

## Die zweite Erde – Teil I Ein bisschen Sciene-Fiction

Andrea Schriever, Andreas Bügler

In den letzten 20 Jahren wurden mehr als 3.000 Exoplaneten entdeckt. Die meisten von ihnen sind aus den verschiedensten Gründen lebensfeindliche Welten; von einigen wenigen aber vermutet man, dass sie Gesteinsplaneten wie die Erde sind und sogar im „richtigen“ Abstand um ihren Stern kreisen. Erst im Sommer dieses Jahres sorgte die Entdeckung eines solchen Planeten direkt bei dem uns nächstgelegenen Stern Proxima Centauri für viel Aufmerksamkeit. Wieder einmal wurde deutlich, dass die Existenz einer zweiten Erde die Phantasie vieler Menschen besonders anregt.

In diesem Artikel spielen wir mit diesem Gedanken. Wir nehmen uns die künstlerische Freiheit und gehen einfach davon aus, dass wir ein Superraumschiff haben, mit dem wir wie Captain Kirk durch die Galaxis fliegen können, um die zweite Erde zu finden.

Wie müsste dieser Planet beschaffen sein, damit wir ihn besiedeln könnten und uns darauf wohlfühlen würden? Unsere Vorstellung ist schon recht klar:

- terrestrischer Gesteinsplanet
- angenehme Lebensbedingungen
- stabile Umlaufbahn um geeigneten Stern in der **habitalen** (= bewohnbaren) **Zone**

Und wo müssten wir ihn suchen?

### Galaktische habitable Zone

Zunächst müsste unser Wunschplanet in einer habitablen (= bewohnbaren) Zone liegen; also dort, wo Leben grundsätzlich möglich ist. Als Voraussetzungen für die Entstehung und den Erhalt von Leben gelten:

- genügend höhere Elemente, insb. C, N, O
- eine Energiequelle (muss nicht unbedingt der Stern sein)

- Lösungsmittel; für uns bekanntes Leben: flüssiges Wasser
- keine lebenszerstörenden Faktoren (z.B. harte Strahlung)

In unserer Galaxis sind diese Bedingungen nur in einer ringförmigen Zone mittleren Abstands um das Zentrum denkbar. Die Wissenschaftler nennen hier aber keine genauen Zahlen über die notwendigen Abstände vom Zentrum bzw. vom Rand. Die dahinter steckenden Überlegungen sind folgende:

**Zu weit draußen** gibt es zu wenig „Metalle“ (Stoffe schwerer als H und He). Es fehlen die Elemente der klassischen organischen Chemie wie C, N, O, sowie einige höhere Elemente wie Eisen (Fe), die ebenfalls für unser Leben notwendig sind. Diese müssen erst durch Kernfusion in Sternen erzeugt und durch Supernovae (SN) im All verteilt werden.

**Zu nah am Zentrum** befinden sich zu viele massereiche Sterne (Spektraltypen O und B), die durch Strahlung und SN Leben zerstören könnten. Außerdem verursacht eine zu hohe Sterndichte die Häufigkeit naher Begegnungen



von Sternen. Hierbei könnten Planetenumlaufbahnen gestört werden.

Auch innerhalb der galaktischen habitablen Zone **in Sternentstehungsgebieten** herrschen ähnliche Bedingungen wie im Zentrum; d.h. zu viele massereiche Sterne und eine zu hohe Sterndichte.

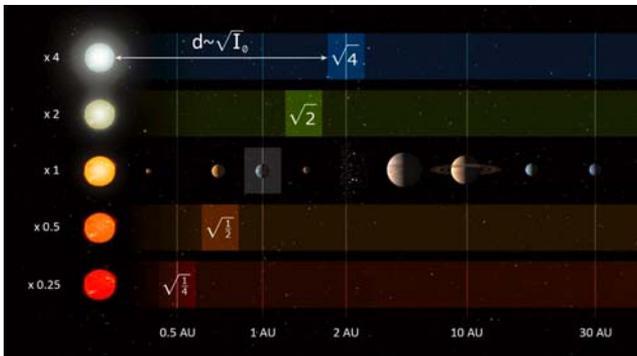
**Art des Sterns und dessen habitable Zone**

Neben der galaktischen habitablen Zone gibt es auch noch die stellare habitable Zone. Gemeint ist hiermit die Entfernung eines Planeten von seinem Stern, in der Wasser in flüssiger Form auf dem Planeten existieren kann. Flüssiges Wasser ist das Lösungsmittel, das für alles irdische Leben – und das ist das einzige, was wir bisher kennen – unverzichtbar ist. Die passende Entfernung hängt im Wesentlichen von der Leuchtkraft des Sterns ab, aber auch von Eigenschaften des Planeten wie dem Atmosphärendruck. Zu beachten ist auch, dass sich die Leuchtkraft eines Sterns im Lauf der Zeit steigert, sodass sich die habitable Zone nach außen verschiebt.

Aus der Leuchtkraft des Sterns kann man die mittlere Entfernung der habitablen Zone um ihn berechnen:

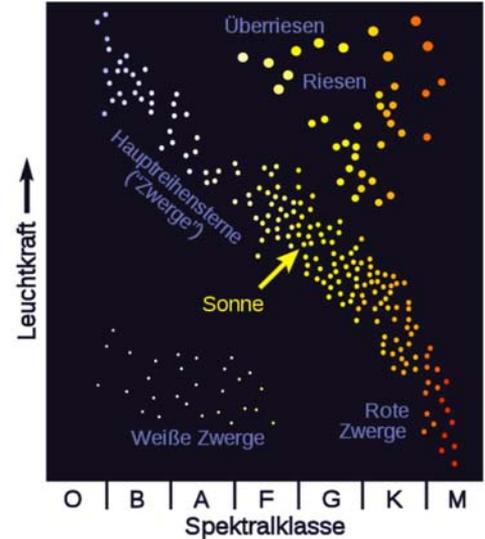
**Bahnradius (in AE) = Wurzel aus Leuchtkraft des Sterns**

Dies ist aber nur eine Faustregel, da hier die Eigenschaften des Planeten nicht berücksichtigt werden.



Der Stern unserer zweiten Erde sollte ein Hauptreihenstern sein. Riesen und Überriesen

finden sich am Ende ihres Sternenlebens, und weiße Zwerge haben dieses bereits hinter sich. Daher scheidet diese Sterntypen aus unseren Überlegungen aus. Auch pulsierende Veränderliche sind für unsere Zwecke ungeeignet.



Sterne verbringen ca. 90 % ihres „Lebens“ auf der Hauptreihe; solange bis etwa 10 % des H in ihrem Kern zu He umgewandelt sind. Die Verweildauer hängt von der Masse des Sterns ab, ebenso wie seine Leuchtkraft. So hat z.B. ein Stern von doppelter Sonnenmasse die achtfache Leuchtkraft.

Dementsprechend verbraucht er seinen Brennstoffvorrat wesentlich schneller und verlässt die Hauptreihe viel früher (siehe Tabelle auf Seite 16). Bei Hauptreihensternen, die massereicher sind als Sterne des Spektraltyps F, würde sich eine Besiedlung möglicher Planeten daher wohl kaum lohnen.

Ideal wären also Sterne der Spektraltypen G (wie unsere Sonne) und K.

Spektraltyp	Oberflächen-Temperatur	Masse	Leuchtkraft	Verweildauer in Jahren
O 7,5	38 000	25	80 000	2 Millionen
B 0	33 000	16	10 000	10 Millionen
B 5	17 000	6	600	70 Millionen
A 0	9 500	3	60	300 Millionen
F 0	6 900	1,5	6	1,7 Milliarden
G 0	5 800	1	1	7 Milliarden
K 0	4 800	0,8	0,4	14 Milliarden
M 0	3 900	0,5	0,07	50 Milliarden

Auch rote Zwerge vom Spektraltyp M sind nicht grundsätzlich ausgeschlossen. Immerhin gehören etwa zwei Drittel der Sterne unserer Galaxis dieser Klasse an. (Anm.: diese Zahl beruht zum einen auf Schätzungen – teilweise werden drei Viertel der Sterne als „rote Zwerge“ bezeichnet; zum anderen ist die Bezeichnung „roter Zwerg“ uneinheitlich, da neben den M-Sternen manchmal auch die schwächeren K-Sterne dazu gezählt werden)

Diese M-Sterne haben aber ihre Tücken:

So ist bei vielen Planeten innerhalb der habitablen Zone mit einer **gebundenen Rotation** zu rechnen, vergleichbar mit dem Umlauf des Mondes um die Erde. Gebundene Rotation bedeutet, dass die Rotationsperiode des Planeten bzw. Mondes gleich seiner Umlaufzeit um den Zentralkörper ist, wobei die Rotationsachse etwa senkrecht auf der Bahnebene steht und der Drehsinn gleich ist.

Bei roten Zwergen mit der Sonnenmasse 0,5 (Leuchtkraft 0,07 % der Sonne) wäre ein Planet innerhalb der habitablen Zone in gebundener Rotation. Das heißt, während eines Umlaufs wendet er dem Zentralkörper stets dieselbe Seite zu. Das bedeutet wiederum, dass eine Seite total heiß ist, die andere total kalt. Leben wäre hier nur in der Übergangszone möglich.

Bei Planeten, die viel Wasser oder Wassereis enthalten, ist die Ausdehnung der habitablen Zone um 30 % nach außen möglich, da Wasser

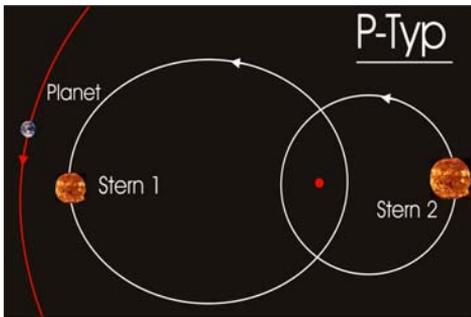
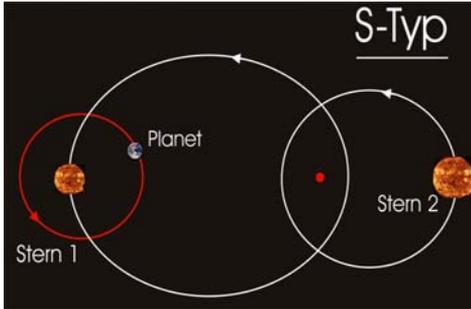
die infrarote Strahlung stark absorbiert. Dann läge der Planet möglicherweise weit genug draußen, sodass keine gebundene Rotation eintreten würde.

Ein weiterer Nachteil von roten Zwergen besteht darin, dass viele von ihnen **Flare-Sterne** sind, auch Flackersterne oder UV-Ceti-Sterne genannt. Der Name kommt von ihren Helligkeitsausbrüchen, die in einer Steigerung der Helligkeit bis zum 4-fachen innerhalb von einer Minute bestehen können. Verbunden damit sind auch starke Partikelstrahlung und koronale Auswürfe. Ein starkes Magnetfeld des Planeten zum Schutz dagegen ist bei gebundener – das heißt auch langsamer – Rotation unwahrscheinlich. Kurzum: Planeten um solche Sterne wären keine angenehmen Orte für uns.

Leider sind etwa 75 % der M-Sterne magnetisch aktiv; die Folge davon sind Flares. Ursache hierfür ist, dass der Wärmetransport innerhalb dieser Sterne - anders als bei unserer Sonne - über Konvektionsströme stattfindet. In Verbindung mit der differentiellen Eigenrotation des roten Zwerges führt dies zu einer starken Verwirbelung seiner Magnetfeldlinien. Damit scheiden die meisten Sterne des häufigsten Spektraltyps als Sonne für unsere zweite Erde leider aus.

Auch Doppelsterne sind problematisch. Bis zu 70 % aller Sterne in unserer Galaxis sind nach Schätzungen Mitglieder von Doppel- oder Mehrfachsystemen.

Grundsätzlich sind Planetenbahnen in solchen Systemen möglich; dies war umstritten bis man die ersten Exoplaneten bei Doppelsternen fand. Diese Bahnen bewegen sich entweder um eine Komponente des Doppelsterns (Typ S) oder weit außerhalb um beide Sterne (Typ P). Fraglich ist allerdings, ob diese Bahnen über sehr lange Zeiträume stabil bleiben.



Bleibt festzuhalten:

Der Stern, um den die zweite Erde kreisen könnte, wäre ein:

- Einzelstern und
- Hauptreihenstern
- vom Spektraltyp K, G oder F
- oder M, sofern kein Flare-Stern und nicht so leuchtschwach, dass die Bahn in der habitablen Zone zu einer gebundenen Rotation führen würde.

Fortsetzung folgt!

## Kleine Messerückschau 2016

Michael Dütting

### ATT

Wer auf der Suche nach günstigen Teleskopen und Zubehör ist, dem bieten sich Astronomie-Messen als willkommene Fundgrube für so manches Schnäppchen an. Leider sind größere Veranstaltungen dieser Art ziemlich rar, und im Wesentlichen gibt es im deutschsprachigen Raum nur zwei davon: Den ATT in Essen, der mittlerweile ins 33. Jahr geht, und die AME in Villingen-Schwenningen. Von Münster nach Essen ist es nur ein Katzensprung und die Maitour ins Ruhrgebiet bei vielen Sternfreunden schon Tradition: An einem Samstagmorgen startete unsere vierköpfige Fahrgemeinschaft Richtung ATT.

Neben den Verkaufsständen privater und professioneller Anbieter präsentieren sich hier auch astronomische Vereinigungen, werden Fachvorträge gehalten und sogar Konzerte mit elektronischer Musik angeboten (Steve Baltes & Stefan Erbe). Interessant sind vor allem auch die Besucher: Hier trifft sich die Astroszene, und neben "kleineren Besorgungen" für unsere neue Sternwarte war das in diesem Jahr meine Hauptmotivation zum Besuch der Messe. Erstes Ziel war der Stand der Vereinigung der Sternfreunde (VdS), in der auch die Sternfreunde Münster Mitglied sind. Im Gespräch mit Astrid Gallus aus dem Vorstand erfuhr ich das Neueste über das Projekt, die Vereine und Volkssternwarten besser zu vernetzen (s. Artikel „Neue VdS-Fachgruppe Astronomische Vereinigungen“). Nachdem ich meine wenigen Einkäufe erledigt hatte, ging es nun zu einer Preisverleihung: In Vertretung der „AstroYoungStars“ der Sternfreunde Münster nahmen Maximilian und Norik den 2. Preis der Zeitschrift Sternzeit für den Wettbewerb „Traumsonde“ entgegen (s. Artikel „Mission Titan“, Andromeda 2/2016). Mein anschließendes Gespräch mit Redakteur Peter Osenberg hatte zum Ergebnis, dass sich die Sternfreunde Münster ab der Ausgabe II/2016 als Mitherausgeber der Zeitschrift engagieren werden.

helleres Band ging von der Mitte schräg nach außen. Hammer! Ich sah – zwar schwach – aber klar differenziert einen Spiralarm der Dreiecks-Galaxie. Nach dem nächsten Wow, folgte ein leichter Veitstanz ums Teleskop!

Und damit war noch nicht Schluss: Ich hatte mir in weiser Voraussicht eine Aufsuchkarte des Planeten Uranus mitgenommen. Den hatte ich noch nie live gesehen! Dummerweise stand er an einer sehr schwachen Sternenkette des Sternbildes Fische. Mit dem bloßen Auge waren diese Sterne fast nicht zu sehen! Also war der Telrad echt am Limit. Uranus blieb versteckt. Ich gab nicht auf: Ich setzte jetzt das 35mm-Okular ein und suchte an der ungefähren Position den Himmel ab. Ein etwas blau-grün leuchtendes Pünktchen – ganz unscheinbar – erregte plötzlich meine Aufmerksamkeit. Stern oder Uranus? Die Lösung brachte dann das 9mm-Okular mit ca. 200x-Vergrößerung: Ein blau-grünlich schimmerndes kleines Scheibchen glotzte mich frech an! Wow! Da war er! Der Beobachtungsabend wurde jetzt für mich zu einer kleinen Sensation.

Der krönende Abschluss waren dann die Plejaden: Eigentlich sind die paar Sterne im Teleskop nicht so spektakulär, da ist ein Feldstecher lohnenswerter. Ich hatte es aber auf die Reflexionsnebel abgesehen: Vor allem Merope, Elektra und Maja zeigen (auf Fotos) blaue Höfe. In der Tat sah ich um Merope einen Hof! War etwa die Optik nicht sauber oder war gar das Okular beschlagen? Andere Sterne im Taurus hatten definitiv keinen Hof. Damit war klar: Ich sah einen Reflexionsnebel als Hof um Merope. Wow!

Dieser Beobachtungsabend war für mich ein echtes Aha-Erlebnis. Zwei Dinge habe ich dabei gelernt: Konzentriere dich auf einige wenige Objekte und studiere sie genauer. Der Lohn sind völlig neue Anblicke auf Details dieser fantastischen Objekte. Und dann habe ich mein Teleskop von einer neuen Seite kennengelernt: Mit dieser großen Öffnung offenbaren sich auch die mir bisher bekannten Objekte in einem völlig neuen Licht! Ich freue mich schon auf den nächsten Abend unter freiem Himmel. Zusammen mit meinem neuen Freund, dem 16-Zoll-Dobson von Explore Scientific.

## Die zweite Erde (Teil 2) – ein bisschen Science-Fiction

Andreas Bügler, Andrea Schriever

Willkommen zum zweiten Teil unserer phantastischen Suche nach der zweiten Erde. Sie ist – wie das Original – ein terrestrischer Gesteinsplanet mit für uns angenehmen Lebensbedingungen.

*In Teil 1 haben wir dargelegt, dass sie sich in einer habitablen Zone befinden muss; also dort, wo grundsätzlich Leben möglich ist. Für die Lage innerhalb unserer Galaxis bedeutet dies, dass sie nicht zu nah am Zentrum, aber auch nicht zu weit draußen liegen darf. Die habitable Zone um einen Stern ist der Bereich, wo Wasser in flüssiger Form existieren kann. Der Stern selbst muss zwingend ein Hauptreihenstern sein; idealerweise ein Einzelstern (wegen der Bahnstabilität) mit einer sonnenähnlichen Masse. Am besten sind Sterne der Spektraltypen K und G sowie untere F-Sterne geeignet. Rote Zwerge vom Typ M sind wegen Strahlungsausbrüchen i.d.R. problematisch. Eine weitere Schwierigkeit ist dort, dass die habitable Zone in vielen Fällen so nahe am Stern liegt, dass beim Planeten gebundene Rotation eintritt. Aus diesen Gründen wären auch die im Februar entdeckten Planeten um den Zwergstern Trappist 1 keine angenehme Umgebung für uns.*

Im zweiten Teil werden wir das umgebende Planetensystem unserer zweiten Erde betrachten, sowie näher auf die erforderlichen Eigenschaften des Planeten selbst eingehen. Diese können auch die Ausdehnung der habitablen Zone um den Stern beeinflussen (z.B. Masse und Zusammensetzung der Atmosphäre).

### Entstehung und Entwicklung von Planetensystemen

Hierzu erst einmal ein Blick auf die Entstehung von Planetensystemen im Allgemeinen.

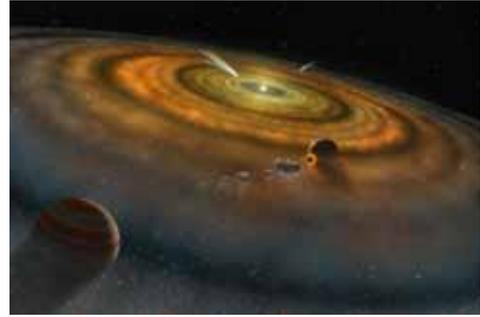
- Zunächst erfolgt der **Kollaps einer interstellarer Gaswolke**, die dann weiter in sich zu sogenannten Kernen fragmentiert;

es bildet sich ein Sternentstehungsgebiet (z.B. Orionnebel). Voraussetzungen hierfür sind eine ausreichende Masse und eine niedrige Temperatur ( $< 10^{\circ}$  Kelvin)

- Um den Protostern entsteht eine **Akkretionsscheibe**; Grund hierfür ist die Erhaltung des Drehimpulses in der zusammenstürzenden Gaswolke. Da diese Akkretionsscheiben in Sternentstehungsgebieten häufig beobachtet werden und die Zahl der bekannten Exoplaneten rasant wächst, sehen die Astronomen die Entstehung von Planetensystemen heute wohl als den Normalfall an.
- Die Akkretionsscheibe ist aufgrund der Reibung und des Deuteriumbrennens des Protosterns innen heiß und außen kalt. Im Übergangsbereich befindet sich die **Schnee- oder Eisgrenze**. Jenseits davon werden leicht flüchtige Stoffe fest.
- Hinter der Eisgrenze entstehen in relativ kurzer Zeit – ca. 10 Mio. Jahre – **Gasriesen**, die durch ihre Schwerkraft bald aktiv Materie anziehen und ihre Bahnen leerräumen. Um diese Gasriesen sind auch Systeme von Monden möglich.
- Innerhalb der Eisgrenze bilden sich die **Gesteinsplaneten**. Ihre Entstehung dauert 100 Mio. Jahre oder mehr und verläuft anders. Es bilden sich gleichzeitig viele Planetesimale und Protoplaneten, die miteinander kollidieren (Beispiel: Entstehung des Mondes). In diesem inneren Bereich befindet sich auch die Jupiterhabitable die Zone.

Auch wenn man bei den weitaus meisten Exoplaneten bisher keine weiteren Planeten in demselben System gefunden hat (ca. 75 %), gehen wir davon aus, dass diese keine Einzelgänger sind. Aufgrund des oben beschriebenen Entstehungsprozesses von Planetensystemen und der schwierigen Bedingungen der Planetenentdeckung nehmen wir an, dass dortige Planeten nur noch nicht aufgespürt wurden.

Wenn sich die Planeten gebildet haben, heißt das aber noch nicht, dass sie auf ihren ursprünglichen Bahnen bleiben. Nach der Entdeckung der



„heißen Jupiter“ sahen sich die Astronomen gezwungen, sog. Migrationstheorien zu entwickeln. Die beobachteten Gasriesen konnten nicht so nah an ihrem Stern entstanden sein, wo sie sich jetzt befinden.

Grund für die Wanderung der Planeten nach innen oder außen ist nach diesen Theorien die große Masse noch ungebundener Materie in den gerade entstandenen Planetensystemen. In unserem Sonnensystem wird vermutet, dass es im Kuiper-Gürtel Restmaterial in der Größenordnung von 30 bis 40 Erdmassen gab; auch im Asteroiden-Gürtel befinden sich immer noch zahlreiche Objekte. Die in diesem Material enthaltene Masse kann über den Swing-By-Effekt die Bahnen der großen Planeten verändern.

Auch Bahnresonanzen der Gasriesen können Einfluss auf die Bahnen anderer Planeten haben. Diese werden dann möglicherweise auf exzentrische Umläufe gezwungen. Für eine zweite Erde ist natürlich eine fast kreisförmige Bahn ideal.

In unserem Sonnensystem gab es ca. 700 Mio. Jahre nach seiner Entstehung eine Chaosphase. Hierbei sollen die Planeten Uranus und Neptun nach außen gezogen worden sein und dabei den Kuiper-Gürtel leergefegt haben. Zahlreiche Kuiper-Gürtel-Objekte wurden dabei in das innere Sonnensystem geschleudert. Die sichtbaren Spuren des „großen Bombardements“ aus

dieser Zeit in Form von Kratern – z.B. auf dem Mond – sprechen dafür.

Für unsere zweite Erde heißt das:

Sie sollte einem System angehören, das alt genug ist, um nur noch wenig freies Material zu beinhalten. Häufige Einschläge von Kometen oder Asteroiden wären zwar interessant, aber nicht schön. Außerdem würde ein Gasriese, der nach innen wandert, die Gesteinsplaneten des inneren Sonnensystems aus ihren Bahnen werfen. Ein massereicher Planet im äußeren Bereich, wie Jupiter in unserem System, wäre aber sehr günstig, da er viele herumfliegende Objekte auf sich zieht und damit unschädlich macht.

### Eigenschaften des Planeten selbst

Wir hatten uns ja bereits festgelegt: Die zweite Erde muss ein Gesteinsplanet sein, denn auf dessen fester Oberfläche können wir uns frei entfalten. Gleichzeitig muss auch genug Wasser in flüssiger Form vorhanden sein, aber auch nicht zu viel. Um unsere These zu untermauern, schauen wir uns zunächst verschiedene Planetentypen an.



### Planetentypen:

**Gasplaneten** sind aus unserem Sonnensystem bekannt. Die vier äußeren Gasriesen sind jenseits der Eisgrenze entstanden und zum Glück dort geblieben. Die beiden kleineren Uranus und Neptun haben etwa die 14- bzw. 17-fache Erdmasse.

Gasriesen haben keine feste Oberfläche; sie bestehen sozusagen hauptsächlich aus ihrer

Atmosphäre. Diese besteht überwiegend aus Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Helium, enthält aber auch leicht flüchtige Stoffe wie Ammoniak und andere Verbindungen aus Phosphor, Schwefel und Kohlenwasserstoff. Die kleineren Gasplaneten in unserem Sonnensystem Uranus und Neptun werden auch als Eisriesen bezeichnet, weil sie einen höheren Anteil an Wassereis, Methan und Ammoniak besitzen als die größeren Gasriesen Jupiter und Saturn.

Unklar ist, ob sie einen großen festen Kern haben. Dies hängt von ihrem Entstehungsprozess ab. Es gibt hier unterschiedliche Modelle: Kern-Aggregations-Hypothese und Scheiben-Instabilitäts-Hypothese. Beide Varianten existieren wahrscheinlich im Weltall, wobei die letztere für sog. „braune Zwerge“ preferiert wird. Wenn ein gasförmiger Himmelskörper die 13-fache Jupitermasse besitzt, setzt bei ihm das Deuteriumbrennen ein. Man spricht dann nicht mehr von einem Planeten, sondern von einem braunen Zwerg.

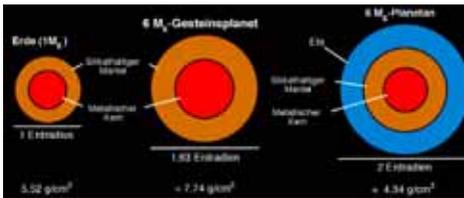
Bei allen Gasplaneten unseres Sonnensystems sind Monde vorhanden. Daher sind diese auch bei Exo-Gasriesen wahrscheinlich. Auf die Bewohnbarkeit dieser Exomonde kommen wir später zu sprechen.

**Planetane oder Ozeanplaneten** gibt es nicht in unserem Sonnensystem. Sie sind Modelle der Wissenschaftler zur Erklärung von Exoplaneten, die ca. 2 bis 8 Erdmassen ausweisen, aber eine geringere Dichte als die Erde besitzen. Man stellt sich vor, dass diese Planeten etwa zur Hälfte aus Metall und Silikat bestehen und zur anderen Hälfte aus Wasser. Sie wären sozusagen die größeren Brüder des Jupitermondes Europa. Ozeane wären auf ihnen mehrere 100 Kilometer tief.

Der Entstehungsprozess wäre aber ein anderer als der der terrestrischen Planeten. Nach dem Modell der Wissenschaftler bildet sich der zukünftige Ozeanplanet als Eisriesen jenseits der Schneegrenze. Seine Zusammensetzung wäre

ähnlich der von Uranus oder Neptun. Aufgrund der Wechselwirkung mit der protoplanetaren Scheibe (s.o.) migriert er dann ins innere Sonnensystem – möglicherweise auch in die habitable Zone – und verliert dabei den größten Teil seines Wasserstoffs und Heliums.

Das verbleibende Wasser würde in Tiefen von mehreren 100 km aufgrund des hohen Drucks fest werden und den Kohlendioxydaustausch zwischen Silikatmantel und flüssigem Wasser verhindern. Damit wäre der Carbonat-Silikat-Zyklus, der auf der Erde den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre regelt, auf dem Ozeanplaneten nicht möglich. Als Folge davon wäre das Klima sehr instabil. Durch sich selbst verstärkende Effekte würde sich der Planet schnell in eine Eishölle verwandeln oder einem galoppierenden Treibhauseffekt zum Opfer fallen.



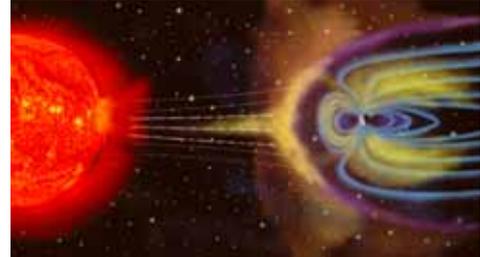
**Supererden** sind terrestrische Gesteinsplaneten, nur größer als die Erde. Die Definitionen sind uneinheitlich; die am weitesten gehende schließt Planeten von 1 bis 14 Erdmassen ein. Es gibt viele Kandidaten für Supererden; allerdings ist die Forschung noch nicht so weit, dass sie einzelne kleinere Exoplaneten eindeutig den Typen Supererde oder Ozeanplanet zuordnen könnte.

Eine massereichere „Erde“ wäre für uns mit einer höheren Schwerkraft und wahrscheinlich auch mit einem höheren Atmosphärendruck verbunden. Der menschliche Körper ist hier nur in geringem Maß anpassungsfähig. Man stelle sich vor, plötzlich mit dem doppelten Gewicht herumzulaufen. Daher wären diese Supererden für uns nicht geeignet.

Es bleiben uns somit nur Gesteinsplaneten, die nicht viel größer sein dürfen als die Erde.

### Magnetfeld

Eine zwingende Voraussetzung für unsere zweite Erde ist auch ein ausreichendes Magnetfeld. Es schützt uns vor dem Sonnenwind und der kos-



mischen Strahlung. In unserem Sonnensystem ist die Erde der einzige Gesteinsplanet, der ein nennenswertes Magnetfeld besitzt.

Das Magnetfeld entsteht durch den Dynamoeffekt.

Bei einem Planeten setzt dies einen flüssigen Eisenkern voraus. Kleinere terrestrische Planeten kühlen zu schnell aus, was zur Verfestigung des Eisenkerns führt. Der Mars hat dadurch sein Magnetfeld verloren, und damit wahrscheinlich auch den größten Teil seiner Atmosphäre.

Für den Dynamoeffekt ist weiterhin die Rotation des Planeten erforderlich. Negativbeispiel ist in unserem Sonnensystem die Venus. Sie ist groß genug, um noch einen flüssigen Eisenkern zu haben; aber aufgrund ihrer sehr geringen Rotation ist ihr Magnetfeld zu schwach.

### Rotation

Neben der Notwendigkeit für das Magnetfeld ist die Rotation eines Planeten auch wichtig für die klimatischen Verhältnisse auf ihm.

Eine zu langsame Rotationsgeschwindigkeit führt zu starken Temperaturunterschieden während einer Umdrehung. Tagsüber heizt sich die Oberfläche über lange Zeit auf, um dann nachts extrem abzukühlen. Die großen Temperaturun-

terschiede könnten starke Winde auslösen. Eine zu schnelle Rotation hat aber ebenfalls starke Winde zur Folge.

Die Stellung der Rotationsachse hat natürlich ebenfalls einen grundlegenden Einfluss auf das planetare Klima. Bei einer Rotationsachse senkrecht zur Bahnebene (wie beim Merkur) gibt es keine Jahreszeiten, wie wir sie von der Erde her kennen. Liegt die Rotationsachse dagegen auf der Bahnebene (wie beim Uranus), ist eine Hemisphäre während des halben Umlaufs der Sonne ausgesetzt und während der restlichen Zeit im Dunkeln. Keine schönen Aussichten für uns.

Die Rotationsachse sollte auch über lange Zeiträume stabil bleiben, damit sich die Klimazonen des Planeten nicht verschieben. Ideal hierfür ist ein Partner des Planeten, wie wir es aus dem System Erde – Mond kennen. Aufgrund der Physik der Kreiselbewegung werden die Achsen beider Himmelskörper stabilisiert. Diese Mondsysteme oder Doppelplaneten sind bei Himmelskörpern, die keine Gasriesen sind, vielleicht häufiger, als man zunächst denkt. Forscher vermuten, dass das System Pluto – Charon ebenso durch einen Impakt entstanden sein kann wie das System Erde – Mond.

### Sauerstoff

Damit wir uns auf der Oberfläche eines Planeten ohne Atemgerät bewegen können, muss ausreichend Sauerstoff (O<sub>2</sub>) zur Verfügung stehen. Der Sauerstoffanteil in der Erdatmosphäre beträgt in der Gegenwart 21 %. Das war aber nicht immer so.

Es ist davon auszugehen, dass die ursprüngliche Atmosphäre eines Gesteinsplaneten – falls vorhanden – von Kohlenstoff dominiert wird. Bei unseren Nachbarplaneten Venus und Mars besteht sie zu über 95 % aus Kohlendioxyd (CO<sub>2</sub>); freier Sauerstoff ist allenfalls in Spuren vorhanden. Daher gilt O<sub>2</sub> in der Atmosphäre eines Planeten als Lebensindikator.

Wir haben also das Problem, dass ein Gesteinsplanet mit ausreichend freiem Sauerstoff bereits von fremdem Leben besiedelt wäre. Wie unsere Gesundheit damit klar käme, ist überhaupt nicht absehbar.

Das Leben hat auf der Erde Milliarden Jahre gebraucht, bis eine Sauerstoffatmosphäre aufgebaut war. Das Alter unseres Planeten wird auf ca. 4,5 Mil. Jahre angesetzt. Bereits vor 3,5 Mil. Jahren gab es das erste, primitive Leben, das sich für lange Zeit nur in den frühen Ozeanen aufhielt. Erst vor etwa 2 Milliarden Jahren waren die Meere soweit mit Sauerstoff gesättigt, dass dieser in die Atmosphäre entwich. Und erst vor 1 bis 0,6 Milliarden Jahren erreichte der O<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre einen Wert von über 3 %.

Dies war der Zeitpunkt, ab dem der Aufbau einer Ozonschicht (O<sub>3</sub>) möglich war. Diese ist unverzichtbar als Schutz vor UV-Strahlung. Erst danach – vor etwa 450 Mio. Jahren – konnte das Leben auch das Land erobern.

### Weitere klimatische Bedingungen

**Atmosphäre:** Wie bereits erwähnt sind die Zusammensetzung und die Dichte einer Atmosphäre wesentliche Faktoren für die Lebensfreundlichkeit des jeweiligen Planeten. Sie beeinflussen, wie viel der eintreffenden Sonnenstrahlung wieder ins Weltall abgestrahlt wird bzw. beim Planeten zurückbehalten wird. Dieser Treibhauseffekt ist Gegenstand der aktuellen Klimadiskussion. Hier wird deutlich, dass auch relativ geringe prozentuale Änderungen große Auswirkungen haben können.

Für einen Planeten heißt dies, dass sich durch den Treibhauseffekt sogar die Lage der habitablen Zone nach außen verschiebt. Möglicherweise wäre der Mars, wenn er seine Atmosphäre nicht wegen seiner geringen Größe verloren hätte (s.o.), heute ein Planet mit prallem Leben.

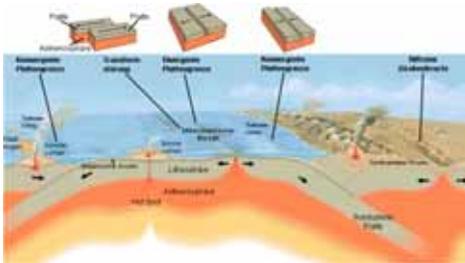
**Temperatur:** Die habitable Zone um einen Stern ist definiert als Bereich, in dem Wasser im

flüssigen Zustand vorkommen kann. Bei einem Atmosphärendruck wie auf der Erde sind dies 0°C bis 100°C. Die Durchschnittstemperatur auf unserer Erde beträgt 15°C. Bei wesentlich höheren Temperaturen – z.B. 80°C – wäre Leben grundsätzlich vorstellbar; aber nicht für uns. Hier zeigt sich, dass unser Körper nur einen geringen Spielraum zulässt, und wir für unsere zweite Erde sehr spezielle Bedingungen brauchen.

Natürlich wären auch große Temperaturschwankungen für uns ungünstig. Diese können durch exzentrische Planetenbahnen oder eine langsame Rotation ausgelöst werden (s. o.).

**Geographische Verhältnisse:** Wünschenswert wäre eine günstige – also erdähnliche – Verteilung von Wasser- und Landflächen; auf der Erde etwa 70 % zu 30 %. Bei zu großen Kontinenten wären weite Regionen mit Wüsten bedeckt. Dies würde auch mit stärkeren Temperaturschwankungen einhergehen.

Plattentektonik regelt auf der Erde u.a. den Kreislauf des Kohlenstoffs; ist also trotz Erdbeben und Vulkanausbrüchen vorteilhaft für uns. Hierzu muss der Planet eine ausreichende Masse haben. Einige Wissenschaftler gehen davon aus, dass die Erde gerade groß genug ist, um Plattentektonik zu ermöglichen. Bei den anderen terrestrischen Planeten unseres Sonnensystems tritt sie nicht auf.



Bei der fast erdgroßen Venus vermutet man, dass es dort deshalb keine Plattentektonik gibt, weil es dort an freiem Wasser fehlt. Dies habe wohl eine wichtige Rolle als Schmiermittel.

### Bleibt festzuhalten:

Ein Planet muss eine Vielzahl von Bedingungen erfüllen, um unserer „Komfortzone“ zu entsprechen. Unseres Wissens ist noch kein Exoplanet entdeckt, der unseren Ansprüchen gerecht würde.

Im nächsten Teil erörtern wir, ob Exomonde als Alternativen in Fragen kommen.

*Fortsetzung folgt*

## Aufruf zur Beobachtung von VV Cep

*Ewald Segna*

Da befindet sich ein Doppelstern ca. 4900 Lichtjahre von uns entfernt im Sternbild Cepheus. Er besteht aus einer roten Komponente A des Spektraltyps M2 - einem Roten Überriesen mit einem Durchmesser von ca. 1600 bis 1900 Sonnendurchmessern - und einer blauen Komponente B des Spektraltyps B6 - einem Blauen Riesen mit dem ca. 10-fachen des Sonnendurchmessers. Nebenbei bemerkt: Stünde VV Cep A an der Stelle der Sonne, reichte sein Durchmesser bis zur Bahn Saturns. Die absoluten Leuchtkräfte betragen das 275.000-575.000-fache (A) bzw. das 100.000-fache (B) der Sonnenleuchtkraft. Er ist ein klassischer Bedeckungsveränderlicher; das bedeutet, dass sich das Sternennpaar durch die besondere Lage zum Beobachter gegenseitig bedeckt. Das spezielle an VV Cep ist die Länge eines Umlaufs (Periode) von 7.430 Tagen, in der sich die Helligkeit des Sterns von 4,91 mag auf 5,4 mag abschwächt. Die komplette Bedeckung dauert fast zwei Jahre (650 Tage).

Nachstehend die Ephemeriden von VV Cep:

**Beginn der Bedeckung (1. Kontakt)**

04. August 2017

**Beginn der totalen Bedeckung (2. Kontakt)**

27. Oktober 2017

**Mitte der Bedeckung** 01. Juni 2018

**Ende der totalen Bedeckung (3. Kontakt)**

06. Februar 2019

**Ende der Bedeckung (4. Kontakt)** 16. Mai 2019