

Außerirdische Artefakte

Die Suche nach fremden Technosignaturen im All

RÜDIGER VAAS¹

Zusammenfassung – Die Suche nach extraterrestrischen Intelligenzen ist eines der größten Abenteuer der Menschheit. Denn die Entdeckung außerirdischer Wesen oder deren Relikte hieße, dass wir nicht allein im Weltall sind. Das würde unser Verständnis von Leben, Bewusstsein, Kultur und von uns selbst revolutionieren. Es wäre eine große Chance – oder eine große Gefahr. Seit 1960 lauschen Astronomen nach Radiobotschaften von fernen Sternen – noch immer vergeblich. Doch extraterrestrische Zivilisationen könnten sich ganz anders verraten: Beispielsweise aufgrund gigantischer Konstruktionen in ihrer Galaxie, bei ihren Sternen oder um ihre Planeten sowie durch Begleiterscheinungen ihrer Industrien, Raumschiffe oder Kommunikationskanäle. Vielleicht durchstreifen Roboter auch weite Bereiche des Weltraums. Deshalb sollte eine neue Fahndungsstrategie nicht vernachlässigt werden: die Suche nach außerirdischen Artefakten bei anderen Sternen und Planeten, im Sonnensystem und sogar auf der Erde. Solche Projekte haben bereits begonnen. Hätten sie Erfolg, wäre unsere Welt nicht mehr dieselbe.

Schlüsselbegriffe: Außerirdische Intelligenz – SETI – SETA – Technosignaturen – Superzivilisationen – Exoplaneten – Weltall

Extraterrestrial Artifacts: In Search of Alien Technosignatures

Abstract² – Searching for extraterrestrial intelligences is one of mankind's greatest adventures. The discovery of other beings or their relics would mean that we are not alone in the universe. It would revolutionize our understanding of life, consciousness, culture and ourselves. It would be a great opportunity – or a great danger. Astronomers have been listening for radio messages from distant stars since 1960 – still in vain. But extraterrestrial civilizations could reveal themselves in completely different ways: We might discover gigantic constructions in their galaxy, near their stars or around their planets,

1 **Rüdiger Vaas** (<https://orcid.org/0000-0002-3666-8139>) ist Philosoph, Publizist, Autor sowie Redakteur für Astronomie und Physik der Monatszeitschrift *bild der wissenschaft*. Dieser Überblicksartikel basiert auf seinen Vorträgen „Außerirdische Artefakte. Warum die Suche nach fremden Spuren im All erfolgversprechender ist als die nach Botschaften“ bei den 35. Neubrandenburger Tagen der Raumfahrt am 8. November 2019 in Neubrandenburg und „Außerirdische Artefakte. Die Suche nach fremden Spuren im All – und warum sie erfolgversprechender ist als die nach Botschaften“ auf der Tagung der Gesellschaft für Anomalistik am 18. Juni 2022 in Marburg. E-Mail: ruediger.vaas@t-online.de.

2 An extended English abstract can be found at the end of the article on pages 397–398.

for example, or accompanying phenomena of their industries, spaceships or communication channels. Perhaps robots roam vast areas of space. Therefore, a new search strategy should be pursued: the search for extraterrestrial artifacts among other stars and planets, in the solar system and even on Earth. Such projects have already begun. If they were successful, our world would no longer be the same.

Keywords: extraterrestrial intelligence – SETI – SETA – technosignatures – supercivilizations – exoplanets – outer space

Kosmische Spezies

Wenn man rückblickend ein Jahr nennen wollte, ab dem sich die Menschheit selbst als kosmische Spezies begriff, wäre es die Zeit um 1960. Eine kosmische Spezies ahnt oder weiß, dass sie nicht allein im Universum ist, dass sie nur eine unter vielen ist, und dass viele andere in zahlreichen Aspekten weiterentwickelt sind als man selbst. Eine kosmische Spezies reflektiert die Möglichkeiten eines Kontakts mit anderen Spezies im All und bereitet sich darauf vor; sie sucht diesen Kontakt passiv (rezeptiv) und vielleicht auch aktiv (emittierend) oder hat ihn bereits.

Schon seit Jahrtausenden und insbesondere ab der Renaissance und Aufklärung spekulierten Menschen darüber, dass es außerhalb der Erde Leben und Intelligenz geben könnte (Brake, 2006; Crowe, 1999, 2008; Dick, 1982, 1996, 2020; Guthke, 1983; Vaas, 2023). Das geschah spiritistisch im Rahmen der Religionen (Engel etwa wurden häufig als außerirdisch imaginiert), rationalistisch im Rahmen der Philosophie und der frühen Naturwissenschaften, fiktiv in der Science-Fiction. Mit den Fortschritten in der Astronomie und den theoretischen Grundlagen der Raumfahrt steigerte sich die extraterrestrische Attitüde bis hin zu imaginierten Entdeckungen (auf Mond und Mars) und sogar mutmaßlichen Direktkontakten (Sichtung und Interpretation von „Unidentified Flying Objects“). Aber erst um 1960 wurde SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence), die Suche nach extraterrestrischen Intelligenzen (Extraterrestrials, ETs), zu dem, was sich inzwischen als ein paradigmatisches Forschungsprogramm etabliert hat (Drake & Sobel, 1992; Lesch & Zaun, 2023; Shostak, 2009; Shostak & Barnett, 2003; Shuch, 2011; Tarter, 2001; Vaas, 2003, 2010a, 2017a, 2017b, 2018a, 2021a, 2022a; Von Hoerner, 2003; Wabbel, 2002; Zaun, 2010). (Die SETI-Nomenklatur ist im historischen Verlauf uneinheitlich und mehrdeutig, siehe etwa Almár, 2011, Wright, 2018b, Wright et al., 2018a.) Inzwischen meint ein Drittel bis zur Hälfte der Bevölkerung in Deutschland und in vielen anderen westlichen Ländern, dass es außerhalb der Erde Intelligenzen gibt (Vaas, 2017c, 2017d).

Die Suche nach Technosignaturen

Als sich die Radioastronomie entwickelte, haben 1959 Giuseppe Cocconi und Philip Morrison vorgeschlagen, nach Signalen von außerirdischen Sendern bei anderen Sternen zu suchen, und

zwar besonders bei einer Frequenz um 1420 Megahertz, der Wellenlänge (21 Zentimeter) des neutralen Wasserstoffs im Grundzustand (Cocconi & Morrison, 1959).

1960 kam Frank Drake unabhängig von ihnen auf dieselbe Idee und realisierte sie auch erstmals im Rahmen seines Project Ozma, indem er mit einem 26-Meter-Radioteleskop am National Radio Astronomy, Green Bank, in West Virginia die beiden sonnennahen Sterne Tau Ceti und Epsilon Eridani inspizierte (Drake, 1961 & 1962). In Green Bank fand 1961 auch die von ihm organisierte erste SETI-Konferenz statt (Drake, 1962 & 1965).

Ebenfalls 1961 schlugen Charles H. Townes und Robert N. Schwartz vor, SETI in weiteren Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums zu betreiben, speziell hinsichtlich von Maser-Impulsen (Townes & Schwartz, 1961). Daraus entwickelte sich OSETI (optical SETI), das inzwischen die Suche nach Signaturen in spezifischen Wellenlängen vom infraroten über den sichtbaren bis zum ultravioletten Bereich des Spektrums ausgeweitet hat (Kingsley & Bhathal, 2001).

1960 wurden zudem zwei ganz andere Suchstrategien und, damit verbunden, Spekulationen über ETs angeregt: Einerseits schlug Ronald N. Bracewell vor, nach fremden Sonden im Sonnensystem zu suchen (Bracewell, 1960, 1975). Daraus entwickelte sich ein Forschungsgebiet, das (nicht völlig deckungsgleich) als S³ETI (Solar System SETI), SETV (Search for Extraterrestrial Visitation), Xenoarchäologie, Artefakt-SETI oder SETA (Search for Extraterrestrial Artefacts) im engeren Sinn bezeichnet wird (Freitas, 1983; Freitas & Valdes, 1985). Andererseits überlegte Freeman Dyson, dass technisch sehr weit fortgeschrittene Zivilisationen zur Energiegewinnung riesige Strukturen um ihre Heimatsterne errichtet haben könnten, die dann über ihre Abwärme mit Infrarotteleskopen nachgewiesen werden könnten (Dyson, 1960). Daraus entwickelte sich ein als SETA im weiteren Sinn oder mitunter als dysonisches SETI bezeichnetes Forschungsgebiet, das ganz allgemein nach indirekten, nicht absichtlich geschickten Signaturen späht (Ćirković, 2006, 2018; Bradbury et al., 2011).

SETA im weiteren Sinn wurde zuweilen, vor allem anfangs, dem dann als traditionellem oder konventionellem oder gar orthodoxem SETI im Radiobereich sowie OSETI gegenübergestellt. Tatsächlich ergänzen sich die Strategien jedoch; sie sind also wesentlich komplementär, nicht kontrastiv oder konkurrierend. Und sie lassen sich als die Suche nach Technosignaturen (Technomarker) zusammenfassen (Tarter, 2007; Wright et al., 2022) – im Gegensatz zur Suche nach Biosignaturen (Biomarker), wie sie im Rahmen der Xeno- oder Exo- oder Astrobiologie oder Bioastronomie betrieben wird (hierzu Cavalazzi & Westall, 2018; Gargaud et al., 2023; Horneck & Rettberg, 2007; Kolb, 2019; Plaxco & Gross, 2021; Rothery et al., 2018). Begrifflich ist die Rede von einer Suche nach Technosignaturen auch weniger problematisch, da keine Definition von Intelligenz vorausgesetzt oder stipuliert werden muss – beziehungsweise, wie anfänglich geschehen, Intelligenz lediglich mit technischer Intelligenz gleichgesetzt wird oder gar mit der Fähigkeit, interstellare Radiosender zu betreiben (Tarter, 2004, S. 397).

Von solchen Suchprojekten sind Sendeprojekte zu unterscheiden (Zaitsev, 2008, 2011). Sie funken gezielt Botschaften im Radiobereich oder mittels Laserstrahlen ins All. Dies wird als METI (Messaging to Extraterrestrial Intelligence), BETI (Broadcast to ETI), active SETI oder CETI (Communication with Extraterrestrial Intelligence) bezeichnet.

Die Großfahndung hat erst begonnen

Radiowellen-SETI hat sich mittlerweile zu einer ausgefeilten und effizienten Methode entwickelt, die auch einen unabhängigen Kollateralnutzen für die Astronomie besitzt. Zwar wurde bislang noch kein einziges ET-Signal detektiert beziehungsweise verifiziert. Doch alle über Jahrzehnte summierten Anstrengungen haben nur einen winzigen Ausschnitt des Suchraums ausgelotet. Selbst optimistisch gerechnet, entspricht dem mit Radioteleskopen durchforsteten Suchraum bisher nur das Volumen eines Wasserglases oder bestenfalls eines kleinen Swimming-Pools im Verhältnis zu allen irdischen Ozeanen (Tarter et al., 2010; Wright et al., 2018b). Auch wenn man sich auf 1 bis 2 Gigahertz bei einer isotropen Radioleistung vom Hundertfachen des irdischen Arecibo-Radars beschränkt, beträgt die kumulierte Durchmusterung nicht einmal 0,001 Prozent des Suchraums (Grimaldi & Marcy, 2018). Und ein solcher Sender könnte bestenfalls noch in 1.000 Lichtjahren Entfernung nachgewiesen werden – vorausgesetzt, man lauscht in der passenden Frequenz zur passenden Zeit in die passende Richtung, was selbst schon ein schwieriges Entscheidungsproblem ist (Narusawa et al., 2018; Wright, 2020b).

Zwar machen die Radiowellen-SETI-Projekte inzwischen große Fortschritte (Enriquez et al., 2017; Franz et al., 2022; Gajjar et al., 2021; Garrett & Siemion, 2023; Harp et al., 2016, 2019; Ma, P.X., 2023. Lacki et al., 2021; Price et al., 2020; Sheikh et al., 2020; Suresh et al., 2023; Tao et al., 2022; Wlodarczyk-Sroka et al., 2020; Zhang et al., 2020). Doch um mit der gegenwärtigen Empfindlichkeit (10^{-26} Watt pro Quadratmeter in einem 1-Hertz-Kanal) beispielsweise Signale von einem 200 Lichtjahre fernen Planeten zu empfangen, müsste der potenziell detektierbare Sender eine Leistung von 10^{13} bis 10^{15} Watt haben. Das liegt in der Größenordnung der verfügbaren Energie der gesamten Menschheit – und ist 10 bis 1.000 Millionen Mal so viel wie die Leistung des irdischen Arecibo-Radarsenders. Verlässlich detektierbar sind nur starke Dauer-Rundumsender. Das wirft die heikle Frage auf nach einer etwaigen Absicht, solche enormen Energien einzusetzen. Nicht zu missachten ist also ein Risiko: An die Erde gerichtete Botschaften aus Entfernungen jenseits der bisherigen Reichweite unserer eigenen Radiowellen wären keine Reaktionen auf diese, sondern hätten eine ganz andere und vielleicht fragwürdige, für uns bedrohliche Motivation.

Aus den bisherigen Radiowellen-SETI-Projekten kann man allenfalls schließen, dass keine starken permanenten Rundumsender existieren, die sich im Umkreis weniger Dutzend

oder höchstens ein paar Hundert Lichtjahre Entfernung befinden. Außerdem gibt es keinen Dauersender im Umkreis von 10 Lichtjahren mit 10^{10} Watt – eine für irdischen Flugzeugradar typische Leistung. Aber nicht einmal daraus folgt, dass wir in diesem Bereich keine Nachbarn haben – denn vielleicht senden sie einfach keine Radiosignale, zumindest nicht in Richtung Erde. Oder wir leben in einem potenziell schweigenden Universum: Zivilisationen mit starken Sendern verbergen sich eventuell, weil sie sich nicht gefährden möchten.

Radiowellen-SETI ist deshalb nicht obsolet oder gar zu unterlassen; zumal man das tun kann und sollte, was zu einer gegebenen Zeit möglich und effizient ist. Und falls im All unbekannte Gefahren lauern (Baum et al., 2011; Michaud, 2007; Vaas, 2010b, 2021b), spricht das nicht gegen SETI – im Gegenteil. METI ist allerdings hochproblematisch (Haqq-Misra et al., 2013; Korbitz, 2014; Musso, 2012; Shostak, 2012; Vakoch, 2011). Und das nicht nur, weil die Menschheit wahrscheinlich noch nicht reif für einen Kontakt mit ETs wäre (Almár & Tarter, 2011; Finney, 1990; Gerritzen, 2016; Harrison, 2002, 2011; Schenkel, 1999; Schetsche, 2014; Schetsche & Anton, 2019; Schetsche & Engelbrecht, 2008; Tough, 1986, 2000; Wright, 2023).

Doch vielleicht sind intentionale elektromagnetische Signale im Weltall zur „internen“ Kommunikation oder aber zur Kontaktaufnahme entweder in Form von Rundumsendern oder sogar gezielt an uns gerichtete Botschaften – egal ob biologischen oder maschinellen Ursprungs – viel zu selten oder zu schwach oder schlicht eine völlig antiquierte Technologie. Deshalb ist eine radikale Erweiterung des Suchraums im Sinn von SETA angeraten, die alle diese Beschränkungen umgeht und keinen Kommunikationswillen der ETs voraussetzt, sondern auch deren Nebenerscheinungen aufspüren könnte. Daher empfiehlt sich die Suche nach extraterrestrischen Artefakten beziehungsweise Technosignaturen im weitesten Sinn.

Artefakte im All

Eine Definition von Artefakten ist nicht trivial. In der Archäologie versteht man darunter von Menschen hergestellte Gegenstände, doch darum geht es bei SETA nicht. Auch etwas „Intentionales“ und/oder „Künstliches“ im Gegensatz zu etwas „Natürlichem“ wäre keine treffliche Bestimmung, insofern „Kunst“, „Geist“, „Pläne“ ja auch ein Teil der Natur sind. Zudem wären weder ein Speziesismus noch ein Biozentrismus zielführend, da Artefakte nicht nur von Menschen, sondern auch von anderen Tieren oder eben ETs stammen können – und nicht einmal nur von Lebewesen (wie immer man wiederum diese definieren mag; siehe Vaas, 2020a), sondern auch von Robotern. Umgekehrt sind außerirdische Artefakte nicht zwingend nichtmenschlich, da Menschen ja bereits zahlreiche Artefakte auf dem Mond und in vielen Teilen des Sonnensystems hinterlassen haben. Überdies könnte es bislang verborgene Artefakte auf der Erde geben, die von ETs stammen (Davies, 2012; Schmidt & Frank, 2018;

Wright, 2018a; Sánchez-Beristain et al., 2023), vielleicht sogar unzählige winzig kleine Nanobots (Sandberg et al., 2016; Vaas, 2018b). Hinzu kommt, dass ET-Indizien nicht einmal geschaffene Objekte zu sein brauchen, sondern auch als Modifikationen der Natur verräterisch wären: etwa in Form von Grabungsspuren auf Planetoiden. (Das gilt analog für indirekte Indizien im elektromagnetischen Spektrum: Abwärme, Modulation von natürlichen Strahlenquellen oder eine partielle Blockade des Lichts eines Sterns durch vorüberziehende Megastrukturen.) Selbst wenn man den Begriff „Artefakte“ also in einem sehr weiten Sinn versteht und beispielsweise Radiobotschaften einschließt, ist er potenziell missverständlich oder unzureichend – aber aber deckungsgleich mit der als Oberbegriff passenderen Bezeichnung „Technosignaturen“.

Eine eindeutige Identifikation von Technosignaturen, falls sich welche zeigten, ist das Hauptproblem von SETA. Denn bestimmte Phänomene könnten einerseits Technosignaturen sein, aber andererseits einen rein natürlichen nichtintentionalen Ursprung haben (was auch bei der Identifikation uralter Werkzeuge von Vor- und Frühmenschen schwierig ist, siehe etwa Semaw et al., 2003; McPherron et al., 2010; Harmand et al., 2015). Das gilt beispielsweise für Infrarotstrahlung oder für chemische Verbindungen, die sich in den Atmosphären von Exoplaneten entdecken lassen. Auch Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, Mikrowellenverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung), also Laser im Mikrowellenbereich, waren zunächst ein artifizielles Phänomen. (Der erste Ammoniak-Maser wurde 1953 bei 24 Gigahertz hergestellt.) Doch ab 1965 wurden zahlreiche extraterrestrische Maser-Quellen entdeckt, die ganz natürlich entstehen: von Wasser, Hydroxyl-Radikalen, Formaldehyd, Methanol, Ethanol und Siliziummonoxid in Kometen, Atmosphären von Planeten (etwa der Jupiter-Aurora) und bestimmten Sternen (Roten Riesen), interstellaren Molekülwolken, Sternentstehungsregionen, Supernova-Überresten und sogar aktiven galaktischen Nuclei (Megamaser bei supermassereichen Schwarzen Löchern). Und die extrem regelmäßigen Radiopulse aus dem All, die 1967 entdeckt wurden, stammen nicht von artifiziiellen Rundumsendern, sondern von rotierenden Neutronensternen (Pulsaren).

Falls es technisch hochentwickelte Zivilisationen in der Milchstraße oder anderswo gibt, hinterlassen sie beziehungsweise ihre Maschinen unvermeidlich Spuren ihrer Energieerzeugung und -nutzung (Berea, 2022; Haqq-Misra et al., 2022c; Jones, 2015; Lazio et al., 2023; Wright, 2021; Wright & Kipping, 2019). Dies kann auch bei bereits ausgestorbenen Kulturen der Fall sein oder bei postbiotischen Intelligenzen (Vaas, 2017e, 2018a, 2020b), die ihre organischen Schöpfer womöglich längst hinter sich gelassen haben und als Roboter-Armada mit Künstlicher Intelligenz den Weltraum relativ einfach kolonisieren könnten. Das mögen verwegene Spekulationen sein, aber sie sind im Prinzip überprüfbar. Denn nach den indirekten Signaturen kann man fahnden – und zwar häufig mit wenig Aufwand oder Kosten, weil die Daten dazu aus anderen Gründen ohnehin durch die astronomische Forschung bereitgestellt werden: etwa bei der Suche nach Transits von Exoplaneten oder umfassenden Himmelsdurchmusterungen.

Relativ einfach wäre ein Nachweis der Abwärme zirkumstellarer oder extragalaktischer Kraftwerke. Diskutiert werden auch Industrieabgase in Planetenatmosphären, Abdrücke artifiziell erzeugter Elemente wie Technetium in Sternspektren, Indizien für interplanetarische und interstellare Raumschifftriebwerke und sogar für technische Artefakte in unserem Sonnensystem. Außerirdische Superzivilisationen könnten zudem Kommunikationskanäle mittels Neutrinos oder Gravitationswellen betreiben, die sich durch irdische Detektoren vielleicht nachweisen ließen, auch wenn die Produktion solcher Signale unseren eigenen technischen Möglichkeiten wohl Jahrtausende voraus wäre. Das alles mag höchst abenteuerlich klingen. Aber es ist im Rahmen der bekannten Naturgesetze weder unsinnig noch unmöglich. Und der Ressourcenverbrauch hält sich bei der Suche in Grenzen – die meisten Projekte werden privat finanziert und nebenher ausgeführt, indem man in ohnehin gewonnenen Daten zusätzlich nach artifiziellen Mustern scannt.

Haben Außerirdische bereits das Sonnensystem besucht?

Interstellare Sonden mit Künstlicher Intelligenz könnten schon seit langer Zeit das Universum nach anderen Zivilisationen durchforsten. Eine Kontaktaufnahme und schnelle Kommunikation wäre dank des im Bordcomputer gespeicherten Wissens viel direkter und effizienter als interstellare Radiobotschaften. Solche Sonden hätten einige Vorteile gegenüber interstellaren Radiobotschaften: Sie sind billiger als Millionen Jahre lange Rundum-Sendungen; sie müssen nur gebaut und gestartet werden und können dann sich selbst überlassen bleiben; wenn sie in der Lage sind, sich selbst zu reproduzieren, könnten sie Rohstoffe vor Ort nutzen und innerhalb von weniger als 100 bis 1.000 Millionen Jahren die Milchstraße kolonisieren; sie wären eventuell effektivere und zielgenauere Informationsüberträger; sie sind sicherer, weil sie nicht ihren Ursprungsort verraten; und sie könnten sich zunächst oder dauerhaft versteckt halten. Falls sie mit Funksignalen auf sich aufmerksam machen, könnten sie ihre Informationen trotzdem erst preisgeben, wenn man die Sonden birgt – ein guter „Filter“ gegen technisch allzu primitive Völker.

Erste Suchprojekte nach solchen Sonden an einigen markanten Punkten im Sonnensystem waren erfolglos (Freitas & Valdes, 1980; Valdes & Freitas, 1983). Doch das besagt nicht viel. Selbst ein Kühlschrank im hohen Erdorbit wäre kaum aufgefallen. Die Suche sollte weitergehen (Burke-Ward, 2000; Freitas, 1980ab, 1983, 1985, 1985; Gertz, 2016, 2020; Vaas, 2018c). Und die Entdeckung des ersten interstellaren Körpers, der 2017 durch das innere Sonnensystem kreuzte und seltsame Eigenschaften aufweist, motivieren Aufmerksamkeit und Vorsicht – zumal kontrovers diskutiert wird, ob er einen artifiziellen Ursprung hat (Bialy & Loeb, 2018; Ezell & Loeb, 2023; Hoang & Loeb, 2023; Loeb, 2022, 2023; Siraj & Loeb, 2022; dagegen Bergner & Seligman, 2023; Curran, 2021; Hsieh et al., 2021; Lineweaver, 2022; Zuckerman, 2022b; Taylor et al., 2023).

Fremde Sonden im Erdorbit?

Falls sich extraterrestrische Forscher für die Erde interessierten, würde es genügen, dass sie eine Sonde oder mehrere in einer geostationären Umlaufbahn parken, knapp 35.800 Kilometer über der Erdoberfläche. Selbst wenn das vor Millionen Jahren geschah und die Späher längst nicht mehr aktiv sind oder zerbrochen, wären diese Artefakte noch immer vorhanden und könnten im Prinzip fotografiert werden. Reflexe von orbitalen Spionen im Sonnenlicht würden sich auf langzeitbelichteten Aufnahmen vor Sonnenaufgang oder nach Sonnenuntergang als leicht gekrümmte Striche oder gestrichelte beziehungsweise punktierte Linien bemerkbar machen. Sie sind gut von Meteoren zu unterscheiden, die keine Bögen, sondern gerade Striche ziehen. Auch besteht keine Verwechslungsgefahr mit Planetoiden, deren Bahnen meist anders verlaufen und zudem bekannt sind; außerdem haben sie auf länger belichteten Fotos recht unscharfe Ränder.

Allerdings haben die raumfahrenden Nationen inzwischen rund 9.000 Satelliten ins All befördert. Einige davon sind kollidiert oder absichtlich zerstört worden. Manche Orbits gleichen inzwischen Müllhalden. Mittlerweile befinden sich rund 34.000 Objekte größer als zehn Zentimeter in einer Erdumlaufbahn, schätzungsweise 900.000 zwischen ein und zehn Zentimeter und über 100 Millionen kleinere. Auch drei Viertel aller gegenwärtig beobachtbaren Lichtreflexe in einer geostationären Umlaufbahn sind nicht katalogisiert. Dabei handelt es sich um wenige Zentimeter große Trümmerstücke. Das macht es hoffnungslos, nach extraterrestrischen Artefakten zu fahnden.

Doch vor dem Start des ersten Satelliten Sputnik am 4. Oktober 1957 gab es keine künstlichen Objekte in Erdumlaufbahnen – zumindest keine von Menschenhand gefertigten. Hätten zuvor schon Späher den Globus umkreist, könnten sie auf früheren Fotos von Himmelsdurchmusterungen wie dem ersten Palomar Observatory Sky Survey (POSS I) zu sehen sein (Villarroel et al., 2021). Allerdings müssen falsch positive punktförmige Objekte auf den Fotoplatten von realen Reflexionen unterschieden werden. Eine Linie aus vier oder fünf Punkten in einer zehn mal zehn Bogenminuten großen Himmelsregion wäre ein zuverlässiger Indikator (Zufallswahrscheinlichkeit knapp 1 zu 100 bis 1 zu 10.000 oder 2,5 bis 3,9 Sigma). Die Suche nach frühen Spionagesatelliten in Erdnähe ist also möglich; die dafür nötigen Daten schlummern bereits seit Jahrzehnten in den Archiven und stehen nun größtenteils digital zur Verfügung.

Inzwischen wurden erste Auffälligkeiten gefunden (Solano et al., 2022, 2023; Villarroel et al., 2022b, c): neun rötliche Punktquellen auf einer Fotoplatte, die am 12. April 1950 von POSS I aufgenommen wurde. Sie befinden sich in einer nur etwa zehn mal zehn Bogenminuten großen Himmelsregion. Sie sind auf früheren und späteren Fotos nicht zu erkennen, auch nicht bei wesentlich größerer Sensitivität: weder auf einer blauempfindlichen Fotoplatte, die 30 Minuten zuvor belichtet wurde, noch auf einer rotempfindlichen Fotoplatte sechs Tage danach. Auch

bei späteren Himmelsdurchmusterungen wie POSS II, SDSS und Pan-STARRS wurden keine Gegenstände aufgenommen. Eine solche Koinzidenz ist nicht zu vereinbaren mit der Häufigkeit kurzfristiger Himmelsphänomene wie etwa Gravitationslinsen-Effekte, Sternexplosionen und den Gegenständen von Radio- oder Gammaausbrüchen. Und ein auseinandergebrochener Planetoid scheidet als Erklärung ebenso aus wie Sternschnuppen. Denkbar ist eine unbekannte Kontamination der Fotoplatte, etwa durch radioaktiven Staub von damaligen Atombombentests in New Mexico ab Ende der 1940er-Jahre. Diese hätten dort dann allerdings im Geheimen stattfinden müssen, wofür es keine Hinweise gibt.

Anschließend wurde die Himmelsregion mit dem Gran Telescopio Canarias auf La Palma inspiziert. Mit einem Hauptspiegeldurchmesser von 10,4 Metern ist es das weltgrößte optische Einzelteleskop. Die Aufnahmen zeigen noch Lichter bis herab zur 26. Helligkeitsklasse, darunter mögliche heutige Gegenstände der Objekte von 1950. Aber das können zufällige Übereinstimmungen sein. Rote Zwergsterne waren nicht darunter, deren Flares liefern also keine Erklärung. Eine andere Möglichkeit ist, dass es sich um kurze Lichtreflexe von Objekten in Erdumlaufbahnen handelte. Allerdings lässt sich ihre heutige Position nicht berechnen, selbst wenn sie noch um die Erde kreisen. Falls es sich um außerirdische Artefakte handelt, wäre das eine Sensation und würde viele Fragen aufwerfen: Seit wann waren oder sind sie dort, was bezwecken sie, und funktionieren sie noch immer?

Artefakte auf dem Mond?

Astronomisch naheliegend ist es auch, den Mond nach Artefakten abzusuchen (Arkhipov, 1998; Davies & Wagner, 2013). Die Vorteile: Er hat nicht nur eine geringe Distanz, sondern ist auch tektonisch inaktiv und seit Jahrmillionen durch Einschläge kaum verändert. (Die Seismometer von Apollo 12 registrierten beispielsweise im Umkreis von 350 Kilometern nur einen Impakt eines grapefruitgroßen Meteoriten pro Monat.) Spuren von intelligenten Aktivitäten könnten sich also sehr lange auf dem Erdtrabanten halten – so wie die Relikte der irdischen Raumfahrt wahrscheinlich die Existenz der Menschheit überdauern werden. In vielen Hundert Millionen Jahren würden einige Dutzend Meter große Objekte allerdings unter Mondstaub verborgen sein, falls sie bis dahin nicht doch ein Meteorit pulverisiert hat.

Es kommen verschiedene Arten von Artefakten in Betracht, zum Beispiel wissenschaftliche Instrumente, „Zeitkapseln“ oder andere gezielt abgesetzte Botschaften, Müll und Grabungsspuren. Letztere könnten von einem Rohstoff-Abbau stammen. Auch Menschen haben ja bereits ihren Abfall hinterlassen – bei den Apollo-Missionen etwa die untere Hälfte der Landefähren. Messgeräte könnten anhand ihrer Solarzellen oder Kernreaktoren zur Energieerzeugung identifiziert werden. Absichtliche Botschaften wären eventuell sogar zum Auffinden extra markiert,

im Zentrum junger Krater aufgestellt oder an markanten Orten positioniert worden – etwa an den Polen oder an dem Punkt direkt gegenüber der Erde oder seinem Antipoden. Wenn der Besuch schon viele Hundert Millionen Jahre zurückliegt, müsste dort freilich gegraben werden.

Die kostengünstigste Suche ist die Inspektion von detailgenauen Fotos. Die 1966 und 1967 gestarteten fünf Lunar Orbiter der NASA hatten Aufnahmen mit einer Auflösung von 60 Metern und besser gemacht. Und der Lunar Reconnaissance Orbiter scannt seit September 2009 den Mond in bisher unerreichter Datenqualität. Seine über eine Million Fotos zeigen Details von 50 Zentimeter Größe oder weniger pro Pixel von 99 Prozent der Mondoberfläche. Jedes Bild besitzt 500 Millionen Pixel. Dieses Datengebirge ist für Wissenschaftler „manuell“ gar nicht zu analysieren, weil jedes Bild ungefähr eine Stunde Arbeitszeit benötigen würde. Aber auch eine automatische Auswertung erfordert großen Aufwand und ist nur eingeschränkt verlässlich. Über das Internet könnten freiwillige Helfer eingebunden werden, wie es 2010 bis 2015 schon einmal beim Moonzoo-Projekt der Fall war.

Außenposten im Planetoidengürtel oder hinter Neptun?

Die Nachbarplaneten Venus und Mars sind ebenfalls für SETA attraktiv. Sie boten vor wenigen Jahrtausenden wesentlich freundlichere Umweltbedingungen als heute: Auf dem Mars gab es vor 3,8 Milliarden Jahren einen großen Ozean. Auch der heutige Höllenplanet Venus könnte vor 0,7 bis 2 Milliarden Jahren noch ein moderates Klima besessen haben, weil seine Kohlendioxid-Atmosphäre damals weniger dicht war und die Sonne schwächer leuchtete. Vielleicht finden sich unter der Oberfläche unserer Nachbarwelten also Relikte einstiger Hochkulturen? Oder extraterrestrische Stationen im Boden der Monde anderer Planeten, geschützt vor Mikrometeoriten und neugierigen Blicken? Oder Artefakte in stabilen Umlaufbahnen um die Sonne oder versteckt im Planetoidengürtel? Oder Spuren eines Abbaus von Rohstoffen (Papagiannis, 1983; Kecskes, 1998)?

Wie stehen die Chancen, ein bis zehn Meter große nichtterrestrische Artefakte im Sonnensystem zu finden, etwa robotische Sonden zur Fernerkundung, die sich nicht gezielt versteckt halten? Eine grobe Abschätzung der bisher erkundeten Orte ist ernüchternd: Einem Vergleich zufolge entsprechen sie dem Fund einer sprichwörtlichen Nadel in einem 1.000 Tonnen schweren Heuhaufen, der ein ganzes Fußballfeld einen Meter hoch bedecken würde (Haqq-Misra & Koppapapu, 2012).

Eine auch räumlich entlegene Idee ist die Suche nach Städten in den Außenbezirken des Sonnensystems. Jenseits der Neptun-Bahn befindet sich der Kuiper-Gürtel: ein Reservoir von Myriaden von Eisbrocken, teils über 1.000 Kilometer groß, zu denen auch der Zwergplanet Pluto und sein Riesenmond Charon gehören. Einige tausend solcher Kuiper-Objekte in der 30- bis 50-fachen Distanz der Erde von der Sonne sind seit 1992 schon entdeckt worden. Durch-

musterungen mit den Pan-STARRS-Teleskopen auf Hawaii und mit dem bald fertig gebauten Large Synoptic Survey Telescope in Chile werden in naher Zukunft noch 10 bis 100 Mal so viele Objekte aufspüren.

Falls es dort extraterrestrische Siedlungen oder Anlagen gäbe, die so viel Licht wie eine irdische Großstadt abstrahlen, könnte dieses Licht bereits von den jetzigen Teleskopen auf der Erde beobachtet werden (Loeb & Turner, 2012). Da die Helligkeit der Kuiper-Objekte aufgrund ihrer oft stark elliptischen Bahnen mit der wechselnden Sonnendistanz schwankt, würden Lichtquellen dort auffallen, weil ihre Helligkeitsvariationen anders wären als die des reflektierten Sonnenlichts. Solche Körper, die scheinbar aus der Reihe tanzen, müssten dann mit Großteleskopen gezielt nachbeobachtet werden. Da künstliche thermische und fluoreszierende Lampen sowie Quantenbeleuchtungen – also Glühbirnen, Neonröhren und Leuchtdioden – charakteristische Spektraleigenschaften haben, die sich vom zurückgeworfenen Sonnenlicht unterscheiden, wäre der technische Ursprung dieser Lichtquellen detektierbar.

Die irdische Nachtseite mit ihrer Helligkeit von über zehn Billionen Lumen (entsprechend einer elektrischen Leistung von über einer Billion Watt) könnte von heutigen Teleskopen sogar noch aus dem 1.000-fachen Erdabstand von der Sonne nachgewiesen werden, also in 0,016 Lichtjahren Distanz. Selbst Tokio wäre aus dieser Entfernung so hell wie die lichtschwächsten Objekte, die das Hubble-Weltraumteleskop in seiner empfindlichsten Aufnahme registriert hat: im Hubble Ultra Deep Field. Das James Webb Space Telescope und künftige Riesenteleskope mit einem 30-Meter-Hauptspiegel auf der Erde könnten sogar nach technisch beleuchteten Nachtseiten von Exoplaneten Ausschau halten. Die Empfindlichkeit würde wohl ausreichen, um die gegenwärtige Erde aufzuspüren, wenn sie einen nahen Weißen Zwergstern umkreisen würde. Solche ausgebrannten Sterne leuchten viel schwächer als normale Sterne, sodass ihr Licht das eines hypothetischen besiedelten Planeten nicht stark überstrahlen würde.

Spuren fremder Raumschiffe?

Fortgeschrittene Zivilisationen können nicht ewig auf ihrem Heimatplaneten leben, denn ihr Stern leuchtet nicht für immer. Daher ist interstellare Raumfahrt oder Aussterben die langfristige Alternative. Die Antriebsenergie oder Abwärme solcher fremder Generationenschiffe lässt sich vielleicht schon heute aufspüren, falls zur passenden Zeit der passende Himmelsort inspiziert würde (Finney, 1985; Matloff, 1994; Teodorani, 2014; Vaas, 2018c; Viewing et al., 1977).

Besonders effizient wären Raumschiffe, die mit Antimaterie betrieben werden. Bei ihrer Annihilation mit Materie entstehen Gammastrahlen, die detektierbar sind. Da es keine natürlichen Prozesse gibt, bei denen sich langsame Protonen und Antiprotonen unter Aussendung von Gammastrahlen vernichten, könnte die Messung einer solchen Quelle auf extraterrestrische

Intelligenzen hinweisen. Dies wäre durch das Compton Gamma-Ray Observatory in bis zu 1.000 Lichtjahren Distanz möglich gewesen, wurde berechnet (Harris, 1986). Es hat 1991 bis 1995 den gesamten Himmel im Gammastrahlen-Bereich von 30 bis 928 Megaelektronenvolt gescannt, doch in den Daten wurde kein Hinweis auf fremde Raumschiffe gefunden (Harris, 2002). Immerhin: Wäre ein Raumschiff mit einem Antimaterie-Triebwerk, wie es im Rahmen unserer eigenen Technik schon machbar wäre, damals innerhalb der Saturn-Bahn durchs Sonnensystem gekreuzt, hätte es das Compton-Observatorium wohl entdeckt. Auch räumliche Muster bei der Analyse kosmischer Gammastrahlen-Ausbrüche wurden nicht gefunden (Harris, 1991), die auf einen Materie-Antimaterie-Annihilationsantrieb hinweisen würden, falls sie sich beispielsweise auf einer geraden Linie befänden.

Denkbar ist auch, dass Radioteleskope zwar bei den klassischen SETI-Projekten fündig werden, dass sie aber nicht Botschaften extraterrestrischer Zivilisationen empfangen, die an ihre Kolonien oder an andere Völker im All gerichtet sind, sondern etwas ganz anderes. Vielleicht bewegt sich die Erde zufällig durch einen Austausch von Telemetrie-Signalen interstellarer Generationenraumschiffe. Oder die Radiowellen dienen zum Antrieb solcher Riesenarchen.

Dies könnte sogar der Ursprung der vielen hundert kurzen Radioblitzes (Fast Radio Bursts, FRBs) sein, die seit 2001 immer wieder an ganz unterschiedlichen Stellen am Himmel gemessen wurden. Sie scheinen fast alle aus Distanzen von Milliarden Lichtjahren zu kommen. Es gibt mehr als ein Dutzend Erklärungsversuche für sie – von magnetischen Kurzschlüssen bei Neutronensternen über die Kollision Weißer Zwerge, gigantische Ausbrüche auf Riesensternen oder spezielle Supernovae bis zu völlig spekulativen Quantenexplosionen Schwarzer Löcher. Aber niemand weiß bislang, ob eines dieser Modelle zutrifft. Daher ist selbst eine extravagant klingende Hypothese nicht ausgeschlossen, derzufolge die FRBs von außerirdischen Zivilisationen stammen (Guillochon & Loeb, 2015; Lingam & Loeb, 2017).

Tatsächlich passen die gemessenen Eigenschaften der FRBs gut zu starken künstlichen Radioquellen. Diese könnten Raumschiffe beim Flug zu Nachbarplaneten oder anderen Sternen beschleunigen. Wenn die Schiffe mit gewaltigen Segeln ausgerüstet wären, würde der Impuls der Photonen die Gefährte ähnlich antreiben wie der irdische Wind Segelschiffe auf dem Meer. Um die FRBs zu erklären, wären gigantische Radiosender nötig und Energiekollektoren, die womöglich so groß sind wie ein Planet. Die in den letzten Jahren gemessenen FRBs wären dann Nebenprodukte der Radiostrahlen, die an den Raumschiffsegeln vorbei gingen und sich dabei zufällig in Richtung Erde bewegten; oder sie sind entstanden, als der Sender umschwenkte, um mehrere Schiffe nacheinander zu bedienen. Die Strahlenenergie würde ausreichen, um ein Raumschiff mit der Masse von einer Million Tonnen anzutreiben – das Zehnfache der größten irdischen Ozeankreuzer. Eine Überschlagsrechnung aus der Zahl der gemessenen FRBs ließe auf rund 10.000 Zivilisationen pro Galaxis schließen, falls diese unabhängig voneinander agieren.

Exoatmosphären im Visier

Eine technische Kultur hinterlässt unvermeidlich Spuren. Das gilt für die Menschheit und mehr noch für weiter entwickelte Zivilisationen. Aus der Ferne sind charakteristische Veränderungen in der Atmosphäre besonders deutlich. Das könnte auch bei ETs der Fall sein. Selbstverständlich ist es schwierig und spekulativ, solche Überlegungen auf ETs zu übertragen, deren biochemische Eigenschaften und Verhaltensweisen völlig unbekannt sind. Dennoch sind Analogieschlüsse zumindest ein Ansatzpunkt – und eine Motivation, Messdaten, die aus anderen Gründen ohnehin gewonnen werden, entsprechend zu analysieren. Denn dabei lassen sich im Prinzip Technosignaturen beim Studium von Planeten um andere Sterne aufspüren.

Schon bald könnten die Atmosphären von Exoplaneten von außerirdischen Intelligenzen künden. Neue Observatorien wie das James Webb Space Telescope (JWST) und künftige Sternwarten, die bereits im Bau oder Planungsstadium sind (etwa das Extremely Large Telescope der Europäischen Südsternwarte ESO, das mit einem 39-Meter-Hauptspiegel zurzeit auf Cerro Armazones in der chilenischen Atacamawüste errichtet wird), werden in der Lage sein, Bio- und Technosignaturen nachzuweisen, falls es sie gibt. Inzwischen ist es bereits gelungen, von ein paar der mittlerweile über 5.500 bekannten Planeten bei fremden Sternen die Atmosphären spektroskopisch zu untersuchen und ihre Zusammensetzung partiell zu messen.

Ein mögliches ET-Indiz wären Gase, die bei landwirtschaftlichen Aktivitäten entstehen (Haqq-Misra et al., 2022b). Vor allem Ammoniak (NH_3) und Distickstoffmonoxid (N_2O), auch als Lachgas bekannt, wären verräterisch. Diese Stoffwechsel- und Abbauprodukte bilden sich verstärkt durch den Einsatz von Düngemitteln, die den Pflanzen den begehrten Stickstoff liefern. Zwar ist die irdische Luft voll von diesem: 78 Volumenprozent. Aber die sehr stabile Atombindung der Stickstoff-Moleküle N_2 können die meisten Organismen nicht aufbrechen und das Element daher nicht nutzen. Durch das Haber-Bosch-Verfahren lässt sich der atmosphärische Stickstoff jedoch in Form von Ammoniak fixieren: durch eine Reaktion mit Wasserstoff bei hohen Temperaturen mithilfe eines metallischen Katalysators. Das erlaubt eine großindustrielle Düngerproduktion, etwa von Ammoniumnitrat (NH_4NO_3), das in Wasser Ammonium- und Nitrat-Ionen freisetzen kann: exzellente Stickstoff-Quellen für Pflanzen.

Inzwischen ist die anthropogene Stickstoff-Fixierung mindestens so groß wie die nichtanthropogene. Darauf geht der Hauptteil des atmosphärischen NH_3 zurück. 81 Prozent der freigesetzten 58 Millionen Tonnen pro Jahr an Stickstoff im Ammoniak stammt von menschlichen Aktivitäten: 65 Prozent aus der Landwirtschaft, 11 Prozent aus Verbrennungsvorgängen und 5 Prozent aus weiteren industriellen Prozessen. Messungen des NASA-Satelliten Aqua zeigten über einen Zeitraum von 14 Jahren einen Zuwachs der NH_3 -Freisetzung um zwei Prozent jährlich – im Einklang mit dem gestiegenen Einsatz von Düngemitteln. Da NH_3 sich nur Stunden

bis Tage in der Luft hält, deutet die Präsenz der Moleküle auf eine stetige Nachlieferung hin. (N_2O hält sich länger, rund 120 Jahre.)

Indizien jeweils für NH_3 oder N_2O allein wären keine klare Technosignatur, weil die Moleküle auf der Erde auch abiotisch oder bei der Stoffwechselaktivität von Mikroorganismen entstehen. Es wäre die Kombination von NH_3 und N_2O , die auf eine Veränderung des planetarischen Stickstoff-Zyklus durch Exofarmen hinweisen könnte, verbunden vielleicht mit erhöhten Konzentrationen von Stickoxiden und Methan. Die kurze Lebensdauer von NH_3 in einer Sauerstoff-Atmosphäre ließe auf eine kontinuierliche Produktion schließen. Die Technosignatur einer Exofarm wäre also der simultane Nachweis von NH_3 und N_2O in der Atmosphäre eines Exoplaneten zusammen mit O_2 , H_2O und CO_2 , die auf Photosynthese-Aktivitäten hindeuten.

Alle diese Moleküle sind besonders im mittleren Infrarot gut detektierbar, wo sie bei Wellenlängen zwischen 3 und 18 Mikrometern charakteristische Absorptions- oder Emissionslinien erzeugen. Für deren Messungen sind freilich spezielle, hochempfindliche Teleskope erforderlich, die es noch nicht gibt. Immerhin wurden in den letzten Jahren bereits mehrere Konzepte dafür ausgearbeitet: LIFE (Large Interferometer for Exoplanets), MIRECLE (Mid-InfraRed Exo-Planet Climate Explorer) und Origins. Das JWST kann in Exoatmosphären allenfalls Methan (CH_4) aufspüren.

Umweltverschmutzung im All

Eine Technosignatur in der Erdatmosphäre ist beispielsweise Stickstoffdioxid (NO_2), weil der überwiegende Teil von menschlichen Aktivitäten stammt: Verbrennungsprozessen. Im Prinzip lässt sich NO_2 auch in Exoplaneten-Atmosphären nachweisen: durch Absorptionslinien im Infraroten bei 0,2 bis 0,7 Mikrometern (Kopparapu et al., 2021). Für sonnenähnliche Sterne ist das schwierig, für kleinere Sterne vom Spektraltyp K wäre es mit Weltraumteleskopen wie dem Habitable Worlds Observatory, das von der NASA für die 2040er-Jahre konzipiert wird, eher möglich.

Überhaupt ist es sinnvoll, nach Industrieprodukten in Exoatmosphären zu suchen: nach Anzeichen extraterrestrischer Umweltverschmutzungen (Lin et al., 2014; Haqq-Misra et al., 2022a). Stickoxide und Methan als Nebenprodukte vieler Verbrennungs- und Produktionsprozesse wären relativ leicht nachweisbar. Auf der Erde sind sie allerdings nicht ausschließlich anthropogen, also auch keine sicheren Intelligenz-Indikatoren. Besser eignen sich Chlor-Fluor-Kohlenstoff-Verbindungen wie CCl_3F und CF_4 , die sich aus thermodynamischen Gründen nicht durch natürliche Prozesse bilden. Sie gehören zu den Treibhausgasen und Ozon-Killern und haben eine relativ lange Verweildauer in der Atmosphäre – CF_4 beispielsweise rund 50.000 Jahre.

Simulationen mit synthetischen Atmosphären-Spektren von erdgroßen Planeten zeigen, dass das JWST CCl_3F und CF_4 mit einigem Aufwand nachweisen könnte – im Verlauf von rund zwei Tagen Messzeit. Allerdings müsste der Planet des besseren Kontrasts wegen einen Weißen Zwerg umkreisen, der lichtschwächer ist als ein normaler Stern. Und die chemischen Signaturen müssten die 100-fache Konzentration des gegenwärtigen Werts in der Erdatmosphäre haben. Ob das realistisch ist, erscheint fraglich, weil eine solche Umweltbelastung extrem wäre – selbst in einem Jahrtausend wäre der CF_4 -Gehalt in der Erdatmosphäre bei gleichbleibendem Anstieg „nur“ zehnmal so hoch wie heute. Falls bei einem Exoplaneten eine hohe CF_4 -Konzentration nachgewiesen würde, könnte die extraterrestrische Zivilisation dort allerdings bereits ausgestorben sein. Vielleicht hat sie sich schlicht zu Tode verschmutzt – was erhärtet würde, wenn sich keine Chlorophyll-Absorptionsspektren oder ähnliche Biomarker messen ließen.

Für erdähnliche Exoplaneten um lichtschwache Rote Zwergsterne wäre das JWST unter günstigen Umständen in der Lage, sogar Chlor-Fluor-Kohlenstoff-Verbindungen (CFCs) wie CCl_3F und CCl_2F_2 in der Größenordnung der Konzentration in der Erdatmosphäre nachzuweisen (gegenwärtig 250 bis 500 Teile pro Billion). CFCs sind eine passive Technosignatur der Erde. Eine CFC-Messung bei einem Planeten Exoplaneten wäre nicht mithilfe der uns heute bekannten biologischen oder geologischen Prozesse zu erklären.

Ein Untersuchungskandidat ist der fast erdgroße, felsige Planet TRAPPIST-1e bei dem 40 Lichtjahre entfernten Stern TRAPPIST im Sternbild Wassermann. Im Infraroten bei 8 bis 14 Mikrometer Wellenlänge wären gegebenenfalls Absorptionslinien zu finden. Solche Analysen können zusammen mit der Suche nach Biosignaturen gemacht werden, simultan und ohne zusätzliche Kosten.

Selbsterstörung, Seuchen und Killermaschinen

Die Suche nach außerirdischen Zivilisationen könnte sogar eine Lehre für uns Menschen sein, sorgsamer mit dem Raumschiff Erde umzugehen. Ein besonders drastischer Fund wäre das Zeugnis untergegangener kosmischer Kulturen (Stevens et al., 2016; Vaas, 2022d). Der Nachweis einer derartigen exoplanetaren Tragödie wäre die traurigste Entdeckung in der Geschichte der Astronomie.

Ein globaler Nuklearkrieg wäre verheerend, doch aus der Ferne schwer nachzuweisen – wahrscheinlich nur, wenn mehrere Phänomene zusammenkämen. So lösen detonierende Kernwaffen kurze Gammablitz aus. Sie sind aber wesentlich schwächer als die häufig gemessenen Gammastrahlen-Ausbrüche explodierender Riesensterne teils Milliarden Lichtjahre entfernt: entfesselte Energien bis zu 10^{44} Joule. Selbst die Auslösung des gesamten irdischen Nuklearwaffen-Arsenals von etwa sechs Millionen Kilotonnen Sprengkraft (rund 10^{16} Joule)

wäre mit heutigen Teleskopen nur aus etwa der achtfachen Distanz von Erde und Sonne zu erspähen. Käme aber ein charakteristisches atmosphärisches Leuchten im grünen Licht des Sauerstoffs bei 558 Nanometern hinzu, eine Abnahme des Ozon-Gehalts sowie eine Zunahme von aufgewirbeltem Staub („nuklearer Winter“) ähnlich wie bei einem Meteoriteneinschlag, dann böte die Schlussfolgerung Anlass zu interstellarer Trauer.

Dass ein ganzer Planet wie die Erde zerrissen wird, ist durch einen globalen Vernichtungskrieg kaum möglich, sondern allenfalls durch eine Karambolage mit einem anderen Himmelskörper. Denn die irdische Bindungsenergie beträgt circa 10^{32} Joule – so viel, wie die Sonne im Lauf von mehreren Tagen abstrahlt. Die Trümmerwolke, die aus einer planetarischen Vernichtung resultiert und sich mit der Zeit zu einem Stein- und Staubring um den Heimatstern ausdehnt, wäre aus der Ferne relativ einfach detektierbar. Doch das erlaubt keinen Rückschluss auf die Ursache.

Würde das Leben auf einem Planeten durch biochemische Ereignisse oder eine Virenseuche zerstört, hätte der Abbau der Biomasse ebenfalls markante Folgen für die Atmosphäre. Zumindest auf der Erde würden sich große Mengen an Methanthiol (CH_3SH) bilden, das aus keiner abiotischen Quelle entstehen kann und eine charakteristische Spektrallinie erzeugt. Beim Tod aller Menschen (100 Milliarden Kilogramm Kohlenstoff-Verbindungen) oder dem Absterben eines Großteils der Biosphäre (bis zu 100 Billionen Kilogramm) würden bis zu 100 Milliarden Kilogramm Methanthiol innerhalb von wenigen Dekaden in die Atmosphäre gelangen. Ob das nachweisbar ist, hängt allerdings von weiteren Faktoren ab. So können Ethan-Moleküle (C_2H_6) die Absorptionslinien deutlich überlagern. Und Methan (CH_4) ist nicht zwingend biologischen Ursprungs.

Eine andere Gefahr, die auf der Erde bislang allenfalls düstere Zukunftsmusik ist, aber bei technisch weiter entwickelten Zivilisationen schon ein dumpfer Schlussakkord sein könnte, resultiert aus sich selbst replizierenden Minimaschinen. Solche quasi fortpflanzungsfähigen Nanoroboter werden im Rahmen von Nanotechnologie-Projektionen erörtert. Falls sich selbst vermehrende Nanobots einmal entwickelt würden und außer Kontrolle gerieten, könnten sie einen großen Teil der irdischen Biomasse binnen Wochen konvertieren (Drexler, 1986; Freitas, 2000). Das Resultat dieser als Ökophagie bezeichneten Katastrophe wäre eine makroskopisch amorphe Masse umgewandelter Materie: „grey goo“, „grey lichen“, „grey plankton“ und „grey dust“ – je nachdem, ob sie hauptsächlich auf dem Land, chemolithotrophisch, im Meer oder in der Luft vorkäme. Ein solches Killersubstrat wäre im Prinzip aus astronomischen Distanzen nachweisbar, denn es würde innerhalb kurzer Zeit die Farbe eines Planeten oder seine Helligkeit ändern.

Gäbe es zahlreiche Indizien für die Selbstzerstörung ganzer Zivilisationen im All, würde das nicht nur erklären, warum wir noch keine Botschaften von Außerirdischen empfangen haben,

sondern deren allzu kurze Lebenszeit würde auch eine düstere Prognose für die Zukunft der Menschheit nahelegen. Ob verschiedene Kulturen im All voneinander erfahren, hängt statistisch gesehen ja wesentlich auch von der Dauer dieser Kulturen ab – ein kurzes Zeitfenster der Existenz isoliert sie notgedrungen gegenseitig. Insofern könnten langfristig die Nachweise der Häufigkeiten von Bio- und Technosignaturen im All auch etwas über die Überlebenschancen technischer Zivilisationen verraten (Haqq-Misra et al., 2020) – die Menschheit eingeschlossen.

Satellitenschwärme um Exoplaneten?

Zieht ein Planet von uns aus gesehen vor seinem Stern vorüber, beschattet er diesen etwas, sodass dessen Helligkeit geringfügig, aber messbar abnimmt. Bei solchen Transits wurden bereits Tausende von Exoplaneten entdeckt, und spezielle Satelliten wie TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) und CHEOPS (CHAracterising ExOPlanet Satellite) suchen gegenwärtig systematisch den Himmel danach ab. Auch dabei könnten Indizien für ETs entdeckt werden. Denn sie haben vielleicht Satelliten oder Megastrukturen gebaut, die um ihren Heimatplaneten oder dessen Sonne kreisen.

Falls es bei nahen Sternen Zivilisationen gibt, die Raumfahrt betreiben und in ihrer Technik nur etwas weiterentwickelt sind als die Menschheit heute, dann könnten diese ETs ihre Existenz unabsichtlich verraten. Viele oder große Strukturen in der Umlaufbahn ihres Heimatplaneten würden sich nämlich vor dem Hintergrund des Sterns bemerkbar machen: als eine geringfügige, aber charakteristische Verdunklung zusätzlich zu der des planetarischen Transits. Das eröffnet neue Möglichkeiten bei der Suche nach extraterrestrischen Kulturen. Und mit dem JWST besteht nun eine Chance, solche Technosignaturen bei anderen Sternen auch aufzuspüren.

Vielleicht gibt es Schwärme von riesigen Spiegeln oder Sonnenkollektoren zur Energiegewinnung oder Beleuchtung in Umlaufbahnen um Exoplaneten. Das wäre vor allem für Zivilisationen auf erdähnlichen Planeten um Rote Zwergsterne vom M-Typ interessant. Solche Planeten in der habitablen Zone mit lebensfreundlichen Temperaturen umkreisen ihren Heimatstern nämlich viel enger als die Erde die Sonne. Die Gezeitenkräfte führen dann zu einer gebundenen Rotation, sodass der Planet seinem Stern immer dieselbe Seite zuwendet (wie der Mond der Erde). Eine Seite liegt also permanent im Schatten – und hier wären orbitale Spiegel nützlich, die das Sternlicht auf die abgewandte Hemisphäre reflektieren und so die ewige Nacht erhellen.

Die Auswirkungen eines solchen orbitalen Satellitenschwarms lassen sich berechnen, falls dieser mit seinem Planeten vor einem M-Stern vorüberzieht (Korpela et al., 2015). Je nach Dichte und Höhe der Riesenreflektoren könnte das JWST die subtilen Signaturen dieser artifiziellen Trabanten messen. Akribische Auswertungen der Lichtkurven, die die winzige Abnahme des gesamten Sternlichts während der Beschattung durch den Transit zeigen, würden unter

günstigen Umständen den technologischen Datenabdruck buchstäblich erhellen. Natürliche Systeme wie Ringe oder verdampfende Atmosphären haben zwar ähnliche Lichtkurven zur Folge, variieren in ihren Wellenlängen jedoch stark von artifiziellen Spiegeln.

Auch ein Geschwader von Kommunikationssatelliten im Orbit um eine fremde Welt ließe sich vielleicht schon bald detektieren – zumindest im Prinzip (Socas-Navarro, 2018; Sallmen et al., 2019; Vaas, 2022e). Ein solcher Satellitengürtel umrundet bereits die Erde. Freilich müssten die ETs Milliarden Satelliten in ihrem Gürtel haben – etwa 0,01 Prozent der Sichtfläche von uns aus gesehen –, damit wir sie in den nächsten beiden Jahrzehnten mit JWST, TESS oder den im Bau befindlichen Riesenteleskopen der 30-Meter-Klasse nachweisen könnten. Weil damit ohnehin nach natürlichen Monden und Ringen gefahndet wird, erfordert die Suche nach Satellitengürteln keine zusätzlichen Instrumente oder Beobachtungszeiten, sondern nur Aufmerksamkeit bei den Datenanalysen. Allerdings müssten detektierbare Gürtel einen hohen Grad an Ordnung und aktiver Steuerung aufweisen, um Kollisionen zwischen den Satelliten zu vermeiden, sonst wären sie in kurzer Zeit zerstört.

Signaturen von Superzivilisationen

Leichter lassen sich gigantische Bauwerke extraterrestrischer Hochkulturen in Umlaufbahnen um deren Heimatsterne aufspüren: riesige Raumstationen, Orbitalfabriken oder weit gespannte Energiekollektoren. Falls solche Megastrukturen nicht kreisrund sind wie ein Planet, ergeben sich aus ihrem Transit vor dem Stern charakteristische Helligkeitsveränderungen, die sich in den gemessenen Lichtkurven zeigen (Arnold, 2005; Forgan, 2013; Wright et al., 2016). Im Extremfall könnte die Existenz derartiger Megastrukturen also schon jetzt nachgewiesen werden. Vielleicht wurden solche Gebilde sogar absichtlich als interstellare Grußkarten konzipiert, um über Tausende von Lichtjahren hinweg Aufmerksamkeit zu erregen?

Megastrukturen um Sterne würden das technologische Vermögen der Menschheit weit übersteigen. Und es sind keine naturgesetzlichen Grenzen bekannt, die eine noch spektakulärere Entwicklung von Superzivilisationen verhindern würden – also technologische Kulturen, vielleicht postbiologischer Art, die mit den Energiemengen von Sternen hantieren können oder sogar ganze Galaxien oder Galaxienhaufen kolonisiert und umgestaltet haben. Dies wäre selbst im Rahmen der bereits bekannten Physik möglich, und die Zeit dafür hätte im 13,8 Milliarden Jahre alten Universum wohl ausgereicht. Solche Spekulationen sind kühn, aber nicht unwissenschaftlich; und es gibt Möglichkeiten der Verifikation.

Stellare oder galaktische Megastrukturen können im Prinzip durch Transits aufgespürt werden. Auch nach den Signaturen künstlicher Elemente oder unnatürlichen Häufigkeiten seltener Elemente in Sternspektren lässt sich suchen (Whitmire & Wright, 1980; Valdes & Freitas, 1986;

Lemarchand, 1995). Außerdem müssen selbst für weit fortgeschrittene ETs die Hauptsätze der Thermodynamik gelten (Energieerhaltung, Entropiezunahme). Daher besteht durchaus eine Chance, die Abwärme ihres Energieverbrauchs zu entdecken, wenn er stellare, interstellare oder gar galaktische Ausmaße angenommen hat (Balbi & Ćirković, 2021; Ćirković, 2006, 2015, 2016, 2018; Dyson, 1960; Huston & Wright, 2022; Lingam & Loeb, 2020; Matloff, 2017; Osmanov 2018; Osmanov & Berezhiani, 2018; Wright, 2020a, 2023; Zackrisson et al., 2018; Zuckerman, 2022a). Dahingehend durchforstet wurden bereits Infrarotquellen-Himmelskataloge von Welt- raumteleskopen wie IRAS (Infrared Astronomical Satellite), WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) und Spitzer, die über 100.000 Sterne und Galaxien verzeichnen (Timofeev et al., 2000; Carrigan, 2009; Wright et al., 2014; Griffith et al., 2015). Bislang wurde nichts Auffälliges gefunden, auch nicht bei weiteren extragalaktischen Spektralanalysen im sichtbaren und ultravioletten Bereich (Annis, 1999; Zackrisson et al., 2015).

Interessant für Superzivilisationen könnte zudem die Umgebung Schwarzer Löcher sein, denn diese sind die effizientesten und langfristigen Energiequellen, Entropiesenken und Informationsspeicher im Universum überhaupt (Press & Teukolsky, 1972; Cardoso et al., 2004; Vidal, 2011; Smart, 2012; Opatrný et al., 2017; Vaas, 2019; Dvali & Osmanov, 2023). Dort sind ebenfalls Technosignaturen vorstellbar (Inoue & Yokoo, 2011; Jackson & Benford, 2019). Selbst kurzfristige Manipulationen von Gestirnen oder Galaxien sind denkbar. Sie könnten nachgewiesen werden beim Vergleich von Himmelskatalogen, die inzwischen bereits viele Jahrzehnte abdecken (Vaas, 2022c; Villarroel et al., 2016, 2020, 2022a).

Überdies kommunizieren fortgeschrittene Kulturen vielleicht nicht elektromagnetisch miteinander, sondern nutzen ganz andere Kanäle, die durch Materie oder Felder im All kaum absorbiert, modifiziert, gestreut oder abgelenkt werden: Neutrinos (Subotowicz, 1979; Learned et al., 1994; Jackson, 2020; Fischbach & Gruenwald, 2017; Santos et al., 2020; Vaas, 2022b) oder Gravitationswellen (Jackson & Benford, 2019; Abramowicz et al., 2020; Sellers et al., 2022; Vaas, 2022b). Die Empfindlichkeit irdischer Detektoren für solche potenziellen Informationsmedien ist bislang allerdings noch sehr gering.

Wir wissen nicht, ob es anderswo Leben und Intelligenz gibt. Wir wissen auch nicht, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, Indizien dafür zu finden. Doch selbst wenn die Chancen winzig erscheinen, wäre der Erkenntnisgewinn womöglich immens. Und abgesehen vom Nichtstun gibt es keine Alternative zur Exploration: Ob außerirdische Zivilisationen existieren, lässt sich nur empirisch entscheiden. Die Suche geht weiter.

Literatur

- Abramowicz, M., Bejger, M., Gourgoulhon, E., & Straub, O. (2020). A galactic centre gravitational-wave messenger. *Scientific Reports*, *10*, 7054. arXiv:1903.10698
- Almár, I. (2011). SETI terminology: Do we interpret SETI terms correctly? *Acta Astronautica*, *68*, 351–357.
- Almár, I., & Tarter, J. (2011). The discovery of ETI as a high-consequence, low-probability event. *Acta Astronautica*, *68*, 358–361.
- Annis, J. (1999). Placing a limit on star-fed Kardashev type III civilisations. *Journal of the British Interplanetary Society*, *52*, 33–36.
- Arhipov, A. V. (1998). Earth-moon system as a collector of alien artefacts. *Journal of the British Interplanetary Society*, *51*, 181–184.
- Arnold, L. F. A. (2005). Transit light-curve signatures of artificial Objects. *Astrophysical Journal*, *627*, 534–539. arXiv:astro-ph/0503580
- Balbi, A., & Ćirković, M. M. (2021). Longevity is the key factor in the search for technosignatures. *Astronomical Journal*, *161*, 222. arXiv:2103.02923
- Baum, S. D., Haqq-Misra, J. D., & Domagal-Goldman, S. D. (2011). Would contact with extraterrestrials benefit or harm humanity? A scenario analysis. *Acta Astronautica*, *68*, 2114–2129. arXiv:1104.4462
- Berea, A. (Hrsg.) (2022). *Technosignatures for detecting intelligent life in our universe: A research companion*. Wiley-Scrivener.
- Bergner, J., & Seligman, D. (2023). Acceleration of II/Oumuamua from radiolytically produced H₂ in H₂O ice. *Nature*, *615*, 610–613. arXiv:2303.13698
- Bialy, S., & Loeb, A. (2018). Could solar radiation pressure Explain ‘Oumuamua’s peculiar acceleration? *Astrophysical Journal Letters*, *868*, L1. arXiv:1810.11490
- Bracewell, R. N. (1960). Communications from superior galactic communities. *Nature*, *186*, 670–671.
- Bracewell, R. N. (1975). *The galactic club: Intelligent life in outer space*. Freeman.
- Bradbury, R. J., Ćirković, M. M., & Dvorsky, G. (2011). Dysonian approach to SETI: A fruitful middle ground? *Journal of the British Interplanetary Society*, *64*, 156–165.
- Brake, M. (2006). On the plurality of inhabited worlds: A brief history of extraterrestrialism. *International Journal of Astrobiology*, *5*, 99–107.
- Burke-Ward, R. (2000). Possible existence of extra-terrestrial technology in the solar system. *Journal of the British Interplanetary Society*, *53*, 1–12.
- Cardoso, V., Dias, O. J. C., Lemos, J. P. S., & Yoshida, S. (2004). Black-hole bomb and superradiant instabilities. *Physical Review D*, *70*, 044039. arXiv:hep-th/0404096
- Carrigan, R. A. (2009). IRAS-based whole-sky upper limit on Dyson spheres. *Astrophysical Journal*, *698*, 2075–2086. arXiv:0811.2376

- Cavalazzi, B., & Westall, F. (2018). *Biosignatures for astrobiology*. Springer.
- Ćirković, M.M. (2006). Macroengineering in the galactic context: A new agenda for astrobiology. arXiv:astro-ph/0606102
- Ćirković, M.M. (2015). Kardashev's classification at 50+: A fine vehicle with room for improvement. *Serbian Astronomical Journal*, 191, 1–15. arXiv:1601.05112
- Ćirković, M. M. (2016). Stellified planets and brown dwarfs as novel Dysonian SETI signatures. *Journal of the British Interplanetary Society*, 69, 92–96.
- Ćirković, M.M. (2018). Astroengineering, Dysonian SETI, and naturalism: A new catch-22. *Acta Astronautica*, 152, 289–298.
- Cocconi, G., & Morrison, P. (1959). Searching for interstellar communications. *Nature*, 184, 844–846.
- Crowe, M. J. (Hrsg.). (2008). *The extraterrestrial life debate: Antiquity to 1915: A source book*. University of Notre Dame Press.
- Crowe, M.J. (1999). *The extraterrestrial life debate 1750–1900: The idea of a plurality of worlds from Kant to Lowell*. Dover.
- Curran, S.J. (2021). 'Oumuamua as a light sail – evidence against artificial origin. *Astronomy and Astrophysics*, 649, L17. arXiv:2105.09435
- Davies, P. C. W. (2012). Footprints of alien technology. *Acta Astronautica*, 73, 250–257.
- Davies, P. C. W., & Wagner, R. V. (2013). Searching for alien artifacts on the moon. *Acta Astronautica*, 89, 261–265.
- Dick, S.J. (1982). *Plurality of worlds: The origins of the extraterrestrial life debate from Democritus to Kant*. Cambridge University Press.
- Dick, S.J. (1996). *Life on other worlds: The twentieth century extraterrestrial life debate*. Cambridge University Press.
- Dick, S.J. (2020). *Space, time, and aliens: Collected works on cosmos and culture*. Springer.
- Drake, F.D. (1961). Project Ozma. *Physics Today*, 14 (4), 140–146.
- Drake, F.D. (1962). *Intelligent life in space*. Macmillan.
- Drake, F.D. (1965). The radio search for intelligent extraterrestrial life. In G. Mamikunian & M. H. Briggs (Hrsg.), *Current aspects of exobiology* (S. 323–345). Pergamon Press.
- Drake, F., & Sobel, D. (1992). *Is anyone out there? The scientific search for extraterrestrial intelligence*. Delacorte Press.
- Drexler, K.E. (1986). *Engines of creation: The coming era of nanotechnology*. Anchor Press, Doubleday.
- Dvali, G., & Osmanov, Z.N. (2023). Black holes as tools for quantum computing by advanced extraterrestrial civilizations. *International Journal of Astrobiology*. arXiv:2301.09575
- Dyson, F.J. (1960). Search for artificial stellar sources of infrared radiation. *Science*, 131, 1667–1668.

- Enriquez, J.E., Siemion, A., Foster, G., Gajjar, V., Hellbourg, G., Hickish, J., Isaacson, H., Price, D.C., Croft, S., DeBoer, D., Lebofsky, M., MacMahon, D., & Werthimer, D. (2017). The breakthrough listen search for advanced life: 1.1–1.9 GHz observations of 692 nearby stars. *Astrophysical Journal*, 849, 104. arXiv:1709.03491
- Ezell, C., & Loeb, A. (2023). The inferred abundance of interstellar objects of technological origin. *Acta Astronautica*, 208, 1241–29. arXiv:2209.11262
- Finney, B.R. (1985). SETI and interstellar migration. *Journal of the British Interplanetary Society*, 38, 274–276.
- Finney, B. (1990). The impact of contact. *Acta Astronautica*, 21, 117–121.
- Fischbach, E., & Gruenwald, J.T. (2017). NU-SETI: A proposal to detect extra-terrestrial signals carried by neutrinos. arXiv:1702.03341
- Forgan, D.H. (2013). On the possibility of detecting class a stellar engines using exoplanet transit curves. *Journal of the British Interplanetary Society*, 66, 144–154. arXiv:1306.1672
- Franz, N., Croft, S., Siemion, A.P.V., Traas, R., Brzycki, B., Gajjar, V., Isaacson, H., Lebofsky, M., Price, D.C., Sheikh, S.Z., De Marines, J., Drew, J., & Worden, P. (2022). The breakthrough listen search for intelligent life: Technosignature search of transiting TESS targets of interest. *Astronomical Journal*, 163(3), 104. arXiv:2201.00918
- Freitas, R. (1980a). Interstellar probes: A new approach to SETI. *Journal of the British Interplanetary Society*, 33, 103–109.
- Freitas, R. (1980b). A self-reproducing interstellar probe. *Journal of the British Interplanetary Society*, 33, 251–264.
- Freitas, R.A. (1983). The search for extraterrestrial artifacts (SETA). *Journal of the British Interplanetary Society*, 36, 501–506.
- Freitas, R.A. (1985). Observable characteristics of extraterrestrial technological civilizations. *Journal of the British Interplanetary Society*, 38, 106–112.
- Freitas, R.A. (2000). Some limits to global ecophagy by biovorous nanoreplicators, with public policy recommendations. *Foresight Archives*. <http://www.foresight.org/nano/Ecophagy.html>
- Freitas, R.A., & Valdes, F. (1980). A search for natural or artificial objects located at the Earth–Moon libration points. *Icarus*, 42, 442–447.
- Freitas, R.A., & Valdes, F. (1985). The search for extraterrestrial artifacts (SETA). *Acta Astronautica*, 12, 1027–1034.
- Gajjar, V., Perez, K.I., Siemion, A.P.V., Foster, G., Brzycki, B., Chatterjee, S., Chen, Y., Cordes, J.M., Croft, S., Czech, D., DeBoer, D., DeMarines, J., Drew, J., Gowanlock, M., Isaacson, H., Lacki, B.C., Lebofsky, M., MacMahon, D.H.E., Morrison, I.S., ... & Worden, S.P. (2021). The breakthrough listen search for intelligent life near the galactic center I. *Astronomical Journal*, 162(33). arXiv:2104.14148
- Gargaud, M., Irvine, W.M., Amils, R., Claeys, P., Cleaves, H.J., Gerin, M., Rouan, D., Spohn, T., Tirard, S., & Viso, M. (Hrsg.). (2023). *Encyclopedia of astrobiology* (3. Aufl.). Springer Nature.
- Garrett, M.A., & Siemion, A.P.V. (2023). Constraints on extragalactic transmitters via breakthrough listen. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. arXiv:2209.08147

- Gerritzen, D. (2016). *Erstkontakt*. Kosmos.
- Gertz, J. (2016). ET Probes: Looking here as well as there. *Journal of the British Interplanetary Society*, 69, 88–91. arXiv:1609.04635
- Gertz, J. (2020). Strategies for the detection of ET probes within our own solar system. *Journal of the British Interplanetary Society*, 73, 427–437. arXiv:2011.12446
- Grimaldi, C., & Marcy, G. W. (2018). Bayesian approach to SETI. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(42), E9755–E9764. arXiv:1810.01207
- Guillochon, J., & Loeb, A. (2015). SETI via leakage from light sails in exoplanetary systems. *Astrophysical Journal Letters*, 811, L20. arXiv:1508.03043
- Guthke, K. S. (1983). *Der Mythos der Neuzeit: Das Thema der Mehrheit der Welten in der Literatur und Geistesgeschichte von der kopernikanischen Wende bis zur Science Fiction*. Francke.
- Haqq-Misra, J., & Kopparapu, R. K. (2012). On the likelihood of non-terrestrial artifacts in the solar system. *Acta Astronautica*, 72, 15–20.
- Haqq-Misra, J., Busch, M. W., Som, S. M., & Baum, S. D. (2013). The benefits and harm of transmitting into space. *Space Policy*, 29(1), 40–48.
- Haqq-Misra, J., Kopparapu, R. K., & Schwieterman, E. (2020). Observational constraints on the great filter. *Astrobiology*, 20, 572–579. arXiv:2002.08776
- Haqq-Misra, J., Kopparapu, R., Fauchez, T. J., Frank, A., Wright, J. T., & Lingam, M. (2022a). Detectability of chlorofluorocarbons in the atmospheres of habitable m-dwarf planets. *Planetary Science Journal*, 3(3), 60. arXiv:2202.05858
- Haqq-Misra, J., Fauchez, T. J., Schwieterman, E. W., & Kopparapu, R. (2022b). Disruption of a planetary nitrogen cycle as evidence of extraterrestrial agriculture. *Astrophysical Journal Letters*, 929, L28. arXiv:2204.05360
- Haqq-Misra, J., Ashtari, R., Benford, J., Carroll-Nellenback, J., Döbler, N. A., Farah, W., Fauchez, T. J., Gajjar, V., Grinspoon, D., Huggahalli, A., Kopparapu, R. K., Lazio, J., Profitiliotis, G., Sneed, E. L., Varghese, S. S., & Vidal, C. (2022c). Opportunities for technosignature science in the planetary science and astrobiology decadal survey. arXiv:2209.11685
- Harp, G. R., Richards, J., Tarter, J. C., Dreher, J., Shostak, S., Smolek, K., Kilsdonk, T., Wilcox, B. R., Wimberly, M. K. R., Ross, J., Barott, W. C., Ackermann, R. F., & Blair, S. (2016). SETI observations of exoplanets with the Allen Telescope Array. *Astronomical Journal*, 152, 181. arXiv:1607.04207
- Harp, G. R., Richards, J., Shostak, S., Tarter, J. C., Mackintosh, G., Scargle, J. D., Henze, C., Nelson, B., Cox, G. A., Egly, S., Vinodababu, S., & Voien, J. (2019). Machine vision and deep learning for classification of radio SETI signals. arXiv:1902.02426
- Harmand, S., Lewis, J. E., Feibel, C. S., Lepre, C. J., Prat, S., Lenoble, A., Boës, X., Quinn, R. L., Brenet, M., Arroyo, A., Taylor, N., Clément, S., Daver, G., Brugal, J.-P., Leaky, L., Mortlock, R. A., Wright, J. D., Lokorody, S., Kirwa, C., Kent, D. V., & Roche, H. (2015). 3.3-million-year-old stone tools from Lomekwi 3, West Turkana, Kenya. *Nature*, 521, 310–315.

- Harris, M. J. (1986). On the detectability of antimatter propulsion spacecraft. *Astrophysics and Space Science*, 123(2), 297–303.
- Harris, M. J. (1999). SETI through the gamma-ray window: A search for interstellar spacecraft. In J. Heidmann & M. J. Klein (Hrsg.), *Bioastronomy: Lecture notes in physics*, 390 (S. 300–305). Springer.
- Harris, M. J. (2002). Limits from CGRO/EGRET data on the use of antimatter as a power source by extraterrestrial civilizations. *Journal of the British Interplanetary Society*, 55, 383–393. arXiv:astro-ph/0112490
- Harrison, A. A. (2002). *After contact*. Basic Books.
- Harrison, A. A. (2011). Fear, pandemonium, equanimity and delight: human responses to extra-terrestrial life. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 369, 656–658.
- Hoang, T., & Loeb, A. (2023). Implications of evaporative cooling by H₂ for 1I/'Oumuamua. *Astrophysical Journal Letters*, 951, L34. arXiv:2303.13861
- Horneck, G., & Rettberg, P. (2007). *Complete course in astrobiology*. Wiley-VCH.
- Huston, M. J., & Wright, J. T. (2022). Evolutionary and observational consequences of Dyson sphere feedback. *Astrophysical Journal*, 924, 78. arXiv:2110.13887
- Hsieh, C.-H., Laughlin, G., & Arce, H. G. (2021). Evidence suggesting that 'Oumuamua is the ~30 Myr-old product of a molecular cloud. *Astrophysical Journal*, 917, 20. arXiv:2105.14670
- Inoue, M., & Yokoo, H. (2011). Type III Dyson sphere of highly advanced civilizations around a super massive black hole. *Journal of British Interplanetary Society*, 64, 58–62. arXiv:1112.5519
- Jackson, A. A. (2020). A neutrino beacon. *Journal of British Interplanetary Society*, 73, 15–20. arXiv:1905.05184
- Jackson, A. A., & Benford, G. (2019). A gravitational wave transmitter. *Journal of the British Interplanetary Society*, 72, 62–69. arXiv:1806.02334
- Jackson A. A., & Benford G. (2020). Novel technosignatures. arXiv:2009.08873
- Jones, M. (2015). Reconsidering macro-artefacts in SETI searches. *Acta Astronautica*, 116, 161–165.
- Kecskes, C. (1998). The possibility of finding traces of extraterrestrial intelligence on asteroids. *Journal of the British Interplanetary Society*, 51, 175–179.
- Kingsley, S. A., & Bhathal, R. (Hrsg.). (2001). The search for extraterrestrial intelligence (SETI) in the optical spectrum III. *Proceedings of SPIE*, 4273, 173–177.
- Kolb, V. M. (Hrsg.). (2019). *Handbook of astrobiology*. CRC Press.
- Kopparapu, R., Arney, G., Haqq-Misra, J., Lustig-Yaeger, J., & Villanueva, G. (2021). Nitrogen dioxide pollution as a signature of extraterrestrial technology. *Astrophysical Journal*, 908, 164. arXiv:2102.05027
- Korbitz, A. (2014). Toward understanding the active SETI debate: Insights from risk communication and perception. *Acta Astronautica*, 105, 517–520.
- Korpela, E. J., Sallmen, S. M., & Leystra Greene, D. (2015). Modeling indications of technology in planetary transit light curves – dark-side illumination. *Astrophysical Journal*, 809, 139. arXiv:1505.07399

- Lacki, B. C., Brzycki, B., Croft, S., Czech, D., DeBoer, D., DeMarines, J., Gajjar, V., Isaacson, H., Lebofsky, M., MacMahon, D.H.E., Price, D.C., Sheikh, S.Z., Siemion, A.P.V., Drew, J., & Worden, P. (2021). One of everything: The breakthrough listen exotica catalog. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 257, 42. arXiv:2006.11304
- Lazio, T. J. W., Djorgovski, S. G., Howard, A., Cutler, C., Sheikh, S. Z., Cavuoti, S., Herzing, D., Wagstaff, K., Wright, J. T., Gajjar, V., Hand, K., Rebbapragada, U., Allen, B., Cartmill, E., Foster, J., Gelino, D., Graham, M. J., Longo, G., Mahabal, A. A., ... & Sussman, G. (2023). Data-driven approaches to searches for the technosignatures of advanced civilizations. *Keck Institute for Space Studies*. arXiv:2308.15518
- Learned, J. G., Pakvasa, S., Simmons, W. A., & Tata, X. (1994). Timing data communication with neutrinos – a new approach to SETI. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 35, 321–329.
- Lemarchand, G. A. (1995). Detectability of extraterrestrial technological activities. *SETIQuest*, 1(1), 3–13.
- Lesch, H., & Zaun, H. (2023). *Die unheimliche Stille*. Herder.
- Lin, H. W., Gonzalez Abad, G., & Loeb, A. (2014). Detecting industrial pollution in the atmospheres of earth-like exoplanets. *Astrophysical Journal Letters*, 792, L7. arXiv:1406.3025
- Lingam, M., & Loeb, A. (2017). Fast radio bursts from extragalactic light sails. *Astrophysical Journal Letters*, 837, L23. arXiv:1701.01109
- Lingam, M., & Loeb, A. (2020). Constraints on the abundance of 0.01c stellar engines in the Milky Way. *Astrophysical Journal*, 905, 175. arXiv:2009.08874
- Loeb, A. (2022). On the possibility of an artificial origin for ‘Oumuamua. *Astrobiology*, 22, 1392–1399. arXiv:2110.15213
- Lineweaver, C. H. (2022). The ‘Oumuamua controversy: Bayesian priors and the evolution of technological intelligence. *Astrobiology*, 22, 1419–1428.
- Loeb, A. (2023). Interstellar objects from broken Dyson spheres. *Research Notes of the AAS*, 7, 43. arXiv:2303.08013
- Loeb, A., & Turner, E. L. (2012). Detection technique for artificially-illuminated objects in the outer solar system and beyond. *Astrobiology*, 12, 290–294. arXiv:1110.6181
- Ma, P. X., Ng, C., Rizk, L., Croft, S., Siemion, A. P. V., Brzycki, B., Czelej, D., Drew, J., Gajjar, V., Hoang, J., Isaacson, H., Lebofsky, M., MacMahon, D. H. E., de Pater, I., Price, D. C., Sheikh, S. Z., & Worden, P. (2023). A deep-learning search for technosignatures from 820 nearby stars. *Nature Astronomy*, 7, 492–502.
- Matloff, G. L. (1994). On the detectability of several varieties of low-energy starships. *Journal of the British Interplanetary Society*, 47, 17–18.
- Matloff, G. L. (2017). A rationale for alien megastructures. *Journal of the British Interplanetary Society*, 70, 210–212.
- McPherron, S. P., Alemseged, Z., Marean, C. W., Wynn, J. G., Reed, D., Geraads, D., Bobe, R., & Béarat, H. A. (2010). Evidence for stone-tool-assisted consumption of animal tissues before 3.39 million years ago at Dikika, Ethiopia. *Nature*, 466, 857–860.
- Michaud, M. A. G. (2007). *Contact with alien civilizations: Our hopes and fears about encountering extraterrestrials*. Copernicus.
- Musso, P. (2012). The problem of active SETI: An overview. *Acta Astronautica*, 78, 43–54.

- Narusawa, S., Aota, T., & Kishimoto, R. (2018). Which colors would extraterrestrial civilizations use to transmit signals? The “magic wavelengths” for optical SETI. *New Astronomy*, *60*, 61–64.
- Opatrný, T., Richterek, L., & Bakala, P. (2017). Life under a black sun. *American Journal of Physics*, *85*(1), 14–22. arXiv:1601.02897
- Osmanov, Z. N., & Bereziani, V. I. (2018). On the possibility of the Dyson spheres observable beyond the infrared spectrum. *International Journal of Astrobiology*, *17*, 356–360. arXiv:1804.04157
- Osmanov, Z. N. (2018). Are the Dyson rings around pulsars detectable? *International Journal of Astrobiology*, *17*, 112–115. arXiv:1705.04142
- Papagiannis, M. D. (1983). The importance of exploring the asteroid belt. *Acta Astronautica*, *10*, 709–712.
- Plaxco, K. W., & Gross, M. (2021). *Astrobiology: An introduction* (3. Aufl.). Johns Hopkins University Press.
- Press, W. H., & Teukolsky, S. A. (1972). Floating orbits, superradiant scattering and the black-hole bomb. *Nature*, *238*, 211–212.
- Price, D.C., Enriquez, J.E., Brzycki, B., Croft, S., Czech, D., DeBoer, D., DeMarines, J., Foster, G., Gajjar, V., Gizani, N., Hellbourg, G., Isaacson, H., Lacki, B., Lebofsky, M., MacMahon, D.H.E., de Pater, I., Siemion, A.P.V., Werthimer, D., Green, J. A., ... Worden, S.P. (2020). The breakthrough listen search for intelligent life: Observations of 1327 nearby stars over 1.10-3.45 GHz. *The Astronomical Journal*, *159*(3), 86. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab65f1>
- Rothery, D. A., Gilmour, I., & Sephton, M. A. (Hrsg.). (2018). *An introduction to astrobiology* (3. Aufl.). Cambridge University Press.
- Sallmen, S., Korpela, E. J., & Crawford-Taylor, K. (2019). Improved analysis of Clarke exobelt detectability. *Astronomical Journal*, *158*, 258. arXiv:1909.10061
- Sánchez-Beristain, F., Paredes-Arriaga, A., Martínez-Velarde, M. F., & Badillo-Avilés, S. (2023). Philosophical and scientific implications of astrobiology and palaeontology in the light of hypothesising the existence of intelligent pre-human civilisations on earth: Empiricist, rationalist, and positivist approaches. *Paleontología Mexicana*, *12*(1), 1, 43–52.
- Sandberg, A., Armstrong, S., & Ćirković, M. M. (2016). That is not dead which can eternal lie: The aetivation hypothesis for resolving Fermi's paradox. *Journal of the British Interplanetary Society*, *69*, 406–415. arXiv:1705.03394
- Santos, A. D., Fischbach, E., & Gruenwald, J. T. (2020). Synchronized neutrino communications over intergalactic distances. arXiv:2007.05736
- Schenkel, P. (1999). *Contact: Are we ready for it?* Minerva.
- Schetsche, M. (Hrsg.). (2014). *Interspezies-Kommunikation: Voraussetzungen und Grenzen*. Logos.
- Schetsche, M., & Anton, A. (2019). *Die Gesellschaft der Außerirdischen: Einführung in die Exosozioologie*. Springer.
- Schetsche, M., & Engelbrecht, M. (2008). *Von Menschen und Außerirdischen: Transterrestrische Begegnungen im Spiegel der Kulturwissenschaft*. transcript.
- Schmidt, G. A., & Frank, A. (2018). The Silurian hypothesis: Would it be possible to detect an industrial civilisation in the geological record? *International Journal of Astrobiology*, *18*, 142–150. arXiv:1804.03748

- Sellers, L., Bobrick, A., Martire, G., Andrews, M., & Paulini, M. (2022). Searching for intelligent life in gravitational wave signals part I: Present capabilities and future horizons. arXiv:2212.02065
- Semaw, S., Rogers, M. J., Quade, J., Renne, P. R., Butler, R. F., Dominguez-Rodrigo, M., Stout, D., Hart, W. S., Pickering, T., & Simpson, S. W. (2003). 2.6-Million-year-old stone tools and associated bones from OGS-6 and OGS-7, Gona, Afar, Ethiopia. *Journal of Human Evolution*, 45(2), 169–177. [https://doi.org/10.1016/S0047-2484\(03\)00093-9](https://doi.org/10.1016/S0047-2484(03)00093-9)
- Sheikh, S. Z., Siemion, A., Enriquez, J. E., Price, D. C., Isaacson, H., Lebofsky, M., Gajjar, V., & Kalas, P. (2020). The breakthrough listen search for intelligent life: A 3.95-8.00 GHz search for radio technosignatures in the restricted earth transit zone. *The Astronomical Journal*, 160(1), 29. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab9361>
- Shostak, S. (2009). *Confessions of an alien hunter: A scientist's search for extraterrestrial intelligence*. National Geographic.
- Shostak, S. (2012). Are transmissions to space dangerous? *International Journal of Astrobiology*, 12, 17–20.
- Shostak, S., & Barnett, A. (2003). *Cosmic company: The search for life in the universe*. Cambridge University Press.
- Shuch, H. P. (Hrsg.). (2011). *Searching for extraterrestrial intelligence*. Springer.
- Siraj, A., & Loeb, A. (2022). The mass budget necessary to explain 'Oumuamua as a nitrogen iceberg. *New Astronomy*, 92, 101730. arXiv:2103.14032
- Smart, J. M. (2012). The transcension hypothesis: sufficiently advanced civilizations invariably leave our universe, and implications for METI and SETI. *Acta Astronautica*, 78, 55–68.
- Socas-Navarro, H. (2018). Possible photometric signatures of moderately advanced civilizations: The Clarke exobelt. *Astrophysical Journal*, 855, 110. arXiv:1802.07723
- Solano, E., Villarroel, B., Rodrigo, C. (2022). Discovering vanishing objects in POSS I red images using the Virtual Observatory. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 515, 1380–1391. arXiv:2206.00907
- Solano, E., Marcy, G. W., Villarroel, B., Geier, S., Streblyanska, A., Lombardi, G., Bär, R. E., & Andruk, V. N. (2023). A bright triple transient that vanished within 50 minutes. arXiv:2310.09035
- Stevens, A., Forgan, D., & O'Malley-James, J. (2016). Observational signatures of self-destructive civilisations. *International Journal of Astrobiology*, 15, 333–344. arXiv:1507.08530
- Subotowicz, M. (1979). Interstellar communication by neutrino beams. *Acta Astronautica*, 6, 213–220.
- Suresh, A., Gajjar, V., Nagarajan, P., Sheikh, S. Z., Siemion, A. P. V., Lebofsky, M., MacMahon, D. H. E., Price, D. C., & Croft, S. (2023). A 4-8 GHz galactic center search for periodic technosignatures. *The Astronomical Journal*, 165(6), 255. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/acccf0>
- Tao, Z., Zhao, H., Zhang, Z., Zhang, T.-J., Gajjar, V., Zhu, Y., Yue, Y., Zhang, H., Liu, W., Li, S., Zhang, J., Liu, C., Wang, H., Duan, R., Qian, L., Jin, C., Li, D., Siemion, A., Jiang, P., ... Anderson, D. (2022). The most sensitive SETI observation by multi-beam coincidence matching strategy towards exoplanet system. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1335086/v1>

- Tarter, J. (2001). The search for extraterrestrial intelligence (SETI). *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, 39, 511–548.
- Tarter, J. (2004). Life, the universe, and SETI in a nutshell. In R. P. Norris, & F. H. Stootman (Hrsg.), *Bioastronomy 2002: Life among the stars* (S. 397–407). IAU Symposium.
- Tarter, J. C. (2007). The evolution of life in the universe: Are we alone? Proceedings of the International Astronomical Union, 2. In K. A. van der Hucht (Hrsg.), *Highlights of astronomy, 14, IAU XXVI General Assembly, 14–25 August 2006* (S. 14–29). Cambridge University Press.
- Tarter, J. C., Agrawal, A., Ackermann, R., Backus, P., Blair, S. K., Bradford, M. T., Harp, G. R., Jordan, J., Kilsdonk, T., Smolek, K. E., Richards, J., Ross, J., Shostak, G. S., & Vakoch, D. (2010). *SETI turns 50: Five decades of progress in the search for extraterrestrial intelligence*. 7819, 781902. <https://doi.org/10.1117/12.863128>
- Taylor, A. G., Seligman, D. Z., Hainaut, O. R., & Meech, K. J. (2023). Fitting the light curve of II' Oumuamua with a nonprincipal axis rotational model and outgassing torques. *The Planetary Science Journal*, 4(10), 186. <https://doi.org/10.3847/PSJ/acf617>
- Teodorani, M. (2014). Search for high-proper motion objects with infrared excess. *Acta Astronautica*, 105, 547–552.
- Timofeev, M. Y., Kardashev, N. S., & Promyslov, V. G. (2000). A search of the IRAS database for evidence of Dyson Spheres. *Acta Astronautica*, 46, 655–659.
- Tough, A. (1986). What role will extraterrestrials play in humanity's future? *Journal of the British Interplanetary Society*, 39, 491–498.
- Tough, A. (2000). What people hope to learn from other civilizations. *Acta Astronautica*, 46, 729–731.
- Townes, C., & Schwartz, R. (1961). Interstellar and interplanetary communication by optical masers. *Nature*, 192, 348–349.
- Vaas, R. (2003). Die Suche nach außerirdischen Intelligenzen. In H. Kneifel (Hrsg.), *Das Energie-Riff* (S. 224–286). Heyne.
- Vaas, R. (2010a). Außerirdische – wo seid ihr? *bild der wissenschaft*, 2, 40–47.
- Vaas, R. (2010b). Fear of fanatics: Why Stephen Hawking is right and we should not contact extraterrestrial intelligence. *Journal of Cosmology*, 7, 1792–1799.
- Vaas, R. (2017a). Warum wir noch keinen Besuch aus dem All erhielten – und das auch besser so ist. *Raumfahrt Concret*, 96 & 97, 20–24 & 23–27.
- Vaas, R. (2017b). Die neue Großfahndung. *bild der wissenschaft*, 7, 32–41.
- Vaas, R. (2017c). Die Deutschen und die Außerirdischen. *bild der wissenschaft*, 7, 42–44.
- Vaas, R. (2017d). Fakten und Flaschenhälse. *bild der wissenschaft*, 7, 45.
- Vaas, R. (2017e). Bewusstsein X.0: Von digitalen Denkwürdigkeiten zur ungeheuerlichen Unsterblichkeit. *Universitas*, 72(854), 64–81.
- Vaas, R. (2018a). Superzivilisationen im Universum. *bild der wissenschaft*, 7, 8–15.

- Vaas, R. (2018b). Kosmische Sommerruhe. *bild der wissenschaft*, 7, 16–21.
- Vaas, R. (2018c). Die Suche nach außerirdischen Artefakten. *bild der wissenschaft*, 7, 22–26.
- Vaas, R. (2019). Life, Intelligence, and the Selection of Universes. In G. Y. Georgiev, J. M. Smart, C. L. Flores Martinez, & M. E. Price (Hrsg.), *Evolution, development and complexity* (S. 93–133). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00075-2_3
- Vaas, R. (2020a). Was ist Leben? Biophilosophische Erkundungen zwischen Chauvinismus und Chimären. In K. Roessler (Hrsg.), *Ursprung des Lebens: Stand nach 100 Jahren Forschung* (S. 85–93). Kurt Roessler.
- Vaas, R. (2020b). Jenseits des Menschen: Trans- und Posthumanismus: Spekulationen, Skepsis oder Superintelligenz. *Universitas*, 75 (893), 18–50.
- Vaas, R. (2021a). Kosmische Kontaktsuche: Kommunikation mit außerirdischen Intelligenzen. *Universitas*, 76(895), 18–40.
- Vaas, R. (2021b). Warum wir noch keinen Besuch aus dem All erhielten ... und das auch besser so ist. *MIZ*, 50(3), 31–35.
- Vaas, R. (2022a). Das große Abenteuer. *bild der wissenschaft*, 2, 14–19.
- Vaas, R. (2022b). Neutrinos von den Nachbarn. *bild der wissenschaft*, 2, 20–27.
- Vaas, R. (2022c). Die Suche nach dem Unmöglichen. *bild der wissenschaft*, 2, 28–33.
- Vaas, R. (2022d). Leben und Tod auf fremden Welten. *bild der wissenschaft*, 5, 56–59.
- Vaas, R. (2022e). Die Suche nach Satelliten-Schwärmen. *bild der wissenschaft*, 7, 32–37.
- Vaas, R. (2023). Kritik der außerirdischen Vernunft. *Aufklärung und Kritik*, 30(4), 48–79.
- Vakoch, D. (Hrsg.). (2011). *Communication with extraterrestrial intelligence*. SUNY Press.
- Valdes, F., & Freitas, R. A. (1983). A search for objects near the Earth–Moon Lagrangian points. *Icarus*, 53, 453–457.
- Valdes, F., & Freitas, R. A. (1986). A search for the tritium hyperfine line from nearby stars. *Icarus*, 65, 152–157.
- Vidal, C. (2011). Black holes: Attractors for intelligence? arXiv:1104.4362
- Viewing, D. R. J., Horswell, C. J., & Palmer, E. W. (1977). Detection of starships. *Journal of the British Interplanetary Society*, 30, 99–104.
- Villarroel, B., Imaz, I., & Bergstedt, J. (2016). Our Sky now and then – searches for lost stars and impossible effects as probes of advanced extra-terrestrial civilisations. *Astronomical Journal*, 152, 76. arXiv:1606.08992
- Villarroel, B., Marcy, G. W., Geier, S., Streblyanska, A., Solano, E., Andruk, V. N., Shultz, M. E., Gupta, A. C., & Mattsson, L. (2021). Exploring nine simultaneously occurring transients on April 12th 1950. *Scientific Reports*, 11, 12794. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92162-7>
- Villarroel, B., Mattsson, L., Guergouri, H., Solano, E., Geier, S., Dom, O. N., & Ward, M. J. (2022b). A glint in the eye: Photographic plate archive searches for non-terrestrial artefacts. *Acta Astronautica*, 194, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.01.039>

- Villarroel, B., Pelckmans, K., Solano, E., Laaksoharju, M., Souza, A., Dom, O. N., Laggoune, K., Mimouni, J., Guergouri, H., Mattsson, L., García, A. L., Soodla, J., Castillo, D., Shultz, M. E., Aworka, R., Comerón, S., Geier, S., Marcy, G. W., Gupta, A. C., ... Ward, M. J. (2022a). Launching the VASCO citizen science project. *Universe*, 8(11), 11. <https://doi.org/10.3390/universe8110561>
- Villarroel, B., Solano, E., Guergouri, H., Streblyanska, A., Mattsson, L., Bär, R. E., Mimouni, J., Geier, S., Gupta, A. C., Okororie, V., Laggoune, K., Shultz, M. E., Freitas Jr., R. A., & Ward, M. J. (2022c). Is there a background population of high-albedo objects in geosynchronous orbits around Earth? [arXiv:2204.06091](https://arxiv.org/abs/2204.06091)
- Villarroel, B., Soodla, J., Comerón, S., Mattsson, L., Pelckmans, K., López-Corredoira, M., Krisciunas, K., Guerras, E., Kochukhov, O., Bergstedt, J., Buelens, B., Bär, R. E., Cubo, R., Enriquez, J. E., Gupta, A. C., Imaz, I., Karlsson, T., Prieto, M. A., Shlyapnikov, A. A., ... Ward, M. J. (2019). The vanishing and appearing sources during a century of observations project. I. USNO objects missing in modern sky surveys and follow-up observations of a “missing star”. *The Astronomical Journal*, 159(1), 8. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab570f>
- Von Hoerner, S. (2003). *Sind wir allein? SETI und das Leben im All*. Beck.
- Wabbel, T. D. (Hrsg.). (2002). *S.E.T.I. Die Suche nach dem Außerirdischen*. beustverlag.
- Whitmire, D. P., & Wright, D. P. (1980). Nuclear waste spectrum as evidence of technological extraterrestrial civilizations. *Icarus*, 42, 149–156.
- Włodarczyk-Sroka, B. S., Garrett, M. A., & Siemion, A. P. V. (2020). Extending the breakthrough listen nearby star survey to other stellar objects in the field. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 498, 5720–5729. [arXiv:2006.09756](https://arxiv.org/abs/2006.09756)
- Wright, J. T. (2018a). Prior indigenous technological species. *International Journal of Astrobiology*, 17, 96–100. [arXiv:1704.07263](https://arxiv.org/abs/1704.07263)
- Wright, J. T. (2018b). Taxonomy and jargon in SETI as an interdisciplinary field of study. [arXiv:1803.06972](https://arxiv.org/abs/1803.06972)
- Wright, J. T. (2020a). Dyson spheres. *Serbian Astronomical Journal*, 200, 1–18. [arXiv:2006.16734](https://arxiv.org/abs/2006.16734)
- Wright, J. T. (2020b). Planck frequencies as Schelling points in SETI. *International Journal of Astrobiology*, 19, 446–455. [arXiv:2008.01817](https://arxiv.org/abs/2008.01817)
- Wright, J. T. (2021). Strategies and advice for the search for extraterrestrial intelligence. *Acta Astronautica*, 188, 203–214.
- Wright, J. T. (2023). Application of the thermodynamics of radiation to Dyson spheres as work extractors and computational engines, and their observational consequences. [arXiv:2309.06564](https://arxiv.org/abs/2309.06564)
- Wright, J. T., Cartier, K. M. S., Zhao, M., Jontof-Hutter, D., & Ford, E. B. (2016). The \hat{G} search for extraterrestrial civilizations with large energy supplies: IV. The signatures and information content of transiting megastructures. *The Astrophysical Journal*, 816(1), 17. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/816/1/17>
- Wright, J. T., Haramia, C., & Swiney, G. (2023). Geopolitical implications of a successful SETI program. *Space Policy*, 63, 101517. [arXiv:2209.15125](https://arxiv.org/abs/2209.15125)
- Wright, J. T., Griffith, R., Sigurðsson, S., Povich, M. S., & Mullan, B. (2014). The \hat{G} infrared search for

- extraterrestrial civilizations with large energy supplies: II. framework, strategy, and first result. *The Astrophysical Journal*, 792(1), 27. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/792/1/27>
- Wright, J. T., Haqq-Misra, J., Frank, A., Kopparapu, R., Lingam, M., & Sheikh, S. Z. (2022). The case for technosignatures: Why they may be abundant, long-lived, highly detectable, and unambiguous. *The Astrophysical Journal Letters*, 927(2), L30. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac5824>
- Wright, J. T., Kanodia, S., & Lubar, E. (2018b). How much SETI has been done? Finding needles in the n-dimensional cosmic haystack. *Astronomical Journal*, 156, 260. arXiv:1809.07252
- Wright, J. T., & Kipping, D. (2019). Technosignatures in transit. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 51(3), 343. arXiv:1907.07830
- Wright, J. T., Sheikh, S., Almár, I., Denning, K., Dick, S., & Tarter, J. (2018a). Recommendations from the ad hoc committee on SETI nomenclature. arXiv:1809.06857
- Zackrisson, E., Calissendorf, P., Asadi, S., & Nyholm, A. (2015). Extragalactic SETI: The Tully-Fisher relation as a probe of Dysonian astroengineering in disk galaxies. *Astrophysical Journal*, 810, 23. arXiv:1508.02406
- Zackrisson, E., Korn, A. J., Wehrhahn, A., & Reiter, J. (2018). SETI with Gaia: The observational signatures of nearly complete Dyson spheres. *Astrophysical Journal*, 862, 21. arXiv:1804.08351
- Zaitsev, A. L. (2008). Sending and searching for interstellar messages. *Acta Astronautica*, 63, 614–617.
- Zaitsev, A. L. (2011). Rationale for METI. arXiv:1105.0910
- Zaun, H. (2010). *SETI: Die wissenschaftliche Suche nach außerirdischen Zivilisationen*. Heise.
- Zhang, Z.-S., Werthimer, D., Zhang, T.-J., Cobb, J., Korpela, E., Anderson, D., Gajjar, V., Lee, R., Li, S.-Y., Pei, X., Zhang, X.-X., Huang, S.-J., Wang, P., Zhu, Y., Duan, R., Zhang, H.-Y., Jin, C., Zhu, L.-C., & Li, D. (2020). First SETI observations with China's five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST). *The Astrophysical Journal*, 891(2), 174. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab7376>
- Zuckerman, B. (2022a). Infrared and optical detectability of Dyson spheres at white dwarf stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 514, 227–233. arXiv:2204.09627
- Zuckerman, B. (2022b). 'Oumuamua is not a probe sent to our solar system by an alien civilization. *Astrobiology*, 22, 1414–1418.

Extraterrestrial artifacts: In search of alien technosignatures

Extended Abstract

The Search for Extra Terrestrial Intelligence (SETI) is one of mankind's greatest adventures. The discovery of other beings or their relics would mean that we are not alone in the universe. It would revolutionize our understanding of life, consciousness, culture and ourselves. It would be a great opportunity – or a great danger.

Astronomers have been searching for radio messages from nearby stars since 1960, followed by listening to distant stars and other galaxies, later also in the optical range (laser frequencies) – still in vain. But extraterrestrial civilizations could reveal themselves in completely different ways: We might discover gigantic constructions in their galaxy, near their stars or around their planets, for example, or accompanying phenomena of their industries, spaceships or communication channels. Perhaps robots roam vast areas of space. Therefore, a new search strategy should be pursued: the Search for Extraterrestrial Artifacts (SETA) among other stars and planets, in the solar system and even on Earth.

SETA in the broader sense has sometimes been contrasted with what is then called traditional or conventional or even orthodox SETI. But in fact the strategies complement each other; they are essentially complementary, not contrasting or competing. And they can be summarized as the search for technosignatures (technomarkers). Conceptually, this is also less problematic, as no definition of intelligence needs to be assumed or stipulated.

If there are technically very advanced civilizations in the Milky Way or elsewhere, they or their machines inevitably leave traces of their energy production and use. This may also be the case with already extinct cultures or with postbiotic intelligences that may have left their organic creators behind long ago and could colonize space relatively easily as a robot armada with artificial intelligence. These bold speculations are in principle verifiable. After all, indirect signatures can be searched for – and often with little effort or cost, because the data is provided by astronomical research for other reasons anyway: comprehensive sky surveys, for example, or the search for exoplanet transits.

It would be relatively easy to detect waste heat from circumstellar or extragalactic power plants. Also under discussion are industrial gases in planetary atmospheres, satellite swarms around exoplanets, imprints of artificially produced elements such as technetium in stellar spectra, evidence for interplanetary and interstellar spacecraft engines and even for technical artifacts in our solar system. (For example, alien space probes in Earth orbits before the beginning of terrestrial space travel would be detectable on old photos of astronomical sky surveys; relics or traces of excavations on the moon or on planetoids might be seen on high-resolution images obtained by space probes). Extraterrestrial supercivilizations could also operate communication channels using neutrinos or gravitational waves, which perhaps might be detected by terrestrial instruments, even if the production of such signals would probably be thousands of years ahead of our own technical capabilities. This may all sound highly adventurous. But it is neither nonsensical nor impossible within the framework of the known laws of nature.

Some of such SETA projects have already begun or could start soon. If they were successful, our world would no longer be the same.