Robin J. Lübbert zur Lage
07.03.2022
DE-49565 Bramsche

2021/2022 Seminarfach Astronomie
Herr Riemer
Greselius-Gymnasium Bramsche

Das Fermi-Paradoxon

Eine Betrachtung der Möglichkeit und Unmöglichkeit extraterrestrischen Lebens und der Kommunikation mit diesem

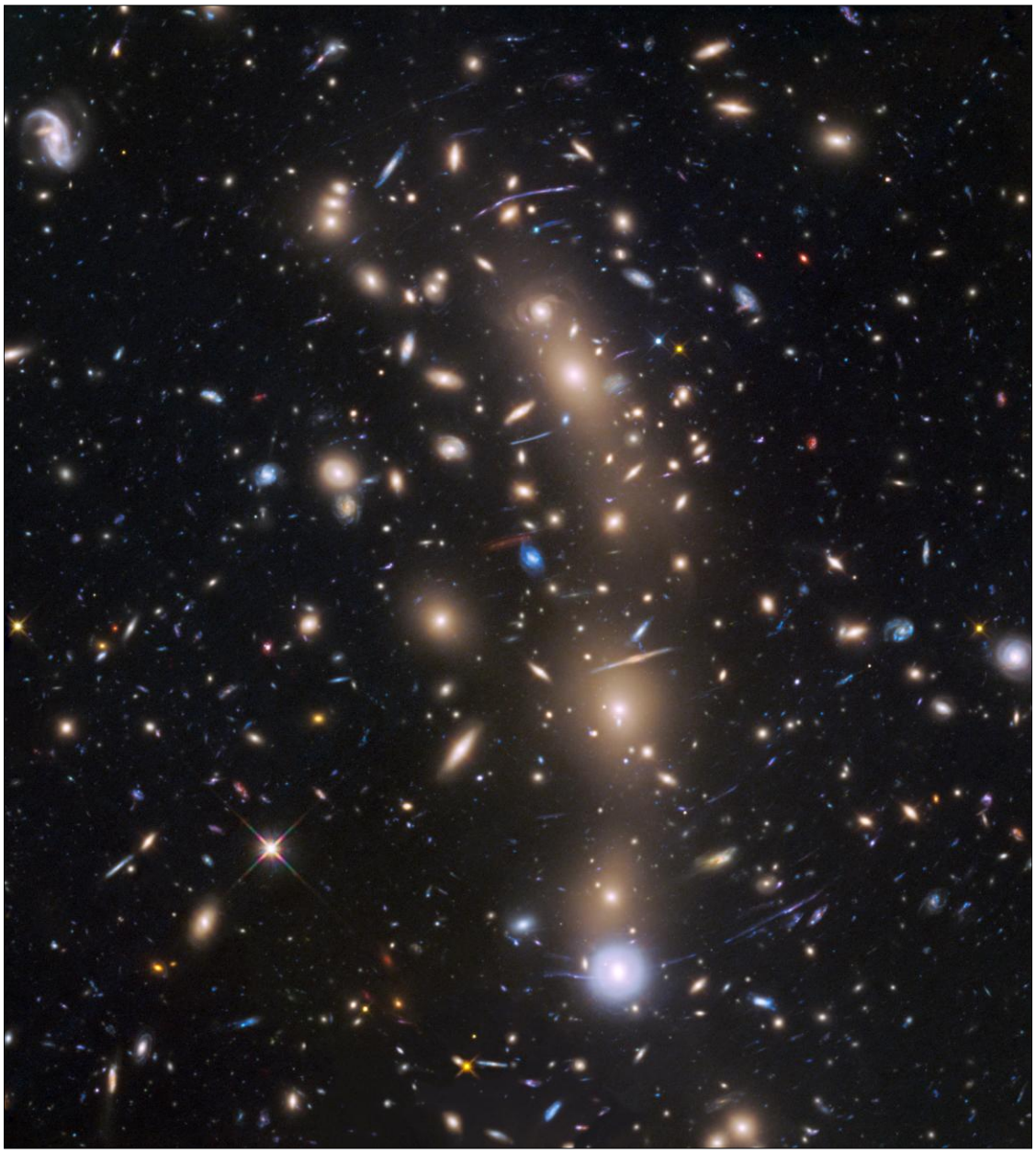

Abbildung 1: Faint Compact Galaxy in the Early Universe (Hubble Space Telescope)

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung 1
2 Die Suche nach extraterrestrischem Leben 2
2.1 Methoden 2
2.2 Bisherige Erkenntnisse 3
3 Lösungsansätze des Fermi-Paradoxons 4
3.1 Wichtige Methoden und Erkenntnisse 5
3.2 Leben als Irregularität 5
3.2.1 Seltene-Erde-Hypothese 5
3.2.2 Große Filter (Vergangenheit) 6
3.2.3 Große Filter (Zukunft) 8
3.3 Kommunikation als Irregularität 10
3.3.1 Raum und Zeit 10
3.3.2 Dunkler-Wald-Theorie 11
3.3.3 „Oberste Direktive“ 12
3.4 Sonstige Theorien 13
3.4.1 Simulationstheorie 13
3.4.2 Panspermie 13
3.4.3 Schöpfungsakt 14
4 Ausblick und Zusammenfassung 14
4.1 Erster Kontakt 14
4.2 Fazit 15
5 Glossar 16
6 Anhang 17
6.1 Versicherung der selbstständigen Erarbeitung und Anfertigung der Facharbeit 19
6.2 Einverständniserklärung zur Veröffentlichung 19
7 Verzeichnisse 20
7.1 Literatur- und Quellenverzeichnis 20
7.1.1 Internetquellen 20
7.1.2 Literatur 24
7.2 Abbildungsverzeichnis 25
8 Endnoten 26

1 Einführung

Das Fermi-Paradoxon geht zurück auf einen Gedankengang des italienischen Physikers und Nobelpreisträgers Enrico Fermi (1901-1954), der 1950 seine Kollegen während einer Diskussion zu der US-amerikanischen UAP[1]-„Sichtungswelle“ in den 1940er und 1950er Jahren fragte: „Where is everybody?“[2]. Er bezog sich dabei auf die sehr hohe Anzahl an Galaxien, Sternen und Planeten in unserem Universum bei der gleichzeitigen Betrachtung der Lebensvielfalt auf der Erde – mit der Menschheit als vergleichsweise hoch entwickelte Zivilisation. Da man bislang einzig die Erde als Vergleichsgröße heranziehen kann, erscheint es in diesem Zusammenhang als paradox, dass die Menschheit bislang keine Beweise für die Existenz extraterrestrischer Zivilisationen beziehungsweise extraterrestrischen Lebens gefunden hat[3].

Circa 20 Jahre nach der Frage von Fermi begann der US-amerikanische Astrophysiker Michael H. Hart mit einer wissenschaftlichen Betrachtung des Paradoxons. Aufgrund dessen und späterer Studien durch Frank J. Tipler, ebenfalls US-amerikanischer Physiker, ist das Fermi-Paradoxon auch als Hart-Tipler-Argument und Fermi-Hart-Paradoxon bekannt[2].

Prinzipiell lassen sich die Lösungsansätze des Fermi-Paradoxons in zwei Hauptbereiche unterteilen: Der eine geht davon aus, dass Leben beziehungsweise die Entwicklung hin zu einer intelligenten und interstellar raumfahrenden Zivilisation eine große Ausnahme im Universum ist, während der andere davon ausgeht, dass intelligentes und interstellar raumfahrendes Leben keine Seltenheit ist, aber jegliche Art der Kommunikation und Interaktion mit diesem (nahezu) unmöglich ist.

Diese Unterteilung in zwei Hauptbereiche wird ab Kapitel 3 angewandt, bevor in Kapitel 4 ein Fazit und ein Ausblick auf einen möglichen Erstkontakt mit extraterrestrischen Lebensformen folgt. Im Folgenden (Kapitel 2) wird allerdings zunächst die bisherige Suche nach außerirdischem Leben betrachtet, um die Möglichkeit zu beleuchten, dass

die Menschheit bereits Kontakt zu intelligentem extraterrestrischem Leben (ETI[4]) hatte.

2 Die Suche nach extraterrestrischem Leben

2.1 Methoden

Je nachdem mit welchem Ziel gesucht wird, müssen zwei Bereiche unterschieden werden: Die Suche nach intelligenten Zivilisationen und die Suche nach einfachen Lebensformen. Letztere ist vor allem auf die Untersuchung von exoplanetaren Atmosphären nach signifikanten Anteilen von zum Beispiel Ozon [5] mittels Transmissionsspektroskopie [6] begrenzt, wobei nur weniger als 1% aller Exoplaneten durch Transmissions-spektroskopie beobachtbar sind[7]. Obwohl auch andere Methoden, wie zum Beispiel die Untersuchung der Reflexionsspektren von Exoplaneten nach Auffälligkeiten im infraroten Bereich um 700nm Wellenlänge (Reflexionsbereich von Chlorophyll), mittlerweile Anklang in der Praxis finden[8], stehen der Suche nach intelligentem Leben (SETI[9]) im Gegensatz dazu weiterhin wesentlich mehr Methoden zur Verfügung. Die wohl bekannteste Methode ist das „Warten" auf extraterrestrische Signale mittels Radioteleskopen [10]. Weitere „Signale", die eine intelligente Zivilisation beweisen würden, wären auch Sterne die nur im Infrarotbereich leuchten, da diese ein Anzeichen für Dyson-Sphären[11] wären[12] oder fehlende Elemente beziehungsweise Massenschwund in Asteroidengürteln anderer Sternsysteme, was auf Rohstoffgewinnung im All schließen lassen würde. Neben dieser eher passiven SETI-Forschung, wird bei der SETA [13] -Forschung nach Artefakten – wie zum Beispiel die konzeptionellen Von-Neumann-Sonden[14] oder Spuren auf dem Mond und der Erde – innerhalb unseres Sonnensystems gesucht[15], die ein Existieren außerirdischen Lebens beweisen würden. Zudem gibt es noch stark in der Kritik stehende Versuche mit möglichen extraterrestrischen Zivilisationen zu kommunizieren (METI[16]), wobei dieses genauso wie SETA als Teil von SETI angesehen

werden kann[17].

2.2 Bisherige Erkenntnisse

Beispiele für solche Kontaktversuche des METI sind die Voyager-Schallplatten von 1977, welche genauso wie die Pioneer-Plaketten von 1972 (s. Anhang) und die Arecibo-Botschaft von 1974 (s. Anhang) die Position der Sonne in der Milchstraße verraten und des Weiteren noch einige Informationen über die Menschheit und Botschaften von der Menschheit enthalten[18]. Außerdem existiert noch die Antwort auf das Wow!-Signal von 2012 und seit knapp 120 Jahren sendet die Menschheit Radiosignale ins All[19]. Insgesamt wurden so Schätzungen zufolge über 75 Sternsysteme erreicht[20], von denen die Menschheit aber bislang keine einzige Antwort empfangen hat.

Auch das SETA-Programm hat bis heute keine besonders aussagekräftigen Hinweise auf extraterrestrisches Leben gefunden. Nennenswert wäre eventuell trotzdem der Antikythera Mechanismus [21], welcher aber wahrscheinlich auf das unterschätzte mechanische Wissen von Archimedes zurückzuführen ist[22]. Auch wenn die SETI-Forschung bislang ebenfalls keine klaren Beweise auf ETI zu verzeichnen hat, gibt es einige interessante Erkenntnisse: Bei der Suche nach Exoplaneten wurden einige Planeten gefunden, auf denen nach unserem Verständnis lebensfreundliche Bedingungen herrschen könnten. Zu nennen ist hier vor allem der 2014 vom Kepler-Weltraumteleskop entdeckte Exoplanet Kepler-186f, welcher ähnliche physikalische Eigenschaften wie die Erde aufweist, um einen Stern (Kepler-186) ähnlich der Sonne kreist und sehr wahrscheinlich in der habitablen Zone[23] von Kepler-186 liegt[24].

Im Bereich des Empfangens von Signalen als Teil des SETI wurde neben einigen „Signalen“, die sich später als technische Störung oder als Folge natürlicher beziehungsweise terrestrischer Phänomene erwiesen – wie zum Beispiel BLC1 oder SHGb02+14a, wurde ein besonderes und bis heute nicht ganz geklärtes Signal empfangen: Das Wow!-Signal vom 15. August

1977[25] (s. Anhang). Es wurde von dem „Big Ear“-Radioteleskop der Ohio State University aufgenommen und von dem Astrophysiker Jerry R. Ehman entdeckt[26]. Er kommentierte seine Entdeckung mit „Wow!“ und gab dem Signal mit dem Codierungsmuster „6EQUJ5“ so seinen Namen[26]. Das Signal besaß die 30-fache Stärke der empirischen Standardabweichung von der kosmischen Hintergrundstrahlung und seine Frequenz entsprach mit 1420,456 Mhz ziemlich genau der sogenannten H1-Linie (1420,405 MHz), eine Frequenz, die kosmisch als sehr ruhig und deshalb als wahrscheinlichster Frequenzbereich für einen extraterrestrischen Kontaktversuch gilt[26]. Aufgrund dessen gibt es internationale Abkommen der ITU, diesen Bereich nicht zu benutzen[27].

Die zunächst ansteigende und sich dann abschwächende „Struktur“ des Signals lässt einen interstellaren Ursprung im Gegensatz zu einer irdischen oder sonnensystemgebundenen Ursache durch die Drehung des Teleskops mit der Erdrotation realistisch erscheinen[26]. Ausgehend davon lassen die angegebenen Äquatorialkoordinaten auf eine Herkunft des Signals aus dem Sternbild Sagittarius schließen, welches vermutlich einen sonnenähnlichen Stern besitzt[26]. Bisherige Versuche, das Wow!-Signal als Folge natürlicher Phänomene (Pulsare, Kometen) zu belegen, werden wie die 2017 veröffentlichte Theorie von dem Astronomieprofessor Antonio Paris als unzureichend belegt und teilweise auch widerlegt angesehen[26].

Falls das Signal tatsächlich von einer extraterrestrischen Zivilisation gekommen sein sollte, so stellt sich die Frage nach dem Inhalt. Eine Modulation hätte aber laut Ehman aufgrund des zu breitbandigen und wenig leistungsstarken Empfängers allerdings nicht erfasst werden können[26].

Das Wow!-Signal stellt also den bisher besten und einzigen wissenschaftlich „anerkannten“ Hinweis auf mögliche ETI dar.

3 Lösungsansätze des Fermi-Paradoxons

Da das Fermi-Paradoxon als Paradoxon keine klare Lösung hat, haben sich im Laufe der Zeit zahlreiche Wissenschaftler mit möglichen

Lösungsansätzen beschäftigt. Die Wichtigsten und Realistischsten davon werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert.

3.1 Wichtige Methoden und Erkenntnisse

Neben Fermi, Hart und Tipler kamen wichtige Erkenntnisse zum Fermi-Paradoxon im Laufe der Zeit von Carl Sagan, der zusammen mit Frank Drake den Beginn der SETI-Forschung darstellt[28], sowie von Nick Bostrom mit zahlreichen ethischen Einschätzungen vor allem zu den Großen Filtern[29], ein Begriff der durch die Arbeit von Robin Hanson geprägt wurde. Auch Stephen Hakwing äußerste sich mehrfach zu dem Fermi-Paradoxon[30].
Hilfsmittel zum „Lösen" des Fermi-Paradoxons wurden vor allem von Nikolai Kardaschow (Kardaschow-Skala [31]) und Frank Drake (Drake-Gleichung[32]) entwickelt[33].

3.2 Leben als Irregularität

Bei der Betrachtung des Fermi-Paradoxons erscheinen zwei Lösungsansätze als logisch: Entweder es gibt anderes intelligentes Leben und die Menschheit konnte bislang nicht mit diesem kommunizieren (Kapitel 3.3) oder die Menschheit ist als intelligente Spezies einzigartig beziehungsweise extrem selten im Universum. Letzteres wird im Folgenden näher erläutert.

3.2.1 Seltene-Erde-Hypothese

Die Seltene-Erde-Hypothese beschreibt eine Theorie zur Erklärung des Fermi-Paradoxons, nachdem (komplexes) Leben im Universum aufgrund extrem unwahrscheinlicher astrophysikalischer, geologischer und biologischer Faktoren als sehr selten angesehen wird und so ein Fehlen an Beweisen für extraterrestrisches Leben erklärt werden kann[34]. Die zentrale Frage der Seltene-Erde-Hypothese lautet somit: „Macht unsere Unwahrscheinlichkeit uns einzigartig?". Dieses stellt einen starken Gegensatz zum kopernikanischen Prinzip[35] dar, das eine Sonderstellung der Menschheit als Beobachter des Universums verneint[36].

Die Seltene-Erde-Hypothese, die unter anderem von Tipler als wahrscheinlichste Lösung des Fermi-Paradoxons eingeschätzt wird[34], kann mit den sogenannten Großen Filtern erklärt werden. Sie beschreiben nahezu unüberwindbare Hürden in der Entwicklung einer hoch entwickelten ETI. Am Beispiel der Menschheit werden die Großen Filter in zwei Kategorien eingeteilt: Große Filter, welche die Menschheit schon passiert hat und solche, welche der Menschheit theoretisch noch bevorstehen könnten.

3.2.2 Große Filter (Vergangenheit)

Ein Planet, auf dem Leben entstehen kann, muss nach bisherigem Verständnis sowohl in der habitablen Zone seiner Galaxie[37] liegen, als auch mit einem relativ runden Orbit um seinen Stern in der habitablen Zone seines Sternsystems liegen[38]. Dieses Sternsystem sollte außerdem ein geeignetes Zentralgestirn besitzen, wobei bislang ungeklärt ist, welche genauen Anforderungen an ein solches Zentralgestirn gelten. Einigen Sterntypen wie Rote Zwerge, Rote Riesen, Neutronensterne, Pulsare sowie binäre Sternsysteme[39] können allerdings vermutlich aufgrund ihrer zu hohen beziehungsweise zu geringen Energie/Strahlung und teilweise damit verbundener gebundener Rotation[40] und instabiler Orbits ausgeschlossen werden[33]. Der Planet muss zudem wahrscheinlich ein terrestrischer Planet sein und ein Magnetfeld sowie eine Atmosphäre zum Schutz vor UV-Strahlung und Sternwinden besitzen[38]. Ein großer Mond würde zudem durch die Stabilisation des Planetenorbits und des Klimas auf diesem, genauso wie ein Gasriese als Schutz vor Asteroideneinschlägen, einen begünstigenden Faktor zur Entstehung von Leben darstellen[38]. Zusammenfassend können diese Faktoren unter „planetare Lage und planetare Eigenschaften“ als erster potenzieller Großer Filter verstanden werden. Allerdings existieren Schätzungen zufolge allein in der Milchstraße circa 40 Milliarden habitable Planeten, was diesen Filter eher zu einem „kleinen“ Großen Filter macht[41].

Neben diesen planetaren „Grundvoraussetzungen“, könnte ein weiterer

möglicher Großer Filter in der Abiogenese liegen, der Entstehung einfachen Lebens. Da bereits circa 3,9 Milliarden Jahre alte Lebensspuren gefunden wurden, aber Wissenschaftler davon ausgehen, dass Leben frühestens vor 4 Milliarden anfangen konnte, sich zu bilden, liegt der Schluss nahe, dass sich primitives Leben wie Prokaryoten [42] auch auf Exoplaneten sehr schnell bildet, sobald geeignete Bedingungen bestehen[43]. Falls das stimmt, scheidet die Abiogenese als Großer Filter aus.

Die Entwicklung von einfachem einzelligem Leben hin zu komplexem einzelligem und schließlich zu komplexem mehrzelligem Leben, erscheint als Großer Filter realistischer. Da für immer größer werdende Organismen eine möglichst konstante externe Energieversorgung ein effektiver Schritt ist, um einen evolutionären Vorteil zu erzielen und die Nutzung der Sternenergie durch Photosynthese oder ähnliche Prozesse sinnvoll wirkt, ist eine Entwicklung von Chlorophyll beziehungsweise Cyanobakterien als Vorstufe nicht unwahrscheinlich[44]. Allerdings wird die Wahrscheinlichkeit eines solch komplexen Evolutionsschritts von einigen (Exo-)Biologen als relativ unwahrscheinlich und potenziell selten im Universum angesehen, was die Photosynthese zu einem potenziellen Großen Filter macht[44].

Ähnlich verhält es sich auch mit der Bildung von Händen zur gezielten Manipulation der Umwelt und mit der Bildung eines flexiblen Stimmapparates, der das Kooperieren zwischen Individuen und das Weitergeben von Wissen ermöglicht. Zwar sind dies nicht zwingend erforderliche Eigenschaften um einer Spezies technologischen Fortschritt und interstellare Raumfahrt zu ermöglichen und eignen sich daher nicht wirklich als Großer Filter, allerdings scheinen sie zumindest der Menschheit im Erreichen dieses „Zieles“ zu helfen.

Eine offenbar jedoch notwendige Eigenschaft einer technologisch fortschrittlichen Zivilisation ist Intelligenz. Ohne sie ist eine technologische Entwicklung genauso undenkbar wie ein aktives interstellares Lebenszeichen dieser Zivilisation. Intelligenz stellt zwar durchaus eine evolutionär vorteilhafte Anpassung dar, könnte aber angesichts der

Komplexität und der Seltenheit „intelligenten“ Lebens auf der Erde durchaus ein Großen Filter sein. Denn im Laufe der Erdgeschichte gab es Schätzungen zufolge circa 250-500 Millionen verschiedene Arten[45], von denen sich aber nur eine – nach allgemeiner Auffassung aufgrund ihrer Intelligenz – hoch entwickeln konnte.

Somit erscheinen die Photosynthese und die Entwicklung der Intelligenz als einzige wirklich Große Filter der menschlichen Vergangenheit. Obwohl es in der geschichtlichen Entwicklung der menschlichen Zivilisation noch einige weitere Hürden gab (wie zum Beispiel Ackerbau, Metallverarbeitung, Schrift, Aufklärung und Spezialisierung), können diese aufgrund ihres tendenziell sehr unwahrscheinlichen Auftretens bei extraterrestrischen Zivilisationen nicht als Großer Filter angesehen werden.

3.2.3 Große Filter (Zukunft)

Neben den bisher genannten möglichen Großen Filtern, die alle von der Menschheit bereits passiert wurden, gibt es noch zahlreiche mögliche Große Filter, mit denen wir möglicherweise noch konfrontiert werden könnten. Viele davon sind im Ansatz jetzt schon erkennbar, während einige bisher noch kaum einschätzbar sind und deshalb auch schwer darstellbar. Dazu gehört unter anderem die Möglichkeit, dass mit dem irgendwann theoretisch möglichen digitalen Transformieren einer Zivilisation, dem Transhumanismus[46], ein Erzielen von Interaktion mit anderen Zivilisationen und von interstellarem Ausbreiten nicht mehr erstrebenswert wirkt. Es ist allerdings ziemlich unwahrscheinlich, dass ein Großteil aller Zivilisationen eine solche Entwicklung annimmt, weshalb dies, genauso wie eine Kontrolle der Wissenschaft beziehungsweise der gesamten Zivilisation durch eine oder mehrere Künstliche Intelligenzen, nicht wirklich als Großer Filter geeignet ist.

Genauso wenig eignen sich „normale“ Kriege und natürlich entstandene Krankheiten als Große Filter, da sie im Normalfall nur einen kleinen Teil der Zivilisation auslöschen und somit auch kein „Ende“ eines Großteils aller

Zivilisation darstellen können. Biologische Kriegsführung stellt allerdings mit künstlich erzeugten Krankheitserregern und sonstigen Biowaffen eine wesentlich größere Gefahr für das Überleben einer Zivilisation dar, da beispielsweise mit molekularen Waffen aus der Nanotechnologie neben einem hohen Prozentsatz aller Tierarten auch Lebensgrundlagen zerstört werden können[47].

Auch technologische Hürden könnten als Große Filter eine Lösung des Fermi-Paradoxons sein: Zum Beispiel könnte die Entwicklung von interstellaren Antriebssystemen eine solche Hürde darstellen, aber auch die Möglichkeit zur interstellaren Kommunikation wäre als technologischer Filter denkbar.

Neben diesen eher hypothetischen Filtern, existieren auch noch einige mögliche Große Filter, deren Auswirkungen sich bereits heute zeigen. Zum einen sorgt die zunehmende Überbevölkerung schon jetzt für Nahrungs- und Wassermangel in manchen Regionen, wobei sich die Situation in den nächsten Jahren in Verbindung mit dem Klimawandel und dem Bevölkerungswachstum in Asien und Afrika noch wesentlich verschärfen wird[48]. Zudem könnte der Klimawandel, auch unabhängig von dem Nahrungs- und Wassermangel durch Wetterextreme, weitreichende Folgen im Bezug auf die langfristige Bewohnbarkeit der Erde haben – vor allem durch sogenannte Rückkopplungseffekte[48]. Außerdem könnte die technologische Bekämpfung des Klimawandels durch zum Beispiel erneuerbare Energien aufgrund zunehmender Ressourcenknappheit[49] (vor allem von Seltenen Erden wie Kobalt) in den nächsten Jahrzehnten stark eingeschränkt werden, wobei auch die Ressourcenknappheit an sich einer modernen und technologisierten Zivilisation nachhaltig ein Ende setzen könnte.

Im Bereich der eventuell der Menschheit noch bevorstehenden Großen Filtern bestehen also neben einigen noch unklaren Entwicklungen einige gut einschätzbare Hürden, wobei wohl vor allem die Klima-Ressourcen-Beziehung als Großer Filter angesehen werden kann.

In Verbindung mit den im vorherigen Unterkapitel genannten Großen Filtern, ergeben sich also drei relativ realistische Große Filter: Photosynthese, Intelligenz und die Klima-Ressourcen-Beziehung. Über die technischen Herausforderungen der interstellaren Raumfahrt als schwer einschätzbarer aber dennoch vierter Großer Filter kann diskutiert werden.

3.3 Kommunikation als Irregularität

Neben der Möglichkeit, dass ETI sehr selten sind, stellt auch die Seltenheit beziehungsweise Unmöglichkeit interstellarer Kommunikation und Interaktion eine mögliche Lösung des Fermi-Paradoxons dar.

3.3.1 Raum und Zeit

Eine mögliche Begründung dessen erhält man durch die Größe des Universums bei gleichzeitiger Betrachtung der Lichtgeschwindigkeit als limitierende Kommunikations- und Reisegeschwindigkeit. Allein von dem nächsten Stern Proxima Centauri aus würde ein Signal 4,246 Jahre brauchen bis es die Erde erreicht[50]. Das bislang schnellste Objekt der Menschheit, die Parker Solar Probe der NASA, erreicht mit 393.044 km/h gerade einmal 0,036% der Lichtgeschwindigkeit (109.179 m/s)[51] und würde daher circa

$$t_1 = \frac{s_{Erde \rightarrow ProximaCentauri}}{v_{ParkerSolarProbe}} = \frac{4{,}246 \cdot 9.460.730.472.580.800 m}{109.179 \frac{m}{s}} = 11.666{,}99 Jahre$$

nach Proxima Centauri benötigen. Selbst mit sozial und ethisch problematischen Generationenschiffen[52] wäre eine solche Reisezeit kaum umsetzbar, zumal die Reisenden dann an ihrem Zielort ankommen könnten, wenn dieser bereits kolonisiert wurde, da nach ihrem Start schnellere Raumschiffe konzipiert wurden oder aber die Zivilisation, von der sie ausgesandt wurden, existiert gar nicht mehr. Dies wäre bei größeren Entfernungen wie zum Beispiel zu dem bereits erwähnten Exoplaneten Kepler-186f auch dann nicht gelöst, wenn man mit hohen Prozenten der Lichtgeschwindigkeit, beispielsweise 99,9%, reisen würde, da eine Reise dann

$$t_2 = \frac{s_{Erde \rightarrow Kepler-186f}}{\frac{v}{c} \cdot c} = \frac{557{,}7 \cdot 9.460.730.472.580.800m}{0{,}999 \cdot 299.792.458 \frac{m}{s}} = 558{,}64 Jahre$$

dauern würde, obwohl ein Generationsschiff aufgrund der Zeitdilatation wohl nicht mehr nötig wäre:

$$t_{relativ} = \frac{t_2}{\gamma} = \frac{17.617.290.810s}{\frac{1}{\sqrt{1-(0{,}999)^2}}} = 24{,}98 Jahre$$

Das Problem der Distanzen für interstellares Reisen beziehungsweise die Kolonisation einer Galaxie bleibt trotzdem. Somit könnte die Größe des Raums ein limitierender Faktor der Kommunikation und Interaktion zwischen zwei Zivilisationen sein. Auch die Zeit könnte ein solch limitierender Faktor sein, denn seit der Entstehung des Universums sind circa 13,8 Milliarden Jahre vergangen[53], von denen wir nur seit 85 Jahren (0,000000616%) mittels Radioteleskopen das Weltall beobachten[54]. Zwar können wir mit immer besseren Teleskopen immer weiter in die Vergangenheit „sehen". Allerdings wäre ein relativ altes extraterrestrisches Signal aus relativ naher Umgebung nicht entdeckt worden. Und selbst wenn ein Signal entdeckt wird, heißt das nicht, dass diese ETI überhaupt noch existiert, schließlich könnte das zeitgleiche Existieren zweier Zivilisationen in räumlicher „Nähe" (eine Galaxie) ziemlich unwahrscheinlich sein.

3.3.2 Dunkler-Wald-Theorie

Eine weitere Möglichkeit, warum Kommunikation zwischen Zivilisationen selten ist, wird durch die Dunkler-Wald-Theorie beschrieben. Sie wurde nach dem Roman „Der dunkle Wald" aus der Trisolaris-Trilogie von Cixin Liu benannt. „Überleben ist das erste Gebot jeder Zivilisation. […] Das Universum ist ein dunkler Wald. Jede Zivilisation ist ein bewaffneter Jäger, der wie ein Geist zwischen den Bäumen umherstreift, vorsichtig störende Zweige aus dem Weg schiebt und versucht, geräuschlos aufzutreten und so leise wie möglich zu atmen. Der Jäger muss vorsichtig sein, denn überall im Wald lauern andere Jäger wie er. Stößt er auf anderes Leben […] so bleibt ihm nichts anderes übrig, als es auszuschalten. […] Es herrscht das

ungeschriebene Gesetz, dass jedes Leben, das sich einem anderen offenbart, umgehend eliminiert werden muss. Das ist das Bild der kosmischen Zivilisationen. Das erklärt das Fermi-Paradox.“[55]. So wird die Dunkler-Wald-Theorie in dem Roman erklärt.

Demnach wäre das Kommunizieren mit einer anderen Zivilisation eine zu große Gefahr für das Überleben einer Zivilisation. Ein Frieden zwischen zwei Zivilisationen könnte unstabil sein, da keine der beiden weiß, ob die andere „gutmütig“ oder „bösartig“ ist. Auch eine weit unterentwickelte Zivilisation könnte durch schnelle technologische Entwicklung zur Gefahr werden. In Folge dessen ist die einzige Option einer jeden Zivilisation die sofortige Vernichtung der anderen.

Als Schlussfolgerung dieser Theorie wäre das Fermi-Paradoxon als Warnung vor Kontaktaufnahme zu verstehen und jeder Kontaktversuch einer Zivilisation, sofern er gehört wird, mehr oder weniger ein Suizid. Das Senden der Arecibo-Botschaft oder die Pioneer-Plaketten der Menschheit wären also als äußerst kritisch anzusehen, was in dem Roman wie folgend beschrieben wird: „Aber in diesem dunklen Wald gibt es ein dummes Kind mit Namen Menschheit, das ein großes Feuer entfacht hat und schreit: Hallo, hier bin ich! Hört mich jemand?“[56].

3.3.3 „Oberste Direktive“

Benannt nach einem Gebot aus „Star Trek“, besteht dieser Theorie nach einer Vereinbarung zwischen den Zivilisationen, sich nicht in die kulturelle, technische und geistige Entwicklung einer Zivilisation einzumischen, bis diese ein bestimmtes technologisches Niveau erreicht hat[57]. Jede Zivilisation hätte so die Möglichkeit, sich unabhängig von externen Einflüssen zu entwickeln. Die kulturelle und technische Vielfalt des Universums könnte so gesichert werden.

Das Fermi-Paradoxon wäre demzufolge insofern gelöst, als dass die Menschheit dieses technologische Niveau noch nicht erreicht hat und eine Kommunikation mit uns für alle ETI verboten ist.

3.4 Sonstige Theorien

Im Folgenden werden noch oft genannte, aber teilweise eher unwissenschaftliche, Theorien zur Erklärung des Fermi-Paradoxons kurz vorgestellt.

3.4.1 Simulationstheorie

Die Simulationstheorie beschreibt das Universum als Simulation durch eine ETI, durch eine KI oder durch Nachfahren der heutigen Menschen, mit dem Zweck der Erforschung der Vergangenheit oder einfach der Unterhaltung[58]. Die Theorie, welche von Nick Bostrom entwickelt wurde[33], stellt allerdings keinen wirklichen Lösungsansatz des Fermi-Paradoxons dar, da sie nicht überprüfbar ist und auch nur im Fall einer ETI als Erschaffer der Simulation eine Lösung des Paradoxons sein könnte.

3.4.2 Panspermie

Eine Lösung des „Problems“, dass bereits 3,9 Milliarden Jahre alte Lebensspuren gefunden wurden, aber die Erde nach Einschätzungen der Wissenschaft erst seit circa 4 Milliarden Jahren bewohnbar ist[43], stellt die Möglichkeit dar, dass entweder ganze Mikroorganismen oder wichtige Moleküle zur Entstehung von Leben durch Kometen oder Meteoriten auf die Erde gebracht wurden und so dem komplexen Leben auf der Erde eine Art Schnellstart ermöglicht haben[43]. Eine Option für solche Moleküle wären Chinone, welche lebensfeindliche UV-Strahlung absorbieren und als Vorstufe zur Photosynthese ähnliche Aufgaben wie Chlorophyll erfüllen[43].
Würde diese Theorie stimmen, so wäre es wahrscheinlich, dass sich Leben oder die Grundlage für Leben an vielen Orten im Universum finden lässt. Eine Lösung des Fermi-Paradoxons stellt dies zumindest zum heutigen Zeitpunkt trotzdem nicht dar, da die Panspermie die Frage nach der Entstehung des Lebens und ob Leben öfter als einmal entstanden ist, nur an einen anderen Ort im Universum verschiebt.

3.4.3 Schöpfungsakt

Das Fermi-Paradoxon lässt sich auch religiös erklären. Denn, wenn man davon ausgeht, dass das Universum von einem Schöpfer erschaffen wurde, so könnte man annehmen, dass die Menschheit als „Krone der Schöpfung“ allein im Universum ist. Zudem wäre eine schöpfende und omnipotente Gottheit nicht hinterfragbar und es wären keine gesicherten Aussagen über das Universum und das Leben darin möglich, da unsere Perspektive gottgewollt wäre. Da Religion allerdings nicht wissenschaftlich ist, scheidet eine Gottheit als wissenschaftliche Lösung des Fermi-Paradoxons aus.

4 Ausblick und Zusammenfassung

4.1 Erster Kontakt

Ein Empfangen von extraterrestrischen Antworten auf unsere bisherigen Signale oder als Kontaktversuch extraterrestrischer Zivilisation ist jederzeit möglich. Doch wie sollte die Menschheit mit einem solchen Signal umgehen? Zwar gibt es mit Simonetta die Pippo eine Beraterin der UN für ein First-Contact-Szenario [59] , doch bei einem Empfangen eines extraterrestrischen Signals wäre eine Entscheidung durch Einzelpersonen durch die mediale Aufmerksamkeit und den dadurch entstehenden Druck der Öffentlichkeit wohl nicht möglich. Nach demokratischem Verständnis müsste theoretisch die gesamte Weltbevölkerung darüber abstimmen, nach welcher Vorgehensweise entschieden werden soll. Dies wäre auch in Anbetracht dessen sinnvoll, als dass ein solches Gremium gesellschaftlich akzeptiert sein muss, da es möglicherweise (vor allem bei Betrachtung der Dunkle-Wald-Theorie) über die Zukunft der gesamten Erde bestimmt. Bei einer britischen Umfrage namens „SETI and Democracy“ aus dem Jahr 2020 stimmten 2.000 Befragte zu 39% für eine Gruppe an Wissenschaftlern als Entscheidungsgewalt über eine Antwort bei einem First-Contact-

Szenario (Anhang: Abbildung 5)[60].

Eine eindeutige Antwort auf den Umgang mit einem extraterrestrischen Signal gibt es also nicht, allerdings wird die Menschheit vermutlich anders handeln als zum Beispiel bei der Anbringung der Pioneer-Plaketten, welches von vier Menschen bestimmt wurde[61].

4.2 Fazit

Zusammenfassend existiert für das Fermi-Paradoxon keine klare und objektive Antwort, denn ansonsten wäre es kein Paradoxon. Aus den vorgestellten Lösungsansätzen erscheint für jede Person, welche sich näher mit dem Thema befasst, vielleicht eine andere für besonders nachvollziehbar, sodass zwar keine generelle Antwort auf das Fermi-Paradoxon existiert, aber jeder für sich selbst entscheiden kann, welchen Lösungsansatz er für am wahrscheinlichsten hält.

Persönliche Meinung: Die Seltene-Erde-Hypothese mit ihren drei Großen Filtern Photosynthese, Intelligenz und Klima-Ressourcen-Beziehung erscheint als realistischster Lösungsansatz durchaus wahrscheinlich, obwohl sie auch als einschränkender Faktor für die Anzahl der Zivilisationen angesehen werden kann und nicht direkt als Theorie, dass die Menschheit die einzige intelligente Spezies im Universum ist. Angesichts der bisherigen Untersuchungen zum Beispiel des Mars und des Jupitermondes Europa könnte es nur eine Frage der Zeit sein, bis die Menschheit primitive Lebensformen oder Fossile von diesen innerhalb der Milchstraße oder sogar innerhalb des Sonnensystems findet. Ob es jedoch jemals Kontakt zu anderem intelligenten Leben gibt, kann aufgrund der Dunkler-Wald-Theorie, welche relativ logisch wirkt, angezweifelt werden.

5 Glossar

UAP	Unindentified Aerial Phenomenom (wissenschaftlicher Ausdruck für UFO)
ETI	Extra-Terrestrial Intelligence
Ozon	Hinweis auf Leben, da Photosynthese als einzige bekannte Quelle für freien Sauerstoff
Transmissionsspektroskopie	Untersuchung der Spektrallinien, die während eines Planetentransits vor seinem Stern von der Atmosphäre ausgestrahlt werden
SETI	Search for Extra-Terrestrial Intelligence
Dyson-Sphäre	Megastruktur um einen Stern zur Energiegewinnung
SETA	Search for Extra-Terrestrial Artifacts
Von-Neumann-Sonden	Sich selbst replizierende Sonden zur Erkundung einer Galaxie
METI	Messaging to Extra-Terrestrial Intelligence
Ankythera-Mechanismus	Komplexe antike astronomische Uhr, die vermutlich auf die Griechen zurückgeht
Habitable Zone	Bereich um einen Zentralstern, in dem flüssiges Wasser dauerhaft vorliegen könnte und so Leben nach menschlichem Verständnis existieren könnte
Kardaschow-Skala	Skala zur Einordnung der technologischen Entwicklung einer Zivilisation aufgrund ihrer Energienutzung (s. Anhang)
Drake-Gleichung	Mathematische Gleichung zur Berechnung der Anzahl an technologisch hoch entwickelten Zivilisationen in der Milchstraße (s. Anhang)
Kopernikanisches Prinzip	Mensch und Sonnensystem als typisch durchschnittlich im Universum
Galaktisch habitable Zone	Bereich in einer Galaxie mit ausreichend schweren Elementen (Metallizität) bei gleichzeitiger gemäßigter Aktivität (mittlerer Sternendichte)
Binäres Sternsystem	Sternsystem mit zwei gravitativ aneinander gebundenen Zentralgestirnen
Gebundene Rotation	Gezeitenkräfte eines Himmelskörpers bringen die Eigenrotation eines um ihn rotierenden Himmelskörpers zum Stillstand
Prokaryoten	Einfaches einzelliges Leben
Transhumanismus	Übertragen des Gehirns/„Wesens“ eines Menschen auf ein technologisches Gerät
Generationenschiffe	Konzept zur interstellaren Raumfahrt um weite Entfernungen mit Besatzung überbrücken zu können

6 Anhang

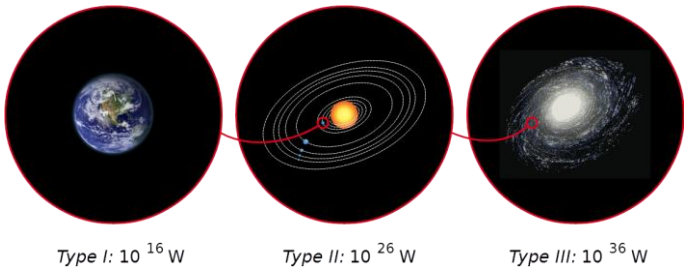

Abbildung 2: Kardaschow-Skala

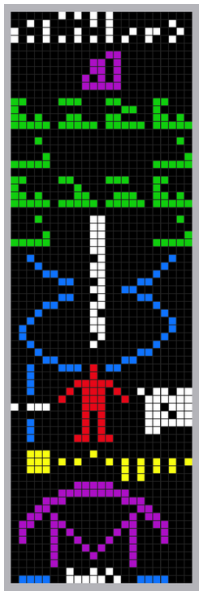

Abbildung 3: Arecibo-Nachricht

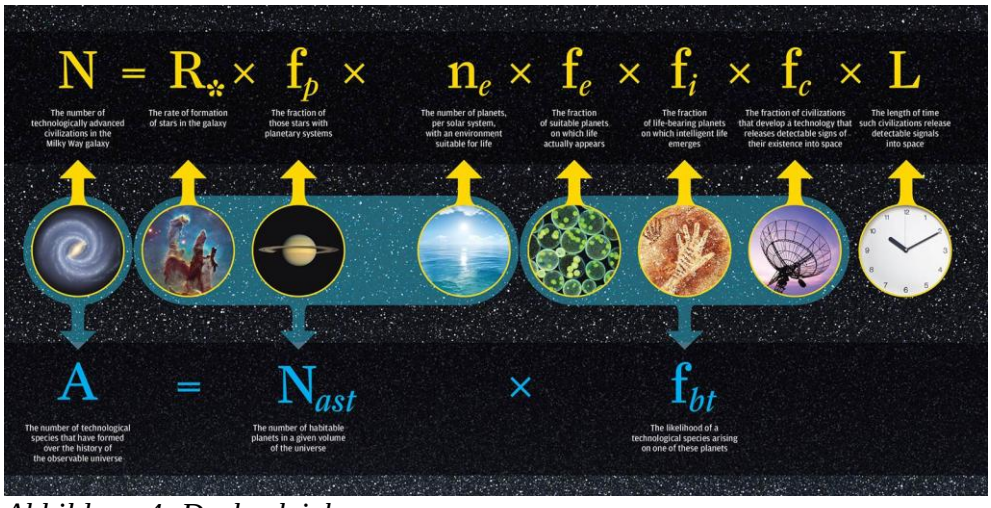

Abbildung 4: Drakegleichung

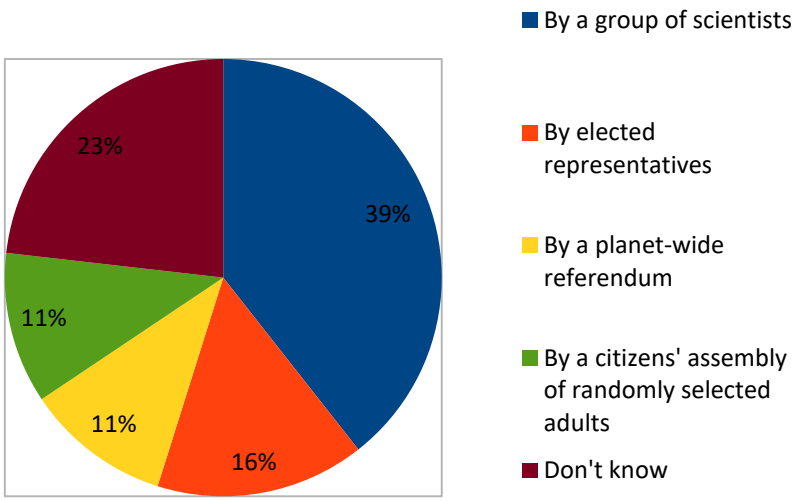

Abbildung 5:"Imagine a scenario in which scientists receive an unambiguous message from extraterrestrials on a distant planet. Of the following options, which would be your preference in terms of how humanity's response to this message should be determined?"

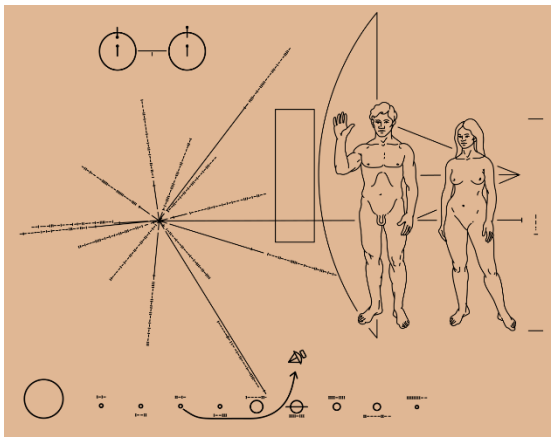

Abbildung 6: Pioneer-Plakette

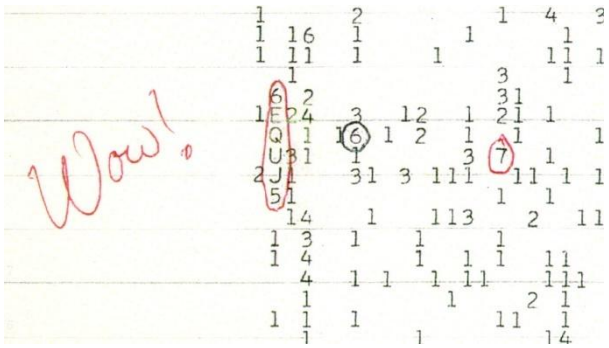

Abbildung 7: Wow!-Signal

6.1 Versicherung der selbstständigen Erarbeitung und Anfertigung der Facharbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken (auch aus dem Internet) entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Verwendete Informationen aus dem Internet sind nach Absprache mit der Fachlehrerin bzw. dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung zu stellen.

Bramsche, den 07.03.2022 _____

Unterschrift der Schülerin / des Schülers

6.2 Einverständniserklärung zur Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Bramsche, den 07.03.2022 _____

Unterschrift der Schülerin / des Schülers

7 Verzeichnisse

7.1 Literatur- und Quellenverzeichnis

7.1.1 Internetquellen

1. Bayerischer Rundfunk: Exoplanet für Außerirdische: Wie Aliens die Erde sehen, in: Bayerischer Rundfunk, 14.10.2021, https://www.ardalpha.de/wissen/ausserirdische-aliens-exoplanet-transitmethode-planet-weltraum-raumfahrt-104.html (abgerufen am 04.03.2022)
2. Bostrom, Nick: In the Great Silence there is Great Hope, in: nickbostrom.com, 2007, https://nickbostrom.com/papers/fermi.pdf (abgerufen am 21.02.2020)
3. bpb: Ressourcenkonflikte, in: bpb.de, 19.01.2022, https://www.bpb.de/themen/ /76755/ressourcenkonflikte/ (abgerufen am 04.03.2022)
4. Culler, Jessica: Kepler-186f, the First Earth-size Planet in the Habitable Zone, in: NASA, o. D., https://www.nasa.gov/ames/kepler/kepler-186f-the-first-earth-size-planet-in-the-habitable-zone/ (abgerufen am 04.03.2022)
5. Evolution Mensch: Pioneer-Plakette – evolution-mensch.de: in: Evoultion Mensch, o. D., https://www.evolution-mensch.de/Anthropologie/Pioneer-Plakette (abgerufen am 05.03.2022)
6. Faszination Regenwald: Artensterben – Verlust der Artenvielfalt, in: Faszination Regenwald, 24.10.2021, https://www.faszination-regenwald.de/info-center/zerstoerung/artensterben/ (abgerufen am 05.03.2022)
7. Fischer, Lars: Wann entstand die Fotosynthese?, in: Spektrum der Wissenschaft, 15.10.2013, https://www.spektrum.de/news/wann-entstand-die-fotosynthese/1210667 (abgerufen am 06.03.2022)

8. Freistetter, Florian: Der Klimawandel und das Bevölkerungswachstum, in: Astrodicticum Simplex, 24.06.2020, https://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2020/06/24/der-klimawandel-und-das-bevoelkerungswachstum/ (abgerufen am 06.03.2022)
9. Geo: 1937: Erstes Radioteleskop: in: geo.de, 08.10.2021, https://www.geo.de/wissen/weltall/1937--erstes-radioteleskop--gebaut-von-grote-reber-in-den-usa_30154240-30167846.html (abgerufen am 06.03.2022)
10. Gräve, Melanie: Biologische Kriegsführung: Die Geschichte von Biowaffen, in: FOCUS.de, 21.09.2020, https://praxistipps.focus.de/biologische-kriegsfuehrung-die-geschichte-von-biowaffen_124681 (abgerufen am 06.03.2022)
11. Hall, Shannon: 60 Billion Habitable Planets in the Milky Way Alone? Astronomers say Yes!, in: Universe Today, 09.07.2013, https://www.universetoday.com/103379/60-billion-habitable-planets-in-the-milky-way-alone-astronomers-say-yes/ (abgerufen am 06.03.2022)
12. Hatfield, Peter/Leah Trueblood: SETI and Democracy, in: SSRN, 28.07.2020, https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3701826 (abgerufen am 05.03.2022)
13. Holland, Martin: SETI: Schwarze Löcher viel besser für Dyson-Sphären geeignet als Sterne, in: heise online, 31.08.2021, https://www.heise.de/news/SETI-Schwarze-Loecher-viel-besser-fuer-Dyson-Sphaeren-geeignet-als-Sterne-6178107.html (abgerufen am 04.03.2022)
14. Ingham, Richard: Astronomie: Forscher warnen vor Kontaktversuchen mit Aliens, in: DIE WELT, 02.10.2015, https://www.welt.de/wissenschaft/weltraum/article6620152/Forscher-warnen-vor-Kontaktversuchen-mit-Aliens.html (abgerufen am

02.03.2022)

15. Knopf, Ingo: Gibt es außerirdisches Leben im Weltall, in: quarks.de, 06.04.2021, https://www.quarks.de/weltall/gibt-es-ausserirdisches-leben-im-weltall/ (abgerufen am 02.03.2022)
16. Lossau, Norbert: Seti-Projekt: Botschaft an Aliens könnte für uns fatal enden, in: DIE WELT, 16.10.2015b,https://www.welt.de/wissenschaft/article141793044/Botschaft-an-Aliens-koennte-fuer-uns-fatal-enden.html (abgerufen am 04.03.2022)
17. NASA: In Depth | Parker Solar Probe: in: NASA Solar System Exploration, o. D., https://solarsystem.nasa.gov/missions/parker-solar-probe/ (abgerufen am 05.03.2022)
18. Nickel, Nelli: Mechanismus von Antikythera: Das Wunderwerk des Archimedes, in: WEB.DE News, 19.05.2016, https://web.de/magazine/wissen/mystery/mechanismus-antikythera-wunderwerk-archimedes-31568406 (abgerufen am 04.03.2022)
19. Planetary Sciences: Rare Earth Hypothesis – Planetary Sciences, Inc.: in: Planetary Science, o. D., https://planetary-science.org/astrobiology/rare-earth-hypothesis/ (abgerufen am 03.03.2022)
20. Sagan, Carl: in: SETI Institute, o. D., https://www.seti.org/carl-sagan (abgerufen am 21.02.2022)
21. Sample, Ian: Scientists looking for aliens investigate radio beam „from nearby star“, in: the Guardian, 07.01.2021, https://www.theguardian.com/science/2020/dec/18/scientists-looking-for-aliens-investigate-radio-beam-from-nearby-star (abgerufen am 04.03.2022)
22. Science ORF: 100 Jahre Radiosignal: in: Science ORF, 01.01.2010, https://sciencev1.orf.at/news/35704.html (abgerufen am 28.02.2022)
23. Scinexx - Das Wissensmagazin: Die Methoden der SETI-Forscher - scinexx.de, in: scinexx | Das Wissensmagazin, 11.02.2019,

https://www.scinexx.de/dossierartikel/die-methoden-der-seti-forscher/ (abgerufen am 17.02.2022)

24. Stasko, Martin: Director, in: UNOOSA, o. D., https://www.unoosa.org/oosa/en/aboutus/director.html (abgerufen am 05.03.2022)
25. Uni Freiburg: Wie berechnet sich das Alter des Universums? in: Uni Freiburg, o. D., https://www.unifr.ch/universitas/de/ausgaben/2017-2018/erwachsenenfragen/wie-berechnet-sich-das-alter-des-universums.html (abgerufen am 05.03.2022)
26. Vakoch, Douglas: Hawking's fear of an alien invasion may explain the Fermi Paradox, in: Academia, 01.01.2017, https://www.academia.edu/34798393/Hawking_s_fear_of_an_alien_invasion_may_explain_the_Fermi_Paradox (abgerufen am 03.03.2022)
27. Wikipedia-Autoren: Copernican principle, in: Wikipedia, 09.12.2021, https://en.wikipedia.org/wiki/Copernican_principle (abgerufen am 03.03.2022)
28. Wikipedia-Autoren: Fermi-Paradoxon, in: Wikipedia, 06.12.2004, https://de.wikipedia.org/wiki/Fermi-Paradoxon (abgerufen am 01.03.2022)
29. Wikipedia-Autoren: HI-Linie, in: Wikipedia, 15.09.2005, https://de.wikipedia.org/wiki/HI-Linie (abgerufen am 06.03.2022)
30. Wikipedia-Autoren: Simulationshypothese, in: Wikipedia, 02.09.2017, https://de.wikipedia.org/wiki/Simulationshypothese (abgerufen am 25.02.2022)
31. Wikipedia-Autoren: Wow!-Signal, in: Wikipedia, 07.03.2004, https://de.wikipedia.org/wiki/Wow!-Signal (abgerufen am 04.03.2022)
32. Zaun, Harald: Das Ende des „Fermi Paradoxon" und das Schweigen im Äther, in: heise online, 02.11.2009, https://www.heise.de/tp/features/Das-Ende-des-Fermi-Paradoxon-

und-das-Schweigen-im-Aether-3383117.html (abgerufen am 18.02.2022)

33. Zaun, Harald: SETA - Spurensuche nach dem extrasolaren Monolithen, in: heise online, 30.01.2012, https://www.heise.de/tp/features/SETA-Spurensuche-nach-dem-extrasolaren-Monolithen-3503440.html (abgerufen am 04.03.2022)

7.1.2 Literatur

1. Bernstein, Max P./Scott A. Sandford/Louis J. Allamandola: Kamen die Zutaten der Ursuppe aus dem All?, in: Spektrum der Wissenschaft, Nr. 10, 1999, S. 26–35
2. Guggenberger, Elisabeth: Die „rote Kante“ der Vegetation, in: Sterne und Weltraum, Nr. 6, 2006, S. 16–20
3. Liu, Cixin/Karin Betz: Der dunkle Wald: Roman (Die Trisolaris-Trilogie, Band 2), S.737,745,746, Deutsche Erstausgabe, München, Deutschland: Heyne Verlag, 2018
4. Rodler, Florian: Spurensuche im All, in: Spektrum der Wissenschaft, Nr. 6/16, 2016, S. 36–41
5. Röhrlich, Dagmar: Hallo? Jemand da draußen?: Der Ursprung des Lebens und die Suche nach neuen Welten, Heidelberg, Deutschland: Spektrum Akademischer Verlag, 2008, S. 27–41
6. Weiden, Silvia von der: Die Suche nach Leben im All, München, Deutschland: Droemer, 1998, S. 31

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:
NASA (https://hubblesite.org/contents/news-releases/2015/news-2015-45.html#:~:text=Faint%20Compact%20Galaxy%20in%20the%20Early%20Universe%20Astronomers,after%20the%20big%20bang%2C%2013.8%20billion%20years%20ago.)

Abbildung 2:
Wikipedia (https://de.wikipedia.org/wiki/Kardaschow-Skala#/media/Datei:Consommations_%C3%A9nerg%C3%A9tiques_des_trois_types_de_l'%C3%A9chelle_de_Kardashev.svg)

Abbildung 3:
Futurezone (https://futurezone.at/science/arecibo-teleskop-ist-zerstoert-was-der-verlust-bedeutet/401116041)

Abbildung 4:
Wordpress (https://erstkontakt.wordpress.com/2018/02/18/erstkontakt-infos-drake-gleichung-mehr-ausserirdische-zivilisationen-fluggast-filmt-ufo-flotte-so-werden-menschen-auf-erstes-treffen-mit-ets-reagieren-18-februar-2018/)

Abbildung 6:
Wikipedia (https://de.wikipedia.org/wiki/Pioneer-Plakette#/media/Datei:Pioneer_plaque.svg)

Abbildung 7:
Wikipedia (https://de.wikipedia.org/wiki/Wow!-Signal#/media/Datei:Wow_signal.jpg)

8 Endnoten

1 Unindentified Aerial Phenomenom (wissenschaftlicher Ausdruck für UFO)
2 Vgl. Wikipedia-Autoren: Fermi-Paradoxon, in: Wikipedia, 06.12.2004, https://de.wikipedia.org/wiki/Fermi-Paradoxon (abgerufen am 01.03.2022).
3 Vgl. Knopf, Ingo: Gibt es außerirdisches Leben im Weltall, in: quarks.de, 06.04.2021, https://www.quarks.de/weltall/gibt-es-ausserirdisches-leben-im-weltall/ (abgerufen am 02.03.2022).
4 Extra-Terrestrial Intelligence
5 Hinweis auf Leben, da Photosynthese als einzige bekannte Quelle für freien Sauerstoff
6 Untersuchung der Spektrallinien, die während eines Planetentransits vor seinem Stern von der Atmosphäre ausgestrahlt werden
7 Vgl. Rodler, Florian: Spurensuche im All, in: Spektrum der Wissenschaft, Nr. 6/16, 2016, S. 36–41.
8 Vgl. Guggenberger, Elisabeth: Die „rote Kante“ der Vegetation, in: Sterne und Weltraum, Nr. 6, 2006, S. 16–20.
9 Search for Extra-Terrestrial Intelligence
10 Vgl. Scinexx - Das Wissensmagazin: Die Methoden der SETI-Forscher - scinexx.de, in: scinexx | Das Wissensmagazin, 11.02.2019, https://www.scinexx.de/dossierartikel/die-methoden-der-seti-forscher/ (abgerufen am 17.02.2022).
11 Megastruktur um einen Stern zur Energiegewinnung
12 Vgl. Holland, Martin: SETI: Schwarze Löcher viel besser für Dyson-Sphären geeignet als Sterne, in: heise online, 31.08.2021, https://www.heise.de/news/SETI-Schwarze-Loecher-viel-besser-fuer-Dyson-Sphaeren-geeignet-als-Sterne-6178107.html (abgerufen am 04.03.2022).
13 Search for Extra-Terrestrial Artifacts
14 Sich selbst replizierende Sonden zur Erkundung einer Galaxie
15 Vgl. Zaun, Harald: SETA - Spurensuche nach dem extrasolaren Monolithen, in: heise online, 30.01.2012, https://www.heise.de/tp/features/SETA-Spurensuche-nach-dem-extrasolaren-Monolithen-3503440.html (abgerufen am 04.03.2022).
16 Messaging to Extra-Terrestrial Intelligence
17 Vgl. Lossau, Norbert: Seti-Projekt: Botschaft an Aliens könnte für uns fatal enden, in: DIE WELT, 16.10.2015b,https://www.welt.de/wissenschaft/article141793044/Botschaft-an-Aliens-koennte-fuer-uns-fatal-enden.html (abgerufen am 04.03.2022).
18 Vgl. Ingham, Richard: Astronomie: Forscher warnen vor Kontaktversuchen mit Aliens, in: DIE WELT, 02.10.2015, https://www.welt.de/wissenschaft/weltraum/article6620152/Forscher-warnen-vor-Kontaktversuchen-mit-Aliens.html (abgerufen am 02.03.2022).
19 Vgl. Science ORF: 100 Jahre Radiosignal: in: Science ORF, 01.01.2010, https://sciencev1.orf.at/news/35704.html (abgerufen am 28.02.2022).
20 Vgl. Bayerischer Rundfunk: Exoplanet für Außerirdische: Wie Aliens die Erde sehen, in: Bayerischer Rundfunk, 14.10.2021, https://www.ardalpha.de/wissen/ausserirdische-aliens-exoplanet-transitmethode-planet-weltraum-raumfahrt-104.html (abgerufen am 04.03.2022).
21 Komplexe antike astronomische Uhr, die vermutlich auf die Griechen zurückgeht
22 Vgl. Nickel, Nelli: Mechanismus von Antikythera: Das Wunderwerk des Archimedes, in: WEB.DE News, 19.05.2016, https://web.de/magazine/wissen/mystery/mechanismus-antikythera-wunderwerk-archimedes-31568406 (abgerufen am 04.03.2022).
23 Bereich um einen Zentralstern, in dem flüssiges Wasser dauerhaft vorliegen könnte und so Leben nach menschlichem Verständnis existieren könnte
24 Vgl. Culler, Jessica: Kepler-186f, the First Earth-size Planet in the Habitable Zone, in: NASA, o. D., https://www.nasa.gov/ames/kepler/kepler-186f-the-first-earth-size-planet-in-the-habitable-zone/ (abgerufen am 04.03.2022).

25 Vgl. Sample, Ian: Scientists looking for aliens investigate radio beam „from nearby star“, in: the Guardian, 07.01.2021, https://www.theguardian.com/science/2020/dec/18/scientists-looking-for-aliens-investigate-radio-beam-from-nearby-star (abgerufen am 04.03.2022).
26 Vgl. Wikipedia-Autoren: Wow!-Signal, in: Wikipedia, 07.03.2004, https://de.wikipedia.org/wiki/Wow!-Signal (abgerufen am 04.03.2022).
27 Vgl. Wikipedia-Autoren: HI-Linie, in: Wikipedia, 15.09.2005, https://de.wikipedia.org/wiki/HI-Linie (abgerufen am 06.03.2022).
28 Vgl. Sagan, Carl: in: SETI Institute, o. D., https://www.seti.org/carl-sagan (abgerufen am 21.02.2022).
29 Vgl. Bostrom, Nick: In the Great Silence there is Great Hope, in: nickbostrom.com, 2007, https://nickbostrom.com/papers/fermi.pdf (abgerufen am 21.02.2020).
30 Vgl. Vakoch, Douglas: Hawking’s fear of an alien invasion may explain the Fermi Paradox, in: Academia, 01.01.2017, https://www.academia.edu/34798393/Hawking_s_fear_of_an_alien_invasion_may_explain_the_Fermi_Paradox (abgerufen am 03.03.2022).
31 Skala zur Einordnung der technologischen Entwicklung einer Zivilisation aufgrund ihrer Energienutzung (s. Anhang)
32 Mathematische Gleichung zur Berechnung der Anzahl an technologisch hoch entwickelten Zivilisationen in der Milchstraße (s. Anhang)
33 Vgl. Wikipedia-Autoren: Fermi-Paradoxon, in: Wikipedia, 06.12.2004a, https://de.wikipedia.org/wiki/Fermi-Paradoxon (abgerufen am 03.03.2022).
34 Vgl. Planetary Sciences: Rare Earth Hypothesis – Planetary Sciences, Inc.: in: Planetary Science, o. D., https://planetary-science.org/astrobiology/rare-earth-hypothesis/ (abgerufen am 03.03.2022).
35 Mensch und Sonnensystem als typisch durchschnittlich im Universum
36 Vgl. Wikipedia-Autoren: Copernican principle, in: Wikipedia, 09.12.2021, https://en.wikipedia.org/wiki/Copernican_principle (abgerufen am 03.03.2022).
37 Bereich in einer Galaxie mit ausreichend schweren Elementen (Metallizität) bei gleichzeitiger gemäßigter Aktivität (mittlerer Sternendichte)
38 Vgl. Röhrlich, Dagmar: Hallo? Jemand da draußen?: Der Ursprung des Lebens und die Suche nach neuen Welten, Heidelberg, Deutschland: Spektrum Akademischer Verlag, 2008, S. 27–41.
39 Sternsystem mit zwei gravitativ aneinander gebundenen Zentralgestirnen
40 Gezeitenkräfte eines Himmelskörpers bringen die Eigenrotation eines um ihn rotierenden Himmelskörpers zum Stillstand
41 Vgl. Hall, Shannon: 60 Billion Habitable Planets in the Milky Way Alone? Astronomers say Yes!, in: Universe Today, 09.07.2013, https://www.universetoday.com/103379/60-billion-habitable-planets-in-the-milky-way-alone-astronomers-say-yes/ (abgerufen am 06.03.2022).
42 Einfaches einzelliges Leben
43 Vgl. Bernstein, Max P./Scott A. Sandford/Louis J. Allamandola: Kamen die Zutaten der Ursuppe aus dem All?, in: Spektrum der Wissenschaft, Nr. 10, 1999, S. 26–35.
44 Vgl. Fischer, Lars: Wann entstand die Fotosynthese?, in: Spektrum der Wissenschaft, 15.10.2013, https://www.spektrum.de/news/wann-entstand-die-fotosynthese/1210667 (abgerufen am 06.03.2022).
45 Vgl. Faszination Regenwald: Artensterben – Verlust der Artenvielfalt, in: Faszination Regenwald, 24.10.2021, https://www.faszination-regenwald.de/info-center/zerstoerung/artensterben/ (abgerufen am 05.03.2022).
46 Übertragen des Gehirns/„Wesens“ eines Menschen auf ein technologisches Gerät
47 Vgl. Gräve, Melanie: Biologische Kriegsführung: Die Geschichte von Biowaffen, in: FOCUS.de, 21.09.2020, https://praxistipps.focus.de/biologische-kriegsfuehrung-die-geschichte-von-biowaffen_124681 (abgerufen am 06.03.2022).
48 Vgl. Freistetter, Florian: Der Klimawandel und das Bevölkerungswachstum, in:

Astrodicticum Simplex, 24.06.2020, https://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2020/06/24/der-klimawandel-und-das-bevoelkerungswachstum/ (abgerufen am 06.03.2022).

49 Vgl. bpb: Ressourcenkonflikte, in: bpb.de, 19.01.2022, https://www.bpb.de/themen/ /76755/ressourcenkonflikte/ (abgerufen am 04.03.2022).

50 Vgl. Weiden, Silvia von der: Die Suche nach Leben im All, München, Deutschland: Droemer, 1998, S. 31.

51 Vgl. NASA: In Depth | Parker Solar Probe: in: NASA Solar System Exploration, o. D., https://solarsystem.nasa.gov/missions/parker-solar-probe/ (abgerufen am 05.03.2022).

52 Konzept zur interstellaren Raumfahrt um weite Entfernungen mit Besatzung überbrücken zu können

53 Vgl. Uni Freiburg: Wie berechnet sich das Alter des Universums? in: Uni Freiburg, o. D., https://www.unifr.ch/universitas/de/ausgaben/2017-2018/erwachsenenfragen/wie-berechnet-sich-das-alter-des-universums.html (abgerufen am 05.03.2022).

54 Vgl. Geo: 1937: Erstes Radioteleskop: in: geo.de, 08.10.2021, https://www.geo.de/wissen/weltall/1937--erstes-radioteleskop--gebaut-von-grote-reber-in-den-usa_30154240-30167846.html (abgerufen am 06.03.2022).

55 Liu, Cixin/Karin Betz: Der dunkle Wald: Roman (Die Trisolaris-Trilogie, Band 2), S.737,745, Deutsche Erstausgabe, München, Deutschland: Heyne Verlag, 2018.

56 Liu, Cixin/Karin Betz: Der dunkle Wald: Roman (Die Trisolaris-Trilogie, Band 2), S.745-746, Deutsche Erstausgabe, München, Deutschland: Heyne Verlag, 2018.

57 Vgl. Zaun, Harald: Das Ende des „Fermi Paradoxon“ und das Schweigen im Äther, in: heise online, 02.11.2009, https://www.heise.de/tp/features/Das-Ende-des-Fermi-Paradoxon-und-das-Schweigen-im-Aether-3383117.html (abgerufen am 18.02.2022).

58 Vgl. Wikipedia-Autoren: Simulationshypothese, in: Wikipedia, 02.09.2017, https://de.wikipedia.org/wiki/Simulationshypothese (abgerufen am 25.02.2022).

59 Vgl. Stasko, Martin: Director, in: UNOOSA, o. D., https://www.unoosa.org/oosa/en/aboutus/director.html (abgerufen am 05.03.2022).

60 Vgl. Hatfield, Peter/Leah Trueblood: SETI and Democracy, in: SSRN, 28.07.2020, https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3701826 (abgerufen am 05.03.2022).

61 Vgl. Evolution Mensch: Pioneer-Plakette – evolution-mensch.de: in: Evoultion Mensch, o. D., https://www.evolution-mensch.de/Anthropologie/Pioneer-Plakette (abgerufen am 05.03.2022).