

Inhabitable exoplanets

In the search for extraterrestrial life, various methods are used to identify inhabitable planets in other star systems (so-called *exoplanets* or extrasolar planets). The most simple way to identify habitable exoplanets is based on the concept of the [habitable zone](#) (IZ) around stars. The IZ can be used as a yes-or-no criteria, where exoplanets are either habitable or not. However, it is clear that some exoplanets have a larger chance of being inhabited than others. Therefore, more advanced metrics are needed, such as *distance to habitable zone* (IZD), that can be used for example to order the over 600 exoplanets that are already confirmed to be habitable. Moreover, there are thousands of exoplanets that are waiting for confirmation of their status, and many more are likely to be discovered in the future. Procedures for ordering and classifying habitable exoplanets do not only help to prioritize observations, but also to compare results.

The IZ is usually defined by the area surrounding a star where fluid water can occur on the surface of a planet (Karsting *et al.*, 1993), since this is an important requirement for the development of life as we know it. Within the IZ, smaller celestial bodies are not able to grip an atmosphere, while the atmosphere in which gigantic planets are captured in giant planets, causing them to compress every form of water in to ice. It is necessary that exoplanets have earthy measurements (between half and twice the intersection of the earth) to be declared potentially habitable. Exoplanets that are closer to their star, will lose all water to space and those that are further away will freeze. The IZ is the good area to search for habitable planets, with a width of about 0.3 AU for weak stars such as those with [stellar classification](#) M ([red dwarfs](#)) and up to 2 AU for bright stars such as those with stellar classification F.

The IZ is defined in function of the stellar brightness and some other critical properties of stars (Karsting *et al.*, 1993). A conservative approach for constructing the IZ uses a "recent Venus" model as boundary r_{is} for the inner radius and an "early Mars" model as boundary r_{os} for the outer radius (Underwood *et al.*, 2003; Selsis *et al.* 2007). Other boundaries that are typically used are given in the below table.

model	ID	r_{is}	r_{os}
Mars-Venus (default model)	0	0,72	1,77
0% clouds	1	0,84	1,67
50% clouds	2	0,68	1,95
100% clouds	3	0,46	2,40

The inner r_{is} and outer r_{os} radius of the IZ (in AU) is given by
$$\begin{array}{l} r_i = \left(r_{is} - a_i (T_{\text{eff}} - T_{\text{s}}) - b_i (T_{\text{eff}} - T_{\text{s}})^2 \right) \sqrt{L} \\ r_o = \left(r_{os} - a_o (T_{\text{eff}} - T_{\text{s}}) - b_o (T_{\text{eff}} - T_{\text{s}})^2 \right) \sqrt{L} \end{array}$$
 where L represents the [stellar brightness](#) (expressed relatively in relation to the luminosity of the sun), T_{eff} is the actual temperature of the star (in Kelvin), $T_{\text{s}} = 5700 \text{ K}$, $a_i = 2,7619 \times 10^{-5}$, $b_i = 3,8095 \times 10^{-9}$, $a_o = 1,3786 \times 10^{-4}$ en $b_o = 1,4286 \times 10^{-9}$. Exoplanets are declared habitable if the mean distance to their stars is within these two boundaries.

Wherever the IZ around a star gives a yes-or-no-answer to the question if the exoplanet is habitable, the IZ is converted to an analogue scale by the IZD. For this conversion, the distance

of the exoplanet to the middle of the IZ is calculated. The distance is then normalized with half the width of the IZ. The IZA is thereby given by the formula $BZA = \frac{2r - r_o - r_i}{r_o - r_i}$ with r representing the distance from the exoplanet to its star (expressed in AU). The advantage of the IZD is that the resulting values can easily be compared with the different star systems, because they always mean the same. IZD values that are between -1 and +1, always correspond to planets that are remote from the star (*cold zone*). An IZD that is equal to zero, corresponds with the center of the IZ. Do note that this does not necessarily imply that an exoplanet that is closer to the center of the IZ would be more habitable than an exoplanet that is further away from the center, but still within the IZ, since being habitable also depends on other properties of the planet.

As an example, we will compare the exoplanets of the star [Gliese 581](#) with those from our own [solar system](#) (Image 1). Gliese 581 is a red dwarf with four confirmed exoplanets that orbit the star in less than 1 AU. In this example, however, we use the six-planet-solution that was proposed by Vogt *et al.* (2010). The IZD was calculated on the basis of the above formulas. In the upper panel of Image 2, we use the absolute value of the IZD to sort the exoplanets on the basis of how habitable they are. The closer the value is to zero, the better the exoplanet can be inhabited. In this comparison it is also important to look at the sign of the IZD (lower frame of Image 2). Candidates with an IZD just below -1 (hot zone) can be ignored as habitable exoplanets, since these probably resemble Venus a lot. Values that are just above +1, however, might be interesting if there would be severe greenhouse effects.

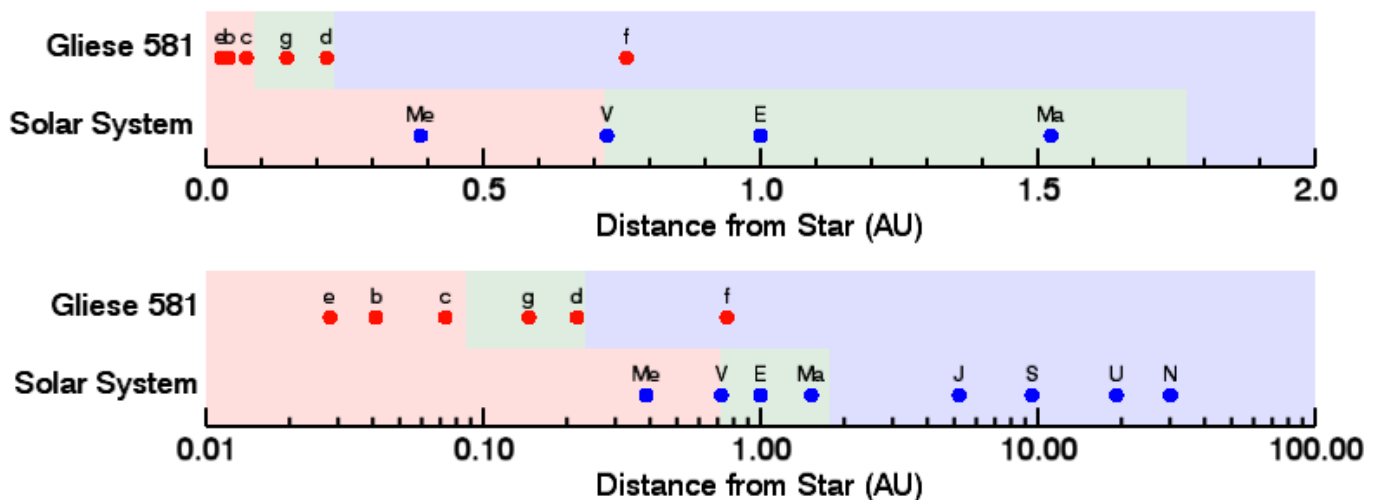


Image 1. Comparison of the distance from the star Gliese 581 to its exoplanets (red dots) with the distance between our sun and the planets of our solar system (blue dots). Because of the clearness, only the earthly planets are given on the linear axis of the upper panel, and the gas giants are used as a reference on the logarithmic axis of the lower panel. The green areas indicate the habitable zone in both cases. Red areas indicate the hot zone and blue areas indicate the cold zone. On this distance, it is harder to compare how to order the planets in comparison with their habitable zones.

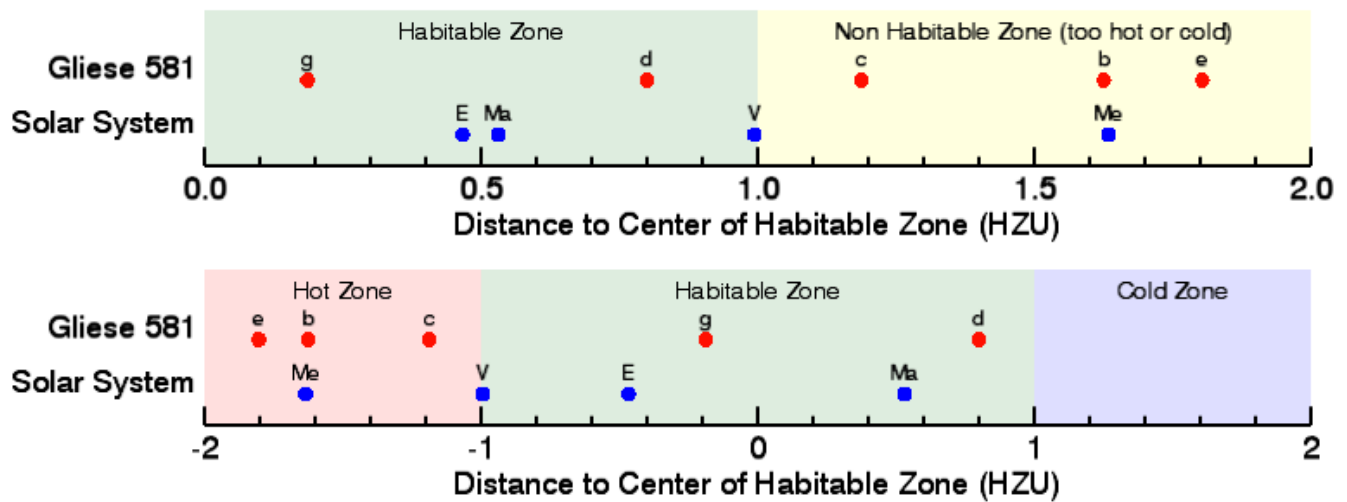


Image 2. Distance to the center of the habitable zone (IZD) of the exoplanets of Gliese 581 (red dots) in comparison with the planets of our solar system (blue dots) The upper panel uses the absolute value of the IZD, while the lower panel uses the IZD value itself. The green areas indicate the habitable zones in both cases. The red areas indicate the hot zone and the blue areas indicate the cold zone. The yellow area combines the hot and cold zone. Note that Gliese 581 c (IZD = -1.2) can be catalogued as less habitable than Venus (IZD = -1.0) and that Gliese 581 g (IZD = -0.2) seems more habitable than the Earth (BZA ~ -0.5). Only 2 IZD units sufficed to represent all exoplanets, except for Gliese 581 f, and all earthly planets, the other cases are outside the scale.

Sources

- **Kasting JF, Whitmire DP, Reynolds RT (1993).** Habitable zones around main sequence stars. *Icarus* **101**, 108-108.
- **Schulze-Makuch D, Méndez A, Fairén AG, von Paris P, Turse C, Boyer G, Davila AF, Resendes de Sousa António M, Irwin LN, Catling D (2011).** A Two-Tiered Approach to Assess the Habitability of Exoplanets. *Astrobiology* **11(10)**, 1041-1052.
- **Selsis F, Kasting J, Levrard B, Paillet J, Ribas I, Delfosse X (2007).** Habitable planets around the star Gliese 581? *A&A* **476**, 1373-1387.
- **Underwood DR, Jones BW, Sleep PN (2003).** The evolution of habitable zones during stellar lifetimes and its implications on the search for extraterrestrial life. *Int. J. of Astrobiology* **2(4)**, 289-299.
- **Vogt SS, Butler RP, Rivera EJ, Haghighipour N, Henry GW, Williamson MH (2010).** The Lick-Carnegie Exoplanet Survey: A 3.1 M Planet in the Habitable Zone of the Nearby M3V Star Gliese 581. *The Astrophysical Journal* **723**, 954.

Assignment

The *HEC Full Database of Exoplanets* contains observed and modeled parameters for the current list of confirmed exoplanets and [NASA Kepler](#) candidates. This databank can be [downloaded](#) in *comma separated value* (CSV) format. This format can be read by Microsoft Excel and most scientific analyses software. An overview of the meaning of the different columns in this CSV can be found [here](#).

- Write a function $IZ(L, T_{\text{eff}}, \text{model})$ that calculates the habitable zone of a star. The luminosity L of the star (relative in relation to the sun) must be passed to the function as a mandatory parameter. The function also takes two optional parameters: the effective temperature T_{eff} of the star (in Kelvin; default value 5700 K) and the identifier of the model that determines the boundaries r_{i} and r_{o} (default value 0). Because of the restrictions of the estimate of the habitable zone, the effective temperature $T_{\text{eff}} = 3700 \text{ K}$ must be used, if an effective temperature is passed that is lower than 3700 K . The function must print the boundaries r_{i} and r_{o} of the IZ as the tuple $(r_{\text{i}}, r_{\text{o}})$.
- Use the function $IZ(r, L, T_{\text{eff}}, \text{model})$ to write a function IZD that prints the distance of a planet to the center of the habitable zone to its star. The distance r of a planet to its star must be passed as a first, obligatory argument to this function. Furthermore, the function takes the same obligatory (L) and optional (T_{eff} and a model identifier) parameters as the function IZ .

- Write a function `habitablePlanets(file[, star][, model])` that can be used to print a neatly drawn up overview list of habitable planets. habitable planets are planets for which $-1 < \text{BZA} < 1$. The overview list must contain the following information, where the expected layout is indicated:

- name of the star to which the exoplanet belongs (aligned left over 14 positions)
- luminosity L of the star (real number with 3 digits after the decimal full stop, aligned right over 8 positions)
- effective temperature T_{eff} of the star (integer, aligned right over 6 positions)
- inner boundary r_i of the habitable zone (real number with 3 digits after the decimal full stop, aligned right over 8 positions)
- outer boundary r_o of the habitable zone (real number with three digits after the decimal full stop, aligned right over 8 positions)
- two spaces
- name of the exoplanet (aligned left over 16 positions)
- distance r from the exoplanet to its star (real number with 3 digits after the decimal full stop, aligned right over 8 positions)
- IZD of the exoplanet (real number with 3 digits after the decimal full stop, aligned right over 8 positions)

the function `habitablePlanets` must obtain the necessary information for the overview from the CSV file or calculated on the basis of the file. Moreover, a file object must be passed to the function as first obligatory argument, referring to the CSV file that was opened to read from. Furthermore, the function takes two optional arguments. To the optional argument `star`, a string can be given. If this is the case, only the habitable exoplanets the name of which starts with the given string (comparison must not distinguish between uppercase and lowercase letters) are given in the overview. If no value was given to the argument `star`, all habitable exoplanets from the CSV file are listed. To the second optional parameter, the identifier of a model can be passed that determines the boundaries r_{is} and r_{os} (default value 0) for calculating the IZD.

Remark: if the CSV file does not contain a value for the distance (r), luminosity (L) or temperature (T_{eff}) that you need for the calculation of the IZD, this planet must not be printed in the overview of habitable planets.

Example

In the interactive Python session below, we assume that the CSV file [exoplanets.csv](#) is in the current directory.

```
>>> IZ(1.0)
(0.72, 1.77)
>>> IZ(0.012, 3498)
(0.08325382874078525, 0.2234714169113722)
>>> IZ(0.012, 3498, 3)
(0.05477225575051661, 0.29248445915702315)

>>> IZD(1.0, 1.0)           # Earth
-0.4666666666666666
>>> IZD(1.524, 1.0)        # Mars
0.5314285714285715
>>> IZD(0.210, 0.012, 3498) # Gliese 581 d
0.8078498270133836

>>> habitablePlanets('exoplanets.csv', star='Gl')
Gl 581      0.012 3498 0.084 0.224 Gl 581 d      0.210 0.797
Gliese 876 0.015 3350 0.092 0.247 Gliese 876 b    0.210 0.524
Gliese 876 0.015 3350 0.092 0.247 Gliese 876 c    0.130 -0.509
>>> habitablePlantes('exoplanets.csv', star='Gliese')
Gliese 876 0.015 3350 0.092 0.247 Gliese 876 b    0.210 0.524
Gliese 876 0.015 3350 0.092 0.247 Gliese 876 c    0.130 -0.509
```

Bij de zoektocht naar buitenaards leven worden verschillende methoden gebruikt voor het identificeren van bewoonbare planeten in andere sterrenstelsels (zogenaamde *exoplaneten*). De

eenvoudigste manier om bewoonbare exoplaneten te kunnen identificeren is gebaseerd op het concept van de [bewoonbare zone](#) (BZ) rondom sterren. De BZ kan gebruikt worden als een ja/nee criterium, waarbij exoplaneten ofwel als bewoonbaar of onbewoonbaar bestempeld worden. Het is echter duidelijk dat sommige exoplaneten een grotere kans hebben om bewoond te zijn dan andere. Daardoor zijn er ook meer geavanceerde metrieken nodig zoals de *afstand tot de bewoonbare zone* (BZA), die bijvoorbeeld kunnen gebruikt worden om de meer dan 600 exoplaneten die reeds bevestigd zijn te rangschikken op basis van hun kans op bewoonbaarheid. Er zijn bovendien nog duizenden exoplaneten die wachten op bevestiging van hun status, en vermoedelijk zullen er nog vele ontdekt worden in de nabije toekomst. Procedures voor het rangschikken en classificeren van bewoonbare exoplaneten helpen niet enkel om prioriteiten vast te leggen voor waarnemingen, maar ook om de resultaten te kunnen vergelijken.

De BZ wordt doorgaans gedefinieerd als het gebied rondom een ster waar vloeibaar water kan voorkomen aan de oppervlakte van een planeet (Karsting *et al.*, 1993). Dit is immers een belangrijke vereiste voor de ontwikkeling van leven zoals we dit kennen. Binnen de BZ zullen kleine hemellichamen niet in staat zijn om een atmosfeer vast te houden, terwijl de atmosfeer waarin gigantische planeten gevangen zitten zodanig dicht is dat ze elke vorm van water tot ijs zal samendrukken. Het is dan ook noodzakelijk dat exoplaneten aardse afmetingen hebben (tussen half en twee keer de doorsnede van de aarde) om als potentieel bewoonbaar verklaard te worden. Exoplaneten die dicht bij hun ster staan zullen alle water verliezen aan de ruimte en diegene die verder staan zullen bevriezen. De BZ is dus het goede gebied om naar bewoonbare planeten te gaan zoeken, met een breedte van om en bij de 0.3 [AE](#) voor zwakke sterren zoals deze met [spectraalklasse M](#) ([rode dwergen](#)) en tot 2 AE voor heldere sterren zoals deze met spectraalklasse F.

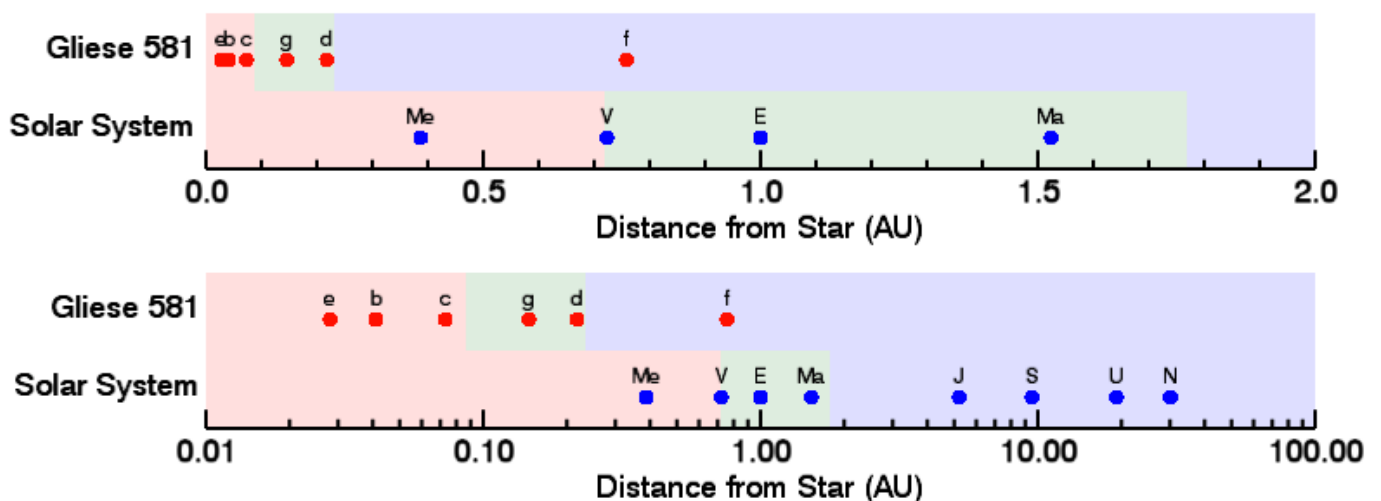
De BZ wordt gedefinieerd in functie van de stellaire helderheid en enkele andere kritische eigenschappen van sterren (Karsting *et al.*, 1993). Een conservatieve benadering voor het opstellen van de BZ gebruikt een "recent Venus" model als begrenzing r_{is} voor de binnenste straal en een "vroeg Mars" model als begrenzing r_{os} voor de buitenste straal (Underwood *et al.*, 2003; Selsis *et al.* 2007). Andere begrenzingen die typisch gebruikt worden staan weergegeven in onderstaande tabel.

model	ID	r_{is}	r_{os}
Mars-Venus (standaardmodel)	0	0,72	1,77
0% bewolking	1	0,84	1,67
50% bewolking	2	0,68	1,95
100% bewolking	3	0,46	2,40

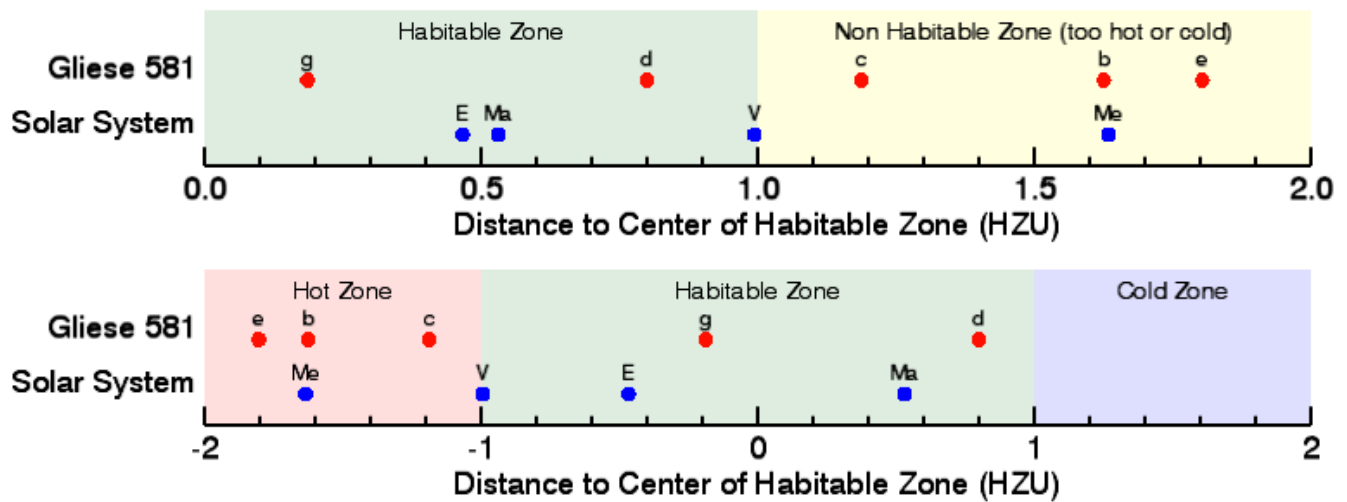
De binnenste r_{i} en buitenste r_{o} straal van de BZ (in AE) wordt gegeven door
$$\begin{array}{l} r_{\text{i}} = \sqrt{\left(r_{\text{is}} - a_{\text{i}} (T_{\text{eff}} - T_{\text{s}}) - b_{\text{i}} (T_{\text{eff}} - T_{\text{s}})^2 \right)} \\ r_{\text{o}} = \sqrt{\left(r_{\text{os}} - a_{\text{o}} (T_{\text{eff}} - T_{\text{s}}) - b_{\text{o}} (T_{\text{eff}} - T_{\text{s}})^2 \right)} \end{array}$$
 waarbij L staat voor de [stellaire helderheid](#) (uitgedrukt relatief ten opzichte van de lichtkracht van de zon), T_{eff} is de effectieve temperatuur van de ster (in Kelvin), $T_{\text{s}} = 5700 \text{ K}$, $a_{\text{i}} = 2,7619 \times 10^{-5}$, $b_{\text{i}} = 3,8095 \times 10^{-9}$, $a_{\text{o}} = 1,3786 \times 10^{-4}$ en $b_{\text{o}} = 1,4286 \times 10^{-9}$. Exoplaneten worden bewoonbaar verklaard als de gemiddelde afstand tot hun ster tussen deze twee grenzen valt.

Waar de BZ rondom een ster een ja/nee antwoord geeft op de vraag of een exoplaneet bewoonbaar is, wordt de BZ door de BZA omgezet naar een analoge schaal. Bij deze omzetting wordt de afstand berekend van de exoplaneet tot het middelpunt van de BZ. Deze afstand wordt vervolgens genormaliseerd met de halve breedte van de BZ. De BZA wordt derhalve gegeven door de formule $BZA = \frac{2r - r_o - r_i}{r_o - r_i}$ waarbij r de afstand weergeeft van de exoplaneet tot zijn ster (uitgedrukt in AE). Het voordeel van de BZA is dat de resulterende waarden makkelijk kunnen vergeleken worden tussen verschillende sterrenstelsels, omdat ze altijd hetzelfde betekenen. BZA waarden die tussen -1 en +1 gelegen zijn, komen altijd overeen met planeten die in de BZ van de ster gelegen zijn. Waarden kleiner dan -1 staan voor exoplaneten die dicht bij de ster gelegen zijn dan de BZ (*hete zone*) en waarden groter dan +1 voor die die verder van de ster afgelegen zijn (*koude zone*). Een BZA gelijk aan nul komt overeen met het centrum van de BZ. Merk op dat dit niet noodzakelijk betekent dat een exoplaneet dichtbij het centrum van de BZ meer bewoonbaar zou zijn dan een exoplaneet die verder van het centrum zou verwijderd zijn, maar nog steeds in de BZ ligt. Bewoonbaarheid hangt immers ook van andere eigenschappen van de planeet af.

Als voorbeeld vergelijken we de exoplaneten van de ster [Gliese 581](#) met deze uit ons eigen [zonnestelsel](#) (Figuur 1). Gliese 581 is een rode dwerg met vier bevestigde exoplaneten die in een baan van minder dan 1 AE rond de ster draaien. In dit voorbeeld gebruiken we echter de zes-planetten oplossing die werd voorgesteld door Vogt *et al.* (2010). De BZA werd berekend op basis van bovenstaande formules. In het bovenste paneel van Figuur 2 gebruiken we de absolute waarde van de BZA om de exoplaneten te sorteren op basis van hun bewoonbaarheid. Hoe dicht de waarde bij nul, hoe bewoonbaarder de exoplaneet. Bij deze vergelijking is het ook belangrijk om naar het teken van de BZA te kijken (onderste frame van Figuur 2). Kandidaten met een BZA juist onder -1 (hete zone) kunnen buiten beschouwing gelaten worden als bewoonbare exoplaneten, aangezien deze waarschijnlijk heel sterk op Venus gelijken. Waarden die net boven +1 liggen zijn echter wellicht nog interessant indien er sterke broeikas effecten zouden spelen.



Figuur 1. Vergelijking van de afstand van ster Gliese 581 tot zijn exoplaneten (rode punten) met de afstand tussen onze zon en de planeten van ons zonnestelsel (blauwe punten). Omwille van de duidelijkheid worden enkel de Aardse planeten weergegeven op de lineaire as van het bovenste paneel, en worden de gasreuzen bij wijze van referentie wel opgenomen op de logaritmische as van het onderste paneel. De groene gebieden geven in beide gevallen de bewoonbare zone aan. Rode gebieden duiden de hete zone aan en blauwe gebieden de koude zone. Op deze afstandsschaal is het moeilijker om te vergelijken hoe de planeten gerangschikt worden ten opzichte van hun bewoonbare zones.



Figuur 2. Afstand tot het centrum van de bewoonbare zone (BZA) van de exoplaneten van Gliese 581 (rode punten) in vergelijking met de planeten van ons zonnestelsel (blauwe punten). Het bovenste paneel gebruikt de absolute waarde van de BZA, terwijl het onderste paneel de waarde van de BZA zelf gebruikt. De groene gebieden geven in beide gevallen de bewoonbare zone aan. Rode gebieden duiden de hete zone aan en blauwe gebieden de koude zone. Het gele gebied combineert de hete en koude zone. Merk op dat Gliese 581 c (BZA = -1.2) als minder bewoonbaar kan gecatalogeerd worden dan Venus (BZA = -1.0) en dat Gliese 581 g (BZA = -0.2) bewoonbaarder lijkt dan de Aarde (BZA ~ -0.5). Enkel 2 BZA eenheden waren voldoende om alle behalve Gliese 581 f en alle aardse planeten weer te geven, de andere vallen buiten de schaal.

Bronnen

- Kasting JF, Whitmire DP, Reynolds RT (1993). Habitable zones around main sequence stars. *Icarus* 101, 108-108.
- Schulze-Makuch D, Méndez A, Fairén AG, von Paris P, Turse C, Boyer G, Davila AF, Resendes de Sousa António M, Irwin LN, Catling D (2011). A Two-Tiered Approach to Assess the Habitability of Exoplanets. *Astrobiology* 11(10), 1041-1052.
- Selsis F, Kasting J, Levrard B, Paillet J, Ribas I, Delfosse X (2007). Habitable planets around the star Gliese 581? *A&A* 476, 1373-1387.
- Underwood DR, Jones BW, Sleep PN (2003). The evolution of habitable zones during stellar lifetimes and its implications on the search for extraterrestrial life. *Int. J. of Astrobiology* 2(4), 289-299.
- Vogt SS, Butler RP, Rivera EJ, Haghighipour N, Henry GW, Williamson MH (2010). The Lick-Carnegie Exoplanet Survey: A 3.1 M Planet in the Habitable Zone of the Nearby M3V Star Gliese 581. *The Astrophysical Journal* 723, 954.

Opgave

De *HEC Full Database of Exoplanets* bevat waargenomen en gemodelleerde parameters voor de huidige lijst van bevestigde exoplaneten en [NASA Kepler](#) kandidaten. Deze databank kan [gedownload](#) worden in *comma separated value* (CSV) formaat. Dit formaat kan ingelezen worden door Microsoft Excel en de meeste wetenschappelijke analysesoftware. Een overzicht van de betekenis van de verschillende kolommen in dit CSV bestand kan je [hier](#) vinden.