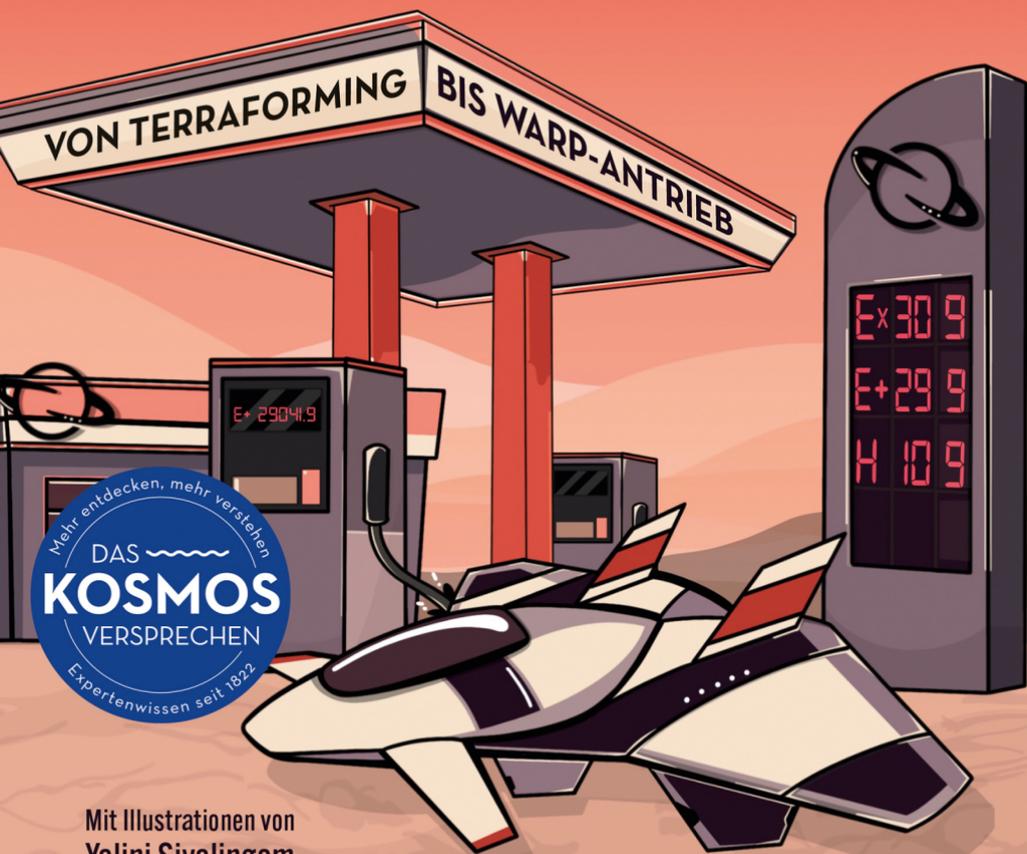


AB INS ALL!

ANNE-DORETTE
ZIEMS

KOSMOS

— WIE WIR
ZU FREMDEN
PLANETEN
KOMMEN OHNE
DRAUFZUGEHEN



Mehr entdecken, mehr verstehen
DAS
KOSMOS
VERSPRECHEN
Expertenwissen seit 1822

Mit Illustrationen von
Yalini Sivalingam

ANNE-DORETTE ZIEMS

AB INS ALL!

Mit Illustrationen von
Yalini Sivalingam

KOSMOS



Welches Thema dich auch begeistert – auf unsere Expertise kannst du dich verlassen. Und das schon seit über 200 Jahren.

Unser Anspruch ist es, dich mit wertvollem Rat zu begleiten, dich zu inspirieren und deinen Horizont zu erweitern.

BEGEISTERUNG DURCH KOMPETENZ

Unsere Autorinnen und Autoren vereinen professionelles Know-how mit großer Leidenschaft für ihre Themen.

WISSEN, DAS DICH WEITERBRINGT

Leicht verständlich, lebensnah und informativ für dich auf den Punkt gebracht.

SACHVERSTAND, DEN MAN SEHEN KANN

Mit aussagestarken Fotos, Zeichnungen und Grafiken werden Inhalte besonders anschaulich aufbereitet.

QUALITÄT FÜR HEUTE UND MORGEN

Dafür sorgen langlebige Verarbeitung und ressourcenschonende Produktion.

Du hast noch Fragen oder Anregungen?
Dann kontaktiere unsere Service-Hotline: 0711 25 29 58 70
Oder schreibe uns: [kosmos.de/servicecenter](https://www.kosmos.de/servicecenter)

To-do-Liste

- Vorwort 5

- Geeigneten Planeten auswählen 6
- Planeten terraformen 30
- Ein schnelles Raumschiff bauen 62
- Crew sicher durch den Weltraum bringen 96
- Dafür sorgen, dass die Crew überlebt 114
- Genug Energie generieren 140
- Mit wenig Privatsphäre klarkommen 152
- Schlafen 162
- Fehlende Erdanziehungskraft ausgleichen 180
- Überlegen, was wir vor Ort produzieren (können) 200
- Und dann? 212

Danksagung 216

Quellen 217

Bildnachweis 223

Impressum 224

*An die Aliens, die die Wegbeschreibung auf
der goldenen Schallplatte in den Voyager-
Sonden verstanden und es bis zur Erde
geschafft haben: Bitte ergänzt dieses Buch
mit euren Erfahrungen.*

Vorwort

Es gibt eine Frage, die ich mir ungefähr 35-mal am Tag stelle: Wann realisieren sich endlich alle meine Science-Fiction-Vorstellungen von interstellaren Reisen zu fremden Planeten?

Die eigentliche Antwort auf diese Frage wird oft von etwas überschattet, das in der Science-Fiction irgendwie selten ein Problem ist: Geld und Politik. Denn klar, Raumfahrtprojekte sind teuer und Raumfahrtprojekte sind auch immer sehr politisch – selbst, wenn man sich nicht gerade in einem Wettlauf ins All befindet. Das wollen wir aber in diesem Buch ein wenig ausblenden, denn so macht es viel mehr Spaß über die Möglichkeiten des Weltraumreisens nachzudenken.

Der Untertitel dieses Buches müsste also eigentlich lauten: „Wie wir zu fremden Planeten kommen ohne draufzugehen, wenn Geld und Politik keine Rolle spielen“. Denn das ist es ja, was wir primär wissen wollen. Was fehlt uns noch auf der wissenschaftlich-technischen Seite, um Star-Trek-mäßig (oder Star-Wars-mäßig, je nachdem, welchem Franchise man sich verbundener fühlt) durch die Milchstraße zu düsen?

Wie muss ein geeigneter Planet aussehen? Welche Anforderungen haben wir ans Raumschiff? Wie schaffen wir es, wirklich nicht draufzugehen? Sei es aus Nahrungsmangel oder wegen der Schikanen, die ein Leben in anderen Gravitationsfeldern als dem der Erde für uns bereithält. Dabei spreche ich nicht davon, dass die ganze Menschheit auswandert, sondern erstmal von grundsätzlicher Erkundung des Weltraums.

Viel Spaß beim Lesen!

10 9 8 7 6

Geeigneten Planeten auswählen



WIR SIND NICHT GASFÖRMIG. Ja, das ist keine bahnbrechende Info. Denn obwohl wir vielleicht nie aktiv darüber nachgedacht haben, ist uns das ziemlich klar. Für die Suche nach einem Planeten, den wir bereisen können, ist diese Feststellung allerdings extrem wichtig – denn viele Planeten sind Gasriesen. Der Jupiter zum Beispiel: Auf dem Jupiter zu landen, wäre wie auf Wolken zu landen. Wir würden durch das Gas durchfallen. Und das ist nicht der einzige Missstand dort: Je tiefer wir Richtung Kern gelangen, desto heißer wird es und desto höher ist der Druck.

Irgendwann kann unser Raumschiff das nicht mehr aushalten und geht kaputt – und *wir* damit auch. Das sage ich nicht einfach so. Das hat die NASA schon mal ausprobiert – ohne Menschen natürlich. 1995 ließ die NASA eine Sonde in den Jupiter stürzen. Diese Sonde, die von der größeren Raumsonde *Galileo* abgestoßen wurde, sollte Jupiters Atmosphäre untersuchen und uns Daten schicken. Das hat sie auch – und zwar 58 Minuten lang. Danach zerstörte der Jupiter den Sender in der Sonde.

Wir haben ja eben schon gesagt, dass Hitze und Druck das Problem sind. Erstmal bremst die Sonde ziemlich doll ab, wenn sie auf die Atmosphäre des Jupiters trifft. Dabei entsteht Hitze. Und zwar nicht nur ein bisschen, sondern richtig viel: 16.000 Grad Celsius. Das ist unvorstellbar viel. Nur mal als Vergleich: Die Sonnenoberfläche hat eine Temperatur von „nur“ 5500 Grad Celsius. Der letzte Druck, den die Sonde übermitteln konnte, lag bei fast 23 Bar (23-mal so viel wie auf der Erdoberfläche). Danach war der Sender zerstört und kurz danach die komplette Sonde. Summa summarum: keine gute Umgebung für uns Menschen. Deswegen ist unser erstes To-do, wenn wir die Erde verlassen wollen: Wir müssen einen Gesteinsplaneten finden.

Gesteinsplaneten finden

Das ist natürlich nicht das einzige Kriterium. Es darf außerdem nicht zu warm sein – und nicht zu kalt. Idealerweise gibt es Wasser: Gerne flüssig, gefroren ist auch okay. Und ansonsten wäre es gut, wenn der Planet keine Merkmale hat, die uns irgendwie umbringen könnten, so wie der Druck in der Atmosphäre vom Jupiter.

Wir kennen mehr als 5600 Exoplaneten in der Milchstraße (Stand: Juli 2024) – also Planeten, die sich nicht in *unserem* Sonnensystem befinden. Mehr als die Hälfte davon sind Gasplaneten. Das liegt allerdings nicht unbedingt daran, dass es deutlich weniger Gesteinsplaneten als Gasriesen gibt. Sondern größere Planeten sind einfach einfacher zu entdecken als kleinere. Und dazu kommt: Planeten, die sehr nah an ihrem Stern dran sind, sind auch einfacher zu erkennen als weiter entfernte. Das bedeutet, dass die Exoplaneten, die wir bis jetzt sicher kennen, nicht unbedingt die Planeten widerspiegeln, die am häufigsten in der Milchstraße vertreten sind.

Werfen wir einen Blick darauf, wie wir Exoplaneten entdecken können. Das ist nämlich gar nicht so einfach und liegt an den Sternen. Die Planeten können in Größe und Helligkeit einfach nicht mit ihren Sternen mithalten. Wenn man in ihre Richtung guckt, sieht man nur den Stern. Es gibt zwar direkte Aufnahmen von Exoplaneten. Dabei wird das Licht des Sterns mit einer Maske blockiert, damit wir den Planeten überhaupt einzeln wahrnehmen können. Das ist aber eher die Ausnahme. Forschende beobachten Exoplaneten vor allem indirekt, indem sie den Stern beobachten. Dabei achten sie auf Bewegungen und die Helligkeit des Sterns. Wenn ein Planet den Stern umkreist, dann schwanken Bewegung und Helligkeit nämlich etwas. Und wenn wir das beobachten können, deutet es stark auf Exoplaneten hin.

51 Pegasi b ist einer von diesen Exoplaneten, der seinen Stern etwas von seiner Bewegungsbahn ablenkt. Und er ist nicht nur irgendein Exoplanet, sondern der *erste* Exoplanet um einen *sonnenähnli-*

chen Stern, der entdeckt wurde. Davor kannte man nur Planeten, die um einen Pulsar kreisen.

Pulsar ist eine Abkürzung für *pulsierende Radioquelle*. Das ist ein Überrest einer Supernovaexplosion, also ein massereicher Stern in seinem Endstadium. Der sendet Radiowellen in ganz kurzen Abständen aus.

Die beiden Forscher Michel Mayor und Didier Queloz entdeckten 51 Pegasi b. Das war 1995.

Einen Planeten wie 51 Pegasi b gibt es in unserem Sonnensystem nicht. Mit der Entdeckung haben die beiden eine neue Planetenklasse etabliert – und zwar die sogenannten „Hot Jupiter“. Das sind Gasriesen (wie Jupiter), die sich sehr nah an ihrem Stern befinden und deswegen heiß sind.

51 Pegasi b hat etwa halb so viel Masse wie Jupiter, ist seinem Stern allerdings näher als Merkur der Sonne. Seine Umlaufzeit um den Stern beträgt deswegen nur etwa vier Tage. Seine große Masse und die geringe Umlaufzeit haben ihm geholfen, einer der ersten nachgewiesenen Exoplaneten zu werden.

Im Alltag reden wir immer davon, dass ein Planet seinen Stern umkreist. Das ist streng genommen nicht ganz richtig: Beide kreisen – und zwar um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. 51 Pegasi b hat eine große Masse und liegt nah an seinem Stern. Das heißt, der Schwerpunkt zwischen 51 Pegasi b und seinem Stern ist so weit vom Mittelpunkt des Sterns entfernt, dass der Stern sich deutlich messbar (für Teleskope auf der Erde) um den gemeinsamen Schwerpunkt bewegt.

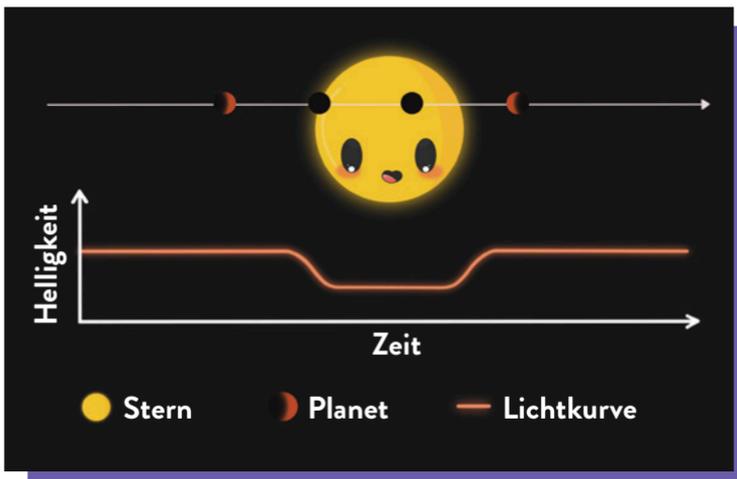
Der Stern heißt übrigens 51 Pegasi und liegt – wie der Name vermuten lässt – im Sternbild Pegasus. Aber wenn ich den Sternnamen jedes Mal ausschreiben würde, würden wir alle wahnsinnig werden.



Die
Arbeit ist 2019
mit dem Nobelpreis
für Physik ausgezeichnet
worden.

Exoplaneten werden in der Regel nach ihrem Stern benannt. Der Stern ist dann formell gesehen 51 Pegasi A und der innerste Planet 51 Pegasi b. Nach dem System könnte unsere Erde auch „Sonne d“ heißen. Die Sonne wäre dann Sonne A, der Merkur „Sonne b“ und die Venus „Sonne c“.

Die nächste und mittlerweile gängigste Methode, einen Exoplaneten zu entdecken, ist, auf die Helligkeit seines Sterns zu achten. Stellen wir uns mal vor, wir sind auf einem anderen Planeten in der Milchstraße und beobachten unsere Sonne. Wenn wir ein Messgerät aufstellen, das ein Jahr lang die Helligkeit der Sonne misst, dann werden wir feststellen, dass die Helligkeit für einen Zeitraum in diesem Jahr niedriger ist als sonst. In genau diesem Zeitraum zieht die Erde vor der Sonne vorbei und verdeckt einen Teil der Sonne. Damit blockiert sie einen Teil des Sonnenlichts – und das nimmt unser Messgerät auf.



Bei der Transitmethode verdunkelt der Planet seinen Stern, während er (von uns aus gesehen) über dessen Scheibe zieht. Das können wir messen.

Auch diese Methode bringt vor allem große Exoplaneten und Exoplaneten, die eng um ihren Stern kreisen, ans Licht. Denn wenn wir nach Kandidaten für einen Exoplaneten suchen, dann reicht es nicht, diesen Einbruch in der Helligkeit nur *einmal* zu sehen. Wir müssen ihn *regelmäßig* beobachten. Ansonsten können wir nicht sicher sein, dass wirklich ein *Planet* diesen Einbruch in der Helligkeit verursacht. Und das geht natürlich schneller, wenn der Planet eine kurze Umlaufzeit um seinen Stern hat. Von einem anderen Planeten in unserer Milchstraße aus müssten wir Sonne und Erde mindestens zwei Jahre lang beobachten, um überhaupt die Vermutung aufstellen zu können, dass der Planet Erde existiert. Bei 51 Pegasi b dagegen reichen ein paar Tage.

Die 5600 Exoplaneten, die wir kennen, sind übrigens längst nicht alle, die es gibt. Allein in der Milchstraße werden Milliarden von Exoplaneten vermutet. Klar, jeder Stern kann potenziell mehrere Planeten haben, die ihn begleiten. Und die Milchstraße beherbergt mindestens 100 Milliarden Sterne. Potenzial ist also da. Lasst uns trotzdem erstmal einen Blick auf unser eigenes Sonnensystem werfen, bevor wir uns ein Ziel weiter draußen in der Milchstraße aussuchen. Ich muss gar nicht so tun, als gäbe es diverse Optionen. Die erste Reise zu einem anderen Planeten wird zum Mars gehen. Da bin ich mir sicher.

Besten Planeten im Sonnensystem finden

Seit ich denken kann, höre ich, dass das nächste riesige Raumfahrt-ereignis eine Reise von Menschen zum Mars sein wird. Und seit es SpaceX gibt, hören wir das alle immer öfter. Allerdings ist es auch wahr, dass, seit es SpaceX gibt, das angestrebte Jahr der Marslandung immer weiter nach hinten korrigiert worden ist. Wenn wir ein bisschen zurückspulen, nämlich ins Jahr 2017 zum *International Astronautical Congress* im australischen Adelaide, dann sehen wir, dass SpaceX eigentlich 2024 eine Crew zum Mars schicken wollte.

Wieder ein Stückchen vorgespult ins Jahr 2022 heißt das neue Stichjahr 2029 – verkündet auf Twitter (damals hieß es noch Twitter). Wenn man die NASA fragt, dann wird es eher nach 2030 was mit einer Marslandung.

Noch bevor es die NASA als Organisation überhaupt gab (die NASA existiert seit 1958), lagen schon Pläne für eine Marsmission auf dem Tisch. Und mit „Pläne“ meine ich nicht, dass jemand mal gedacht hat, zum Mars reisen wäre cool. Sondern die Pläne sind wissenschaftliche Arbeiten, die sich vor allem mit der technischen Machbarkeit beschäftigen.

Ein Raketenwissenschaftler, der sich um 1950 intensiv mit einer astronautischen Marsmission beschäftigte, war Wernher von Braun. Das war der Mann, der mit seinem Team im zweiten Weltkrieg für

NS-Deutschland eine große Langstreckenrakete entwickelt hatte – und somit die weltweit erste Rakete, die die Kraft hatte, ins All zu fliegen.

Es ist nicht klar definiert, ab welcher Höhe der Weltraum beginnt. International anerkannt ist die sogenannte „Kármán-Linie“ bei 100 Kilometern Höhe.

Diese Rakete heißt *Aggregat 4*, auch *V2 (Vergeltungswaffe 2)* genannt. *Aggregat 4* ist eine Kriegswaffe des zweiten Welt-

kriegs und zugleich Ausgangspunkt für zukünftige Weltraumraketen. Wernher von Braun ist nämlich auch der Mann, der nach dem zweiten Weltkrieg an Trägerraketen für die USA gearbeitet hat – erst für die U.S. Army und später für die NASA. Unter seiner Leitung ist auch die *Saturn V* entworfen worden – also die Rakete, die die ersten Menschen zum Mond geschickt hat.

Von Wernher von Braun erschien 1952 das Buch „Das Marsprojekt“. Auf knackigen 81 Seiten konzipiert er eine astronautische Mission zum Mars. Das Buch ist kein populärwissenschaftliches Sachbuch. Es ist eher eine wissenschaftliche Arbeit, die vor allem Berechnungen enthält. Wernher von Braun betont, dass es lediglich

darum ginge, wie eine Reise zum Mars technisch machbar sei, und Aspekte wie die Navigation im Weltraum oder die Auswirkungen auf den menschlichen Körper nicht beachtet werden. Aspekte, die allerdings durchaus relevant sind, wie wir später noch sehen werden.

In „Das Marsprojekt“ visierte Wernher von Braun eine Landung auf dem Mars im Jahr 1965 an. Wir alle wissen, dass das nie passiert ist. Nach der Mondlandung 1969 schlug er nochmal eine Mission zum Mars vor. Diesmal sollten die Raumschiffe 1981 auf unserem Nachbarplaneten landen. Das ist genauso wenig passiert wie die über 60 anderen Pläne, die seitdem geschmiedet wurden. Mal sehen, ob sich das demnächst ändert: *Jetzt* haben nämlich sowohl die NASA und SpaceX als auch die chinesische Raumfahrtbehörde eine Reise zum Mars in den 2030er-Jahren wieder im Blick.

Der Zeitpunkt ist unklar. Aber wenn es passiert, dann passiert es auf dem Mars – und nicht auf der Venus oder dem Merkur, obwohl die beiden ja auch Gesteinsplaneten sind. Und dafür gibt es Gründe.

Eine Reise zum Merkur dauert Jahre. Sie dauert ungefähr so lange wie bis zum Jupiter, obwohl Merkur im Durchschnitt zehnmal näher an der Erde ist als der Jupiter. Die NASA-Sonde *Galileo*, die in den Jupiter gekracht ist, hat sechs Jahre gebraucht, bis sie in einen Orbit um den Jupiter gelangt ist. Gucken wir uns im Vergleich dazu die Raumsonde *BepiColombo* an. Die ist, während ich das hier schreibe (März 2023), unterwegs zum Merkur. 2018 startete BepiColombo vom ESA-Weltraumbahnhof in Kourou (Französisch-Guayana). Ende 2025 wird die Sonde im Orbit um den Merkur ankommen. Sie braucht also sieben Jahre für die Reise.

Es macht einen Unterschied, ob wir von der Sonne *wegfliegen* – zum Beispiel Richtung Jupiter – oder zur Sonne *hin*, wie zum Merkur. Richtung Sonne fliegen ist wie bergab rollen. Man ist schneller, weil man nicht gegen die Gravitation der Sonne ankämpfen muss. Und klar: Eigentlich heißt „schneller“, dass wir dann auch schneller da sind. Das Problem ist allerdings, dass wir leicht *zu schnell* für einen Orbit um den Merkur werden und nur an dem kleinen Planeten



Ein Schnappschuss von der Merkuroberfläche: BepiColombo zeigt uns hier die vielen Krater, die den kleinsten der Gesteinsplaneten überziehen.

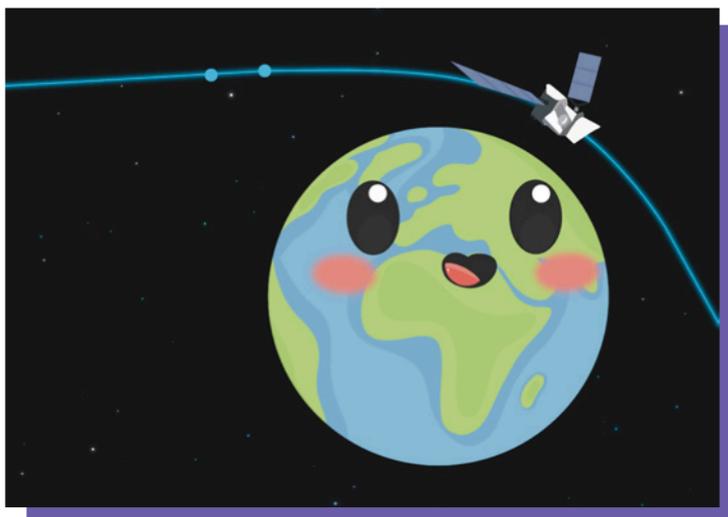
vorbeipreschen. Deswegen muss BepiColombo bremsen. Und das ist im Vakuum des Weltalls gar nicht so leicht – zumindest nicht ohne superviel Treibstoff dabeizuhaben. Es gibt zum Glück einen Trick – und der heißt *Swing-by* an einem Planeten. Bei diesem Manöver kann eine Raumsonde im Schwerfeld des Planeten entweder beschleunigen oder bremsen. Genau das macht BepiColombo: einmal an der Erde, zweimal an der Venus und sechsmal am Merkur selbst. Dieses Prozedere dauert lange und deswegen braucht BepiColombo sieben Jahre bis zum Merkur.

Wenn wir zum Merkur fliegen und ihn betreten wollen, dann würde es ähnlich lange dauern, weil wir zum Landen auch erstmal

in den Orbit gelangen müssen. Abgesehen von der Reisedauer gibt es noch weitere Dinge, die gegen den Merkur als Reiseziel für uns sprechen: Merkur ist zum Beispiel nicht geeignet für Menschen mit einem kleinen Temperaturtoleranzbereich. Auf keinem anderen Planeten in unserem Sonnensystem schwanken die Temperaturen so sehr wie auf dem Merkur. Bei Tag wird es bis zu 430 Grad Celsius heiß und bei Nacht minus 180 Grad Celsius kalt. Merkur ist also raus.

Wie sieht es mit der Venus aus? Ich meinte ja vorhin, dass es von Vorteil ist, wenn uns ein Planet nicht direkt umbringt, sobald wir einen Fuß auf seine Oberfläche setzen. Und na ja, das kann die Venus leider nicht leisten – obwohl sie näher an der Erde ist als der Mars.

Anfang der 1960er-Jahre war das noch nicht so klar. Damals war die Venus ein Hauptziel der sowjetischen Raumfahrt. Das Ganze lief unter dem Namen „Venera-Programm“. *Venera* ist die russische Bezeichnung für Venus. Wenn wir die Missionen, die schon



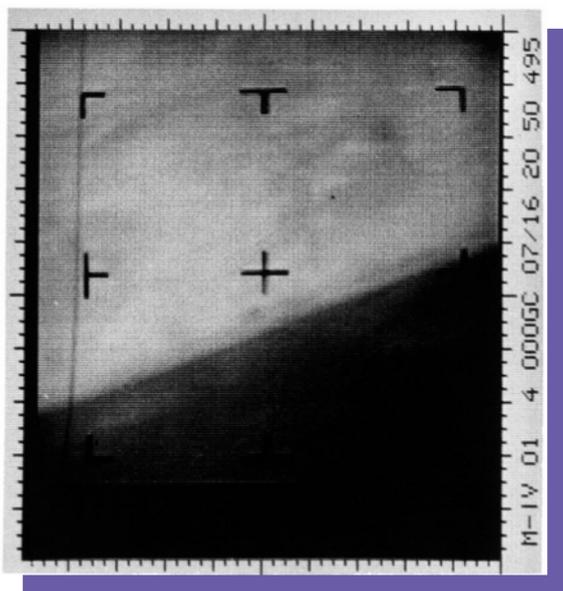
Die Schwerkraft von Planeten lässt sich super nutzen, um Raumsonden ohne zusätzlichen Treibstoff zu beschleunigen.

direkt beim Start schiefgegangen sind, nicht mitzählen, dann gab es 16 Venera-Missionen. Venera 4 sendete zum ersten Mal Daten aus der Venusatmosphäre. Nach 94 Minuten (24,96 Kilometer über der Venusoberfläche) brach die Funkverbindung ab – der Druck in der Atmosphäre war zu hoch. Erst Venera 7 landete erfolgreich auf der Venusoberfläche. Sie hielt den Druck dort von 90 Bar (wir erinnern uns: auf der Erdoberfläche herrscht ein Bar) für 23 Minuten aus. Dazu kommt: Die Venus ist der Planet mit der heißesten Oberflächentemperatur in unserem Sonnensystem. Man sollte eigentlich meinen, dieser Titel gebührt dem Merkur, schließlich ist er der Sonne am nächsten. Doch die Venus hat eine Atmosphäre mit Treibhauseffekt (wie die Erde). Dort ist es durchschnittlich 475 Grad Celsius heiß. Und als wäre das noch nicht alles, ist die Venus auch noch ein wortwörtlich ätzender Planet. Die Atmosphäre besteht hauptsächlich aus Kohlenstoffdioxid (CO₂) und die Wolken aus Schwefelsäure. Überleben auf der Oberfläche? Ein klares Nein.

Ein kleines Schlupfloch bietet die Venus allerdings: Solange wir nicht versuchen, die Oberfläche zu betreten, könnten wir uns die Venus vielleicht aus der Nähe angucken. 50 Kilometer über der Oberfläche erwartet uns nämlich ungefähr der Luftdruck, den wir auch auf der Erdoberfläche haben. Die Temperaturen variieren mit 30 bis 70 Grad Celsius zwischen Sommertag und Sauna und sind damit zumindest aushaltbar. Dieses Schlupfloch ist natürlich eher für die Forschung interessant als für eine dauerhafte Siedlung. Denn nur mit Luftschiffen in der Venusatmosphäre ist es schwierig, unabhängig von der Erde zu werden. Damit ist die Venus erstmal auch raus.

Mars erforschen

Der Mars gewinnt also gegen Merkur und Venus, wenn es darum geht, Menschen auf einen anderen Planeten zu schicken. Und der Mars hat schon einmal gewonnen: Am 15. Juli 1965 konnte die NASA einen großen Erfolg in der Raumfahrt verbuchen: Das ist der



Say 'cheese': Das erste Marsfoto aus dem Juli 1965.

Tag, an dem das erste Foto eines anderen Planeten aus dem Welt-
raum geschossen wurde – und zwar mit der Raumsonde Mariner 4.

Mittlerweile ist der Mars der am besten erforschte Planet in un-
serem Sonnensystem – gleich nach der Erde natürlich. Diverse Son-
den und Rover haben große Mengen an Daten zur Erde geschickt.
Für uns, die die Erde verlassen wollen, ein gutes Zeichen. Denn das
bedeutet: Der Mars ist ganz gut erreichbar. Alle 26 Monate öffnet
sich ein Zeitfenster, in dem Erde und Mars so zueinanderstehen,
dass wir energetisch günstig zum Mars reisen können. Damit ist die
Reisedauer vergleichsweise kurz und wir brauchen möglichst wenig
Treibstoff.

„Vergleichsweise kurz“ meint etwa ein halbes Jahr. So lange hat
zum Beispiel auch der Flug von Marsrover *Perseverance* gedauert.

Die Mission begann am 14. August 2020 und der Rover landete am 18. Februar 2021 auf dem Mars. Sechs Monate sind natürlich trotzdem lang für eine Reise. *Perseverance* musste allerdings auch über 480 Millionen Kilometer hinter sich bringen. Dafür gibt es nicht mal einen guten irdischen Vergleich, so groß ist das. Für diese Kilometerzahl müsste man über 1000-mal von der Erde zum Mond fliegen. Aber selbst das ist schwer vorstellbar. Wie man diese Reisezeit möglicherweise verkürzen könnte, besprechen wir in späteren Kapiteln noch. Es gibt nämlich Ideen für alternative Raumschiffantriebe.



Mars

Durchmesser	0,53 d_{Erde}
Masse	0,1 M_{Erde}
Durchschnittlicher Abstand zur Sonne	1,5 AE
Oberflächenbeschleunigung	0,4 g
Jahr dauert	687 Tage
Tag dauert	24 Stunden, 40 Minuten
Hauptbestandteile der Atmosphäre	Kohlenstoffdioxid (CO_2) - 95,1% ; Stickstoff (N_2) - 2,59% ; Argon (Ar) - 1,94% ; Sauerstoff (O_2) - 0,16% ; Kohlenstoffmonoxid (CO) - 0,06%

Wir fassen zusammen: Wenn wir erstmal in unserem Sonnensystem bleiben wollen, dann ist der Mars die erste Wahl, weil

1. er ein Gesteinsplanet ist und wir auf der Oberfläche stehen können (anders als auf Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun)
2. er ein Nachbarplanet der Erde ist und die Reisezeit im Idealfall „nur“ ein halbes Jahr dauert (anders als zum Merkur) und
3. sein Luftdruck und seine Hitze uns nicht zerquetschen, wenn wir auf der Oberfläche ankommen (anders als auf Venus).

Trotzdem ist der Mars natürlich nicht wie die Erde. Die Schwerkraft auf dem Mars entspricht nur etwa einem Drittel der Schwerkraft, die wir hier gewohnt sind. Die Durchschnittstemperatur liegt mit -55 Grad Celsius deutlich unter dem, was wir von der Erde kennen (etwa 14 bis 15 Grad Celsius). Und auch wichtig: Es gibt keinen Sauerstoff in der Atmosphäre. Generell ist die Atmosphäre sehr dünn. Es ist zwar gut, dass sie uns nicht zerquetscht. Allerdings können unsere Körper es auch nicht ab, wenn der Druck zu niedrig ist.

Auf dem Mars ist der Atmosphärendruck ($6,35$ Millibar) kleiner als ein Hundertstel des Luftdrucks, den wir von der Erde kennen (ein Bar). Wir können uns schwer vorstellen, was das für unsere Körper bedeutet, weil es diese Situation auf der Erde nicht gibt. Klar, je höher man auf einem Berg wandert, desto niedriger der Luftdruck – allerdings nicht so niedrig.

Ein niedriger Luftdruck hat Konsequenzen für den Aggregatzustand von Wasser (und allen anderen Elementen) – also ob es fest, flüssig oder gasförmig ist. Wir bestehen zu einem großen Teil aus Wasser. Deswegen ist das für uns relevant. Der Aggregatzustand hängt nämlich nicht nur von der Temperatur ab, sondern auch vom



Auf dem Mount Everest beträgt der Luftdruck etwa $0,3$ Bar – also knapp ein Drittel des Normaldrucks auf der Erde.

Luftdruck. Im Alltag nehmen wir das nicht wahr, solange wir nicht auf Bergspitzen Wasser kochen.

Bei einem so niedrigen Luftdruck wie auf dem Mars kann flüssiges Wasser selbst in Gebieten, in denen der Druck etwas höher als durchschnittlich ist, nur zwischen 0 und 10 Grad Celsius existieren. Darunter gefriert es und darüber verdampft es. Unsere Betriebstemperatur beträgt circa 37 °C und liegt damit oberhalb der 10 °C, über denen flüssiges Wasser auf dem Mars anfängt zu kochen.



Das heißt jetzt nicht, dass unser Blut und andere Körperflüssigkeiten sofort komplett verdampfen. Es können sich allerdings Bläschen in der Blutbahn und Schwellungen durch Wasserdampf unter der Haut bilden.

Schlimmer als für die Adern ist das Ganze für die Lunge. In der Marsatmosphäre kann die Lunge reißen, weil sich die Restluft (mit normalem irdischem Luftdruck) darin ausdehnt. Und na klar: Generell können wir ohne Sauerstoff nicht auskommen.

Das sind zum Glück alles Dinge, bei denen uns ein Raumanzug helfen kann. Der sorgt dafür, dass wir nicht erfrieren, nicht überhitzen, Luft zum Atmen haben, dass unser Blut flüssig bleibt und unsere Lunge nicht zerreißt.

So weit die kurzfristigen Probleme, die der Mars mit sich bringt. Es bleiben natürlich noch langfristige Auswirkungen von Raumfahrt auf den Körper. Dazu später mehr.

Was Temperatur und Druck angeht, verhält sich der Mars also gegensätzlich zur Venus: Die Venus ist heiß mit viel Druck und der Mars kalt mit wenig Druck. Ersteres können wir bisher nicht mit Raumanzügen ausgleichen. Letzteres schon – und deswegen ist der Mars im Sonnensystem unsere erste Wahl. Ist er auch milchstraßenweit ein idealer Reise- und Auswanderungsort für uns Menschen? Vermutlich nicht ... Das geht bestimmt besser und erdähnlicher.

Dafür müssen wir dann aber wohl oder übel unser Sonnensystem verlassen – entweder in Richtung eines der über 5600 Exoplaneten, die wir kennen, oder eines der Milliarden Exoplaneten, die wir (noch) nicht kennen.

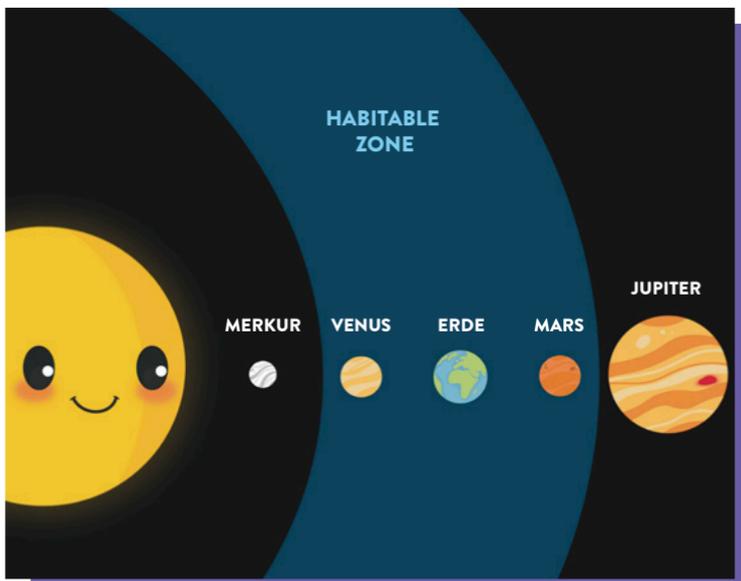
Exoplaneten in habitabler Zone finden

Ich sag's, wie's ist: Bisher ist es noch nicht vorgekommen, dass Forschende einen Exoplaneten entdeckt haben und wir danach lesen konnten: „Das ist der erdähnlichste Planet überhaupt, lasst uns dahin düsen!“ Das liegt einerseits daran, dass wir nur einen Bruchteil der Exoplaneten dort draußen kennen, und andererseits daran, dass es – selbst wenn wir sie kennen – schwierig ist, mehr über ihre Eigenschaften herauszufinden.

„Auf Wolf 1069 b könnte es Leben geben“: Schlagzeilen wie diese betitelten im Februar 2023 diverse Artikel. Ein internationales Team um Diana Kossakowski vom Max-Planck-Institut für Astronomie hatte einen neuen Exoplaneten entdeckt. Wolf 1069 b ist der Erde, was Masse und Größe angeht, ziemlich ähnlich. Und besonders interessant: Er ist in der sogenannten *habitablen Zone* seines Planeten. „Habitabel“ bedeutet bewohnbar. Die habitable Zone ist der Bereich um einen Stern, in dem es nicht zu heiß und nicht zu kalt ist, so dass es dort theoretisch flüssiges Wasser geben kann. Denn flüssiges Wasser ist essentiell für erdähnliches Leben. Wenn ein Planet jetzt in der habitablen Zone liegt, bedeutet es nicht automatisch, dass er auch wirklich bewohnbar oder sogar bewohnt ist. In unserer habitablen Zone um die Sonne liegen auch noch Venus und Mars. Wir erinnern uns an die unangenehmen Bedingungen auf beiden Planeten.

Die habitable Zone ist allerdings ein guter Anfang, wenn wir nach Planeten suchen, auf denen erdähnliches Leben möglich ist.

Wolf 1069 b liegt also in der habitablen Zone um seinen Stern. Sein Stern (Wolf 1069) ist übrigens ein roter Zwerg – also ein Stern,



Die Erde hat genau den richtigen Ort für Leben erwischt: Sie liegt mitten in der habitablen Zone unseres Sonnensystems. Venus und Mars liegen an ihren Rändern.

der im Vergleich zu unserer Sonne viel weniger Energie (Licht) abstrahlt. Deswegen befindet sich die habitable Zone dort auch näher am Stern. Denn es gibt durchaus einige nennenswerte Unterschiede zwischen Wolf 1069 b und unserer Erde: Der Exoplanet ist viel näher an seinem Stern dran. Der Abstand beträgt nur ein Fünfzehntel des Abstands zwischen Erde und Sonne. Damit ist er wie 51 Pegasi b näher an seinem Stern als Merkur an der Sonne. Dementsprechend kurz ist auch seine Umlaufzeit. Ein Jahr auf Wolf 1069 b dauert nur etwa 15 Erdtage. Und sehr wahrscheinlich befindet er sich in gebundener Rotation um seinen Stern.

Die Forschenden vermuten das, weil Wolf 1069 b so nah an seinem Stern liegt. Gebundene Rotation ist nämlich ein Phänomen

zwischen Himmelskörpern, die eng beieinander sind. Für Wolf 1069 b würde das bedeuten, dass es auf der einen Seite des Planeten immer hell ist und auf der anderen immer dunkel.

→ **Gebundene Rotation** bedeutet für einen Planeten, dass eine Umdrehung um sich selbst genauso lange dauert wie ein Orbit um die Sonne. Mit anderen Worten: Ein Tag ist genauso lang wie ein Jahr. Außerdem zeigt immer dieselbe Seite des Planeten zum Stern. Das kennen wir von unserem Mond. Der ist in gebundener Rotation um die Erde und wir sehen von der Erde aus immer dieselbe Seite vom Mond. ↩

Atmosphären von Exoplaneten erforschen

Nur in der habitablen Zone zu liegen, reicht allerdings nicht, um auch wirklich lebensfreundlich zu sein. Was Wolf 1069 b bräuchte, ist eine Atmosphäre, wie wir sie hier auf der Erde haben. Die Forschenden haben die Durchschnittstemperatur für Wolf 1069 b berechnet. Wenn sie von einem einfachen Gesteinsplaneten ausgehen, dann liegt die Durchschnittstemperatur bei -23 Grad Celsius. Wenn sie allerdings von einer erdähnlichen Atmosphäre ausgehen, dann wirkt wie bei uns der Treibhauseffekt und die Durchschnittstemperatur steigt auf 13 Grad Celsius. Unter den Bedingungen könnte es auf der Seite, die zum Stern zeigt, flüssiges Wasser geben.

Wir wissen allerdings nicht, ob es überhaupt Wasser auf dem Planeten gibt; geschweige denn eine Atmosphäre. Dazu stehen noch weitere Untersuchungen aus, die technisch im Moment nicht so leicht zu bewältigen sind. Wir sprechen immerhin von einem relativ kleinen (erdähnliche Größe und Masse) Planeten, der 31 Lichtjahre von uns entfernt liegt. Das ist so weit entfernt, dass sein Licht 31 Jahre braucht, um bei uns anzukommen. Zum Vergleich: Licht braucht acht Minuten von der Sonnenoberfläche bis zur Erde. Und diese Entfernung ist für uns Menschen auch schon ziemlich weit.

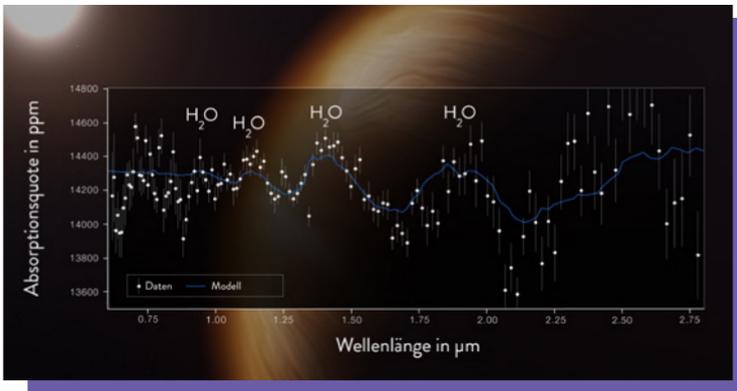
So wie Wolf 1069 b geht es diversen Exoplaneten. Sie sind Gesteinsplaneten und in der habitablen Zone. Viel mehr finden wir über sie nicht heraus. Es ist mittlerweile möglich, Exoplaneten mit Erdmasse zu entdecken. Sie weiter zu erforschen, bleibt allerdings erstmal schwierig – und das hängt vor allem damit zusammen, dass sie vergleichsweise klein sind.

Ein kleines bisschen weiter entfernt als Wolf 1069 b liegt das laut NASA am besten erforschte Planetensystem außerhalb unseres Sonnensystems: das Trappist-1-System. Der rote Zwerg Trappist 1 liegt 40 Lichtjahre von uns entfernt und wir kennen sieben Planeten, die ihn umkreisen: Trappist 1 b, c, d, e, f, g und h.

Vier der Planeten haben ungefähr die Maße der Erde und liegen in der habitablen Zone (d, e, f, g). Sie alle kreisen sehr nah und dicht beieinander um ihren Stern und – ich habe langsam das Gefühl, das ist ein Running Gag in diesem Kapitel – alle sieben Planeten befinden sich näher an Trappist 1 als Merkur an der Sonne (wir sehen, es ist wirklich von Vorteil, als Exoplanet nah an seinem Stern zu kreisen, wenn man entdeckt werden will). Und sie sind alle Gesteinsplaneten.

Wie bei allen Exoplaneten, die wir als Gesteinsplaneten klassifizieren, wissen wir nicht genau, woraus sie bestehen. Ob es ein Gesteinsplanet oder ein Gasriese ist, wird vor allem an der Dichte festgemacht. Eine hohe Dichte bedeutet *Gesteinsplanet* und eine niedrige Dichte *Gasriese*. Dabei stützen wir uns auf die Planeten, die wir viel besser kennen – nämlich die in unserem Sonnensystem. Merkur, Venus, Erde und Mars haben eine deutlich höhere Dichte als Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Der Saturn hat mit seiner mittleren Dichte von etwa 0,7 Gramm pro Kubikzentimeter als einziger Planet im Sonnensystem eine geringere Dichte als Wasser (etwa ein Gramm pro Kubikzentimeter). Wenn wir den Saturn also in ein riesiges Schwimmbad legen würden, dann würde er obenauf schwimmen. Natürlich reicht uns diese grobe Unterteilung anhand der Dichte nicht. Wir wollen wissen, aus welchen Stoffen die Exoplaneten bestehen.

Am 12. Juli 2022 war die Freude bei allen Weltraumfans groß: Die ersten fünf Bilder des James-Webb-Weltraumteleskops (JWST) wurden veröffentlicht. Das Teleskop war über ein halbes Jahr vorher ins All gestartet und um die 25 Jahre vorher geplant worden. Unter den ersten fünf Bildern stach eines besonders heraus, denn es war kein Foto von einem Himmelsobjekt. Forschende analysierten mithilfe des JWST die Zusammensetzung der Atmosphäre eines Exoplaneten. Dafür nahmen sie das Licht des Sterns, den der Planet umkreist, auf, das durch die Atmosphäre des Planeten gelaufen war. Bestimmte Moleküle in der Atmosphäre absorbieren bestimmte Wellenlängen an Licht. Und wenn wir uns ein Spektrum des Lichts angucken – also wie viel Licht von welcher Wellenlänge bei uns ankommt – dann sehen wir, welche Wellenlängen absorbiert worden sind. Und so können wir auf die Moleküle in der Atmosphäre schließen. Das JWST hatte das Spektrum für den Planeten WASP-96 b aufgenommen, ein Gasriese, der – wie sollte es anders sein – näher an seinem Stern ist als Merkur an der Sonne, und Wasserdampf in seiner Atmosphäre entdeckt.



Das Spektrum von WASP-96 b zeigt, dass sich in der Atmosphäre Wasser befindet.

Es ist nicht das erste Mal, dass es Forschenden gelang, eine Exoplanetenatmosphäre zu analysieren. Das Hubble-Weltraumteleskop zum Beispiel hatte bereits diverse solcher Aufnahmen gemacht, auch von den Planeten im Trappist-1-System. Danach konnten Forschende zwar ausschließen, dass die Planeten eine dicke Wasserdampf-Atmosphäre wie Gasriesen haben. Für weitere Untersuchungen brauchten sie allerdings das JWST mit seinen präziseren Messinstrumenten. Leider gab es auch hier keine „positive“ Rückmeldung. Auch mit dem JWST ist noch keine Atmosphäre im Trappist-1-System gefunden worden.

Das Teleskop bestimmte im März 2023 die Temperatur von Trappist-1 b. Die Temperatur ist auch ein Anzeichen dafür, ob es eine Atmosphäre gibt oder nicht. Denn *mit* Atmosphäre verteilt sich die Temperatur besser und gleichmäßiger über den gesamten Planeten. Dazu kommen Treibhausgase, die die Temperatur steigen lassen. Im Vorfeld hatte es Modelle zur Temperatur von Trappist-1 b gegeben – jeweils mit und ohne Atmosphäre. Und was das JWST messen konnte, stimmte mit dem Modell für „keine Atmosphäre“ überein. Leider. Auch Trappist-1 c stellte sich demnach als wahrscheinlich atmosphärenlos heraus. Trappist-1 c galt bis dahin als zweite Venus. Denn Größe und Strahlung sind vergleichbar mit der Venus. Messungen konnten allerdings zeigen, dass Trappist-1 c höchstens eine sehr dünne Atmosphäre mit ganz wenig Kohlendioxid aufweist oder eben gar keine. Wobei der Planet wahrscheinlich mal eine hatte, sie aber wegen des Sternenwinds von Trappist-1 verloren hat.

Exoplaneten mit Magnetfeld finden

Mal angenommen, wir haben einen Exoplaneten, der ähnlich groß und schwer ist wie die Erde und eine sauerstoffreiche Atmosphäre hat wie die Erde, dann ist das schon mal die halbe Miete und mehr als wir hier in unserem Sonnensystem finden können. Bonuspunkt wäre jetzt noch ein Magnetfeld. Denn gerade im Moment, wo wir mit



Dieses faszinierende Polarlicht konnte ich im April 2024 über Island erleben. Dafür lohnt es sich, nochmal mitten in der Nacht aufzustehen!

unseren Teleskopen nur dazu in der Lage sind, erdähnliche Planeten zu entdecken, die sehr nah an ihrem Stern liegen, macht sich eine Frage breit: Werden diese Planeten mit Sternwinden bombardiert?

Unsere Sonne sendet permanent Strahlung in Form von geladenen Teilchen aus. Zum Glück haben wir ein Magnetfeld, das diese Teilchen abwehrt. Ist der Sonnenwind besonders stark, können wir ihn auf der Erde trotzdem wahrnehmen – als Polarlichter. Noch stärker kann der Sonnenwind zu einem Sonnensturm werden und auch für technische Störungen bei Satelliten und anderen Geräten sorgen.

Das haben wir in jüngster Zeit zum Glück noch nicht erlebt. Der bisher größte wissenschaftlich beobachtete Sonnensturm war das sogenannte *Carrington-Ereignis* im Jahr 1859 – benannt nach dem Astronomen Richard Christopher Carrington, der die Sonneneruptionen, die dem Sturm vorausgegangen waren, beobachtete. Damals war die Menschheit noch nicht so weit technologisiert wie

heute. Deswegen waren die Auswirkungen auf den Alltag nicht so gravierend. Allerdings gab es damals ein Telegrafennetz, das durch den Sonnensturm gestört wurde. Hohe Spannungen induzierten Funkenschläge in den Telegrafen und brachten teilweise sogar das Papier zum Brennen. Dazu kamen Polarlichter, die bis in die Karibik zu sehen waren.

Würde sich das Carrington-Ereignis heute wiederholen, stünden wir vor viel größeren Problemen. Betroffen wären als Erstes Satelliten, die ausfallen. Dazu gehört beispielsweise das GPS-Netz. Das könnten wir vielleicht noch mit einer Karte kompensieren. Viel schlimmer wäre es für uns, wenn großflächig der Strom ausfällt. Auch dafür kann ein Sonnensturm sorgen. Wie bereits erwähnt, können die Teilchen des Sonnensturms hohe Spannungen induzieren und damit Transformatoren zerstören, die sich auch nicht so einfach ersetzen lassen. Und Strom brauchen wir ja für alles. Da müssen wir uns nur mal vorstellen, ein Krankenhaus hat für längere Zeit keinen Strom. Umso wichtiger ist es, das Weltraumwetter im Blick zu behalten. Beim Carrington-Ereignis lagen übrigens etwa 17 Stunden zwischen der beobachteten Sonneneruption und dem Eintreffen des Sonnensturms auf der Erde.

Planeten ohne Magnetfeld sind dem Sonnenwind komplett ausgeliefert; nicht nur bei besonders großen Sonnenstürmen. Auf dem Mars gelangen die Sonnenteilchen ungestört bis zur Oberfläche. Und von den meisten Exoplaneten wissen wir nicht, ob sie ein Magnetfeld haben oder nicht. Bei einigen wenigen Exoplaneten haben Forschungsgruppen Anzeichen auf ein Magnetfeld gefunden, als sie die Atmosphären untersucht haben. Bei HAT-P-11 b zum Beispiel. 2021 nahm das Hubble-Weltraumteleskop ein Spektrum des Sternenlichts durch die Atmosphäre von HAT-P-11 b auf. Die Forschenden konnten Kohlenstoffionen nachweisen. Die deuten auf ein Magnetfeld hin, weil das Teilchen sind, die mit dem Magnetfeld interagieren und deswegen in der Magnetosphäre bleiben – dem Bereich um den Planeten herum, in dem das Magnetfeld geladene Teilchen aufhält.



Ein Magnetfeld oder ein anderer Schutz vor kosmischer Strahlung – vor allem Sternwinden – ist für unsere Reise ein Muss. Denn *ohne* kann das nicht nur Folgen für technische Geräte haben, sondern auch für unsere Gesundheit. Darüber reden wir später noch ausführlicher.

Fazit

Die Frage ist, was wir wollen: Wollen wir beweisen, dass wir dazu in der Lage sind, einen anderen Planeten zu betreten? Dann ist der Mars unser Planet. Wollen wir eine potenzielle neue oder zweite Heimat für die Menschheit finden? Dann brauchen wir langfristig einen Planeten, der ein Gesteinsplanet ist, in der habitablen Zone um seinen Stern liegt, eine erdähnliche Atmosphäre hat und Schutz vor Sternwinden und anderer kosmischer Strahlung bietet.

Vor allem bei Atmosphäre und Magnetfeld liegt es an uns, Teleskope zu bauen, mit denen wir Gesteinsexoplaneten nicht nur entdecken können, sondern auch mehr über einzelne Exoplaneten herausfinden.

Was ist, wenn wir nicht warten wollen, bis wir all diese Bedingungen abhaken können? Es gibt eine Idee aus der Science-Fiction, mit der wir einige Punkte auf dieser Liste umgehen können. Natürlich beinhaltet diese Idee selbst aber auch noch einige Herausforderungen, bevor wir sie einsetzen können.