die habitable Zone und danach werden wir unser Sonnensystem und das Sternsystem 47 Ursae Major etwas genauer betrachten.

1.1 Einflüsse des Zentralsterns auf die Habitabilität

1.1.1 Abstand des Planeten vom Zentralstern

Wenn man von flüssigem Wasser auf der Oberfläche ausgeht, wird schnell klar, dass es eine innere und eine äußere Grenze für die habitable Zone geben muss. Ist der Planet zu nahe an seinem Zentralstern, ist die Oberflächentemperatur zu heiß und das Wasser verdampft. Ist der Planet jedoch zu weit entfernt, liegt das Wasser nur noch in gefrorener Form vor, da die Oberflächentemperatur zu niedrig ist.

Die Energie die ein Planet pro Sekunde absorbiert ist gleich der vom Planeten abgegebenen Energie (Stefan-Boltzmann):

$$\pi \cdot R_P^2 \cdot \frac{L}{4\pi \cdot D^2} = (4\pi \cdot R_P^2)(\sigma \cdot T_P^2) \quad (1.1)$$

$L = 4\pi \cdot R_S^2 \cdot \sigma \cdot T_S^4$ ist die Leuchtkraft des Zentralsterns und D der Abstand Zentralstern-Planet. Damit lassen sich mit den Grenztemperaturen (273K und 373K) erste Abgrenzungen der habitablen Zone berechnen. Dies ist natürlich nur eine sehr grobe Berechnung, denn viele Einflüsse wie Planetenbahn, Planeten- und Atmosphärenaufbau oder Zusammensetzung des Sternsystems beeinflussen die Grenzen der habitablen Zone.

1.1.2 Entwicklungszustand und Masse des Zentralsterns

Wie man sich gut vorstellen kann, benötigt es sehr lange Zeit bis sich Leben entwickeln kann. Daher muss der Planet auch lange genug in der habitablen Zone um seinen Zentralstern liegen, damit eine Entwicklung von erdähnlichem Leben möglich ist. Man sagt, dass ein Planet muss mindestens 1 Milliarde Jahre habitabel sein, um Leben hervorbringen zu können. Daher ist der Entwicklungszustand des Sterns von wichtiger Bedeutung. In sogenannten Hertzsprung-Russell-Diagrammen kann man den Entwicklungszustand eines Sterns ablesen. Abbildung 1.1 zeigt ein solches Diagramm. In diesem Diagramm ist die Temperatur und die Leuchtkraft eines Sterns aufgetragen.

1 Die habitable Zone

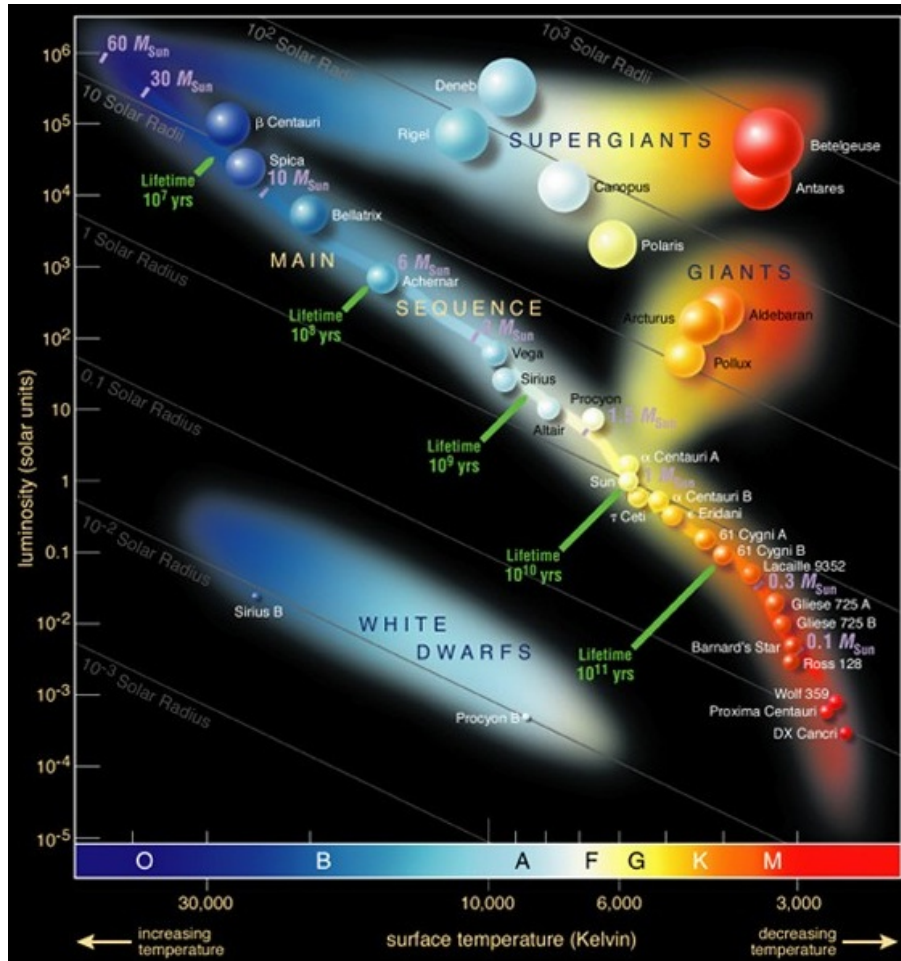


Abbildung 1.1: Hertzsprung-Russell-Diagramm mit vielen Sternen unserer Galaxis. Aufgetragen sind die Sterntemperatur und die Leuchtkraft des Sterns. Abbildung aus [8]

Die meisten Sterne auf liegen auf der sog. Main Sequence (Hauptreihe), auf der sie etwa 90 Prozent ihrer Lebensdauer verbringen. Verlässt der Stern die Hauptreihe hat der habitable Planet keine Überlebenschancen mehr, da sich die Leuchtkraft und die Größe des Sterns massiv erhöht (Er entwickelt sich zu Giants (Riesen) und Supergiants (Überriesen) weiter). Daher muss sich ein Stern lange genug auf der Hauptreihe aufhalten. Aber auch auf der Hauptreihe ist die Leuchtkraft eines Sterns nicht konstant (z. B. hat die Leuchtkraft unserer Sonne seit Entstehung um 30 Prozent zugenommen) ist, verschiebt sich die habitable Zone immer weiter nach außen (siehe Formel 1.1: Bei Erhöhung der Leuchtkraft L muss sich auch der Abstand D erhöhen).

Zu beachten ist, dass bei größerer Sternmasse die Brenndauer kürzer ist als bei masseärmeren Sternen und bei kurzen Lebensdauern die Strahlungsleistung enorm ist (bis zu 100000 mal so groß wie die unserer Sonne). Damit ist Masse und der Brennvorrat des Sterns von entscheidender Bedeutung. Aus der sog. Masse-Leuchtkraft-Beziehung

$$L \propto M^{3,5} \quad (1.2)$$

kann man die Abhängigkeit der Leuchtkraft von der Sternmasse ablesen. Mit weiteren Berechnungen erhält man für die Verweildauer eines Sterns auf der Hauptreihe die Beziehung:

1 Die habitable Zone

$$\tau_H \approx 10^{10} \text{ a} \cdot \left(\frac{M_s}{M_o} \right)^{-2,5} \quad (1.3)$$

Dabei steht der Index o für unsere Sonne und M_s für die Masse des Sterns. Aus der Formel ist ersichtlich, dass Sterne mit kleinen Massen sehr lange auf der Hauptreihe bleiben, dafür aber eine geringere Leuchtkraft haben. Schwere Sterne haben eine massive Leuchtkraft, bleiben jedoch nicht lange auf der Hauptreihe. Daraus kann man eine Einteilung der Sternmassen treffen:

- Hauptreihensterne mit $M_S > 2M_o$ verlassen die Hauptreihe bereits nach cirka 0,8 Milliarden Jahren. Dies ist zu kurz für die Entwicklung von Leben.
- Sterne mit $1,1M_o < M_S < 2,2M_o$ können eine habitable Zone länger als 0,8 Milliarden Jahren aufrecht erhalten und die Entwicklung von Leben ist möglich. Jedoch verschwindet die habitable Zone, wenn der Stern die Hauptreihe verlässt.
- Bei Masse zwischen $0,6M_o$ bis $1,1M_o$ ist die habitable Zone alleine durch den Entwicklungszustand (Geodynamik) des Planeten gegeben.
- Bei Sternen mit geringeren Massen liegt die habitable Zone sehr nahe am Zentralstern. Eine Habitabilität ist hier umstritten, da in diesen Abstandsbereichen die Rotation des Planeten an die des Zentralsterns gekoppelt ist. Daher zeigt der Planet dem Stern immer die selbe Seite, nach neuen Erkenntnissen sollte eine Habitabilität möglich sein, da die Atmosphäre einen genügenden Wärmeaustausch bereitstellen könnte.

Abbildung 1.2 zeigt die Verschiebung der habitablen Zone für verschiedene Sternmassen. Hier ist die Sternmasse auf unsere Sonne normiert und zusätzlich sind die Planeten unseres Sonnensystems eingezeichnet.

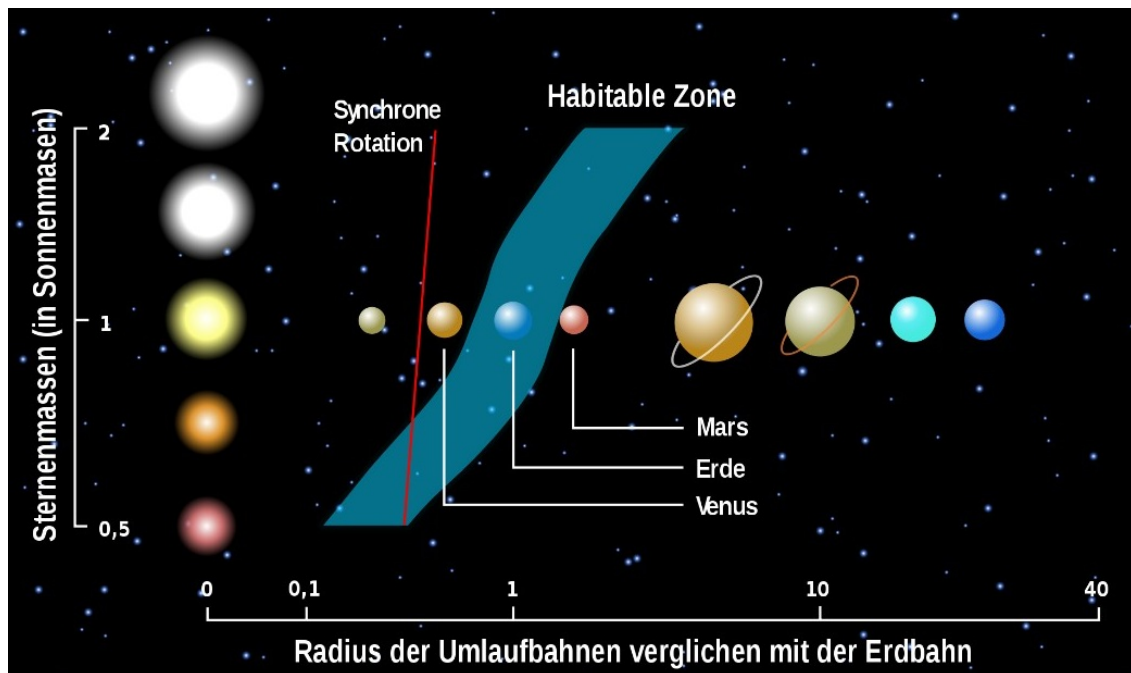


Abbildung 1.2: Vergleich von habitablen Zonen für verschieden Massen der Sterne und Abstände Planet-Stern. Die rote Linie gibt die Rotationskopplung an, hier sind die habitablen Zonen nicht unumstritten. Abbildung aus [11]

1.1.3 Metallizität

Metallizität ist einfach gesagt die Häufigkeit von schweren, chemischen Elementen in einem Stern. Als Metalle werden hier fälschlicherweise alle Elemente außer Wasserstoff und Helium bezeichnet. Die schweren Elemente sind durch Kernreaktionen in Sternen entstanden und bei deren Absterben wieder im Universum verteilt worden, deswegen hängt die Metallizität eng mit der Entstehungszeit eines Sternes zusammen. Sterne mit niedriger Metallizität sind in einem früheren Entwicklungsstadium des Universums entstanden, als noch weniger Metalle vorhanden waren. Sterne mit hoher Metallizität sind zu einem späteren Zeitpunkt, aus der mit schweren Elementen angereicherten Asche früherer Sternengenerationen, entstanden. Bei Sternen mit hoher Metallizität ist es wahrscheinlicher, dass überhaupt Planeten um sie herum entstehen. Jedoch ist bei einer erhöhten Metallizität auch die Bildung von Riesenplaneten häufiger, dadurch wird die Entwicklung kleinerer, erdähnlicher Planeten gestört. Wenn sich die Riesenplaneten weiter außen im Sternsystem bilden haben sie den positive Effekt, dass sie als eine Art Schutzschild gegen Kometen und Meteoriten wirken. Durch ihre starke Gravitation ziehen sie solche Himmelskörper an oder lenken ihre Bahn ab. Bei Metalizitäten nahe nahe dem Wert unserer Sonne (oder zumindest der halbe Wert) ist es möglich erdähnliche Planeten zu formen.

1.2 Wichtige Eigenschaften des Planeten

Um genauere Aussagen über habitable Zonen machen zu können, muss natürlich der mögliche Planet mit betrachtet werden. Über die Ausmaße der habitablen Zone entscheiden unter anderem die Reflektion der Strahlung in der Planetenatmosphäre, die Albedo der Oberfläche und die Stärke des Kohlenstoffkreislaufs. Um neue Erkenntnisse über die Habitabilität zu gewinnen, bezieht man auch die Erdsystemanalyse (System aus fester Oberfläche, Hydrosphäre, Atmosphäre und selbstregulierende Biosphäre) mit in die Berechnungen ein. Für die Erde sind diese Einflüsse bekannt und können zur Berechnung der habitablen Zone verwendet werden. Wollen wir dies auch für extrasolare Systeme tun, müssen wir als Planeten einen Erdzwilling annehmen, der ähnliche Eigenschaften wie unsere Erde besitzt. Grundlegende Eigenschaften die ein Planet benötigt, werden nun kurz erklärt.

1.2.1 Gravitation

Die Gravitation ist eine sehr wichtige Kraft, die durch Masse und Radius des Planeten bestimmt wird. Wichtig ist die Gravitation, da sie eine Atmosphäre mit lebenswichtigen Elementen halten muss. Ist die Gravitation zu klein, können dies Elemente entweichen. Aus Nachforschungen durch NASA-Missionen vermutet man die untere Grenze der Masse etwa bei 50 Prozent der Erdmasse. Bei einer oberen Grenze von etwa 5-10 Erdmassen entsteht kann eine unwirtschaftliche, dichte Wasserstoff-Helium Atmosphäre angezogen werden.

1.2.2 Planetendichte

Ein Faktot wie die Planetendichte ist nicht unbedingt offensichtlich. Wichtig wird er bei der Entdeckung neuer Planeten, den von ihnen können wir zuerst Masse und Größe bestimmen und daraus auf die Dichte des Planeten schließen. Daraus können wir, ohne den Planeten genauer beobachtet zu haben, bereits schließen ob es sich eher um einen erdähnlichen oder eher einen Gasplaneten oder einen anderen Typ handelt. Dies hat natürlich starken Einfluss auf die mögliche Habitabilität des Planeten.

Eine erste Unterteilung war die Unterscheidung von terrestrischen Gesteinsplaneten (Dichte etwa 3 bis 6 g/cm³) und Gasriesen (Dichte etwa 1 g/cm³). Dazwischen gibt es noch silikatische Planeten, wie den Erdmond, und Eisplaneten, wie den Saturnmond Enceladus.

1 Die habitable Zone

In den letzten Jahren kam man immer wieder auf die Schlussfolgerung, dass auch auf einem Eisplaneten Leben möglich sein könnte, nur nicht an der Oberfläche sondern unterirdisch. Ziel der Nachforschungen war der Saturnmond Enceladus, einem Eisplaneten mit einer Albedo von 0,99 und daher auch Temperaturen um -200 Grad Celsius. Zudem ist der kleinste bekannte Körper unseres Sonnensystems, der geologisch aktiv ist. Im Jahr 2006 teilt die NASA mit, dass es auf Grund von Aufnahmen der Sonde Cassini möglicherweise möglich ist, dass sich in Kammern unterhalb der Oberfläche Ansammlungen von flüssigem Wasser befindet. Zudem wird Enceladus von innen erwärmt und durch Analysen der Sonde Cassini konnten organische Chemikalien nachgewiesen werden. Dadaher könnte es möglich sein, dass sich Leben entwickelt.

1.2.3 Plattentektonik und Kohlenstoffkreislauf

Planeten kleiner Masse haben das Problem, dass sie nicht genügend Hitze entwickeln können um über lange Zeit Plattentektonik (hierzu wird auch flüssiges Wasser als Schmiermittel benötigt) und vulkanische Aktivität aufrecht zu erhalten. Diese beiden Tatsachen werden für die Aufrechterhaltung des Kohlenstoffkreislaufs und des Treibhauseffekts benötigt, da durch Vulkanismus das gespeicherte CO_2 wieder an die Atmosphäre abgegeben werden kann. Würde dies fehlen, sinkt der CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre, was deutlich fallende Temperaturen zur Folge haben würde.

1.2.4 Magnetfeld

Für den Schutz vor kosmischer Strahlung und anderen Aktivitäten des Zentralsterns benötigt ein Planet ein genügend starkes und stabiles Magnetfeld. Für dieses Magnetfeld benötigt der Planet jedoch einen ausreichend großen, flüssigen Metallkern. Hierfür benötigt der Planet bereits in seiner Entstehung einen ausreichenden Anteil an schweren Elementen (Metallizität des Zentralsterns).

1.2.5 Bahnstabilität

Wie vorher schon erwähnt muss die habitable Zone lange genug erhalten sein, dies bedeutet auch, dass der Planet auf seiner Umlaufbahn um den Zentralstern die habitable Zone nicht verlassen darf. Bei instabilen Bahnen ergibt sich durch eine zu starke Klimaschwankung ein Ende der Habitabilität. Die Bahnbestimmung eines möglichen habitablen Planeten ist schwierig, den oft muss man ein Mehrkörperproblem der Gravitation lösen. Zum Beispiel kann die Anwesenheit eines Riesenplanet eine stabile Bahn stark einschränken oder ganz verhindern.

Ein weiteres Kriterium, dass die Bahnstabilität beeinflusst ist die Exzentrizität, im allgemeinen sind Kreisbahnen mit ϵ nahe null am stabilsten. Bei großen Exzentrizitäten besteht eine größere Gefahr einen anderen Planeten zu kreuzen. Natürlich beeinflusst die Exzentrizität auch das Klima des Planeten. Wenn er auf seiner Bahn weiter vom Stern entfernt ist, sinken die Temperaturen. Ebenso steigen die Temperaturen wenn sich der Planet dem Stern nähert. In gewissen Maße können zum Beispiel große Wasservorkommen an der Oberfläche und deren hohe Wärmekapazität diese Effekte ausgleichen. Welche maximalen Bahnexzentrizitäten möglich sind hängt daher stark vom betrachteten Planeten ab.

1.2.6 Einflüsse der Geodynamik

Unter Berücksichtigung der Alterung des habitablen Planeten selbst ergeben sich drastische Änderungen der habitablen Zone. Die äußere Grenze ist stark von der Geodynamik (Alterungsprozess des Planeten) abhängig. Daher ist es auch bei hohem CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre nicht mehr möglich mit dem Treibhauseffekt die geringere Sonneneinstrahlung zu kompensieren. Daher wandert die äußere Grenze der habitablen Zone weiter nach innen.

An der inneren Grenze entstehen durch die Nähe zum Zentralstern höhere Temperaturen. Durch

1 Die habitable Zone

Verwitterung wird immer mehr CO_2 aus der Atmosphäre gebunden, daher herrscht schon vor $T=100$ Grad CO_2 Mangel und die Photosynthese kann nicht mehr ablaufen, daher verschiebt sich die innere Grenze langsam, aber kontinuierlich, nach außen. In beiden Fällen kann sich die Biosphäre nicht erhalten und stirbt aus. Wenn sich also beide Grenzen treffen, bedeutet dies das Ende der Habitabilität. Theoretische Berechnungen zufolge trifft dies in etwa 1,5 Milliarden Jahren für unser Sonnensystem zu. In Abbildung 1.3 ist die Entwicklung der Zonengrenzen für unser Sonnensystem angegeben.

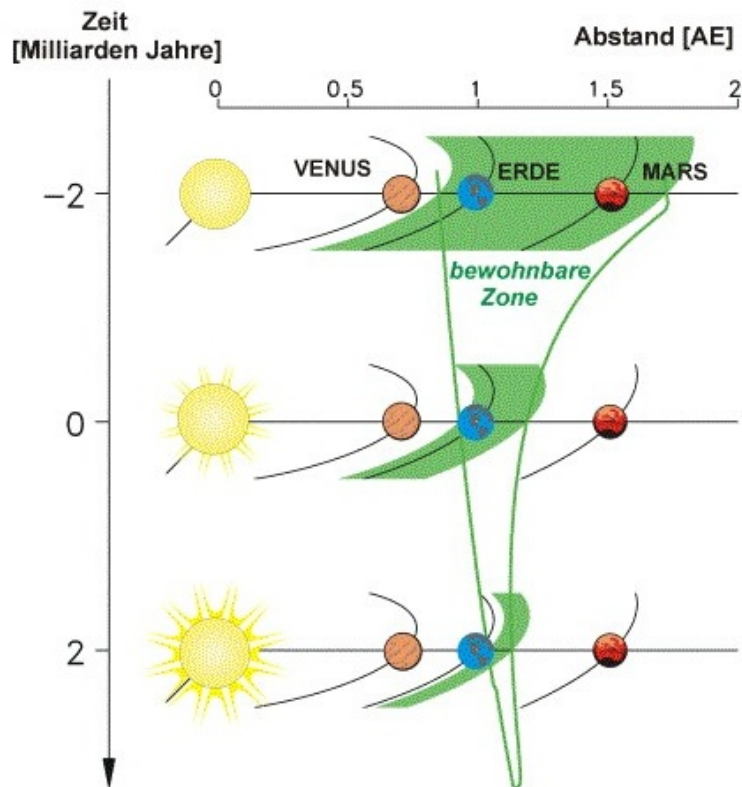


Abbildung 1.3: Zeitliche Entwicklung der habitablen Zone ins unserem Sonnensystem. Abbildung aus [2]

2 Galaktische habitable Zonen (GHZ)

Zu dem Konzept der galaktischen habitablen Zone führt die Tatsache, dass auch die Lage des Sternsystems in der Galaxie von entscheidender Bedeutung ist. Zuerst beinhaltete die GHZ nur, ob genügend schwere Elemente in der untersuchten Region der Galaxie vorhanden sind. Schwere Elemente entstehen in Inneren der Sterne durch Kernprozesse. Stirbt der Stern gibt er sie ins Universum ab. Im inneren Bereich von Galaxien laufen diese Prozesse zügiger ab, wonach man einen äußeren Radius der GHZ ziehen kann. Als weiteres Kriterium wurde die langfristige Sicherheit vor Supernovaexplosionen, die die Planetenatmosphäre stark stören und den Planeten starker kosmischer Strahlung aussetzen, eingeführt. In der Milchstraße steigt die Rate der Supernovaexplosionen, je näher man sich dem Zentrum nähert. Daraus ergibt sich eine innere Grenze der GHZ. Nach der Arbeit von Lineweaver, Fenner und Gibson beträgt die Ausdehnung der GHZ etwa 22,8 bis 29,3 Lichtjahre vom Zentrum. Nach der selben Arbeit dehnt sich die GHZ mit der Zeit aus und beinhaltet Sterne die vor etwa 4 bis 8 Billionen Jahren geformt wurden. Abbildung 2.1 zeigt unsere Galaxie, die GHZ und die Lage unseres Sonnensystems.

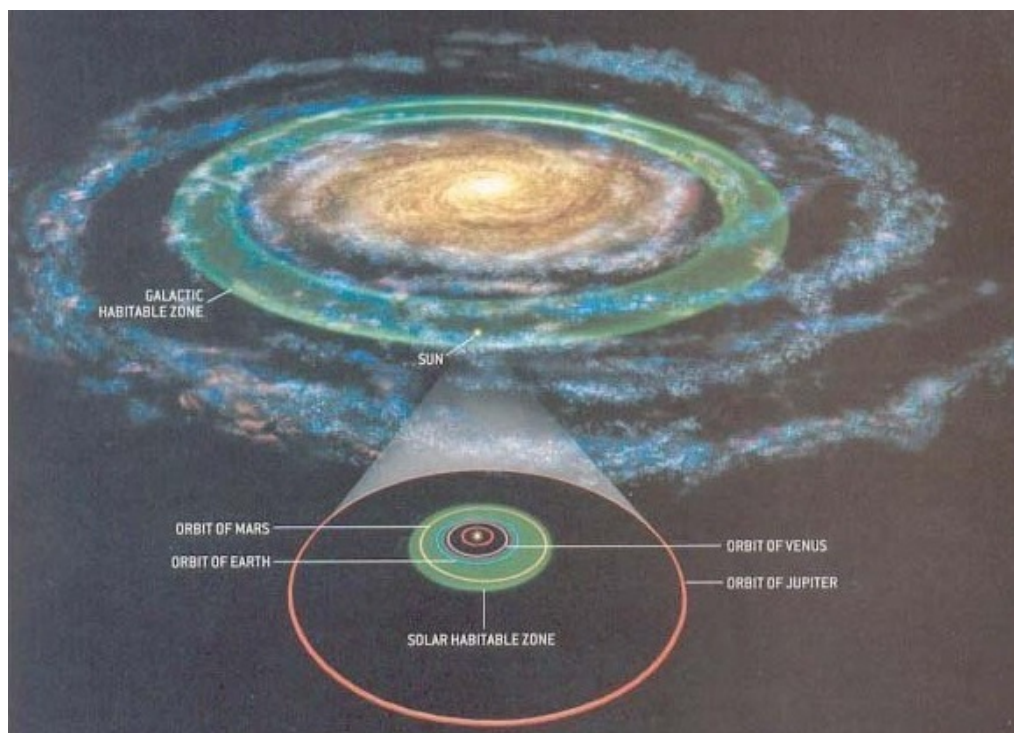


Abbildung 2.1: Unsere Galaxie mit der GHZ, zusätzlich sieht man die Lage unseres Sonnensystems.
Abbildung aus [4]

3 Habitabilität in unserem Sonnensystem

Nach den ganzen theoretischen Vorgaben die ein möglicher habitabler Planet und sein Stern erfüllen müssen, wollen wir unser Sonnensystem etwas genau betrachten und untersuchen warum sich Leben auf der Erde entwickeln konnte. Vorteile unseres Sonnensystems an sich sind:

- Die Exzentrizität der Bahn des Sonnensystems um das Zentrum unserer Galaxis ist sehr gering, daher nähert sich das System nie dem Zentrum, wo eine höhere Wahrscheinlichkeit für Supernovaexplosionen herrscht.
- Die Bahn des Sonnensystems ist nur gering gegen die galaktische Scheibe geneigt und die Zahl der Durchgänge durch die galaktische Scheibe ist gering. Dadurch kann vermieden werden, dass die Erde mit Kometen aus dem Oort-Gürtel kollidiert.
- Die Wahrscheinlichkeiten für Supernovaexplosionen wird zusätzlich dadurch verringert, dass sich die Winkelgeschwindigkeiten von Sonnensystem und dem Spiralarm, in dem wir uns befinden, kaum unterscheiden. Daher muss unsere Sonnensystem selten den Spiralarm durchqueren.

Unser Sonnensystem besteht aus der Sonnen als zentralem Stern, acht Planeten (Pluto zählt offiziell nicht mehr dazu), einige Zwergplaneten und über 100 Satelliten der Planeten. Dazu kommen noch viele kleinere Körper, wie Asteroide und Kometen. Abbildung 3.1 zeigt die Planetenkonstellation unseres Sonnensystems.

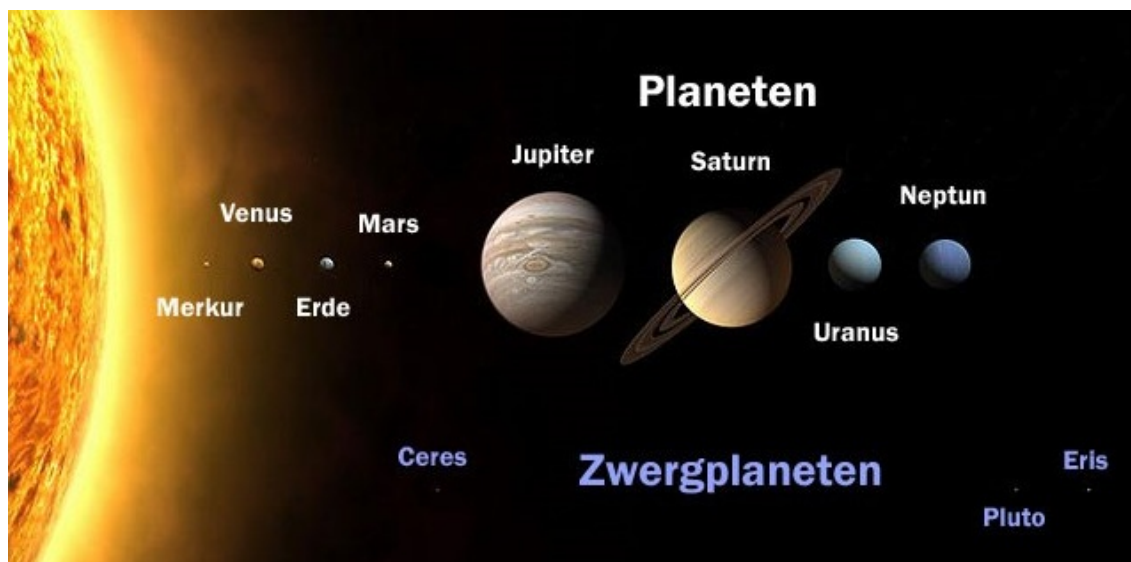


Abbildung 3.1: Übersicht über unser Sonnensystem. Abbildung aus [7]

3.1 Die Sonne

Im Gegensatz zu vielen anderen Sternensystemen ist unsere Sonne ein Einzelstern (kein Doppeltstern), dadurch sind stabilere Planetenbahnen wahrscheinlicher. Wichtig ist auch, dass die Sonne ein sehr dichter Stern ist, was eine lange Brenndauer und einen längeren Aufenthalt in der

3 Habitabilität in unserem Sonnensystem

Hauptreihe ermöglicht. Aus den vorherigen Kriterien, der Sonnenmasse und der Leuchtkraft der Sonne können wir eine erste Abschätzung der möglichen habitablen Zone in unserem Sonnensystem durchführen. Für unsere Sonne darf ein Planet nicht näher als 0,958 AE und nicht weiter als 1,004 AE von der Sonne entfernt sein (1AE = 1 Astronomische Einheit, entspricht dem mittleren Abstand Sonne-Erde). Dieser Bereich ist sehr gering, es wurden jedoch keine Planeteneigenschaften berücksichtigt. Wenn man den negativen Rückkopplungsprozesse zwischen Kohlendioxidgehalt und Oberflächentemperatur mit einbezieht, könnte sich die habitable Zone auf etwa 0,84 bis 1,77 AE ausdehnen. Der heutige Wert der habitablen Zone beträgt etwa 0,87 bis 1,2 AE, bei dieser Berechnung von 2000 wurde die Photosynthese, die für die Biosphäre lebenswichtig ist und weitere Effekte mit berücksichtigt.

3.2 Unsere Erde

Wie wir gerade gesehen haben, liegt unsere Erde in Mitten der habitablen Zone unseres Sonnensystems. Es stellt sich nun die Frage, welche Eigenschaften die Erde selbst besitzt, damit unser Leben möglich ist:

- Die Erde besitzt eine sehr stabile Umlaufbahn mit geringer Exzentrizität.
- Durch den Mond als Satelliten wird die Erdachse durch einen zusätzlichen Drehimpuls stabilisiert.
- Da 71 Prozent der Oberfläche mit Wasser bedeckt sind, kann durch die hohe Wärmekapazität eine Temperaturstabilisierung hergestellt werden.
- Die Erdkruste ist in 8 große und etwa 20 kleine tektonische Platten aufgeteilt, dadurch wird Kohlenstoffaustausch zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre erreicht und ein Gleichgewicht des CO_2 -Gehalts durch Vulkanismus hergestellt.
- Das Magnetfeld der Erde reicht aus, um uns vor solarer und kosmischer Strahlung zu schützen.

Wie vorher erwähnt, ist die Bahnexzentrizität von entscheidender Bedeutung für die Möglichkeit, dass sich Leben entwickeln kann. Am Beispiel der Erde wollen wir kurz diskutieren was bei geänderter Exzentrizität passieren würde. Theoretische Rechnungen zeigen, dass die Erde auch Leben unterstützen kann für $0,3 < e < 0,7$. Die Exzentrizität der Erde liegt bei $e=0,0167$, wäre sie etwas größer hätte das noch keinen großen Einfluss auf das Erdklima, da die Bahn noch innerhalb der habitablen Zone liegen würde. Bei einer Exzentrizität von $e=0,3$ würden sich die Erde zwischen einen Abstand von 0,7 bis 1,3 AE bewegen und die mittlere Temperatur um circa 8 Grad Celsius steigen. Ab $e=0,4$ wäre einige Kontinente bereits zu heiß und die Menschen müssten in kühlere Gebiete wandern. Bei Exzentrizitäten um $e=0,7$ würde sich die Erde im Abstand von 0,3 bis 1,7 AE um die Sonne bewegen. Würde man die Leuchtkraft der Sonne um etwa 30 Prozent verringern oder die Erdumlaufbahn vergrößern, damit die Erde den selben Lichtanteil der Sonne erhält wie aktuell, würde die Erde dennoch habitabel bleiben. Aber trotzdem würden die Temperaturen massiv ansteigen (Erie, Pennsylvania: 60 Grad Celsius im Sommer) und die Sonne würde doppelt so groß erscheinen wie jetzt, wenn sich die Erde der Umlaufbahn der Merkur nähert. Wenn sich die Erde von der Sonne wieder entfernt und in die Nähe der Marsumlaufbahn kommt, erscheint die Sonne nur noch halb so groß, jedoch wäre es möglich, dass die große Wärmekapazität der Ozeane die Temperaturen über dem Gefrierpunkt hält. Nach den theoretischen Berechnungen hält man es sogar für möglich, dass die Erde für noch größere Exzentrizitäten habitabel bleiben könnte, wenn man die Parameter verändert. Damit ist zum Beispiel eine prozentuelle Vergrößerung der Meeresoberfläche oder eine dicker Atmosphäre (wie zum Beispiel Venus) gemeint. Zu beachten ist jedoch, dass Bahnen mit höherer Exzentrizität immer mehr dazu neigen instabil zu werden.

3.3 Die weiteren Planeten und ihr Einflüsse auf die Erde

Eine der wichtigsten Eigenschaften für unsere Erde besitzt der Jupiter. Dieser Riesenplanet kreist mit einem Abstand von etwa 5,2 AE um die Sonne und wirkt durch seine starke Gravitation als Schutzschild gegen Asteroiden, die aus dem Universum in unser Sonnensystem eindringen.

4 47 Ursae Majoris

Da sich die Untersuchungsmöglichkeiten des Universums in den letzten Jahren stark verbessert haben und immer neue Sternsysteme und Planeten entdecken konnte, stellt sich die Frage, ob auch Planeten vorhanden sind auf denen erdähnliches Leben möglich ist. Es gab einige vielversprechende Kandidaten. Abbildung 4.1 zeigt ein paar Eckdaten der Sterne 51 Peg, 47 UMa und HD 210277c.

TABLE 1
STELLAR PARAMETERS

Parameters	51 Peg ^a	47 UMa ^b	HD 210277 ^c
Spectral type	G2–3 V	G1 V	G0
T_{eff} (K).....	5770	5800	5540
M_* (M_{\odot}).....	1.05	1.03	0.92
R_* (R_{\odot}).....	1.15	1.26	1.06
$r_{\text{HZ},i}$ (AU).....	1.20	1.05	1.28
$r_{\text{HZ},o}$ (AU).....	2.01	1.83	2.12
Age (Gyr).....	8.5	6.9	12

Abbildung 4.1: Einige Daten der Sterne 51 Peg, 47 UMa und HD 210277c. Abbildung aus [9]

Etwas genauer wollen wir den Stern 47 Ursae Majoris (47UMa) betrachten.

4.1 Eigenschaften

47UMa befindet sich im Sternbild Ursa Major (Gelber Kreis in Abbildung 4.2) und ist cirka 46 Lichtjahre von unserem System entfernt. Seine Masse, sein Radius und seine Leuchtkraft sind sehr ähnlich zu unserer Sonne (siehe Abbildung 4.1). Ebenso sind sich beide Sterne in Metallizität (47UMa erreicht einen Wert zwischen 82 und 102 Prozent der Sonne) und Oberflächentemperatur (47UMa: 5855K) sehr ähnlich. Das Alter des Sterns wird auf etwa 6.32(+1.2/-1.0) Billionen Jahre geschätzt.

1996 wurde ein erster jupiterähnlicher Planet um den Stern 47UMa gefunden, er wurde 47UMb genannt. Er umkreist mit 2,54 Jupitermassen, einer geringen Exzentrizität von $e=0,06\pm 0,014$ und einem Abstand von 2,09 AE seinen Zentralstern. 2002 wurde ein weiterer Riesenplanet, 47UMc, entdeckt. Er umkreist 47UMa im Abstand von 3,73 AE mit einer Exzentrizität zwischen 0 und 0,2. Weitere Riesenplaneten befinden sich nicht in der inneren Sternregion.

4.2 Habitabilität

Nimmt man einen erdähnlichen Planeten mit geeigneter Masse, Dichte und Atmosphärenzusammensetzung an, kann flüssiges Wasser zwischen 1,05 und 1,83 AE Abstand an der Oberfläche

4 47 Ursae Majoris

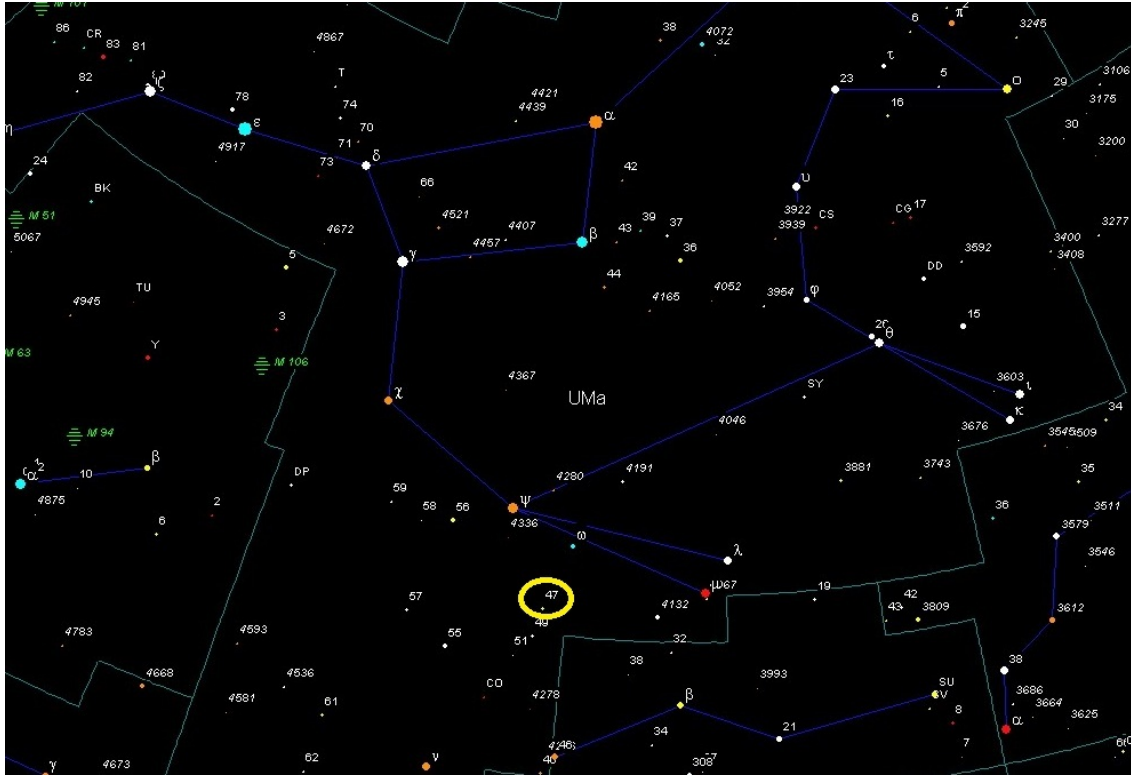


Abbildung 4.2: Sternbild des Systems Ursa Major. Im gelben Kreis befindet sich der Stern 47UMa. Abbildung aus [10]

existieren. Die Entwicklungswahrscheinlichkeit für einen Erdzwilling ist in 47UMa gering als in unserem Sonnensystem, denn die Riesenplaneten befinden sich näher am Zentrum. Ein Riesenplanet sehr nahe am Zentrum kann bewirken, dass sich die Planetenkeime gegenseitig stören und deswegen nicht heranwachsen können. Dennoch solltes es in 47UMa möglich gewesen sein, dass sich erdähnliche Planeten gebildet haben.

Nun muss sich der mögliche Planet noch langfristig auf einer stabilen Bahn um 47UMa bewegen, damit sich Leben entwickeln kann. Um herauszufinden welchen Bahnen stabil sind, setzte man theoretische Berechnungen mit verschiedenen Startpositionen an. Die Anfangsposition des terrestrischen Planeten ist durch

$$r_j = r_{HZ,i} + \delta_j \cdot (r_{HZ,o} - r_{HZ,i}) \quad (4.1)$$

gegeben. Dabei ist $r_{HZ,i}$ die innere Grenze der habitablen Zone und $r_{HZ,o}$ die äußere Grenze. δ_j stellt den Abstandsparameter dar. Für ihn wurden die Werte $\delta_1=0,1$ (innerer Bereich der habitablen Zone), $\delta_2=0,5$ (mittlerer Bereich der habitablen Zone) und $\delta_3=0,9$ (äußerer Bereich der habitablen Zone) angenommen. Es entstanden folgende Ergebnisse:

1. $\delta_1=0,1$: Der mittlere Abstand Planet - Stern beträgt $1,1179 \pm 8,546^{-5}$ und es existiert eine stabile Planetenbahn.
2. $\delta_2=0,5$: Der Abstand schwankt zwischen 1,1853 und 1,6171 AE und eine Habitität ist sehr unwahrscheinlich.
3. $\delta_3=0,9$: Der Planet verlässt bereits nach 0,24 Jahren die habitable Zone.

Man sieht, dass nur Bahnen im inneren Bereich der habitablen Zone stabil verlaufen, da hier die Einflüsse der beiden Riesenplaneten gering sind (Bahnradius schwankt nur um $5,1 \cdot 10^{-2}$ Prozent).

In Abbildung 4.2 sind die Bahnverläufe der einzelnen Anfangspunkte gezeigt.

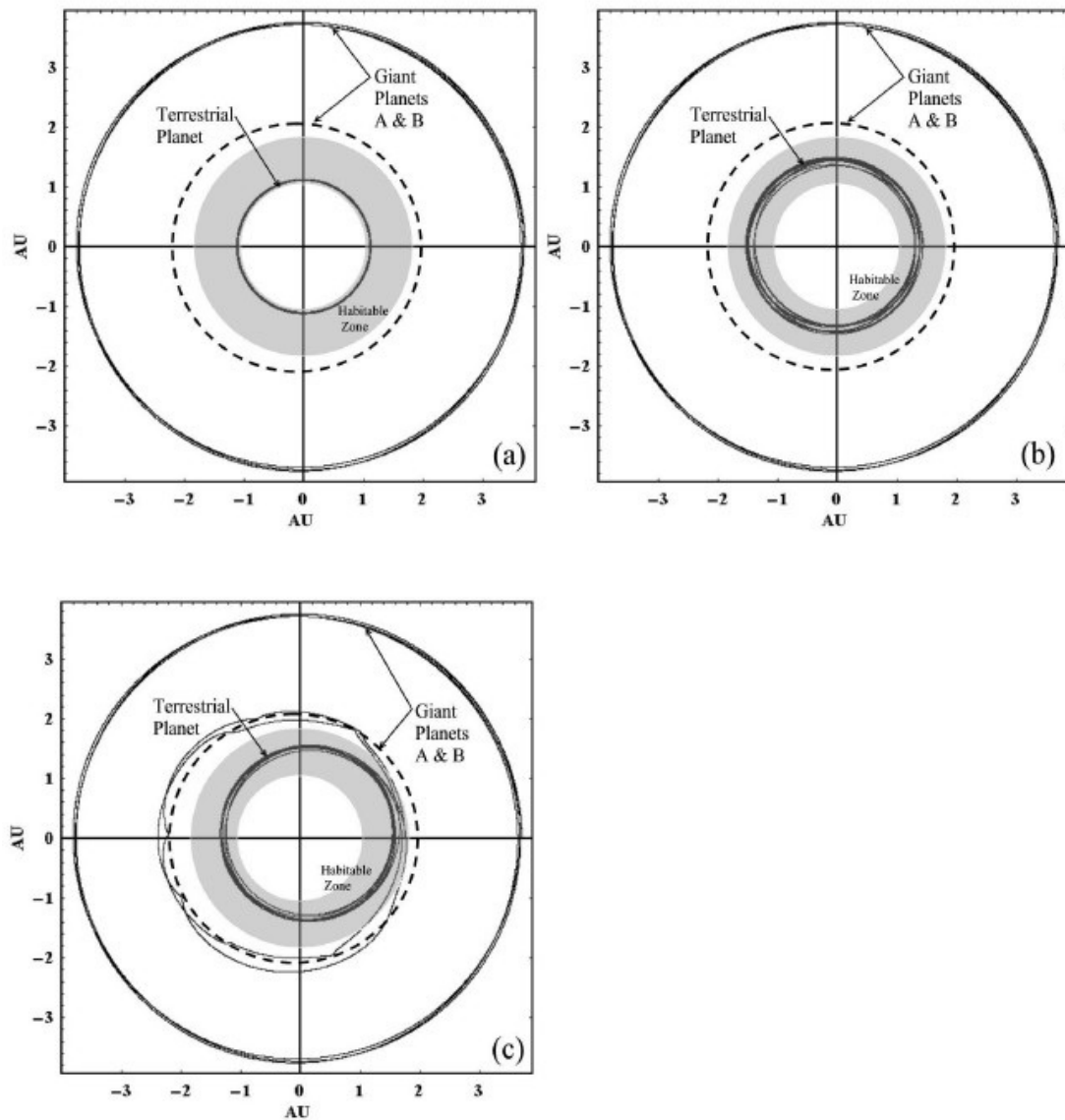


Abbildung 4.3: Umlaufbahnen der beiden Riesenplaneten und der möglichen terrestrischen Planeten. (a) Stabile Bahn mit $\delta_1=0,1$. (b) Stark schwankende Bahn für $\delta_2=0,5$. (c) Bahnverlauf für $\delta_3=0,9$. Bereits früh verlässt der Planet die habitable Zone. Abbildung aus [9]

5 Erforschung extrasolarer Sternsysteme und Planeten

Aktuell gibt es 424 extrasolare Planeten in 358 Systemen (Stand: 13.1.2010). Die meisten Entdeckungen wurden in den letzten 15 Jahren gemacht, dies liegt vor allem an der immer neuen technischen Verbesserungen der Beobachtungsmöglichkeiten. Neben den direkten Beobachtungsmethoden der Auslöschunginterferometrie und der Abdunkelung des Zentralsterns gibts es noch einige indirekten Beobachtungsmethoden:

- Doppler-Spektroskopie (Radialgeschwindigkeit)
- Photometrie (Transit)
- Astrometrie
- Pulsar Timing
- Microlensing

Problem ist derzeit, dass es kaum bis garnicht möglich ist Planeten mit Erdgröße (Masse,Radius) und ähnlichem Abstand zum Zentralstern zu detektieren. Durch weitere Verbesserungen der Messinstrumente und viele Projekte wollen die Weltraumbehörden wie NASA oder ESA die Entdeckung eines Erdzwillings möglich machen.

5.1 Doppler-Spektroskopie

Dies ist eine der erfolgreichsten Methoden, wenn es um die Entdeckung extrasolarer Planeten geht. Etwa 90 Prozent der heute bekannten Planeten wurden mit Dopplerspektroskopie (oder Radialgeschwindigkeitsmethode) entdeckt. Bei dieser Methode verwendet man, dass der Planet nicht genau um seinen Zentralstern kreist, sondern das beide um einen gemeinsamen Schwerpunkt kreisen (Aufgrund der großen Masse des Sterns liegt dieser Schwerpunkt aber im Inneren des Sterns). Wenn man das System von der Erde aus betrachtet, kommt der Stern einmal auf den Betrachter zu und einmal bewegt er sich von ihm weg, dies führt zu einer Dopplerverschiebung des ausgestrahlten Spektrums. Damit lässt sich die Radialgeschwindigkeit eines Sterns, also die Bewegung auf uns zu oder von uns weg, messen. Wenn ein Stern von einem Planeten umkreist wird, zeigt seine Radialgeschwindigkeit eine kleine periodische Schwankung auf. Der Stern bewegt sich umso schneller um den gemeinsamen Schwerpunkt, je größer der Planet ist und je näher er sich am Stern befindet.

Das sog. Wackeln des Sterns ist jedoch sehr schwach, aber heutige Messmethoden sind inzwischen in der Lage Bewegungen von etwa 1 m/s detektieren zu können. Jedoch reicht diese Messgenauigkeit i.a. noch nicht aus um Planeten von Erdgröße zu finden. Für einen Planeten mit sonnenähnlichem Zentralstern, Erdmasse und einem Abstand Zentralstern-Planet von 1 AE müsste man eine Radialgeschwindigkeit von 0,1 m/s messen können. Nachteile der Radialgeschwindigkeitsmethode sind:

- Ist die Bahn des extrasolaren Planeten um 90 Grad relativ zur Erde geneigt, kann keine Dopplerverschiebung nachgewiesen werden. Denn weder der Stern noch der Planet bewegt sich auf die Erde zu bzw. weg.

- Eine maximale Dopplerverschiebung ergibt sich, wenn die Planetenbahn um 0 Grad gegenüber der Sichtlinie geneigt ist. Daher kann ohne der Kenntniss der Orientierung der Bahnebene nur eine minimale Masse für den entdeckten Planeten angegeben kann. Möglichwerweise kann es sich bei solchen Planeten dann auch um kleine Sterne handeln.

Mit der Masse eines Sterns und den aus der Spektroskopie erhaltenen Parameter Periode und Amplitude des Wackelns kann man dann Bahnradius, Bahngeschwindigkeit und Masse des Planeten bestimmen.

5.2 Transitmethode - COROT-Mission

Eine weitere Methode ist Transitmethode. Bei ihr sucht man nach Planeten, die auf ihrer Bahn zeitweise zwischen Erde und ihrem Zentralstern liegen. Trick dabei ist, dass der Planet den Stern dabei verdeckt und die Helligkeit des Sterns verringert wird. Zum Beispiel verursacht ein Planet von Jupitergröße einen Helligkeitsabfall von etwa einem Prozent. Aufgrund der geringen Schwankungen der Helligkeit benötigt man jedoch mehr als einen Bahnlauf um mit großer Sicherheit von einem neuen Planeten ausgehen zu können (meistens 3 periodische Minima in der Helligkeit). Denn auch andere Phänomene wie Sternpulsationen oder Sternenflecken führen zu geringen Änderung in der Helligkeit, die man durch mehrere Umläufe ausschließen kann.

Probleme entstehen bei jedoch bei der Beobachtung von der Erde aus, den die Genauigkeit wird durch Turbulenzen in der Erdatmosphäre (Sonnenlicht wird zum Flackern gebraucht) begrenzt. Mit der sog. COROT-Mission wird die Beobachtungstandpunkt in dem Weltraum verlagert (Satellit in Erdumlaufbahn mit Messtechnik und Teleskopen an Bord) und eine viel höhere Genauigkeit erzielt.

Ein Problem der COROT-Mission ist jedoch, dass ein einzelnes Sternfeld nur 150 Tage lang beobachtet wird. Es werden aber 3 Umläufe benötigt (siehe oben), daraus ergibt sich das nur Planeten mit Umlaufzeit von weniger als 50 Tagen beobachtet werden können. Damit ist man auf Planeten beschränkt die sehr nahe am Zentralstern liegen und daher eher wohl kaum habitabel sein werden.

5.3 Microlensing - Gravitationslinsenmethode

Bei dieser Methode nützt eine wichtige Aussage aus Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie: Licht wird durch Gravitation abgelenkt. Die Bilder entfernter Galaxien können, durch im Vordergrund liegende massive Galaxien oder Galaxienhaufen, verschoben, verzerrt oder sogar dubliziert werden (Abbildung 5.1 erklärt grafisch die Bildverdopplung). In der Nähe von schweren Himmelskörpern werden die Lichtwellen zum Objekt hin abgelenkt, daher wirkt das Gravitationsfeld eines großen Sterns wie eine Art Sammellinse.

Die Objekte an denen die Lichtbeugung stattfindet werden Gravitationslinsen genannt. Damit mehrere Bilder beobachtbar sind braucht man jedoch extrem starke Gravitationsfelder, wie schwarze Löcher, ganze Galaxien oder Galaxienhaufen.

Von größerem Interesse ist vielmehr das Microlensing (Mikrolinseneffekt, Linse ist klein im Vergleich zum ganzen optischen System), bei dem die erzeugten Bilder zwar nicht mehr mit Teleskopen getrennt beobachtet werden können und auch die Lichtablenkung nicht messbar ist, jedoch erscheint die Bilder des Hintergrundobjekts heller als ohne Linse. Diese Verstärkung ist an sich noch nicht so einfach zu erkennen, bewegen sich jedoch Linse und Objekt sehr nahe aneinander vorbei, nimmt die Bildhelligkeit durch den Mikrolinseneffekt in bestimmter Weise zu und wieder ab. Die Linsenwirkung ist von der Masse abhängig, damit können auch die Umgebungen von leuchtschwachen Sternen untersucht werden. Zudem glaubt man mit dem Microlensing auch Planeten mit Erdmasse entdecken zu können. Nachteile dieser Methode sind jedoch:

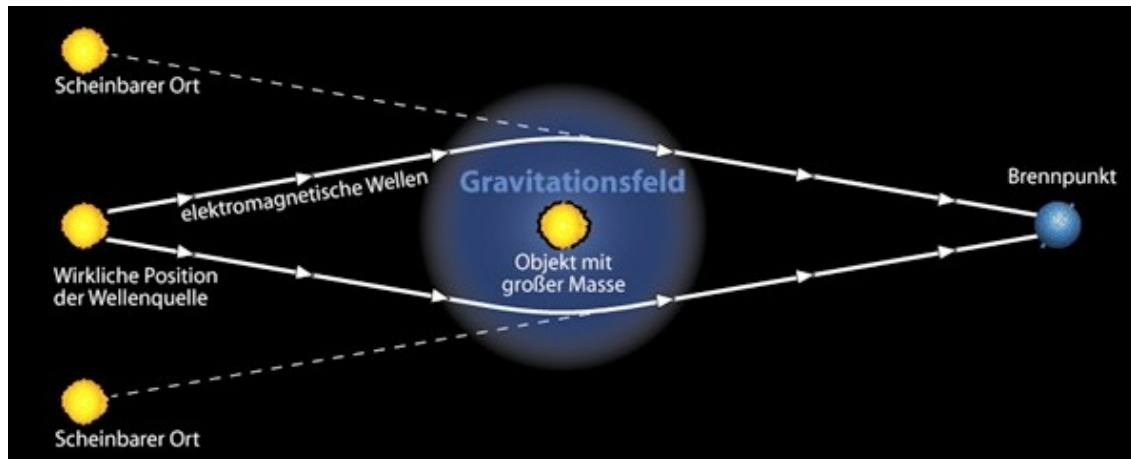


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Einflusses der Gravitation. Abbildung aus [12]

- Der Planet ist nur einmal für Wochen sichtbar. Abhängig von der Masse der Linse und der relativen Bewegung von Linse und Objekt.
- Der Abstand Planet-Zentralstern lässt sich oft nicht genau bestimmen.

5.4 Methoden zu direkten Planetenbestimmung

Die bisherigen Methoden konnten die Planeten nur indirekt nachweisen. Im Jahre 2005 konnte die ersten Bilder eines extrasolaren Planeten aufgenommen werden. Die Frage ist nun, wie kann man einen Planeten nachweisen der mehr als 100 Lichtjahre von der Erde entfernt ist? Ein Planet an sich leuchtet nur schwach und wird stark von seinem Zentralstern überstrahlt. Weiteres Problem bei der Beobachtung von der Erde aus ist, dass maximale Abstand Stern-Planet im Bogenskundenbereich liegt. Der direkte Nachweis auf visuellem Weg ist daher oft schwer bis unmöglich. Jedoch gibt es Tricks mit denen man sich weiter helfen kann. Man kann zum Beispiel auf anderen Spektralbereich wechseln, bei dem der Kontrast Planet-Stern geringer ist. Bei Planetenbeobachtung verwendet man den infraroten Bereich.

Zwei erfolgreiche Methoden sind die koronografische Methode, bei der in der Brennebene des Teleskops der Zentralstern ausgeblendet wird, und die Nulling-Interferometrie, bei der durch mehrere Strahlengänge verschiedener Teleskope eine destruktive Interferenz erzeugt wird, mit der der Zentralstern ausgeblendet oder seine Helligkeit zumindest stark reduziert wird, ohne dabei die Lichteinwirkung des Planeten zu schwächen. Aktuell werden Weltallmissionen geplant, um die direkte Beobachtung von Planeten aus dem Weltall zu erreichen.

Literaturverzeichnis

- [1] A. Unsöld, B. Baschek, Der neue Kosmos, Springer-Verlag
- [2] Christine Bounama, Werner von Bloh und Siegfried Franck, Wo kann es Zwillinge der Erde geben?, Sterne und Weltraum 1/2004, S. 30-36
- [3] <http://abenteuer-universum.de/sterne/sternentwick.html> , 16.01.2010
- [4] <http://www.daviddarling.info/> , 17.01.2010
- [5] <http://www.solstation.com> , 17.01.2010
- [6] <http://exoplanets.org/esp/47uma/ms.pdf> , 17.01.2010
- [7] <http://lexikon.astronomie.info/planeten/definition.html> , 18.01.2010
- [8] <http://www.starsurfin.com> , 18.01.2010
- [9] <http://www.iop.org/EJ/article/0004-637X/572/2/1024/16046.web.pdf?request-id=5521b8f4-2c6e-4866-967f-ba2f7d8ba31d> , 18.01.2010
- [10] http://de.wikipedia.org/wiki/Gro%C3%9Fer_B%C3%A4r , 18.01.2010
- [11] http://shayol.bartol.udel.edu/~hdt/diploma/lecture_3/ , 18.01.2010
- [12] <http://www.corot.de/> , 25.02.2010
- [13] Physics Today, November 2004 Seite 27-29
- [14] Physics Today, Mai 2009 Seite 46-51
- [15] Physics Today, Januar 2009 Seite 11-13