

SEMINARARBEIT

Rahmenthema des Wissenschaftspropädeutischen Seminars:

Astrophysik

Leitfach: *Physik*

Thema der Arbeit:

Exoplaneten und ihre Bewohnbarkeit

Theorien im Vergleich zur Trisolaris-Reihe

Verfasser:

Tobias Stauber

Kursleiter:

StR S. Rager

Abgabetermin:

7. November 2023

Bewertung	Note	Notenstufe in Worten	Punkte		Punkte
schriftliche Arbeit				x 3	
Abschlusspräsentation				x 1	
Summe:					
Gesamtleistung nach § 61 (7) GSO = Summe:2 (gerundet)					

Datum und Unterschrift des Kursleiters

A person stands on a dark, rocky landscape, looking up at a massive, glowing blue planet that dominates the sky. The planet is surrounded by a bright, hazy atmosphere, and the sky is a warm, orange-brown color. In the background, there are silhouettes of mountains and a smaller, dark planet in the upper right corner.

***Exoplaneten und ihre
Bewohnbarkeit***

Theorien im Vergleich zur Trisolaris Reihe

von Tobias Stauber

Inhalt

1. Fremde Welten in den Weiten des Alls?	4
2. Methoden zum Nachweis von Exoplaneten	5
2.1. Radialgeschwindigkeitsmethode	5
2.2. Transit-Methode.....	8
3. Bewohnbarkeit von Exoplaneten.....	10
3.1. Die habitable Zone.....	11
3.2. Untersuchung planetarer Atmosphären.....	14
4. Außerirdisches Leben	16
4.1. Die Drake-Gleichung.....	16
4.2. Das Fermi Paradoxon.....	17
4.2.1. Der große Filter	17
4.2.2. Die große Stille.....	18
5. Vergleich der Trisolaris-Buchreihe mit der physikalischen Realität	20
5.1. Interstellare Kommunikation	21
5.2. Trisolaris und seine Bewohner.....	23
5.3. Kosmosoziologie	24
6. Fazit	27
7. Anhang.....	28
7.1. Literaturverzeichnis	28
7.2. Abbildungsverzeichnis.....	33
7.3 Tabellenverzeichnis.....	34
7.4. Selbstständigkeitserklärung	35

1. Fremde Welten in den Weiten des Alls?

Das Universum. Eine scheinbar unendliche Leere, die unseren Planeten schon immer umgibt und nur darauf wartet, erkundet zu werden. Eine schwarze Leinwand, die von Künstlern und Forschern mit Leben gefüllt



Abbildung 1.1 Ein Blick hinaus ins Universum

werden will. Eine fremde Welt, die einen jeden zum Träumen einlädt. Seit wir Menschen gedenken, fasziniert uns der Blick hinauf zum nächtlichen Himmel (vgl. Abb. 1.1). Gibt es noch andere Planeten? Gibt es eine andere Erde? Gibt es vielleicht sogar anderes Leben? Oder sind wir doch ganz allein im Universum, ein paar glückliche Moleküle auf einem kleinen Stein?

Auch wenn die Wissenschaft nicht auf alles eine hundertprozentige Antwort hat, so wollen wir im Folgenden doch einmal versuchen, einer solchen möglichst nahe zu kommen. Dabei widmen wir uns zuerst der Frage nach der Existenz extrasolarer Planeten und wie wir diese nachweisen können, bevor wir uns der Bewohnbarkeit von Exoplaneten annehmen. Zum Schluss werfen wir dann noch einen Blick auf aktuelle Theorien zu außerirdischem Leben und vergleichen die ersten beiden Bände von *Cixin Lius* (chin. Autor; 1963 - heute) *Trisolaris-Reihe* mit der physikalischen Realität. Für den größten Teil der Arbeit wird die wissenschaftliche Methode der Literaturanalyse genutzt, also das Wissen aus verschiedenen Quellen zusammengetragen und kombiniert. Dabei handelt es sich bei der verwendeten Literatur sowohl um Fachbücher als auch um Artikel von Fachzeitschriften und Internetquellen. Die qualitative Analyse im letzten Kapitel verwendet vergleichende und inhaltsanalytische Ansätze.

2. Methoden zum Nachweis von Exoplaneten

Seit Astronomen mit dem Gedanken spielen, dass unsere Sonne nur ein Stern von vielen sei, stellt man sich die Frage, ob nicht auch die Planeten unseres Sonnensystems nur einige von vielen sind. Doch blickt man in den Nachthimmel, so sind fremde Planeten im Gegensatz zu fremden Sternen nicht zu entdecken. Aufgrund der hohen Entfer-

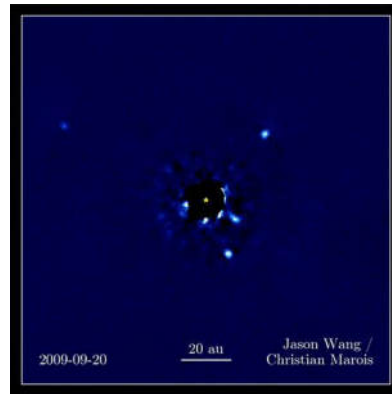


Abbildung 2.1 Vier Exoplaneten um den Stern HR 8799; Jason Wang und Christian Marois

nung der Sterne zu unserer Erde und der nicht vorhandenen Leuchtkraft der umkreisenden Planeten, können Exoplaneten nicht mit dem bloßen Auge oder einfacheren Teleskopen von der Erde aus erblickt werden. Dennoch hat die Wissenschaft andere Wege gefunden, Planeten in weit entfernten Sternensystemen nachzuweisen. Bekannte und bereits erfolgreich angewendete Methoden hierzu basieren auf der Masse der Planeten (*Gravitational Microlensing*), der Beobachtung des Sternsystems wie auf Abbildung 2.1 zu sehen (*Direct Imaging*), der Veränderung der Radialgeschwindigkeit des Sterns und der Verdunklung des Sterns, während sich ein Planet zwischen ihm und dem Beobachter hindurchbewegt.¹

Über die letzten drei Jahrzehnte konnten so über fünf tausend Exoplaneten mit Entfernungen von bis zu 27.000 Lichtjahren nachgewiesen werden. Die folgenden Unterkapitel beschäftigen sich genauer mit den Verfahren der Radialgeschwindigkeitsmessung und der Messung von Transits, die zusammen für den Nachweis von 93.9% aller extrasolarer Planeten verantwortlich sind.²

2.1. Radialgeschwindigkeitsmethode

Bereits im 17. Jahrhundert erkannte der Physiker und Mathematiker *Sir Isaac Newton* (engl. Physiker, 1642-1727), dass die Planeten des Sonnensystems nicht direkt um die Sonne kreisen, sondern sich viel mehr zusammen mit der Sonne um einen gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Aus dieser auf seinen zuvor aufgestellten, physikalischen Gesetzen basierenden Überlegung, lässt sich schlussfolgern, dass die Bewegung und damit Existenz eines Planeten in einem Sternensystem eine Bewegung des Sternes hervorruft. Um die Radialgeschwindigkeit des Sternes auch von der hunderte Lichtjahre entfernten Erde bestimmen zu können, wird in den

¹ (Perryman, 2018, S. 3; 119); (Brennan, Discoveries Dashboard, 2023)

² (Brennan, Discoveries Dashboard, 2023)

meisten Fällen der Dopplereffekt genutzt, der mit der Hilfe eines Spektrographen gemessen werden kann.³

Um ein besseres Verständnis für die Auswirkungen der Bewegungen des Planeten auf die Geschwindigkeit des Sterns zu bekommen, wird im Folgenden angenommen ein Planet umkreist einen Stern auf einer perfekten Kreisbahn (vgl. Abb. 2.2). Die wahre Anomalie des Planeten v entspricht dem Winkel zwischen Perihel (dem Punkt, an dem der Planet dem Stern am nächsten ist) und dem Planeten. Aufgrund der angenommenen idealen Bedingungen sind Planet und Stern im Beispiel immer gleichweit entfernt, das Perihel wird daher als der Schnittpunkt des Planetenorbits mit einer zur Beobachtungsrichtung senkrechten Gerade durch den Schwerpunkt festgelegt. Betrachtet man nun die Bewegung des Sterns während einer Periode entlang der Blickachse des Beobachters, so entspricht die seit Beginn zurückgelegte Strecke $s = \sin(v + \pi)$ ($+\pi$ da der Stern im Vergleich zum Planeten um 180° gedreht ist). Da die Geschwindigkeit die Ableitung der Strecke ist, entspricht die im Beispiel gemessene Radialgeschwindigkeit v (dunkelrot eingezeichnet) der Ableitung von s :

$$v = \cos(v + \pi) \cdot 1$$

Die Amplitude der Geschwindigkeit ergibt sich aus dem Massenverhältnis sowie dem exakten Orbit der beiden Körper, eine genauere Erläuterung würde allerdings den Umfang dieser Arbeit sprengen. Außerdem muss angemerkt werden, dass es in der Realität oft komplizierter ist. Zum einen bewegen sich die meisten Planeten auf einer Ellipsen Bahn, die oft aus Sicht des Beobachters rotiert ist, zum anderen beherbergen viele Sterne mehr als einen Planeten, was zu einer Überlagerung

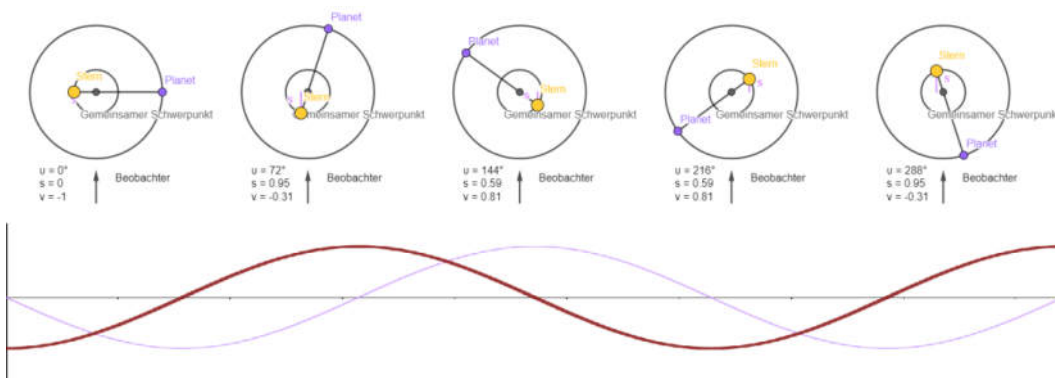


Abbildung 2.2 Die Radialgeschwindigkeit eines Sterns mit Planeten auf perfekter Kreisbahn aus Sicht des eingezeichneten Beobachters

³ (Newton, 1846, S. 402); (Perryman, 2018, S. 17)

mehrerer Kurven führt. Die Messung der Radialgeschwindigkeit erfolgt daher meist über einen Zeitraum von mehreren Jahren hinweg, um möglichst viele aussagekräftige Abschnitte (z. B. Maxima, Minima und Nullstellen) oder sogar ganze Perioden aufzuzeichnen. Dabei ergeben sich Graphen, die dem in Abbildung 2.3 ähneln und von Computern ausgewertet werden müssen.⁴

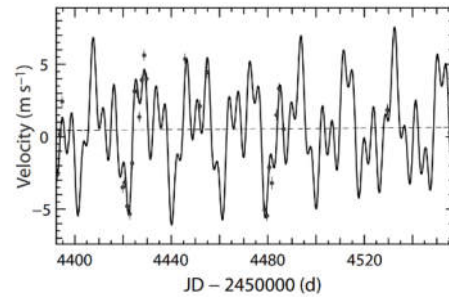


Abbildung 2.3 Radialgeschwindigkeitsmessung von HD 40307

Der Erfolg der Messung hängt dabei von vielen Faktoren ab. Einer der wichtigsten ist die Auflösung des Spektroskops. Dabei hat sich eine minimale Auflösung von 100.000 als gut geeignet für langsame, sonnenähnliche Sterne gezeigt. Auch Effekte wie eine gravitätsbedingte Rotverschiebung und Aktivität des beobachteten Sterns müssen von Forschern berücksichtigt werden.⁵

Dank dieser Art des Nachweises konnte nicht nur 1995 der erste Planet außerhalb unseres Sonnensystems, der 50 LJ von der Erde entfernte und den Stern *Pegasi b* umkreisende *51 Pegasi b*, überhaupt überzeugend nachgewiesen werden, sondern seitdem auch 1068 weitere Planeten.⁶

⁴ (Perryman, 2018, S. 18-26)

⁵ (Perryman, 2018, S. 28; 34)

⁶ (Brennan, Exoplanet Catalog, 2023); (The Planetary Society, o.D.10)

2.2. Transit-Methode

Ähnlich wie bei der oben beschriebenen Radialgeschwindigkeitsmethode basiert auch die Transit-Methode auf der sehr genauen Beobachtung eines Sterns. Dabei misst man allerdings nicht dessen Spektrum, sondern betrachtet dessen Helligkeit. Besitzt der Stern einen Planeten, so wird sich dieser, falls sein Orbit stark genug geneigt ist (fast parallel zur Blickrichtung des Betrachters), im Laufe einer Periode zwischen Stern und Beobachter hindurchbewegen und der Stern erscheint somit dunkler.⁷

An dem sich daraus ergebenden Helligkeitsgraphen (vgl. Abb. 2.4) kann man anhand der Stärke und Dauer des Einbruches nun Aussagen über die Periodendauer und den Radius des Planeten sowie den Abstand zu seinem Stern treffen. Kennt man außerdem auch die Masse des Planeten aus z. B. einer Messung der Radialgeschwindigkeit, so kann damit auch die Dichte und seine Oberflächengravität errechnet werden. Zusätzlich kann mit der Spezialform der Transitspektroskopie auch ein grundlegender Aufbau der Planetenatmosphäre bestimmt werden, wie in Kapitel 3.2 näher erläutert wird.⁸

Da die Wahrscheinlichkeit zufällig einen Stern zu treffen, dessen Planeten bei ihrem Transit den richtigen Winkel besitzen, sehr gering ist, und auch der Zeitpunkt eines möglichen Transits unbekannt ist, werden oft *Wide Angle Searches* eingesetzt, bei denen Teleskope mehrere zehntausend Planeten über einen längeren Zeitraum von mehreren Monaten oder Jahren beobachten und deren relative Helligkeit von Computern analysiert. Die Teleskope befinden sich dabei anders als bei der Radialgeschwindigkeitsmethode nahezu immer im Weltraum, da von dort aus ohne die beeinflussende Erdatmosphäre eine höhere Genauigkeit erzielt werden kann.⁹

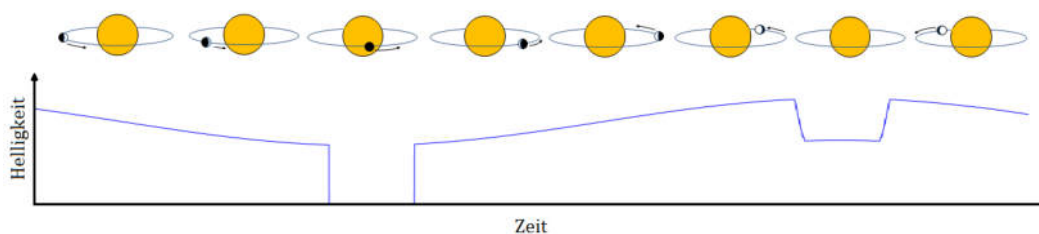


Abbildung 2.4 Veranschaulichung zur Helligkeitskurve mit Phaseninformationen des Planeten

⁷ (Perryman, 2018, S. 153)

⁸ (Perryman, 2018, S. 153; 199-202; 206-207)

⁹ (Perryman, 2018, S. 153-155)

Dennoch gibt es auch Effekte, die sich nur schwer vermeiden lassen. So können Sternenflecken und die Randverdunklung des Sterns die tatsächliche Kurve von der theoretischen abweichen lassen. Ebenfalls sorgt das vom Planeten während eines Orbits reflektierte Licht, das bei einem Transit von der Erde aus nicht beobachtet werden kann, für einen stärkeren Helligkeitseinbruch. Um trotzdem die Größe des Planeten bestimmen zu können, kann die Helligkeit, während der Planet vom Stern verdeckt wird, gemessen werden. Aus dieser kleineren Kerbe im Graphen (vgl. Abb. 2.4) kann dann auch der Albedo und, bei einer Beobachtung im infraroten Spektrum, die Temperatur des Planeten abgeschätzt werden.¹⁰

Mittlerweile wurden über 4128 Planeten, was 74,6% aller entdeckten Exoplaneten entspricht, aufgrund von Transits nachgewiesen, größtenteils dank des extra für diesen Zweck entwickelten *Kepler Teleskop*. Auch das neuere *James Webb Teleskop* wird für die Suche von Exoplaneten basierend auf der Transitmethode im Infrarotbereich genutzt.¹¹

¹⁰ (Perryman, 2018, S. 202-210; 275)

¹¹ (Brennan, Discoveries Dashboard, 2023); (NASA, o.D.6); (NASA, o.D.5)

3. Bewohnbarkeit von Exoplaneten

Fast genauso alt wie die Frage nach fremden Planeten, ist auch die Frage nach der Seltenheit unserer Erde. Sind wir mit unserem Zuhause allein im Universum oder gibt es vielleicht eine solche Fülle bewohnbarer Planeten, dass ein jedes Sternensystem einen solchen beherbergt?¹²

Im Folgenden gilt ein Planet als bewohnbar, wenn der die Bedürfnisse von Leben wie es auf der Erde vorkommt erfüllt. Ein erstes Indiz für die Bewohnbarkeit eines Planeten liefert seine Masse. Ist er zu massereich (mehr als die 10-fache Erdmasse), so ist seine Anziehungskraft stark genug, um zu einem Gasplaneten zu mutieren. Ist seine Masse geringer als die der Erde, so ist sein äußerer Kern wahrscheinlich zu dünn, um ein stabiles Magnetfeld zu generieren. Auch könnten dann für ein stabiles Klima notwendige Prozesse wie Vulkanismus und Bewegungen tektonischer Platten wegfallen. Weitere Indizien sind die Verfügbarkeit flüssigen Wassers sowie der Aufbau der Atmosphäre, der nicht nur etwas über die Möglichkeit von Leben, sondern auch etwas über die Existenz dessen aussagen kann.¹³

¹² (Ludwig-Maximilians-Universität München, o.D.3)

¹³ (Kasting J. , 2021, S. 3; 151)

3.1. Die habitable Zone

Geht man, wie meistens der Fall, davon aus, dass für die Entstehung von Leben Wasser in flüssiger Form auf der Planetenoberfläche vorhanden sein muss, so bleibt einem ein Streifen im Orbit des Sterns, in dem sich ein bewohnbarer Planet befinden muss. Dieser Streifen der als erstes von *Harlow Shapley* (amer. Astronom, 1885 – 1972) 1953 als *liquid water belt* beschrieben wurde, ist von Stern zu Stern unterschiedlich. Beeinflusst wird der heute unter dem Namen *habitable Zone* bekannte Bereich von der Helligkeit des Zentralgestirns (vgl. Abb. 3.1).¹⁴

Liegt der Orbit eines Planeten zu nah an seinem Stern, so kann dies einen *galoppierenden Treibhauseffekt* zur Folge haben. Die Oberfläche des Planeten wird dabei so heiß, dass sämtliches Wasser verdunstet und sich in der Atmosphäre ansammelt. Die Wassermoleküle in den oberen Schichten können daraufhin durch UV-Strahlung gespalten werden und die freien Wasserstoffatome ins All entweichen (ähnlich wie es bei Venus wahrscheinlich der Fall war). Die dafür nötige Oberflächentemperatur wird bei unserer Sonne bei einem mittleren Abstand von unter 0,95 AE erreicht und markiert damit den inneren Rand der habitablen Zone.¹⁵

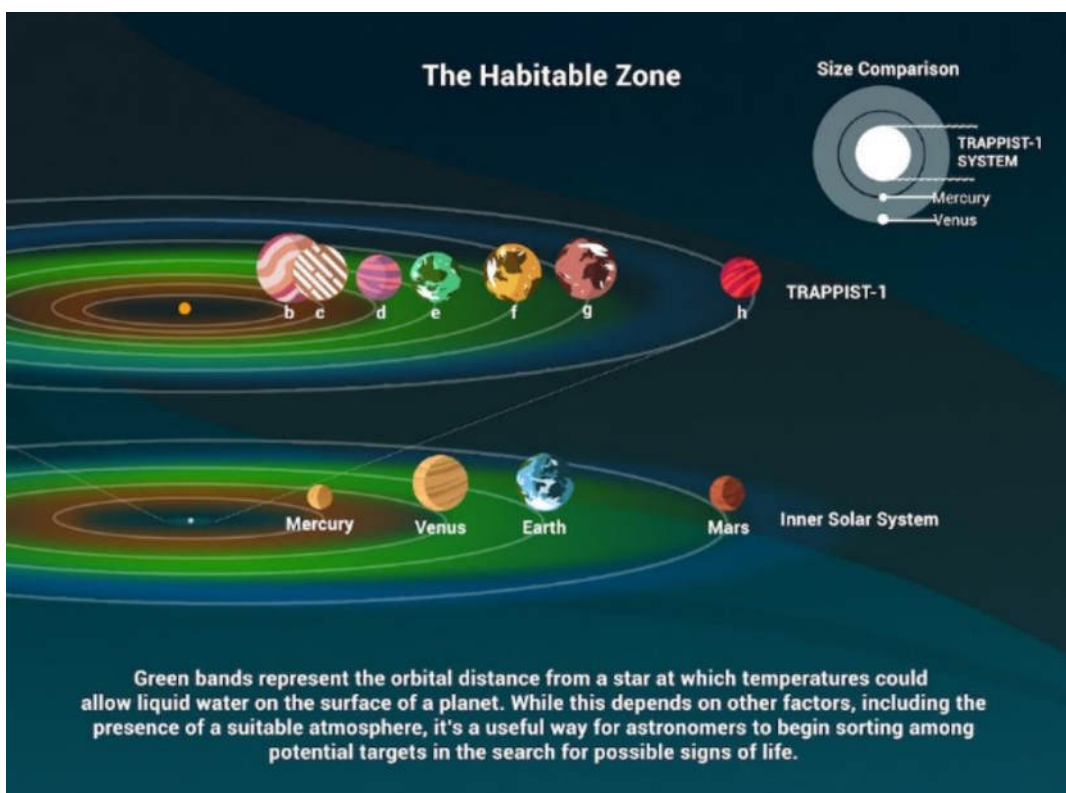


Abbildung 3.1 Die habitable Zone des Sonnensystems (Typ G Stern) und des TRAPPIST-1 Systems (Typ M Stern) im Vergleich

¹⁴ (Kasting J. , 2021, S. 171)

¹⁵ (Kasting J. , 2021, S. 102; 177)

Der äußere Rand wird wiederum von einem fast gegenteiligen Vorgang markiert. Überschreitet ein Planet diese Grenze, so ist die vom Stern empfangene Strahlung zu gering, um Wasser vom Gefrieren abzuhalten. Bei der Sonne ist dies ab über 1,65 AE der Fall.¹⁶

Planet	Innere Grenze	Äußere Grenze
Erde	0,95 AE	1,67 AE
Mars ($g = 3,73 \frac{m}{s^2}$)	0,98 AE	1,67 AE
Großer Planet ($g = 25,0 \frac{m}{s^2}$)	0,91 AE	1,64 AE

Tabelle 3.1 Grenzen der habitablen Zone für Planeten mit verschiedenen Parametern

Natürlich hängen die minimalen und maximalen durchschnittlichen Abstände, die ein Planet einhalten muss, um flüssiges Wasser auf seiner Oberfläche gewährleisten zu können, auch vom Planeten selbst ab. Hat er z. B. eine größere Masse, so ist seine Atmosphäre dichter und Wasser verdampft erst bei höheren Temperaturen. Wie diese Grenzen für unterschiedliche Planeten aussehen, würden diese um unsere Sonne kreisen, kann Tabelle 3.1 entnommen werden. Wie sich die Grenzen verändern, wenn ein Planet wie unsere Erde um einen der anderen Sterne aus der Hauptreihe kreist, ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Breite der

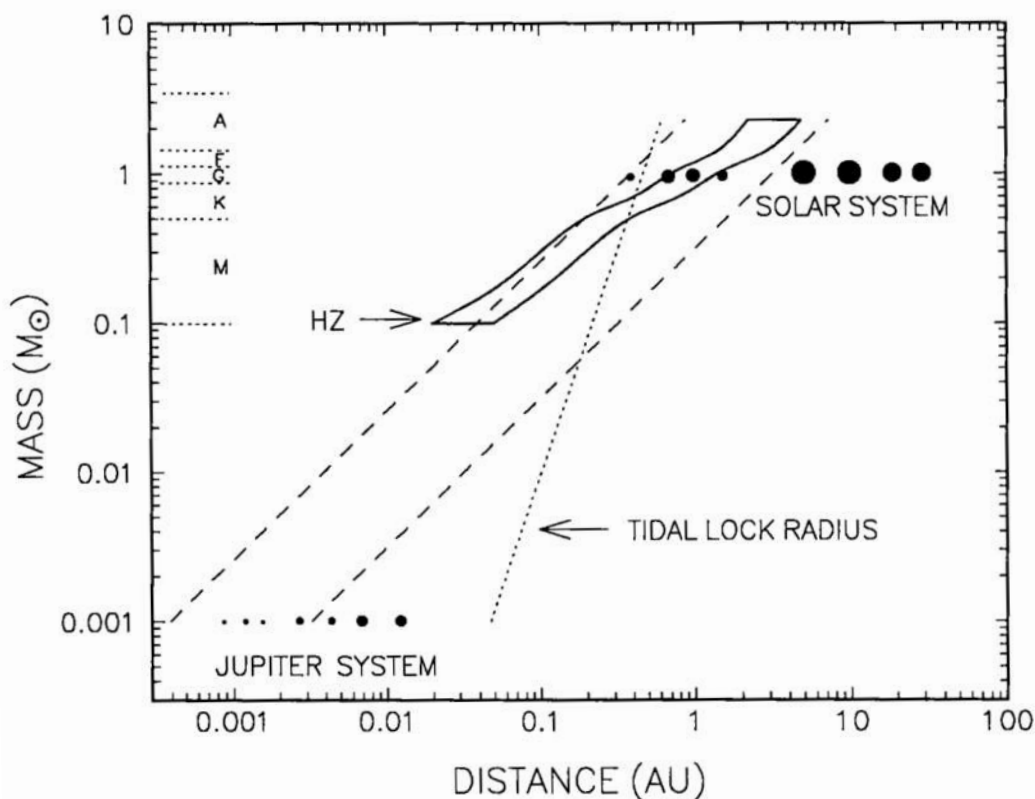


Abbildung 3.2 Breite der habitablen Zone in Abhängigkeit vom Stern für einen erdähnlichen Planeten in AE

¹⁶ (Kasting J. , 2021, S. 177-178)

habitablen Zone auf der logarithmischen Skala nahezu konstant bleibt, also der Bereich bei späten Sternen z. B. des Typs M um ein Vielfaches kleiner ist als bei frühen Sternen wie denen vom Typ A. Bei unserer Sonne beträgt der Abstand beider Grenzen im Moment in etwa 0,7 AE. Nun ist die Helligkeit eines Sterns jedoch nicht konstant, sondern steigt im Laufe seines Lebens, wodurch sich auch seine habitable Zone verschiebt. Da die Entwicklung von komplexem Leben nach unserem heutigen Verständnis mehrere Milliarden Jahre in Anspruch nimmt, muss ein Exoplanet für einen längeren Zeitraum in der habitablen Zone liegen. Hierfür kann die *kontinuierliche habitable Zone* zu Rate gezogen werden, deren innere und äußere Grenze jeweils der am weitesten entfernten bzw. nächsten entsprechenden Grenze über einen festgelegten Zeitraum entspricht. Betrachtet man nun wieder Erde und Sonne, so ist die kontinuierliche habitable Zone über die letzten 4,6 Mrd. Jahre (seit Entstehung der Erde) nur noch 0,45 AE breit (0,95 – 1,4 AE).¹⁷

Bei sorgfältiger Betrachtung der Abbildung 3.2 fällt auf, dass besonders frühe Sterne der Hauptreihe, wie Sterne des Typs O und B, nicht in dem Diagramm enthalten sind. Dies hängt mit der Kurzlebigkeit früherer Sterne zusammen, deren Lebensdauer nicht ausreicht, um die Entwicklung komplexen Lebens zu ermöglichen. Zusätzlich verändert sich die Helligkeit dieser Sterne so schnell, dass die kontinuierliche habitable Zone sehr klein ausfällt. Des Weiteren ist der Anteil an UV-Strahlung im Licht der Sterne deutlich höher als z. B. bei unserer Sonne, was sich wiederum auch auf die Entwicklung von Leben auswirkt. Sterne des Typs O bis A sind also eher ungeeignet.¹⁸

Aber auch späte Sterne des Typs K6-M sind nicht ideal für die Entwicklung von komplexem Leben. Da diese eine geringe Helligkeit besitzen, liegt die habitable Zone hier sehr nah am Stern. Dadurch ist der Planet nicht nur innerhalb des gebunden Rotationsradius, sondern auch stärkeren Sonnenwinden ausgesetzt. Gegen letzteres könnte zwar ein Magnetfeld helfen, dieses kommt aber wahrscheinlich aufgrund der geringen Drehgeschwindigkeit eines so nahen Planeten nicht zustande. Zusätzlich haben Planeten, die sich so nah am Stern bilden, meistens nur eine kleine Masse.¹⁹

¹⁷ (Kasting J. , 2021, S. 173; 178; 185)

¹⁸ (Kasting J. , 2021, S. 185-187)

¹⁹ (Kasting J. , 2021, S. 187-190)

Basierend auf diesen Annahmen fokussiert sich die Suche nach bewohnbaren Planeten vor allem auf solche, die Sterne vom Typ F0-K5 umkreisen, was in etwa 20% aller Sterne in der Milchstraße entspricht. Dennoch können Planeten, die andere Sterntypen umkreisen oder nicht innerhalb der habitablen Zone liegen nicht ausgeschlossen werden.²⁰

3.2. Untersuchung planetarer Atmosphären

Ein weiterer Aspekt, den man bei der Beurteilung der Bewohnbarkeit eines Planeten nicht außer Acht lassen sollte, ist seine Atmosphäre. Diese kann über Spektroskopie auch aus großen Entfernungen bis zu einem gewissen Grad untersucht werden. Dabei gibt es zwei Wege, das Absorptionsspektrum zu messen, aus dem man dann wiederum die einzelnen, vorhandenen Gase sowie deren Häufigkeit ableiten kann.²¹

Die erste Methode basiert auf der oben bereits beschriebenen Transitmethode und wird als *Transit-Spektroskopie* bezeichnet. Befindet sich ein Planet zwischen Beobachter und Stern, so strahlt ein Teil des Lichts durch die Atmosphäre des Planeten. Da die vorhandenen Gase bestimmte Wellenlängen absorbieren, ist der Anteil dieser Wellenlängen in diesem Licht geringer und die Verdunklung des Sterns in der entsprechenden Frequenz stärker (vgl. Abb. 3.3). Beobachtet man folglich also den Transit des Exoplaneten in einer Vielzahl von Wellenlängen, so ergibt sich ein breites Absorptionsspektrum für seine Atmosphäre.²²

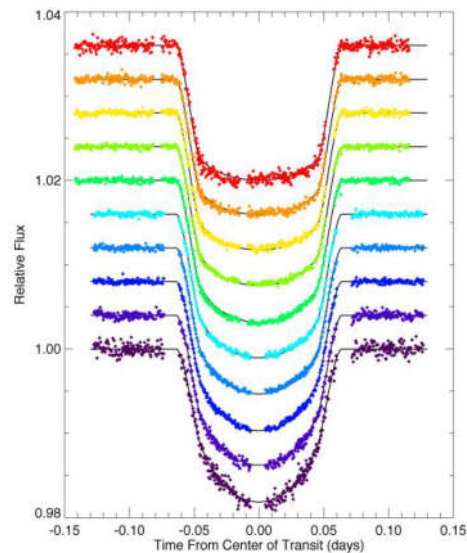


Abbildung 3.3 Transitkurve eines Planeten in verschiedenen Frequenzen

Die zweite Methode nutzt die Fähigkeit moderner Teleskope nähergelegene Exoplaneten direkt zu beobachten. So können spektroskopische Aufnahmen von den Planeten selbst gemacht werden. Im Gegensatz zur ersten Methode kann man mit diesen auch Aussagen über die Beschaffenheit der Planetenoberfläche treffen.²³

²⁰ (Kasting J. , 2021, S. 191)

²¹ (Kasting J. , 2021, S. 258)

²² (Kasting J. , 2021, S. 230)

²³ (Heng, 2017, S. 11)

Obwohl beide Methoden nur Spektren mit geringer Auflösung produzieren, können mit diesen einige Aussagen über die Bewohnbarkeit und mögliches Leben auf den untersuchten Planeten getroffen werden. Besonders interessant für Wissenschaftler sind die Konzentrationen von O_2 und O_3 . Ersteres ist ein Produkt der Photosynthese und gilt daher als Indikator für Lebewesen im Allgemeinen. Da Ozon sich durch die Spaltung von Sauerstoff in der Atmosphäre bildet, weist Ozon auf das Vorhandensein von Sauerstoff und damit auch von Leben hin. Wichtig ist, dass es nur darauf hinweist, denn Sauerstoff kann sich auch über lange Zeiträume durch abiotische Prozesse in der Atmosphäre anreichern. Auch die Gase H_2O (Wasserdampf) und CO_2 können durch spektroskopische Beobachtungen im infraroten Bereich nachgewiesen werden. Beide stehen in engem Zusammenhang mit dem Leben auf der Erde, sind aber anders als O_2 und O_3 eher Zeichen für die Möglichkeit der Bildung von Leben als für dessen Vorhandensein.²⁴

²⁴ (Kasting J. , 2021, S. 262-263; 266-267; 269-273; 278)

4. Außerirdisches Leben

Nachdem man also sicher weiß, dass es in den Weiten des Alls von anderen Planeten, die teilweise auch die für Leben wie es auf der Erde vorkommt nötigen Bedingungen erfüllen, nur so wimmelt, stellt sich die Frage, ob selbiges ebenfalls auf außerirdisches Leben zutrifft. Stand dieser Arbeit weiß man es nicht. Dennoch gibt es tausende an Theorien und Konzepten, wie außerirdisches Leben aussehen könnte. Im Folgenden werden zwei der bekanntesten wissenschaftlichen Überlegungen zum Thema präsentiert.

4.1. Die Drake-Gleichung

Als *Frank Drake* (amer. Astrophysiker, 1930-2022; vgl. Abb. 4.1) 1961 seine weltbekannte Gleichung im Greenbank Observatorium vorstellte, sollte sie vor allem als Leitfaden für das Treffen dienen:

$$N = R_* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$



Abbildung 4.1 Frank Drake

Könnte man jeden der sieben Faktoren exakt bestimmen, so würde man mit N die Zahl der kommunizierenden Zivilisationen in der Milchstraße erhalten.²⁵

Die ersten drei Faktoren stehen für die Anzahl an neuen, bewohnbaren Planeten pro Jahr. Momentan schätzt man, dass in der Milchstraße etwa zwei Sonnenmassen an Materie innerhalb eines Jahres zu sechs bis sieben neuen Sternen werden. Da allerdings nur in etwa 20% aller Sterne auch für Leben geeignet sind (siehe Kapitel 3.1) liegt die Zahl neuer für Leben geeigneter Sterne pro Jahr R_* eher bei ein bis zwei Sternen. Der Anteil dieser, der Planeten beherbergt, f_p ist da schon etwas unsicherer. Im Moment geht man davon aus, dass im Durchschnitt jeder Stern einen Planeten beherbergt, wenn diese auch nicht gleichmäßig verteilt sind. Wie viele von diesen dann pro Sonnensystem in der habitablen Zone liegen und eine der Erde ähnliche Masse besitzen, also bewohnbar sind, ist reines Raten. Einige Wissenschaftler schätzten 2013, dass einer von fünf sonnenähnlichen Sternen (Typ G) einen habitablen Planeten besitzt, andere Wissenschaftler vermuten n_e eher in der Größenordnung von einem hundertstel.²⁶

Da Werte für die letzten vier Parameter, die sich mit der Entstehung und Entwicklung von Leben beschäftigen stark von Quelle zu Quelle schwanken, werden im

²⁵ (Shostak, 2021)

²⁶ (Shostak, 2021); (Ferguson, 2022); (Wikipedia, 2023); (Sanders, 2013); (Häusser, 2019)

Anschluss nur ihre einzelnen Bedeutungen aufgeführt. f_l ist der Anteil bewohnbarer Planeten, auf denen sich tatsächlich auch Leben entwickelt, f_i gibt an wie viele Planeten mit Leben irgendwann mal intelligentes Leben hervorbringen. Wie viele dann versuchen mit Radiowellen zu kommunizieren, wird von f_c in die Gleichung eingebracht. Zum Schluss bleibt noch die Lebensdauer L einer Zivilisation ab dem Zeitpunkt der Nutzung von Radiowellen.²⁷

Obwohl die Gleichung nie gelöst werden wird, gibt sie dennoch durch ihre Faktoren einen guten Überblick, was die Zahl möglicher kommunizierender Zivilisationen beeinflusst, und dient auch heute noch als wichtiger Leitfaden bei der *Search for extraterrestrial intelligence* (SETI). Viele Schätzungen wie z. B. die der 1961 anwesenden Wissenschaftler machen außerdem Mut, dass es sich lohnen könnte, zu suchen und wir im Universum nicht allein sind.²⁸

4.2. Das Fermi Paradoxon

Wo sind die Außerirdischen also? Eine Frage, die sich auch *Enrico Fermi* (ital. Physiker; 1901-1954; vgl. Abb. 4.2) bereits 1950 stellte und die die Grundlage für sein weltbekanntes Fermi-Paradoxon bildete. Die Milchstraße hat nach Schätzungen der ESA an die 100 Milliarden Sterne, von denen wie oben beschrieben zumindest ein Teil auch bewohnbare Planeten besitzt. Hinzu



Abbildung 4.2 Enrico Fermi

kommt, dass Leben in unserer Galaxie mit 13,7 Milliarden Jahren genug Zeit gehabt haben sollte, um sich zu entwickeln und auszubreiten. Dennoch hat man Stand heute keine Hinweise auf die Existenz einer weiteren Zivilisation gefunden, dafür aber einige Theorien, die diesen Widerspruch erklären könnten. Während ein Teil der hypothetischen Überlegungen, wie die Theorie des großen Filters, Erklärungen bereitstellt, warum es doch keine andere Zivilisation gibt, beschäftigen sich andere unter dem Überbegriff der großen Stille mit der Frage, wieso man keine Hinweise auf diese gefunden hat.²⁹

4.2.1. Der große Filter

Betrachtet man die zuvor erwähnten Informationen, so ist es nicht abwegig zu erwarten, dass sich zumindest auf einem großen Teil der bewohnbaren Planeten auch

²⁷ (Shostak, 2021)

²⁸ (Shostak, 2021)

²⁹ (SETI Institute, o.D.9); (NASA, 2019); (The European Space Agency, o.D.4)

Leben entwickelt, welches sich dann im Universum ausbreitet. Da das Weltall um die Erde herum allerdings sehr leer und leblos erscheint, liegt es nahe, dass die Entwicklung vom bewohnbaren Planeten zur Galaxien erobernden Zivilisation vielleicht doch nicht so einfach ist, wie gedacht, sondern es einige Hürden im Laufe der Reise gibt, die die meisten Spezies ausfiltern (vgl. Abb. 4.3). Diese von *Robin Hanson* (amer. Ökonom; 1959 - heute) vorgestellte Theorie ist allgemein hin als der *große Filter* bekannt. Was alles eine solche Hürde ist, kann nur spekuliert werden. Hanson schlug zum Beispiel die Entwicklung von zur Reproduktion nötigem Material wie RNA, von einzelligem und mehrzelligem Leben oder von kommunizierenden Lebewesen vor. Er schließt aber auch nicht aus, dass der oder die Filter noch vor uns liegen. So könnte die Entdeckung von atomaren Waffen im Regelfall zu einem vernichtenden Konflikt führen oder die Zerstörung des Ökosystems des Heimatplaneten die Pläne zur Expansion zunichtemachen.³⁰

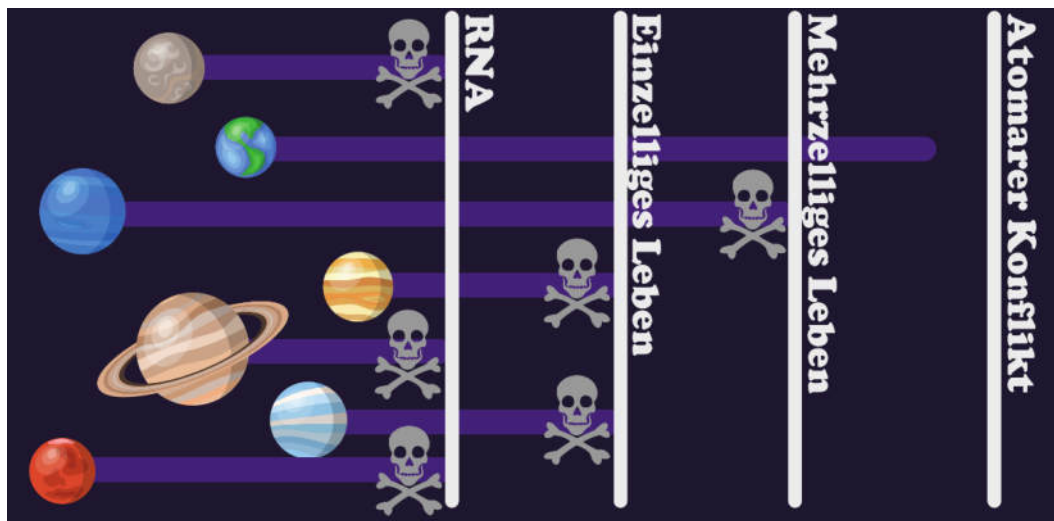


Abbildung 4.3 Verschiedene Filter, die langsam Zivilisationen aussortieren

4.2.2. Die große Stille

Etwas optimistischer ist da die Idee der *großen Stille*. Anstatt zu überlegen, warum es kein anderes intelligentes Leben im All gibt, versucht man zu erklären, warum wir noch nichts von den anderen Zivilisationen mitbekommen haben. Möglicherweise beobachtet man einfach die falschen Frequenzen oder nutzt mit Radiowellen eine veraltete Form der Kommunikation verglichen zu anderen weiterentwickelten Zivilisationen. Vielleicht wurden wir von außerirdischen Lebensformen auch schon entdeckt, aber sie kommunizieren absichtlich nicht mit uns, da wir noch nicht weit

³⁰ (Hanson, 1998)

genug entwickelt sind oder man unsere Entwicklung aus wissenschaftlichen Gründen unbeeinflusst beobachten möchte.³¹

Es kann auch sein, dass andere Zivilisationen versuchen, möglichst nicht auf sich aufmerksam zu machen, da sie es für zu riskant halten ihre Existenz anderen preiszugeben. Die *dunkle Wald Theorie* schlägt zum Beispiel vor, dass es für außerirdische, die von anderen Lebewesen erfahren, am sinnvollsten ist, dieses andere Leben auszulöschen, um der Auslöschung der eigenen Art zuvorzukommen. Falls auch nur ein paar wenige nach dieser Theorie handeln, würde es womöglich keine der offen kommunizierenden Zivilisationen mehr geben.³²

³¹ (Brin, 1983)

³² (Yu, 2015)

5. Vergleich der Trisolaris-Buchreihe mit der physikalischen Realität

Gute Beispiele wie ein Universum aussehen könnte, indem die Menschheit nicht allein ist, geben diverse Science-Fiction Romane wie *Cixin Lius Trisolaris Trilogie*.

Im ersten mehrfach ausgezeichneten Buch der Reihe, *Die drei Sonnen* (vgl. Abb. 5.1), erhält die chinesische Wissenschaftlerin Ye Wenjie eine Antwort auf eine ins All gesendete Botschaft. Einer der Planeten im Nachbarsystem Alpha Centauri wird von der intelligenten Zivilisation der Trisolarier, benannt nach den drei Sonnen ihres Systems, bewohnt. Aufgrund der harschen Lebensbedingungen in ihrer Heimat macht sich ein Teil dieser auf den Weg, die Erde zu besiedeln. Im Laufe der Jahre bildet sich ein geheimer Kult um die weiterentwickelten Trisolarier, der mit Hilfe eines auf Trisolaris basierenden Computerspiels immer weiter neue Mitglieder engagiert. Als die weltweiten Geheimdienste auf die Sekte aufmerksam werden, soll sich Wang Miao, ein chinesischer Wissenschaftler, in die elitäre Gemeinschaft einschleusen. Obwohl er das Angebot ablehnt, beginnt er zusammen mit dem Polizeiinspektor Shi Qiang die Organisation aufzudecken.³³



Abbildung 5.1 Deutsches Cover des Romans „Die drei Sonnen“ von Cixin Liu



Abbildung 6.2 Deutsches Cover des Romans „Der dunkle Wald“ von Cixin Liu

Im zweiten Band, *Der dunkle Wald* (vgl. Abb. 5.2), beschreibt Cixin Liu, wie die Menschheit versucht mit der bevorstehenden Invasion umzugehen. Da die Trisolarier dank den Sophonen alles bis auf die Gedanken der Menschen ausspionieren können, beschließt die UN das Wandschauerprogramm. Vier besondere Menschen bekommen alle Ressourcen der vereinten Nationen zur Verfügung gestellt, um im Geheimen eine Verteidigungsstrategie zu entwickeln. Im Fokus steht dabei Wandschauer Luo Ji. Basierend auf einem Gespräch mit Ye Wenjie begründet er die Kosmosoziologie und entwickelt die *dunkle Wald Theorie*. Mit ihrer Hilfe gelingt es ihm die Trisolarier zu Verhandlungen zu zwingen.³⁴

³³ (Liu, Die drei Sonnen, 2017)

³⁴ (Liu, Der dunkle Wald, 2018)

Im Folgenden sollen drei Konzepte der ersten beiden Bücher mit der physikalischen Realität verglichen werden, um deren Plausibilität zu bestimmen.

5.1. Interstellare Kommunikation

Als Ye Wenjie zu Beginn des ersten Buches auf der Militärbasis Rotes Ufer stationiert wird, ist noch nicht direkt klar, welchen Zweck die große, auf der Spitze eines Berges gelegene Radioantenne erfüllt (vgl. Abb. 5.3). Erst im Laufe des Romans erfahren wir, dass mit ihr ähnlich wie bei dem amerikanischen Projekt OZMA außerirdische Zivilisationen kontaktiert werden sollen. Dank eines Kapitels, das chinesische Regierungsdokumente zum Projekt imitiert, finden sich im Buch sogar konkrete Zahlen, was die Leistung und überwachten Frequenzen betrifft. Letztere ähneln durchaus realen Werten (Rotes Ufer: 1 – 40 GHz; *Allen Telescope Array*: 1 – 9 GHz), wenn Frequenzen über 10 GHz auch heute meistens nicht beachtet werden, da die Erdatmosphäre und damit wahrscheinlich auch die Atmosphäre anderer erdähnlicher Planeten große Teile in diesem Bereich absorbieren. Die Sendeleistung der chinesischen Antenne, 25 MW, ist schon etwas verwunderlicher. Laut den chinesischen Dokumenten kann man damit zwar Sterne in einem Radius von 200 LJ erreichen, vergleicht man das allerdings mit den Angaben des ebenfalls in China gelegenen *Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope* (FAST), das bei einer Sendeleistung von 1000 MW davon ausgeht nur bis 4,5 LJ empfangbar zu sein, scheint die Antenne vom Roten Ufer nicht leistungsfähig genug, um selbst den nächsten Stern Alpha Centauri zu kontaktieren. Eine Tatsache die auch der Protagonistin Ye Wenjie aufgefallen zu sein scheint. In einem Gespräch mit Wang Miao



Abbildung 5.3 Das Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope in China, ein 'echtes Rotes Ufer'

zweifelt sie daran, dass die Signale so je eine außerirdische Spezies erreichen könnten.³⁵

³⁵ (Liu, *Die drei Sonnen*, 2017, S. 233-237; 245); (Ackermann & a., 2016); (SETI Institute, o.D.7); (FAST, o.D.2);

Dass Ye Wenjie es trotzdem geschafft hat, Trisolaris auf die Erde aufmerksam zu machen, verdankt sie ihren Forschungen zu reflektierenden Eigenschaften von Phasengrenzen im Strahlungsbereich der Sonne. Schösse man elektromagnetische Wellen in den entsprechenden Frequenzen auf die Phasengrenzflächen im inneren der Sonne, so würden diese reflektiert und stark verstärkt werden. Man würde dann mit der Energie eines mittleren Sterns senden. Zwar sind einige der beschriebenen physikalischen Gesetzmäßigkeiten bekannt, eine wissenschaftliche Arbeit, die auf die Nutzung der Sonne als verstärkende Antenne hinweist, konnte aber trotz langer Recherche nicht gefunden werden.³⁶

Anders sieht es mit der fortschrittlicheren Kommunikationsmethode der Trisolarier mit der Erde aus. Diese nutzen den Effekt der Quantenverschränkung, um über die Sophonen eine Echtzeitkommunikation zu ermöglichen. Obwohl bewiesen werden konnte, dass die Geschwindigkeit der Übertragung durch Quantenverschränkung die Lichtgeschwindigkeit weit übersteigt, ist es die statistische Eigenschaft der Quantenmechanik, die die Kommunikation über den Zustand eines Quantenteilchens unmöglich macht.³⁷

³⁶ (Liu, Die drei Sonnen, 2017, S. 57-58; 363-364)

³⁷ (Liu, Die drei Sonnen, 2017, S. 450; 503-504; 520-533); (LEIFPhysik, o.D.1); (Baas & a., 2008)

5.2. Trisolaris und seine Bewohner

Beginnen wir mit dem Planeten der außerirdischen Spezies. Er befindet sich laut den Büchern im 4,34 LJ entfernten *Alpha Centauri System*. Anders als in Cixins Buchreihe handelt es sich dabei allerdings nicht direkt um ein Dreifachsternsystem, sondern viel mehr um das Doppelsternsystem *Alpha Centauri* und den roten Zwerg *Proxima Centauri*, der die Sterne in 0,21 LJ Entfernung umkreist (vgl. Abb. 5.4). Zur möglichen Existenz von Planeten im Orbit einer der Sterne gab es in der Vergangenheit auch zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten. Für das Doppelsternsystem konnte gezeigt werden, dass es durchaus stabile Umlaufbahnen in der habitablen Zone gibt. In Proxima Centauris Umlaufbahn konnte dank der Radialgeschwindigkeitsmethode sogar die Existenz eines erdähnlichen Planeten in der habitablen Zone nachgewiesen werden. Damit würden bei einem realen Trisolaris allerdings die Auswirkungen der drei Sterne in Form von starken Unregelmäßigkeiten im Klima wegfallen. Da diese jedoch stark mit den Trisolariern verwoben sind, nehmen wir im Folgenden an, sie seien gegeben. Ansonsten erfährt man viel, was unseren Vorstellungen eines bewohnbaren Planeten entspricht. Auf Trisolaris findet man nicht nur flüssiges Wasser in Form von Seen und Ozeanen, sondern auch Kontinente und Gebirgsketten, die die Existenz tektonischer Platten nahelegen. Aus der Tatsache das es auf Trisolaris während kalter Zeiten Trockeneis schneit, lässt sich außerdem folgern, dass der Planet vermutlich eine CO₂ reiche Atmosphäre besitzt.³⁸

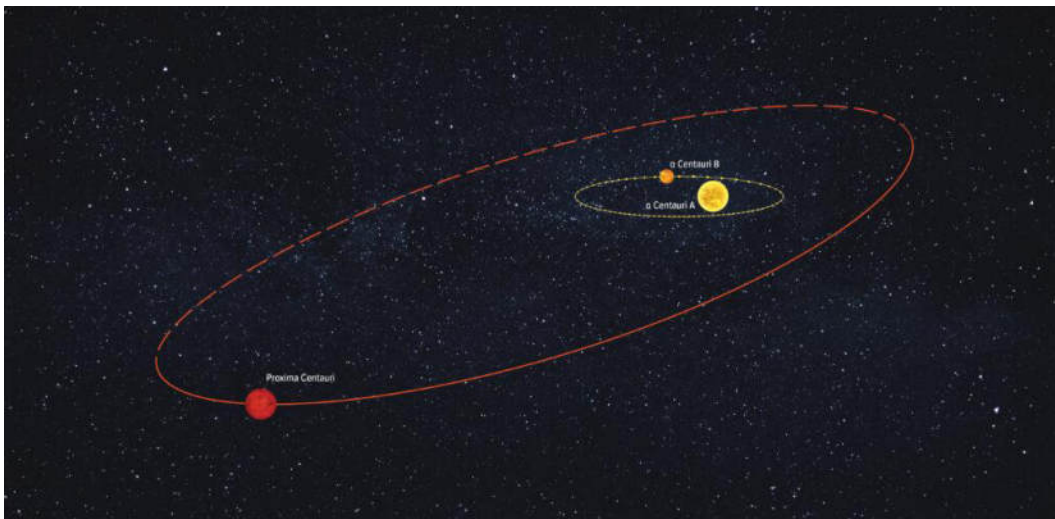


Abbildung 5.4 Doppelsternsystem Alpha Centauri und der umkreisende Stern Proxima Centauri

³⁸ (Liu, Die drei Sonnen, 2017, S. 154; 157; 254; 334; 380; 518); (Anglada-Escudé & a., 2016); (Wiegert & Holman, 1996); (Wikipedia, 2023)

Dennoch herrschen auf ihm tendenziell aus unserer Sicht lebensunfreundliche Bedingungen, die eine starke Anpassung der Bewohner zur Folge haben. Um die sehr heißen und sehr kalten Perioden zu überstehen, besitzen die heimischen Pflanzen und die Trisolarier die Fähigkeit zu dehydrieren, also alles Wasser aus dem Körper zu lassen und in einem bewusstseinslosen Zustand zu verharren, bis sie durch den Kontakt mit Wasser wieder zum Leben



Abbildung 5.5 Eine zusammengerollte, tote Rose von Jericho

erweckt werden. Was erstmal wie reine Fantasie klingt, findet sich tatsächlich in ähnlicher Form auch auf der Erde. Die Rose von Jericho rollt sich in regenarmen Zeiten zu totem Gestrüpp zusammen (vgl. Abb. 5.5), nur um bei Regen wiederbelebt zu werden (wobei angemerkt werden muss, dass die Pflanze zwischenzeitlich tot ist). Ein weiterer zentraler Aspekt der Reihe ist die Art der Kommunikation der Trisolarier untereinander aus. Ähnlich wie das menschliche Gehirn erzeugen die Gehirne der Trisolarier beim Denken elektromagnetische Wellen, nur dass diese so stark sind, dass der Gegenüber diese empfangen und interpretieren kann. Interessant ist dabei, dass die Wellenlänge teilweise im sichtbaren Bereich des Lichts liegt ($\lambda_{\text{sichtbares Licht}} = 400 - 780 \text{ nm}$ vs. $\lambda_{\text{menschliches Gehirn}} \approx 12 \text{ m}$). Dass die Trisolarier dennoch Augen besitzen sollen und, um vor der Sonne geschützt zu sein, eine stark reflektierende Haut haben, wirkt hingegen etwas widersprüchlich. Zuletzt bleibt nun noch das kontroverseste Detail an Cixins Außerirdischen. Wegen der harten Bedingungen kommt es regelmäßig vor, dass das gesamte Leben auf Trisolaris ausgelöscht wird und sich von neuem bildet. Für die 192. Zivilisation gibt das Buch dabei einen Entwicklungszeitraum von 90 Mio. Jahren an. Vergleicht man das mit den ca. 4 Mrd. Jahren, die es auf der Erde gebraucht hat, um aus Einzellern komplexes Leben zu schaffen und bedenkt die vergleichsweise lebensunfreundlichen Bedingungen auf Trisolaris, scheint das sehr unwahrscheinlich.³⁹

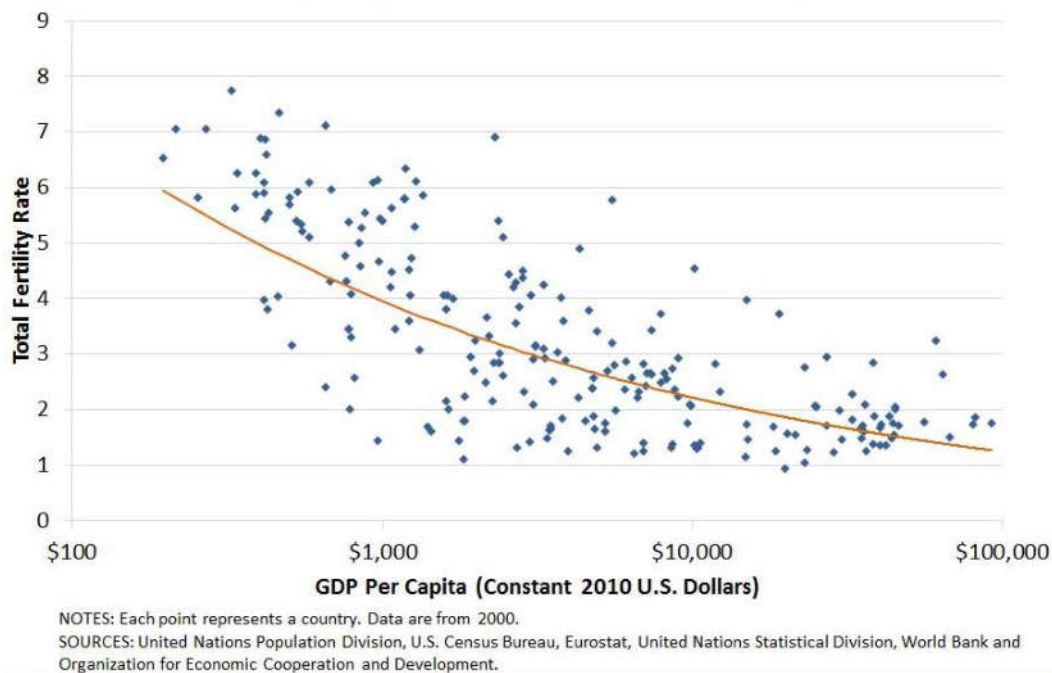
5.3. Kosmosoziologie

Als zu Beginn des zweiten Buches Luo Ji Ye Wenjie zufällig auf einem Friedhof trifft, ist es letztere, die dem jungen Physiker vorschlägt die Wissenschaft der *Kosmosoziologie* zu begründen. Diese würde vor allem auf zwei grundlegenden Axiomen aufbauen: „Erstens: Überleben ist das oberste Gebot jeder Zivilisation.

³⁹ (Liu, Die drei Sonnen, 2017, S. 144; 318; 334; 480; 485; 509); (Wikipedia, 2023); (Sun, 2022)

Zweitens: Zivilisationen wachsen und dehnen sich ununterbrochen aus, aber die im Kosmos verfügbare Materie bleibt konstant.“ Zusätzlich erwähnt sie noch *Zweifelsketten* und *technologische Explosionen*, um Ji den Weg zu weisen.⁴⁰

Am ehesten ähnelt die *Kosmosozoologie*, die sich mit der Gesellschaft der im Kosmos vertretenen Zivilisationen befasst, der *Exosozoologie*. Diese ist momentan jedoch noch mehr auf eine mögliche Interaktion der Menschheit mit außerirdischem Leben fokussiert als Ye Wenjies Konzept. Daher gibt es auch keine wirklichen auf den Weltraum bezogenen Forschungen bezüglich den zwei Axiomen. Geht man allerdings davon aus, dass außerirdisches Leben in seinem Verhalten, dem auf der Erde nahekommen, so erscheinen sie doch logisch. Ersteres folgt in meinen Augen direkt aus *Charles Darwins* (brit. Naturforscher; 1809-1882) Evolutionstheorie, nach der die Entwicklung eines Organismus darauf ausgelegt ist zu überleben. Dass Zivilisationen wachsen und sich ausdehnen, sieht man am Beispiel der Menschheit. Seit Beginn unserer Existenz ist die menschliche Population ununterbrochen gewachsen und der Mensch hat sich auf dem ganzen Planeten ausgebreitet. Dass dabei der zur Verfügung stehende Platz begrenzt ist, würden die meisten auch nicht anzweifeln. Jedoch gibt es auch Beobachtungen, die Wenjies Axiom widersprechen. Umso wohlhabender ein Mensch ist, desto weniger Kinder bekommt er im Durchschnitt (vgl. Abb. 5.6). Weiterentwickelte Zivilisationen neigen also vermutlich



FEDERAL RESERVE BANK of ST. LOUIS

Abbildung 5.6 Beziehung zwischen Einkommen und durchschnittlicher Anzahl der Kinder

⁴⁰ (Liu, Der dunkle Wald, 2018, S. 16-20)

eher zu einer konstanten bzw. sogar schrumpfenden Population. Und auch der zur Verfügung stehende Lebensraum wächst mit dem technischen Fortschritt. Heute können Menschen Städte an Orten (z. B. Wüsten) errichten, die vor ein paar Jahrhunderten noch als Lebensfeindlich galten. Eine weitgenug entwickelte Zivilisation könnte also womöglich auch dem begrenzten Platz der Milchstraße entfliehen. Dass ein solcher Wandel in den letzten Jahren möglich war, hängt mit dem Konzept einer *technologischen Explosion* zusammen. Dieses beschreibt den explosionsartigen Fortschritt den einzelne Entdeckungen auslösen, wie es im 20. Jahrhundert mit dem Computer der Fall war. Auch *Zweifelsketten* kennen die meisten wahrscheinlich aus ihrem Alltag („Selbst wenn du wüsstest, dass ich denke, du seist gutmütig, und auch ich weiß, dass du denkst, dass ich gutmütig sei, dann weiß ich nicht, was du über das denkst, was ich über das, was du denkst, denke“). Normalerweise lösen sich diese Angesicht zu Angesicht relativ schnell auf, kommen aber nun die großen Entfernungen und die Ungewissheit des Universums hinzu, so wären solche Ketten zwischen zwei Zivilisationen nahezu unendlich.⁴¹

Im Laufe des Buches nutzt Luo Ji dieses Wissen dann, um die bekannte *dunkle Wald Theorie*, wie sie bereits oben erwähnt wurde, herzuleiten. Dazu geht er von zwei Zivilisationen A und B aus, die gut 100 LJ voneinander entfernt sind. A ist weiterentwickelt als B und weiß von dessen Existenz, B kennt A jedoch nicht. Zivilisationen können entweder Bösartig oder Gutmütig sein, also andere Zivilisationen vernichten oder eben nicht. Da A die Absichten von B nicht einschätzen kann, wäre es riskant B zu kontaktieren und sich somit B preiszugeben. Entscheidet A sich trotzdem für letzteres, verhindern *Zweifelsketten*, dass A auf diese Weise Bs Haltung erfährt. A kann allerdings auch nicht einfach nichts tun, da B jederzeit dank einer technologischen Explosion den technischen Vorsprung aufholen könnte. Irgendwann würde B dann vermutlich A aufspüren und es bestände die Chance, dass B A zerstört. Der einzige Weg das eigene Leben zu schützen, wie es im ersten Axiom festgeschrieben ist, ist die andere Zivilisation zu vernichten, sobald sie sich einem offenbart. Sich bemerkbar zu machen, verstößt folglich auch gegen das erste Axiom. Das Universum bleibt also still.⁴²

⁴¹ (Liu, *Der dunkle Wald*, 2018, S. 739-745); (Vandenbroucke, 2016); (Anton, 2022)

⁴² (Liu, *Der dunkle Wald*, 2018, S. 739-745)

6. Fazit

Als ich begonnen hatte für diese Arbeit zu recherchieren, hatte man bereits 5.419 Planeten in anderen Sternensystemen nachweisen können. Bis zum Zeitpunkt der Fertigstellung sind weitere 116 hinzugekommen. Nahezu täglich entdecken Astronomen auf der ganzen Welt neue Exoplaneten, die die Leere um die Sterne füllen (vgl. Abb. 6.1). Dank immer besser werdender technologischer Ausstattung

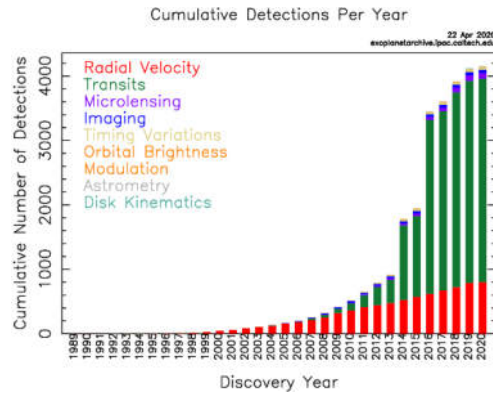


Abbildung 6.1 Nachgewiesene Exoplaneten seit 1989

und fortschrittlicheren Nachweismethoden können sie dabei genauere Aussagen über die Beschaffenheit der Exoplaneten treffen als je zuvor. Obwohl unser Heimatplanet mit seinen Bedingungen auf alle Fälle besonders ist, so ist er nicht der einzige lebensfreundliche Planet in den Weiten des Alls. Um uns herum scheint es viele weitere tausend Welten wie die unsere zu geben, die eine passende Größe, flüssiges Wasser und eine schützende Atmosphäre bereitstellen. Theoretisch also auch viele weitere tausend Möglichkeiten für die Existenz außerirdischen Lebens. Die Tatsache, dass wir bisher noch nichts von anderen Zivilisationen erfahren haben, muss dabei nicht bedeuten, dass es keine anderen Zivilisationen gibt, wenn sie uns auch zu denken geben sollte.⁴³

Ich bin mir ziemlich sicher, dass es da draußen noch jemanden geben muss und wir früher oder später auf anderes Leben stoßen werden. Allein die Existenz von anderen Planeten, die eigentlich nicht ganz so anders sind und durchaus Leben ähnlich dem unseren beherbergen könnten, macht das für mich wahrscheinlich. Wie dieses Leben dann aussieht, ob es gutmütig oder böse ist, ob wir eine gemeinsame Allianz bilden oder im ewigen Krieg verenden werden, das muss sich erst noch zeigen. Bis es so weit ist, bleiben uns immerhin Geschichten und unsere eigene Fantasie, um uns all die Planeten, die sich in der Dunkelheit des Nachthimmels verstecken, mit ihren Bewohnern und Eigenheiten auszumalen.

⁴³ (Brennan, Discoveries Dashboard, 2023)

7. Anhang

7.1. Literaturverzeichnis

Ackermann, R. F., & a., u. (2016). SETI Observations of Exoplanets with the Allen Telescope Array. *The Astronomical Journal*(152), 181.

Amazon. (kein Datum). *Der dunkle Wald: Roman (Die Trisolaris-Trilogie, Band 2)*. Abgerufen am 2. November 2023 von Amazon.de:

https://www.amazon.de/dunkle-Wald-Roman-Trisolaris-Trilogie-Band/dp/3453317653/ref=pd_bxgy_img_sccl_1/259-9874402-3001351?pd_rd_w=IHM3M&content-id=amzn1.sym.1fd66f59-86e9-493d-ae93-3b66d16d3ee0&pf_rd_p=1fd66f59-86e9-493d-ae93-3b66d16d3ee0&pf_rd_r=RZTYTMN9

Amazon. (kein Datum). *Die drei Sonnen: Roman (Die Trisolaris-Trilogie, Band 1)*. Abgerufen am 2. November 2023 von Amazon.de:

<https://www.amazon.de/Die-drei-Sonnen-Roman-Trisolaris-Trilogie/dp/3453317165>

Anglada-Escudé, G., & a., u. (2016). A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri. *Nature*(536), 437 - 440.

Anton, D. A. (2022). *Exosozologie: Außerirdische Intelligenzen und die Folgen eines Erstkontaktes*. Abgerufen am 4. November 2023 von

https://www.uni-wuerzburg.de/fileadmin/1003-ifex/2022/Exosozologie._Ausserirdische_Intelligenzen_und_die_Folgen_eines_Erstkontaktes.pdf

Baas, A., & a., u. (2008). Testing spooky action at a distance. *Nature*(454), 861-864.

Bösl, E. (10. Januar 2017). *Die echte „Basis Rotes Ufer“*. Abgerufen am 2.

November 2023 von die zukunft Die Welt von morgen in Science & Fiction: <https://diezukunft.de/news/science/die-echte-basis-rotes-ufer>

Brennan, P. (1. November 2023). *Discoveries Dashboard*. Abgerufen am 1.

November 2023 von Exoplanet Exploration Planets Beyond Our Solar System: <https://exoplanets.nasa.gov/discovery/discoveries-dashboard/>

Brennan, P. (1. November 2023). *Exoplanet Catalog*. Abgerufen am 1. November 2023 von Exoplanet Exploration Planets Beyond Our Solar System: <https://exoplanets.nasa.gov/discovery/exoplanet-catalog/>

Brennan, P. (13. April 2023). *How We Find and Characterize*. Abgerufen am 1. November 2023 von Exoplanet Exploration Planets Beyond Our Solar System: <https://exoplanets.nasa.gov/discovery/how-we-find-and-characterize/>

Brennan, P. (o.D.11). *What's a transit?* Abgerufen am 2. November 2023 von Exoplanet Exploration Planets Beyond Our Solar System: <https://exoplanets.nasa.gov/faq/31/whats-a-transit/>

Brin, D. (1983). The 'Great Silence': The Controversy Concerning Extraterrestrial Intelligent Life. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 283-309.

Byrd, D., & Whitt, K. K. (17. November 2022). *What is the Great Filter, and can we survive it?* Abgerufen am 2. November 2023 von EarthSky: <https://earthsky.org/space/avoiding-the-great-filter-earth-alien-civilizations/>

FAST. (o.D.2). *Detecting interstellar communication signals*. Abgerufen am 2. November 2023 von Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope: https://web.archive.org/web/20171017203930/http://fast.bao.ac.cn/en/science_SETI.html

Ferguson, A. (21. November 2022). *Ask Astro: How many stars are born each year in the Milky Way?* Abgerufen am 31. Oktober 2023 von Astronomy: <https://www.astronomy.com/science/ask-astro-how-many-stars-are-born-each-year-in-the-milky-way/>

Hanson, R. (1998). The Great Filter - Are We Almost Past It?

Häusser, P. (19. September 2019). *Die Suche nach Leben im All*. Abgerufen am 31. Oktober 2023 von planetwissen: <https://www.planetwissen.de/technik/weltraumforschung/astronomie/pwiediesuchenachlebenimall100.html>

- Heng, K. (2017). *Exoplanetary Atmospheres. Theoretical Concepts and Foundations*. Princeton: Princeton University Press.
- Kasting, J. (2021). *How to Find a Habitable Planet*. Princeton: Princeton University Press.
- Kasting, J. F., Reynolds, R. T., & Whitmire, D. P. (1993). Habitable Zones around Main Sequence Stars. *Icarus*(101), 108-128.
- Knutson, H. (o.D.12). *Introduction to Transit (and Secondary Eclipse) Spectroscopy*. Abgerufen am 2. November 2023 von https://nexsci.caltech.edu/workshop/2012/talks/HeatherKnutson_124.pdf
- LEIFIphysik. (o.D.1). *Aufbau von Atomkernen*. Abgerufen am 2. November 2023 von LEIFIphysik: [https://www.leifiphysik.de/kern-
teilchenphysik/kernphysik-grundlagen/grundwissen/aufbau-von-
atomkernen](https://www.leifiphysik.de/kern-
teilchenphysik/kernphysik-grundlagen/grundwissen/aufbau-von-
atomkernen)
- Liu, C. (2017). *Die drei Sonnen*. (M. Hasse, Übers.) München: Wilhelm Heyne Verlag.
- Liu, C. (2018). *Der dunkle Wald*. (K. Betz, Übers.) München: Wilhelm Heyne Verlag.
- Ludwig-Maximilians-Universität München. (o.D.3). *Extrasolar Planets*. Abgerufen am 8. Oktober 2023 von Ludwig-Maximilians-Universität München Faculty Of Physics Extragalactic Astronomy: <https://www.exgal.physik.uni-muenchen.de/research/planets/index.html>
- NASA. (24. Januar 2019). *How Old Are Galaxies?* Abgerufen am 15. Oktober 2023 von NASA Science Space Place Explore Earth and Space!: <https://spaceplace.nasa.gov/galaxies-age/en/>
- NASA. (o.D.5). *Kepler/K2 In Depth*. Abgerufen am 2. November 2023 von NASA: https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/overview/index.html
- NASA. (o.D.6). *Science Other Worlds*. Abgerufen am 2. November 2023 von James Webb Space Telescope Goddard Space Flight Center: <https://jwst.nasa.gov/content/science/origins.html>
- Newton, I. (1846). *The Mathematical Principles Of Natural Philosophy*. (A. Motte, Übers.) New York: Adee.

- Perryman, M. (2018). *The exoplanet handbook. Second edition.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Sanders, R. (4. November 2013). *Astronomers answer key question: How common are habitable planets?* Abgerufen am 31. Oktober 2023 von UC Berkeley News Center:
<https://web.archive.org/web/20141107081158/http://newscenter.berkeley.edu/2013/11/04/astronomers-answer-key-question-how-common-are-habitable-planets/>
- SETI Institute. (2. September 2022). *Frank D. Drake 1930 – 2022.* Abgerufen am 2. November 2023 von SETI Institute: <https://www.seti.org/frank-d-drake-1930-2022>
- SETI Institute. (o.D.7). *SETI-Observations.* Abgerufen am 2. November 2023 von SETI Institute: <https://www.seti.org/seti-institute/project/details/seti-observations>
- SETI Institute. (o.D.9). *The Fermi Paradox.* Abgerufen am 15. Oktober 2023 von SETI Institute: <https://www.seti.org/fermi-paradox-0>
- Shostak, S. (Juli 2021). *Drake Equation.* Abgerufen am 8. Oktober 2023 von SETI Institute: <https://www.seti.org/drake-equation-index>
- Sridara, C. (o.D.13). *Solar system planets, vector illustration Free Vector.* Abgerufen am 4. November 2023 von Vecteezy:
<https://www.vecteezy.com/vector-art/1990024-solar-system-planets-vector-illustration>
- Stable Diffusion. (o.D.14). *AI Image Generator.* Abgerufen am 4. November 2023 von Stable Diffusion: <https://stablediffusionweb.com/#ai-image-generator>
- Sun, Z. (2022). Neurons Can Generate Electromagnetic Waves. *Natural Science*(14), 463-471.
- The European Space Agency. (o.D.4). *How many stars are there in the Universe?* Abgerufen am 15. Oktober 2023 von The European Space Agency:
https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Herschel/How_many_stars_are_there_in_the_Universe

The Planetary Society. (o.D.10). *The radial velocity graph of 51 Pegasi*.

Abgerufen am 1. November 2023 von The Planetary Society:

<https://www.planetary.org/space-images/radial-velocity-graph-51-pegasi>

The Universe Space Tech. (30. August 2023). *Life near the neighboring star: Are there inhabited planets in Proxima Centauri system?* Abgerufen am 2.

November 2023 von The Universe Space Tech:

<https://universemagazine.com/en/life-near-the-neighboring-star-are-there-inhabited-planets-in-proxima-centauri-system/>

Torre, L. B. (15. Dezember 2022). *What Is the Habitable Zone*. Abgerufen am 2.

November 2023 von Exoplanet Exploration Planets Beyond Our Solar

System: <https://exoplanets.nasa.gov/resources/2255/what-is-the-habitable-zone/>

Vandenbroucke, G. (13. Dezember 2016). *The Link between Fertility and Income*.

Abgerufen am 2. November 2023 von Federal Reserve Bank of St.Louis:

<https://www.stlouisfed.org/on-the-economy/2016/december/link-fertility-income>

Vectoro Artworks. (o.D.8). *Skull Vector Icons Collection Free Vector*. Abgerufen

am 4. November 2023 von Vecteezy: <https://www.vecteezy.com/vector-art/2209546-skull-vector-icons-collection>

Wiegert, P. A., & Holman, M. (16. September 1996). The stability of planets in the Alpha Centauri system.

Wikipedia. (27. Oktober 2023). *Alpha Centauri*. Abgerufen am 30. Oktober 2023

von Wikipedia Die freie Enzyklopädie:

https://de.wikipedia.org/wiki/Alpha_Centauri

Wikipedia. (21. April 2023). *Echte Rose von Jericho*. Abgerufen am 31. Oktober

2023 von Wikipedia Die freie Enzyklopädie:

https://de.wikipedia.org/wiki/Echte_Rose_von_Jericho

Wikipedia. (28. September 2023). *Enrico Fermi*. Abgerufen am 2. November

2023 von Wikipedia Die freie Enzyklopädie:

https://de.wikipedia.org/wiki/Enrico_Fermi

Wikipedia. (25. August 2023). *Planet-hosting star*. Abgerufen am 31. Oktober 2023 von Wikipedia The Free Encyclopedia:
https://en.wikipedia.org/wiki/Planet-hosting_star

Wikipedia. (29. August 2023). *Transitmethode*. Abgerufen am 2. November 2023 von Wikipedia Die freie Enzyklopädie:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Transitmethode>

Wilson, K. (7. Februar 2019). *Tips and tricks for night sky photography*. Abgerufen am 1. November 2023 von Geographical:
<https://geographical.co.uk/science-environment/tips-and-tricks-for-astrophotography>

Yu, C. (2015). The Dark Forest Rule: One Solution to the Fermi Paradox. *Journal of the British Interplanetary Society*(67).

7.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung	Quelle
Abbildung 0.1	(Stable Diffusion, o.D.14); bearbeitet
Abbildung 1.1	(Wilson, 2019)
Abbildung 2.1	(Brennan, How We Find and Characterize, 2023)
Abbildung 2.2	Selbsterstellte Grafik
Abbildung 2.3	(Perryman, 2018, S. 52)
Abbildung 2.4	(Wikipedia, 2023); bearbeitet
Abbildung 3.1	(Torre, 2022)
Abbildung 3.2	(Kasting, Reynolds, & Whitmire, 1993, S. 124)
Abbildung 3.3	(Knutson, o.D.12)
Abbildung 4.1	(SETI Institute, 2022)
Abbildung 4.2	(Wikipedia, 2023)
Abbildung 4.3	Selbsterstellte Grafik nach (Byrd & Whitt, 2022); genutztes Bildmaterial: (Vectoro Artworks, o.D.8); (Sridara, o.D.13)

7. Anhang

Abbildung 5.1	(Amazon, kein Datum)
Abbildung 5.2	(Amazon, kein Datum)
Abbildung 5.3	(Bösl, 2017)
Abbildung 5.4	(The Universe Space Tech, 2023)
Abbildung 5.5	(Wikipedia, 2023)
Abbildung 5.6	(Vandenbroucke, 2016)
Abbildung 6.1	(Brennan, What's a transit?, o.D.11)

7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle	Quelle
Tabelle 3.1	(Kasting, Reynolds, & Whitmire, 1993, S. 117); bearbeitet

7.4. Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die Arbeit selbständig und nur mit den in der Bibliographie angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen sind, wurden als Entlehnung kenntlich gemacht.

Darüber hinaus erkläre ich, dass die Arbeit noch keiner anderen Prüfungsbehörde in gleicher oder ähnlicher Form vorgelegt wurde.

München, den 6.11.2023

Unterschrift des Verfassers