

Wer sind sie?

Glaubt nicht der größte Teil, dass der Mensch die Krone der Schöpfung sei? Und meinen die, welche aus ihrem Ich nicht herauszuschreiten vermögen, nicht, dass das All nur der Schauplatz dieses Ichs sei, selbst die unzähligen Welten des ewigen Raums dazugerechnet? Und dennoch dürfte es ganz anders sein.

Adalbert Stifter

Wie fremdartig kann Leben sein?

Bei der Suche nach außerirdischen Lebensformen ist eine geozentrische Vorgehensweise momentan unvermeidbar. Menschen kennen bislang nur irdisches Leben, also bezieht sich darauf auch der Begriff (die Definition) von Leben – und die Art und Weise, wie man Leben erkennt.

Das hat sich in den letzten Jahrhunderten allerdings stark gewandelt. Maßgeblich dafür waren technische Instrumente, mit denen der Vorstoß in die Mikrowelt gelang: die Entdeckung, dass Lebewesen aus Zellen bestehen beziehungsweise Einzeller sind; dass es Bakterien, Viren und Viroide gibt; wie Stoffwechsel, Vermehrung und Vererbung funktionieren und so weiter. Neben der Biochemie und Molekularbiologie spielte auch die Evolutionstheorie eine wichtige Rolle; ohne sie wären die Entstehung und Entwicklung, die Vielfalt und Verwandtschaft des Lebens unverständlich.

Doch welche dieser eminenten Erkenntnisse sind quasi kosmisch verallgemeinerbar und welche sind hauptsächlich irdische Eigenheiten?

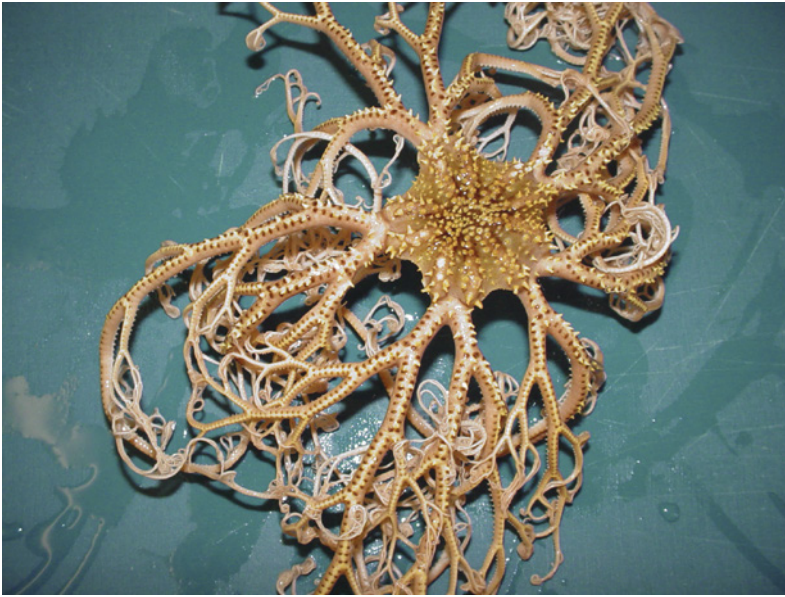
Drei Stufen der Exotik

Höchstwahrscheinlich haben extraterrestrische Lebensformen, falls sie existieren, im Lauf einer Evolution ebenfalls Mechanismen von

Stoffwechsel, Vermehrung und Vererbung ausgebildet. Aber die Details sowie mindestens teilweise die biochemischen Grundlagen müssen anders sein. Eine komplette Übereinstimmung mit irdischem Leben wäre schon aufgrund der kombinatorischen Komplexität extrem unwahrscheinlich. (Oder es gäbe eine gemeinsame Abstammung des Lebens hinweg über Planeten, Sonnen- und Sternsysteme, was allenfalls durch eine kosmische Panspermie oder gar durch gezieltes intelligentes Design einer extraterrestrischen Superzivilisation möglich wäre.)

Wie groß die Unterschiede sind, ist unbekannt. Und darin besteht die Hauptschwierigkeit, Leben allgemein zu definieren und außerirdisches Leben zu detektieren.

- Es könnte dem irdischen ähneln. Es enthält vielleicht komplexe Erbmoleküle wie die DNA, biokatalytisch wirksame Enzyme aus Proteinen und Photosynthese-Fähigkeiten zur Nutzung der Lichtenergie mithilfe von Molekülen wie Chlorophyll. Aber selbst dann würden diese Lebensformen einen anderen genetischen Code verwenden, andere Proteine – und wohl sogar andere Aminosäuren, aus denen die Proteine bestehen – sowie andere Lichteinfangs- und Elektronentransport-Moleküle.
- Das Leben könnte jedoch viel fremdartiger sein. Möglicherweise gründet es nicht nur auf ganz anderen Molekülen, sondern sogar auf anderen Elementen. (99 Prozent der Masse des Menschen besteht aus den sechs Elementen Sauerstoff, Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Calcium und Phosphor; 0,85 Prozent aus weiteren fünf, nämlich Kalium, Schwefel, Natrium, Chlor und Magnesium; hinzu kommen 13 bis 18 Spurenelemente wie Kupfer, Mangan und Zink.) Vielleicht benötigt es weder Phosphor noch Natrium und Kalium, sondern Arsen. Vielleicht ist nicht einmal Kohlenstoff zentral, sondern Silizium. Solche spekulativen Szenarien wurden erdacht, auch wenn sie aus chemischen oder astrophysikalischen Gründen unwahrscheinlich anmuten.



Wie bizarr Leben ist, liegt im Auge des Betrachters: Die Gorgonenhäupter (Gorgonocephalidae) sind bis zu 1,5 Meter große Schlangensterne im Meer; sie gehören zur Klasse der Stachelhäuter. Tagsüber verkriechen sie sich, nachts sitzen sie oft auf Schwämmen oder Korallen und strecken ihre verzweigten Arme mit vielen kleinen Haken in die Strömung, um Plankton zu erhaschen. Der Name der exotischen wirbellosen Tiere bezieht sich auf die Gorgonen der griechischen Mythologie – die bekannteste dieser Schreckgestalten mit Schlangen als Haaren ist Medusa, deren Haupt von Perseus abgeschlagen wurde. Könnten Gorgonenhäupter von Menschen wissen, empfänden sie diese wohl auch als sehr bizarr. [G. Sedberry/South Carolina DNR, Charleston Bump Expedition 2003, NOAA Office of Ocean Exploration]

- Schließlich könnte exotisches Leben auf noch völlig unbekanntem Stoffen, chemischen Reaktionsmechanismen oder Naturgesetzen basieren, etwa auf einer Physik der Extradimensionen oder der ominösen Dunklen Materie (falls es diese wirklich gibt). Solche Daseinsformen wären durch die gegenwärtige Brille der irdischen Wissenschaft wahrscheinlich gar nicht zu erkennen.

Elementare Vielfalt und Kohlenstoff-Chauvinismus

Bereits die Vorstellung von Leben ohne Kohlenstoff-Atome ist eine Herausforderung – und nicht bloß ein irdisches Vorurteil. Kohlenstoff ist eben ein besonderes Element, denn es kann extrem viele verschiedene und komplexe chemische Verbindungen eingehen. Daher wird auch zwischen Anorganischer und Organischer Chemie unterschieden – letztere ist die des Kohlenstoffs, obgleich sie keineswegs nur biochemische Reaktionen und Moleküle behandelt, wie der historisch bedingte Begriff suggeriert.

Die Kohlenstoff-Dominanz zeigt schon ein Blick in die größte einschlägige Datenbank – die des Chemical Abstracts Service (CAS). Er ist eine 1907 gegründete Unterabteilung der American Chemical Society mit Sitz in Columbus, Ohio, und wertet die chemische Fachliteratur weltweit aus. CAS hat inzwischen knapp 200 Millionen chemische Verbindungen registriert. »Davon sind lediglich knapp über ein Prozent anorganisch«, sagt Tina Tomeo vom CAS. Mit anderen Worten: Bei nur etwa einer Million der Verbindungen handelt es sich um Moleküle beziehungsweise Legierungen *ohne* Kohlenstoff-Atome. Vom Kohlenstoff sind also wesentlich mehr Verbindungen bekannt als von allen anderen Elementen zusammengerechnet – abgesehen von Wasserstoff, weil der in Kohlenwasserstoffen ebenfalls vorkommt.

Zuweilen wird auch Leben auf Silizium-Basis diskutiert (und damit sind nicht künstliche Computer-Intelligenzen gemeint). Legendar ist die Kurzgeschichte *The Talking Stone* (1955) des Biochemikers Isaac Asimov, in der sich steinförmige Wesen von radioaktivem Fallout ernähren. Silizium ist chemisch mit Kohlenstoff verwandt und steht im Periodensystem der Elemente in derselben Gruppe unter diesem. Es ist allerdings nicht richtig, wie man oft lesen kann, dass Silizium nach Kohlenstoff das Element mit der drittgrößten Zahl verschiedener Moleküle ist. »Es gibt rund 2,5 Millionen Einträge von Silizium-Verbindungen in der CAS-Datenbank«,

verrät Tina Tomeo. »Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel und ein paar Halogene haben alle mehr Einträge.«

Zwar sind durch die Kernfusion in Sternen die Elemente im All mit unterschiedlichen Häufigkeiten entstanden, sodass ihre Nutzung auch nicht an jedem Ort gleich wahrscheinlich ist, doch dürften sich die Myriaden von Planeten im Universum nicht radikal unterscheiden in der Zusammensetzung ihrer chemischen Elemente. Ein »Kohlenstoff-Chauvinismus« ist also nicht so unplausibel oder intolerant, wie manchmal behauptet wird – auch wenn diese despektierliche Bezeichnung die Annahme kritisiert, dass ausschließlich mit Leben auf Kohlenstoff-Basis zu rechnen sei. Organismen ohne Kohlenstoff sind prinzipiell möglich – doch ob es sie gibt und in welcher Häufigkeit, das lässt sich gegenwärtig nicht entscheiden.

Sinn, Suche und Spekulationen

Wissenschaftliche Spekulationen sind das eine – das freie Spiel der Fantasie ist etwas anderes. Beides hat seine Berechtigung, obgleich man es nicht zu sehr vermischen sollte; das Leben ist schon verwirrend genug. Trotzdem muss man immer die Begrenztheit und Vorläufigkeit und Irrtumsanfälligkeit des Wissens und der Forschung mitbedenken. Sonst könnte man womöglich revolutionäre Indizien übersehen.

Allerdings ist die Beweisspflicht klar verteilt: Aus wissenschaftlichen Gründen muss derjenige die Indizien vorlegen, der eine Existenz-Behauptung macht. Und es hat sich bewährt, dass die Indizien umso härter sein sollten, je außergewöhnlicher die Behauptungen sind. Sonst wären »Fake News«, Beliebigkeit und Täuschungsmanövern aller Art Tor und Tür geöffnet. Die kritischen wissenschaftlichen Standards haben sich bestens etabliert und sind vorläufig unverhandelbar bei der Suche nach Erkenntnis. Das ist ein Gebot der intellektuellen Redlichkeit. Doch zum Beharren auf Dogmen aller Art besteht gleichfalls kein Grund.

Das heißt für die Suche nach fremdem Leben: Neugier, Demut, Offenheit, Kritik und Kritik und nochmals Kritik. Aber vielleicht ist es am Ende ganz einfach? Vielleicht sind die Anstrengungen um die »richtige« Definition des Lebens müßig. Vielleicht wissen wir auch so, dass es Leben ist, wenn wir es wirklich einmal finden.

Doch das genügt nicht. Wesentlich ist zudem, zwischen extraterrestrischem Leben und extraterrestrischer Intelligenz zu unterscheiden. Wiewohl weder hinreichend geklärt oder definiert ist, worin »Leben« besteht, noch was »Intelligenz« bedeutet, ist diese Unterscheidung pragmatisch hinreichend verständlich und vor allem relevant – zumal es nicht nur scheinbar »unintelligentes« Leben gibt, auf der Erde etwa Bakterien, sondern auch »nichtlebendige« Intelligenz, nämlich Supercomputer. Vielleicht kann Intelligenz nicht ohne Leben entstehen; dieses muss dann freilich nicht zwingend eine anhaltende Voraussetzung bleiben, sondern könnte lediglich eine Steigbügelhalter-, Wagenheber- oder Wachablösungsfunktion haben, indem es die Entwicklung postbiotischer Intelligenzen ermöglicht und sich gleichsam selbst abschafft oder überwindet.

Jedenfalls ist die Suche nach oder Entdeckung von Leben im All weder eine notwendige noch eine hinreichende Bedingung für SETI. Pragmatisch und methodisch gibt es große Überschneidungen, aber eben auch separate Ausrichtungen. Und trotz aller begrifflichen Unschärfen und anthropozentrischer Vorurteile beziehungsweise kognitiver Beschränkungen haben wir bereits ein ausreichendes Wissen, um zumindest eine rational fundierte Suche zu betreiben, obgleich wir das Ausmaß des Parameterraums keineswegs ermessen, vielleicht nicht einmal erahnen können. Dabei bedeutet »Intelligenz« hier wesentlich eine technische. Es gibt viele andere Formen von Intelligenz, bereits auf der Erde, doch auf Grundlage unseres gegenwärtigen Wissensstandes ist nur eine *auch* technische Intelligenz über interstellare oder intergalaktische Distanzen hinweg prinzipiell detektierbar.

Das setzt voraus, dass unser Weltbild bereits hinreichend korrekt ist, also unser Verständnis von den physikalischen Gesetzen und der kosmischen Realität insgesamt. Diese Voraussetzung ist alles andere als trivial und muss daher als Prämisse expliziert werden. Ein solches naturalistisches Weltbild hat sich zwar bewährt, aber es ist selbst eine Hypothese (oder metaphysische Annahme) und nicht selbstevident. Vielleicht ist das Universum völlig anders?

Unsere angenommene »Realität« könnte eine frappierende Illusion sein (was skeptische Hypothesen ja auch betonen und imaginieren: Täuschergott, Gehirne im Tank, Universum als Simulation, Planetarium-Hypothese und so weiter); und diverse ontologische Überzeugungen behaupten das sogar (Solipsismus, Mentalismus, Spiritismus, manche Versionen des Buddhismus und so fort). Oder die bekannten physikalischen Gesetze sind grob unzureichend: Falls es etwa rein »psychische Kräfte« gäbe, womöglich instantaner oder extradimensionaler Art, könnten intelligente Kontaktaufnahmen ganz ohne bosonische oder fermionische Vermittler erfolgen, also ohne elektromagnetische Strahlung und Gravitationswellen beziehungsweise Neutrinos.

Auch deshalb sind unsere Vorstellungsräume und -vermögen im Hinblick auf Leben und Intelligenz keine kongruente Beziehung oder Über- und Untermenge, sondern nur überlappend und gewissermaßen windschief – mathematisch-metaphorisch ausgedrückt. Leben und Intelligenz sind mithin strikt zu unterscheiden und können unabhängig voneinander sein, müssen es aber nicht.

Leben begreifen wir vor allem aus einer physikochemischen Perspektive. Dabei kann die Betrachtung von der terrestrischen Biochemie erweitert werden zu unbekanntem Reaktionen, zu anderen chemischen Elementen, sogar zu fremden physikalischen Trägern (etwa der hypothetischen Dunklen Materie). Letztlich geht es hier um abstrahierbare systemtheoretische Eigenschaften wie Homöostase (metastabile Fließgleichgewichte der nichtlinearen Thermodynamik), Kompartimentierung, Replikation und Reproduktion,

Mutabilität und (quasi-darwinistische) Evolvierbarkeit. Das sind wichtige, wenn nicht sogar wesentliche Eigenschaften dessen, was uns als Leben erscheint.

Intelligenz hingegen ist vor allem sozial und funktionell konzeptualisiert. Auch hier erfolgt eine systemtheoretische Abstraktion von der konkreten physikochemischen Basis. Doch es geht dabei nicht um die thermodynamische Wirkungsformen dieser Basis, sondern um zusätzliche thermodynamische Freiheiten und mithin Auswirkungsformen – vereinfacht: nicht um Stoffwechsel, sondern um Verhalten. Dabei ist die physikochemische Betrachtungsweise sekundär, wenn nicht irrelevant. Wichtig werden soziobiologische beziehungsweise -ökonomische Modelle: etwa spieltheoretische Untersuchungen der verschiedenen Arten von Altruismus, Kooperation und Konkurrenz. Darauf gründen sich letztlich wissenschaftliche Fähigkeiten, die wiederum eine Voraussetzung für eine (detektierbare) technische Intelligenz sind.

Wie intelligent ist der Kosmos?

Ein intelligenter Kosmos ist von Intelligenz durchzogen, beherbergt also intelligente Wesen. Diese können singulär oder vernetzt sein, isolierte Intelligenzen oder intelligente Kollektive. Eine weitere Stufe wäre, dass der Kosmos selbst, partiell oder ganz, zu einer intelligenten Entität wird, dass er gewissermaßen nicht nur denkende Materie enthält, sondern dann eine solche *ist*. Und vielleicht können fortgeschrittene Superzivilisationen sogar neue Universen erzeugen, die damit ein Intelligenzprodukt wären – wie womöglich unser Universum auch.

So ähnlich mögen religiöse Dogmen oder spirituelle Ahnungen klingen. Doch darum geht es nicht im wissenschaftlichen Kontext. Ein naturalistisches Weltbild bleibt der Ausgangspunkt – auch für SETI. Das schließt jedoch waghalsige technokratische Spekulationen nicht aus, über die seriöse Kosmologen durchaus nachdenken und in renommierten, begutachteten Fachzeitschriften publizie-

ren. Dies ist legitim, denn es hat nichts mit Hirngespinnsten, Ideologien, Verschwörungsglauben, Betrügereien oder Lügenmärchen zu tun. Doch in der Regel geht es mehrere Nummern kleiner, und das ist noch immer groß gedacht.

Die Entdeckung von Technosignaturen im All – unabhängig davon, ob es sich um an uns gerichtete Botschaften handelt oder um Nebenprodukte maschineller Aktivitäten – wäre eine Sensation. Solche Signaturen könnten schon morgen aufgespürt werden: etwa Radio- oder Lasersignale, Abwärme gigantischer Apparate, Artefakte im Sonnensystem, nicht natürlich entstandene Moleküle in den Atmosphären ferner Planeten oder die Verdunklung anderer Sterne durch vorbeiziehende künstliche Megastrukturen. Das alles wäre ein Indikator extraterrestrischer Intelligenz, ohne dass man dafür eine umfassende Definition oder ein genaues Verständnis von Leben, Kognition, Intelligenz, Rationalität, Bewusstsein oder Kultur bräuchte. (Man wüsste bei einer solchen Entdeckung allerdings noch nicht, wie und ob die ETs in unserem biologischen Sinn leben, wie lange schon, ob sie inzwischen bereits ausgestorben oder Teil eines galaktischen Netzwerks sind, ob es sich um Künstliche Intelligenzen handelt, ob sie sich auf einem oder vielen Planeten aufhalten oder den interstellaren Raum durchstreifen.)

Insofern ist SETI ein pragmatisches Vorgehen. Es vermeidet, sich gleich zu Beginn in einem Begriffswirrwarr zu verheddern und vor lauter Konfusion gar nicht erst zu beginnen. Wir wissen vielleicht wenig – aber genug, um vielfältige Versuche zu starten und dabei zu lernen und mehr zu verstehen. Dann werden sich, falls nötig, auch die Begriffe schärfen lassen.

Evidenzen, Beweislast und Wunschenken

Wie einst die Götter sind extraterrestrische Intelligenzen momentan nur himmlische Projektionsfelder menschlicher Fantasien, Sehnsüchte und Ängste. Über Wesen jenseits von uns (oder gar jenseits der physischen Welt) wissen wir nichts, und über das Wesen

von uns selbst noch immer sehr wenig. Umso dringlicher erscheint es vielen Menschen, sich im Unbekannten zu verorten oder sogar zwischen den Sternen zu verankern und darüber hinaus.

Selbstverständlich ist es von einem kosmischem Staubkörnchen namens Erde aus nur ansatzweise und extrem eingeschränkt vorstellbar, was alles an Leben, Intelligenz und Bewusstsein existieren könnte in den – vielleicht sogar unendlichen – Weiten des Welt-raums. Und das betrifft nicht nur das, was sehr fern ist oder sehr groß, sondern auch, was sehr klein ist und uns vielleicht sogar zu Füßen liegt. Von Nanobots über Wesen aus Dunkler Materie bis hin zu intergalaktischen Informationsnetzwerken, universalen Bewusstseinsfeldern und darüber hinaus ist bereits spekuliert worden, und die Mutmaßungen transzendieren sogar unser Univer-sum. Die Kühnheit des menschlichen Geistes ist bemerkenswert – weil und obwohl er sich aus dem irdischen Staub erhoben hat und sogar zu den Sternen emporzuschwingen trachtet. Freilich: Was möglich oder denkbar erscheint (und das ist nicht dasselbe), muss nicht real sein im Kosmos. Und was ist überhaupt möglich – und in-wiefern?

Angesichts solcher Unsicherheiten kann sich rasch ein Gefühl der Ratlosigkeit und des Schwindels einstellen. Besser ist eine wachsame und bescheidene Neugier. Weder besteht ein Grund, in diesen Fragen Ratschläge geben zu müssen, noch uns selbst zu beschwindeln. Wir wissen wenig; und wir wissen wohl vielfach nicht einmal, was wir nicht wissen. Eben deshalb ist neugieriges Nachdenken und vorurteilsloses Forschen so sinnvoll wie wünschenswert. Und eben deshalb sind Spekulationen und Extrapolationen (bis in die schwindelerregenden Höhen oder aber Abgründe der Metaphysik) wie auch wilde Fantasien (vorzüglich in den Imaginationen intelligenter Science Fiction) durchaus nützlich – vorausgesetzt, man verwechselt sie nicht mit Wissenschaft oder gar objektiver Wahrheit. Nützlich sind sie, weil sie motivieren oder inspirieren, neue Ideen kreieren und somit die empirische Forschung anregen,

bereichern oder in ihren Grenzen beziehungsweise Denkhorizonten erweitern können. Womöglich resultiert daraus sogar eine radikale Revolution unseres Realitätsverständnisses.

Aus einer empirisch-naturwissenschaftlichen Perspektive sind Beobachtungsdaten sowie ihre theoretische Einbettung und Interpretation entscheidend. Dieser »evidenzbasierte« Ansatz, das nachdrückliche Wertlegen auf belastbare Belege, ist die Grundlage von SETI. Das schließt philosophische Reflexionen keinesfalls aus, sondern hält sie für wünschenswert – nur können diese allein ebene keine ETs aufspüren. Ohne Beobachtungsdaten ist SETI blind und ohne entsprechende Forschungsansätze lahm.

Zudem ist die Beweislast eindeutig, gerade aus wissenschaftstheoretischer Perspektive: Wer Existenz-Aussagen macht, der muss sie belegen und begründen. Das gilt keineswegs nur für hypothetische ETs. Denn der Logik der Forschung gemäß kann man zwar All-Aussagen nicht beweisen, nur widerlegen (und deshalb müssen Gesetzhypothesen falsifizierbar sein, um als wissenschaftlich zu gelten). Aber umgekehrt lassen sich Existenz-Aussagen nur verifizieren, nicht ausschließen. Eine Nicht-Existenz empirischer Entitäten ist nicht beweisbar.

Ob es beispielsweise Einhörner gibt, muss anhand mindestens eines Exemplars gezeigt, also verifiziert werden. Es lässt sich prinzipiell nicht ausschließen, also falsifizieren, denn bislang könnten sich Einhörner ja schlicht gut versteckt haben oder wurden stets mit Pferden verwechselt. Ob jedoch sämtliche Einhörner weiß sind oder sämtliche Schwäne, das lässt sich nicht belegen, also verifizieren, weil man praktisch nie alle beobachten kann; doch diese Gesetzhypothese ist falsifizierbar, denn sie ist durch den Nachweis eines einzigen nicht weißen Einhornes beziehungsweise Schwans widerlegt (tatsächlich gibt es in Australien schwarze Schwäne).

Entsprechend kann nicht falsifiziert werden, dass ETs existieren (niemand vermag den ganzen Kosmos in jeder nur möglichen Hin-

sicht nach ihnen abzusuchen). Das ist auch nicht erforderlich. Und umgekehrt lässt sich nicht beweisen, dass die Menschheit die einzige intelligente, technische Zivilisation im All ist.

In diesem Zusammenhang sind zwei Maximen relevant und wichtig, die Carl Sagan Ende der 1970er-Jahre popularisierte: dass außerordentliche Behauptungen außerordentliche Belege erfordern (»extraordinary claims require extraordinary evidence«) und dass die Nichtexistenz von Belegen für etwas nicht der Beleg für dessen Nichtexistenz ist (»absence of evidence is not evidence of absence«). Diese Bonmots reichen mindestens bis ins 18. Jahrhundert zurück. (Ähnliche Formulierungen finden sich bereits bei Benjamin Bayly, David Hume und Pierre-Simon Laplace beziehungsweise bei William Wright, William Housman und Dugald Bell.)

Im Kontext von SETI bedeutet dies: Eine mutmaßliche Detektion von Technosignaturen und so weiter erfordert exzellente Indizien, um akzeptabel zu sein, denn ein Nachweis von außerirdischen Intelligenzen wäre sicherlich eine unserer epochalsten Entdeckungen überhaupt. (Durchaus strittig ist freilich zuweilen, was als Evidenz gilt, besonders als gute, und inwiefern nicht reproduzierbare Einzelereignisse eingeschlossen sind oder sogar subjektive Zeugnisse.) Belastbare Daten und deren kritische Interpretation sind also ein Gebot der intellektuellen Redlichkeit. Umgekehrt beweist der bisherige Mangel an solchen Indizien allerdings nicht, dass es keine ETs gab oder gibt.

Persönlich darf jeder hier für wahr halten, was er will – was keineswegs irrelevant ist, auch über Meinungsforschungen hinaus, denn von solchen Interessen und Überzeugungen hängen letztlich intersubjektive Projekte wie SETI ab, von der Finanzierung bis zur Verwirklichung. Ob, welche, wie viele ETs wo und wann existieren, ist jedoch eine objektive Tatsache der hypothetischen Realität. Diese können sich Forscher nicht aussuchen, sondern müssen sie nach bestem Wissen und Gewissen erkunden – mithin akribisch, kritisch und vor allem selbstkritisch. Wir leben nicht in einer Welt,

»widewidewitt«, wie sie uns gefällt; entsprechend ist eine Wunsch-Dir-was-Philosophie zwar mitunter anheimelnd oder unterhaltsam, doch kein Gegenstand der Naturwissenschaft und ihrer skeptischen Reflexion.

Was und wer jenseits unseres Wissenshorizonts ist, hängt nicht davon ab, ob wir uns dafür interessieren. Es besteht kein Zwang zu forschen. Aber Neugier ist fast schon konstitutiv für den Menschen. Ohne Neugier gäbe es keine Kultur.

Man muss daraus keinen Imperativ ableiten; man könnte selbstgenügsam verharren oder sich in Dumm- und Dumpfheit zurückentwickeln. Doch das Welttheater bietet keine Soloveranstaltung. Auf der Erde ist das Mit- und Wiedereinander der Organismen allgegenwärtig sowie eine Art Triebkraft der Evolution. Selbst in einigermaßen isolierten ökologischen Nischen bleibt kein Wesen lange allein. Niemand weiß, ob das alles ein sinnloses Possenspiel darstellt oder zu einer brillanten Bühnenschau beiträgt; ob es eine große Erzählung ist und welche Absicht ihr Autor dann haben könnte, oder aber ein blindes Zucken der Materie, die gleichwohl sehend wurde, wenn auch nur für einen kosmischen Augenblick.

Vielleicht also hat William Shakespeare Recht, wenn er seinen Macbeth deklamieren lässt: »Leben ist nur ein wandelnd Schattenbild; ein armer Komödiant, der spreizt und knirscht sein Stündchen auf der Bühne' und dann nicht mehr vernommen wird; ein Märchen ist's, erzählt von einem Dummkopf, voller Klang und Wut, das nichts bedeutet.«

Trotzdem stellen sich Fragen wie: Was wollen wir wissen? Wollen wir dies wirklich wissen? Und welche Konsequenzen hätte es?

Frank Drakes Formel

Grundlage für viele Diskussionen bis heute ist eine Gleichung, die der Radioastronom Frank Drake auf einer wegweisenden Konferenz in Green Bank, West Virginia, im November 1961 formulierte. Zuvor hatte er erstmals mit einem Radioteleskop nach Botschaften von

anderen Planetensystemen gesucht. Daraufhin wollte er abschätzen, wie groß – oder klein – die Erfolgsaussichten sind.

Die Drake-Gleichung, die inzwischen sogar auf T-Shirts und Kaffeebechern prangt, lautet in ihrer originalen Version: $N = R^* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$. Demnach ergibt sich die Anzahl N der Zivilisationen in unserer Milchstraße, mit denen wir in Funkkontakt treten könnten, aus dem Produkt der Sternentstehungsrate R^* (der Anzahl der sich jährlich neu bildenden Sterne in der Milchstraße), dem Anteil f_p der Sterne mit Planetensystemen, dem Anteil n_e der Planeten pro Planetensystem, die Leben beherbergen können, dem Anteil f_l der tatsächlich belebten unter den lebensfreundlichen Planeten, dem Anteil f_i der Planeten davon, die intelligente Lebensformen tragen, dem Anteil f_c der Zivilisationen mit technischen Fähigkeiten zur Radiokommunikation sowie dem Faktor für die mittlere Lebensdauer L dieser technischen Zivilisationen. In dieser Form hat die Formel einen Flaschenhals-Effekt: Je kleiner irgendein Wert ist, desto kleiner fällt das Gesamtergebnis aus.

Die Frage nach N ist hier also gleichbedeutend mit der Frage nach den einzelnen Faktoren der Drake-Gleichung. Darüber war vor 1961 viel weniger bekannt als heute. Entsprechend stark variierten die Schätzungen: Optimisten rechneten mit bis zu rund 100 Millionen Zivilisationen in der Galaxis, was einem mittleren Abstand zwischen bewohnten Planeten von zehn Lichtjahren entspräche, Skeptiker nicht einmal mit einem Dutzend Zivilisationen. Gäbe es eine Million Zivilisationen, entspräche dies einer durchschnittlichen Distanz von 100 bis 300 Lichtjahren.

Organisierte Unkenntnis

Zwar kann man die Werte der ersten drei Faktoren inzwischen recht gut abschätzen, viel besser als 1961, aber dies hilft kaum weiter; die Werte der letzten vier Faktoren hingegen sind noch genauso spekulativ und lassen nach wie vor jede empirische Basis vermissen. Trotzdem werden immer wieder wissenschaftliche Arbeiten publi-

ziert, die so exakt wie (deshalb) grotesk erscheinen. So kamen Tom Westby und Christopher J. Conselice von der britischen University of Nottingham 2020 auf genau 36 Zivilisationen in der Milchstraße, Wenjie Song und He Gao von der Pädagogischen Universität Peking in China auf 42 777 (mit jeweils ebenso präzisen Angaben der statistischen Unsicherheit). Das erinnert an mittelalterliche Dispute über die Anzahl von Engeln auf einer Nadelspitze.

Auch rein formal ist die Drake-Gleichung nicht adäquat. So müssten die meisten Faktoren als Integrale über Raum und Zeit umgeschrieben werden, denn sie variieren. Zum Beispiel waren »lebensfreundliche« Planeten nicht immer solche und bleiben es nicht, zumal sie nicht nur eine eigene Dynamik aufweisen, ebenso wie ihr Heimatstern, sondern es außerdem galaktische Einflüsse gibt, etwa durch Nachbarsterne.

Insgesamt scheint Drakes Formel also eine wissenschaftliche Seriosität zu suggerieren, die ihr nicht zukommt. Das könnte sogar SETI insgesamt in Misskredit bringen. Aber eine solche Rezeption wäre ein Irrtum oder Missverständnis. Drake hatte die Formel lediglich als konzise Themenübersicht seiner Konferenz konzipiert. Er sprach von einem »Kompositum von Unsicherheiten« und sagte mehrfach: »Es überrascht mich immer wieder, dass diese Gleichung als eine der großen Ikonen der Wissenschaft betrachtet wird, da sie mir weder großartige intellektuelle Anstrengungen noch Einblicke abverlangt hatte.« Und die einflussreiche SETI-Forscherin Jill Tarter meinte, die Formel »organisiert unsere Unkenntnis«.

Welche Sterne?

Die Sternentstehungsrate R^* ist inzwischen ziemlich gut bekannt und entspricht in der Milchstraße heute etwa der Bildung eines sonnenähnlichen Sterns pro Jahr, hat also den Wert 1. Doch das besagt nicht viel. Zum einen könnten ETs auch bei anderen Sternen beheimatet sein, deren Bildungsrate teilweise das Zehnfache beträgt; und vor Milliarden Jahren war R^* ohnehin wesentlich höher, die meisten

Sterne in der Geschichte und Zukunft des Universums sind inzwischen bereits entstanden. Zum anderen ist die heutige Rate irrelevant, weil die Evolution einer technischen Intelligenz zumindest auf der Erde Milliarden Jahre gedauert hat. Wichtiger ist also die Zahl der Sterne, bei denen sich für uns heute Zivilisationen aufhalten.

Freilich ist nicht jeder Stern geeignet, erdähnliches Leben hervorzubringen. So muss es sich um Gestirne von mindestens der zweiten Generation handeln, denn die ersten Sterne entstanden aus reinen Wasserstoff- und Helium-Wolken. Sie enthielten noch keine schwereren Elemente, wie sie für die Planetenbildung unerlässlich sind: Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Silizium, Magnesium, Calcium, Phosphor, Eisen und so weiter. Diese Materie, aus der wir selbst bestehen, wurde nicht mit dem Urknall erzeugt, sondern erst im Inneren von längst erloschenen und explodierten Sternen erbrütet. Daraus folgt: Planeten gibt es hauptsächlich in den Spiralarmen von Spiralgalaxien, weil in den galaktischen Zentralregionen und Randbezirken – wie auch in elliptischen Galaxien und in Kugelsternhaufen – wohl meistens nicht so viel schwere Elemente als Rohstoff vorhanden sind. (Ausnahmen bestätigen die Regel; so wurde in dem 5600 Lichtjahre entfernten Kugelsternhaufen M4 ein über zwölf Milliarden Jahre alter Planet aufgespürt.)

Früher dominierten kurzlebige Riesensterne vom Spektraltyp O und B, aber sie kommen für erdähnliches Leben nicht infrage. Sie existieren nicht lange genug, um der Evolution (mutmaßlich) hinreichend Zeit zu lassen – selbst Sterne mit nur der doppelten Sonnenmasse werden lediglich eine Milliarde Jahre alt. Gegenwärtig machen O- und B-Riesen jedoch weniger als ein Prozent aller Sterne aus.

Die Hälfte aller Sterne sind Doppel- und Mehrfachsysteme, in denen die Wahrscheinlichkeit für stabile Umlaufbahnen erdähnlicher Planeten geringer ist. (Allerdings sind bereits Planeten bei Doppelsternen entdeckt worden, sogar manche lebensfeindliche Neutronensterne haben Trabanten).

Am lebensfreundlichsten erscheinen Sterne von der Spektralklasse G wie unsere Sonne. Sie brennen lange und gleichmäßig genug, um nicht durch plötzliche Superflares das aufkeimende Leben rasch wieder zu versengen.

Über zehn Prozent aller Sterne heute sind Weiße Zwerge, die von den bisherigen SETI-Projekten jedoch weitgehend vernachlässigt wurden. Das könnte ein Fehler sein, denn sie stammen von ausgebrannten F- und G-Sternen und sind allesamt Milliarden Jahre älter als die Sonne. Wenn bei ihren Vorläufersternen Zivilisationen entstanden sind, könnten sich diese noch immer dort aufhalten – etwa in Bunkersystemen unter Planetenoberflächen oder in riesigen Raumstationen.

Sterne vom Spektraltyp K haben eine geringere Masse als die Sonne und brennen daher länger: 17 bis 70 Milliarden Jahre. Jeder K-Stern, der jemals entstanden ist, scheint also heute noch, und die meisten sind älter als die Sonne. Dort könnten sich deshalb schon viel früher Zivilisationen entwickelt haben.

Noch viel älter, bis zu zehn Billionen Jahre, werden die unscheinbaren M-Sterne. Sie haben weniger als 40 Prozent der Sonnenmasse und sind am häufigsten im Universum. Allerdings sind diese Roten Zwerge kühl und lichtschwach. Lebensfreundliche Zonen dort befinden sich sehr nahe an den Sternoberflächen, näher als Merkur bei der Sonne. Daraus resultieren Gezeitenreibungen und mithin gebundene Rotationen: Planeten zeigen ihrem Stern dann stets nur eine Seite (so wie unser Mond der Erde); das führt zu extremen Temperaturunterschieden auf solchen Welten, zu heftigen Stürmen oder gar dem Verlust der Atmosphären. Außerdem entfachen viele Rote Zwerge tödliche Ultraviolett- und Röntgeneruptionen. Aber vielleicht werden die Bedingungen dort künftig lebensfreundlicher – und dann würden die meisten Zivilisationen im All womöglich erst in Zukunft entstehen. Ein Team um Abraham (Avi) Loeb von der Harvard University in Cambridge, Massachusetts, schätzte sogar, dass viele M-Sterne erst in ein paar Billionen Jahren zu Le-

bensstätten werden. Die irdische Biosphäre könnte daher unter den ersten 0,1 Prozent sein, wäre also extrem frühreif.

Gar nicht berücksichtigt werden in der Drake-Formel Braune Zwerge. (Die Bezeichnung prägte Jill Tarter erst 1975.) Auch diese düsteren, nur etwa 13 bis 80 Jupitermassen schwere Himmelskörper, die lediglich eine kurze Phase der Kernfusion durchlaufen, können Planeten beherbergen. Vielleicht sind sie bevorzugte Ziele von Generationenraumschiffen – wie die ebenfalls außer Acht gelassenen frei vagabundierenden interstellaren Planeten, die nach ihrer Bildung aus den jeweiligen Sternsystemen herausgeschleudert wurden. Solche isolierten Welten haben, wie Braune Zwerge, noch eine innere Wärme, und es gibt allein in der Milchstraße wohl bis zu einer Billion von ihnen.

Exotische Exoplaneten

Die Faktoren f_p und n_e sind auch kein Grund für SETI-Pessimismus. Die Forschungsergebnisse der letzten Jahre bezeugen eine planetare Vielfalt, die sich auf der Drake-Konferenz niemand vorzustellen vermochte. In der Milchstraße wimmelt es von Sterntrabanten!

Mittlerweile sind Nachweise von extrasolaren Planeten und ihr Studium Routine. Dabei endeten mehr als 2500-jährige Spekulationen darüber, ob noch andere – vielleicht belebte? – Welten existieren, erst 1995. Damals haben Michel Mayor und Didier Queloz von der Universität Genf zum ersten Mal einen Begleiter bei einem anderen sonnenähnlichen Stern nachgewiesen. (Dafür wurden sie 2019 mit dem Physik-Nobelpreis geehrt.) Dies markierte zugleich den Anfang einer grandiosen Entdeckungstour, die sich nun immer weiter beschleunigt – mit nicht absehbaren Konsequenzen.

Inzwischen wurden mehr als 8000 Exoplaneten aufgespürt (Stand 2026). Hinzu kommen ähnlich viele weitere Kandidaten, die erfahrungsgemäß überwiegend ebenfalls real sind, aber noch bestätigt werden müssen. Und das ist nur die sprichwörtliche Spitze

des Eisbergs (die vielen Eiswelten eingeschlossen), weil die Detektionsmethoden sehr limitiert sind.

Hochrechnungen zeigen, dass es wohl mehr Planeten gibt als Sterne in der Milchstraße – und dies sind über 100 Milliarden. Denn viele Sterne besitzen mehr als nur einen Trabanten; bei unserer Sonne sind es acht, ebenso bei Kepler-90 im Sternbild Drache, 2800 Lichtjahre entfernt. Es wurden schon über 1000 Planetensysteme mit zwei und mehr Trabanten nachgewiesen. Über 800 bekannte Planeten umrunden einen Stern, der zu einem Doppel-, Dreier- oder Vierersystem gehört; zudem wurden mehr als drei Dutzend Planeten identifiziert, die sogar eine weite Umlaufbahn um beide Komponenten eines Doppelsterns haben. Ferner konnten Astronomen circa 900 Objekte mit weniger als 60 Jupitermassen im interstellaren Raum aufspüren: überwiegend wohl Planeten, die aus ihrem jeweiligen Sonnensystem herausgeschleudert wurden.

Rund zwei Drittel der bislang identifizierten Welten sind Gasriesen mit größeren Massen als Neptun. Nur etwa fünf Prozent der Planeten sind felsig und von ähnlichem Ausmaß wie die Erde oder kleiner. Die anderen, größeren werden Supererden genannt und haben überwiegend feste Oberflächen. Diese Zahlen sind allerdings nicht repräsentativ, sondern den Detektionsmethoden geschuldet, die hauptsächlich massereiche Trabanten und solche auf engen Umlaufbahnen nachweisen können.

Der Reigen der Welten spart nicht an Exotik. Das begann bereits mit dem Fund von Mayor und Queloz bei dem 50 Lichtjahre fernen Stern 51 Pegasi (mittlerweile Helvetios genannt). Denn sein Trabant namens Dimidium ist sehr seltsam: Nicht nur umkreist er sein Gestirn alle 4,2 Tage in lediglich 7,9 Millionen Kilometern Abstand – lediglich 13 Prozent der Distanz des Planeten Merkur von der Sonne –, er ist auch mit der halben Masse des Jupiters und dem 1,2-Fachen seines Durchmessers groß und schwer. Dimidium wurde durch die Hitze seines nahen Sterns aufgebläht und hat eine Oberflächentemperatur von fast 1000 Grad Celsius.

Solche sogenannten Heißen Jupiter, das zeigte sich bald, sind recht häufig in der Milchstraße. Sie waren zuvor genauso wenig bekannt wie die Supererden. Diese gibt es in unserem Sonnensystem ebenfalls nicht. Sie besitzen Massen vom etwa Drei- bis mehr als Zehnfachen der Erde, sind also leichter als Uranus (14 Erdmassen). Sie können felsige Oberflächen haben und weisen vielleicht tektonische Aktivitäten auf. Seit der ersten Entdeckung 2005 bei dem 15 Lichtjahre fernen Stern Gliese 876 im Sternbild Wassermann wurden über 1000 Supererden aufgespürt.

Mittlerweile ist es nicht nur möglich, Umlaufzeiten und Massen der Himmelskörper zu bestimmen und daraus wichtige Eigenschaften wie Größe, Dichte, Temperatur oder Distanz zum Heimatstern zu berechnen. Es glückte in über 200 Fällen auch schon, Planeten direkt zu fotografieren – freilich nur als kleine Lichtpünktchen.

Günstige Gelegenheiten

Bühnen für einen Auftritt des Lebens gibt es allein in der Milchstraße also genug. Wie viele davon tatsächlich ein Schauspiel bieten, ist aber unbekannt. Immerhin scheinen lebensfreundliche Welten keine Rarität zu sein. Das sind Planeten, die ihr Gestirn in der sogenannten Ökosphäre oder habitablen Zone umrunden. Diese Begriffe wurden bereits in den 1950er-Jahren von dem Raumfahrtmediziner Hubertus Strughold beziehungsweise dem Astronomen Su-Shu Huang geprägt. Damit ist der Bereich um einen Stern gemeint, in dem die Umlaufbahn eines Planeten (oder Mondes) liegen muss, um Oberflächentemperaturen zwischen 0 und 100 Grad Celsius zu gewährleisten – die Bedingung für flüssiges Wasser. Das ist notwendig für Leben, wie wir es kennen.

In unserem Sonnensystem erstreckt sich der Sonnenabstand der Ökosphäre ungünstigstenfalls von etwa 142 bis 209 Millionen Kilometern (0,95 bis 1,4 Astronomische Einheiten), günstigstenfalls von 112 bis 265 Millionen Kilometern (0,75 bis 1,8). Durch einen wärmenden Treibhauseffekt der planetaren Atmosphäre könnte die

Außengrenze bis auf 360 Millionen Kilometer anwachsen. Die Erde ist knapp 150 Millionen Kilometer von der Sonne entfernt (das definiert die Astronomische Einheit), Mars etwa 228 Millionen Kilometer (1,5 Astronomische Einheiten).

Im Umkreis von 1000 Lichtjahren sind inzwischen über fünf Dutzend extrasolare felsige Planeten in der jeweiligen Ökosphäre bekannt (Stand 2026). Die Bedingungen dort sind zwar in vielen Fällen noch schwierig abzuschätzen, doch mehr und bessere Daten wie auch die Entdeckung vieler weiterer Exemplare sind nur eine Frage der Zeit.

Nach keineswegs besonders »optimistischen« Modellrechnungen könnten in der Milchstraße rund eine halbe Million Planeten mit – zumindest primitivem – erdähnlichem Leben existieren. Das ergab zumindest eine Studie von Siegfried Franck und seinen Kollegen am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung im Jahr 2000. Die Rechnung basiert auf etablierten Methoden der Erdsystemmodellierung. Ein Computerprogramm, mit dem ursprünglich die irdische Biosphäre simuliert wurde, insbesondere im Hinblick auf die Menge des atmosphärischen Kohlendioxids und das Ausmaß der Photosynthese, erlaubte es, die Häufigkeit und Größe bewohnbarer Zonen in der Nähe anderer Sterne abzuschätzen: »Etwa ein Prozent aller Sterne sollte mindestens einen erdähnlichen Planeten besitzen«, lautete die Schlussfolgerung von Franck. »Es gibt also in der Milchstraße etwa 50 Millionen Planeten mit der Voraussetzung für Leben. Von diesen dürfte etwa ein Prozent, das heißt rund 500 000, auch wirklich eine globale Biosphäre mit zumindest niederem Leben entwickelt haben.« Die Frage »Ist die Erde ein gewöhnlicher Ort in der Milchstraße?« im Titel ihres Fachartikels beantworteten Franck und seine Mitarbeiter daher mit einem enthusiastischen »Ja!«

Weitere Studien kamen zu noch potenziell lebensfreundlicheren Schätzungen. So ließen erste Hochrechnungen aus den Daten der Kepler-Mission der US-amerikanischen Weltraumbehörde NASA

darauf schließen, dass mindestens jeder fünfte sonnenähnliche Stern einen Planeten hat, auf dem flüssiges Wasser möglich wäre. Wenn das für zehn Prozent aller Sterne in der Milchstraße gilt, gäbe es rund vier Milliarden habitable, also potenziell lebensfreundliche Planeten. Die Raumsonde Kepler hatte 2009 bis 2013 mit einem 95-Zentimeter-Teleskop eine 115 Quadratgrad große Himmelsregion mit über 170 000 Sternen in den Sternbildern Schwan, Leier und Drache im Visier. In diesem Zeitraum wurde die Helligkeit dieser Sonnen mit großer Präzision gemessen, um Planeten zu finden, die im Blickfeld vor ihrem Heimatstern vorbeiziehen. Bei solchen periodischen Transits »verfinstert« sich der Stern um etwa 0,01 Prozent seiner Leuchtkraft. Auf diese Weise hat Kepler über 2600 Planeten aufgespürt. Eine neuere Hochrechnung auf Grundlage der Kepler-Daten ergab, dass sogar jeder dritte oder zweite sonnenähnliche Stern einen Steinplaneten von 0,5 bis 1,5 Erdmassen haben könnte, sodass es bereits im Umkreis von 30 Lichtjahren eine Handvoll gäbe.

Eine andere Studie, die Xavier Bonfils von der Universität Grenoble in Frankreich geleitet hat, inspizierte mit dem 3,6-Meter-Teleskop der Europäischen Südsternwarte auf La Silla in Chile spektroskopisch nahe Rote Zwerge. Sie machen 80 Prozent aller Sterne in der Milchstraße aus, vielleicht 160 Milliarden. Die bald noch genauer werdenden Hochrechnungen ergaben, dass 30 bis 90 Prozent der Zwerge in ihrer habitablen Zone von Supererden umlaufen werden, die Massen zwischen einer und zehn Erden besitzen. In unserer Umgebung von 30 Lichtjahren Radius gibt es schätzungsweise 100 davon.

Kurzum: An Planeten in der Milchstraße herrscht kein Mangel. Auch nicht an solchen, die erdähnliche Ausmaße und Massen besitzen und in der habitablen Zone um ihren jeweiligen Heimatstern kreisen. Doch blühende Landschaften im weiten Weltall benötigen noch mehr Voraussetzungen.

Lebensfreundliche Welten

... erfordern zahlreiche Bedingungen. Dazu gehören hauptsächlich

- sonnenähnliche Einzelsterne der zweiten oder dritten Generation mit einer Lebensdauer von mehreren Milliarden Jahren, relativ konstanter Strahlungsleistung und in der Umgebung genug schweren Elementen zur Planetenbildung;
- ausreichende Distanz vom Galaktischen Zentrum mit seinem gefährlichen Schwarzen Loch sowie einer für die mittelfristige Stabilität von Planetenbahnen zu hohen Sterndichte;
- ein sicherer Abstand von Sternentstehungsgebieten, um nicht vernichtenden Strahlenschauern durch benachbarte Sternexplosionen (Supernovae, Gammastrahlen-Ausbrüche) ausgeliefert zu sein;
- andererseits sind Supernovae wichtig, weil sie den Kollaps interstellarer Gaswolken auslösen, aus denen Sterne und Planetensysteme entstehen;
- ein ungefähr kreisförmiger Orbit des Planeten in einer Entfernung zum Stern, die konstante, gemäßigte Oberflächentemperaturen gewährleistet, sodass flüssiges Wasser vorhanden ist;
- langfristig stabile Umlaufbahnen im System (benachbarte Riesenplaneten dürfen kein orbitales Chaos verursachen);
- eine planetare Umdrehungsperiode, die kurz genug ist, um rundum eine relativ gleichmäßige Bestrahlung zu gewährleisten;
- eine nicht zu starke Neigung der Rotationsachse, damit es keine extremen jahreszeitlichen Unterschiede gibt;
- eine Planetenmasse, die groß genug ist, um eine Atmosphäre zu halten, aber nicht zu groß, weil sonst zu viel Kohlendioxid zu einem gravierenden Treibhauseffekt führt;
- Kohlenstoff als Lebensbaustein und für einen moderaten Treibhauseffekt via Kohlendioxid (dieser Effekt darf jedoch nicht ausufern, wie auf der Höllenwelt Venus mit Temperaturen von über 400 Grad Celsius);

- ein planetares Magnetfeld zur Abschirmung des Sonnenwinds und der harten Kosmischen Strahlung;
- eine passende Atmosphäre (Zusammensetzung, Luftdruck, eventuell schützende Ozonschicht vor der stellaren Ultraviolettstrahlung);
- Plattentektonik für die Bildung von Landmassen und ein geochemischer Karbonat-Silikat-Zyklus als langfristiger Thermostat; dadurch konnte auf der Erde die allmähliche Zunahme der Sonnenstrahlung – über zehn Prozent in den letzten drei Milliarden Jahren – kompensiert werden; Voraussetzung für die Plattentektonik sind radioaktive Nuklide im Planetenkern, die für genügend Hitze und somit innere Dynamik sorgen;
- nicht zu wenige, aber auch nicht zu viele Ozeane;
- idealerweise ein großer Mond in der richtigen Umlaufbahn für eine stabile Neigung der Rotationsachse des Planeten; sonst schwankt diese im Lauf der Jahrhundertmillionen stark, was zu drastischen Klimawechseln führen kann;
- ein ferner großer Gasplanet wie Jupiter als eine Art Wachposten, der Kometen aufsammelt oder so ablenkt, dass der lebensfreundliche Planet vor verheerenden Einschlägen weitgehend verschont bleibt;
- vielleicht einige wenige große Meteoriteneinschläge im Lauf von Jahrhundertmillionen, die quasi als Evolutionsbeschleuniger wirken.

Zufall oder Zwangsläufigkeit

Wie verbreitet und komplex Leben im Universum ist, weiß bislang niemand. Entsprechend gehen die Meinungen darüber weit auseinander, auch unter Experten. Die Extreme schlagen sich schon in stark beachteten wissenschaftlichen Titeln nieder. *Rare Earth: Why Complex Life Is Uncommon in the Universe* heißt ein Buch von Peter D. Ward und Donald Brownlee aus dem Jahr 2000 (*Unsere einsame Erde* in der deutschen Übersetzung). »Wir befinden uns auf einem von

vielen Planeten. Dennoch sind es nicht so viele wie wir hoffen mögen«, schreiben die beiden Professoren für Geowissenschaften beziehungsweise Astronomie an der University of Washington in Seattle. »Vielleicht sind es nicht so viele, dass wir jemals, wie lang die Geschichte unserer Spezies auch immer sein wird, irgendwelches extraterrestrisches, höheres Leben in der Nachbarschaft unserer Sonne finden werden. Diese Geschichte ist von Hollywood so nicht vorgesehen – dass wir vielleicht nichts als Bakterien finden, sogar auf Planeten im Umlauf um andere Sterne.«

Diese Hypothese von der einsamen Erde mag eine schlechte Nachricht für SF-Fans sein – obwohl sie gerade in der Science Fiction schon oft durchgespielt wurde –, aber sie ist nicht bloß eine missmutige Behauptung. Dagegen opponieren der Astrobiologe Dirk Schulze-Makuch von der Technischen Universität Berlin und der Biochemiker William Bains vom Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. In ihrem Buch *The Cosmic Zoo: Complex Life on Many Worlds* von 2017 (deutsch 2019 erschienen als *Das lebendige Universum. Komplexes Leben auf vielen Planeten?*) argumentieren sie, dass es auf zahlreichen Exoplaneten von Leben wohl nur so wimmelt, und zwar nicht nur in Form einfacher Einzeller.

Kurzum: Über die Entstehung und Entwicklung von Leben sowie die Anzahl der tatsächlich belebten Planeten im All lässt sich gegenwärtig nur spekulieren. Wir wissen nicht, ob Leben ein einzigartiger Zufall »in der teilnahmslosen Unermesslichkeit des Universums« ist, wie der Molekulargenetiker und Nobelpreisträger Jacques Monod vermutet hat, oder »eine kosmische Zwangsläufigkeit«, wie der Biochemiker, Zellbiologe und Nobelpreisträger Christian De Duve meinte. Evolutionsbiologische Überlegungen sprechen aber eher gegen die Auffassung, Leben sei ein einmaliger Lotteriegewinn. Denn die darwinistischen Selektionsprinzipien setzen schon im Bereich vermehrungsfähiger Makromoleküle an; so können auch aus einfachen Grundbausteinen rasch komplexe Aggregationen hervorgehen und die Grenze zwischen unbelebt und belebt überschreiten.

Astrobiologie am Anfang

Nach etwas zu suchen, von dem man nur vage Vorstellungen hat, ist schwierig, Trotzdem existiert bereits ein Forschungszweig namens Astrobiologie. Er befasst sich mit den Möglichkeiten des Nachweises extraterrestrischen Lebens im Sonnensystem und auf Exoplaneten (Biosignaturen). Weitere Themen sind die Entstehung, Entwicklung und Bedingungen des Lebens allgemein. (Nie gemeint war Leben *auf* den Sternen, sondern bei und zwischen ihnen.)

Die Bezeichnung Astrobiologie wurde schon 1935 von dem in Polen geborenen Astronautik-Experten Ary J. Sternfeld in dem populären französischen Magazin *La Nature* verwendet sowie 1941 in einem Artikel von Laurence J. Lafleur vom Brooklyn College in New York. Auch der am kalifornischen Leuschner Observatory tätige Astronom Otto von Struve nutzte den Begriff, betonte 1955 aber, dass »die Zeit noch nicht reif« dafür sei, obwohl er SETI früh befürwortete und als Direktor von Green Bank 1961 Frank Drakes Konferenz unterstützte. 1953 trug ein in Moskau erschienenes Buch des in Alma-Ata, Kasachstan, forschenden Astronomen Gabriel A. Tikhov den Titel *Astrobiologie*. Schon 1945 sprach er von Astrobotanik im Zusammenhang mit dem Mars, später zudem von Kosmobiologie. Letzteres tat der Kristallograph und Philosoph John D. Bernal 1952 ebenfalls auf einer Konferenz der British Interplanetary Society (schon 1929 hatte er Raumstationen konzipiert). Den synonymen Begriff Exobiologie prägte Joshua Lederberg 1960 im Titel eines Artikels in *Science*. Gebräuchlich ist auch Xenobiologie, 1954 von Robert A. Heinlein in seinem SF-Roman *The Star Beast* eingeführt, bezieht sich mittlerweile aber meistens auf eine alternative (fremde) und/oder synthetische Biochemie.

Das astrobiologische Themenfeld selbst hatte lange eine etwas anrühige Aura des Unseriösen – eine »Wissenschaft, die erst noch zeigen muss, dass ihr Forschungsobjekt existiert«, wie George G. Simpson 1964 spottete, der Exobiologen als Ex-Biologen bezeichnete –, obwohl die Fragestellungen und Methoden denselben wissenschaft-

lichen Standards gehorchen müssen und wollen wie andere Forschungszweige. Tatsächlich wurde die Astrobiologie bald ein respektables Wissenschaftsgebiet. Bereits im Juni 1957 fand in Flagstaff, Arizona, das erste Astrobiologie-Symposium statt. 1979 veranstaltete die International Astronomical Union (IAU), die größte Organisation der Berufsastronomen, in Montreal eine Sitzung mit dem Titel *Strategy for the Search for Life in the Universe*. 1982 gründete sie daraufhin im Rahmen ihrer Generalversammlung im griechischen Patras die Kommission 51 *Search for Extraterrestrial Life*. Sie trägt mittlerweile den Namen *Bioastronomy* und veranstaltete zahlreiche internationale wissenschaftliche Konferenzen mit Hunderten Teilnehmern.

Wichtig war auch, dass NASA-Administrator Daniel Goldin ab 1996 der Astrobiologie eine zentrale Stellung in den Forschungsrichtungen einräumte. Zwar wurde aus Kostengründen kein eigenständiges Institut aufgebaut, doch es schlossen sich 1998 über ein Dutzend bestehende Forschungseinrichtungen zusammen, wobei dem Ames Research Center der NASA im kalifornischen Mountain View eine Koordinierungsfunktion zukam. Bevor das NASA Astrobiology Institute 2019 aufgelöst wurde, waren ungefähr 600 Forscher aus rund 100 Instituten damit assoziiert. Die Fortsetzung ist das NASA Astrobiology Program. Außerdem hatten sich rasch internationale Kooperationen gebildet: das Centro de Astrobiologia in Madrid, das Groupement de Recherche en Exobiologie in Paris, die European Exo/Astrobiology Network Association (EANA) in Orleans, die Astrobiology Society of Britain, das Australian Centre for Astrobiology an der Macquarie University in Sydney und so weiter. Die Deutsche Astrobiologische Gesellschaft wurde erst 2016 in Berlin gegründet.

Ist Intelligenz ein seltener Spätzünder?

Trotz aller Ambitionen, Hypothesen und empirischer Forschungsprojekte der Astrobiologie und SETI tappen Wissenschaftler hinsichtlich der letzten Faktoren der Drake-Gleichung noch immer völlig im Dunkeln. Für Leben, Intelligenz, und Technologie kennen wir

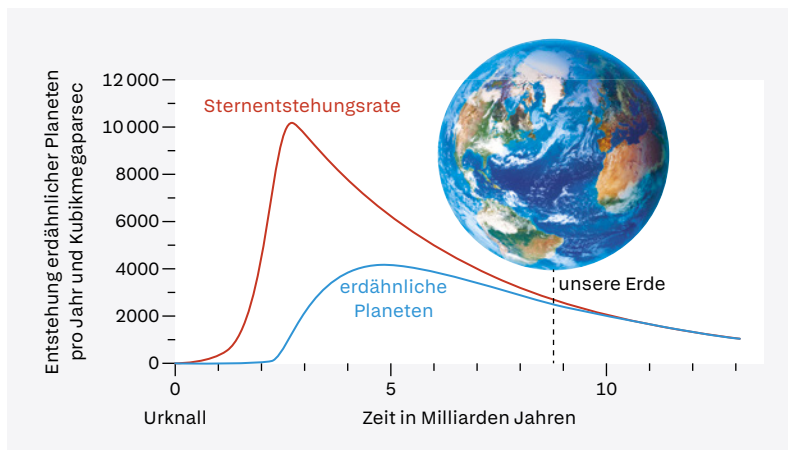
bislang nur ein einziges Exempel: die Erde. Und für den letzten Faktor, die Zivildationsdauer, können wir nicht einmal auf die Menschheit schauen – oder allenfalls mit Argwohn und Angst.

Dass es limitierende Bedingungen für technische Zivilisationen gibt, ist unstrittig. Das Universum musste zunächst »lebensfreundlich« werden – hinsichtlich seiner Temperatur, der Bildung von langlebigen Sternen sowie schweren Elementen und so weiter. Zwar sind die ersten Sterne schon wenige Dutzend Jahrmillionen nach dem Urknall entflammt, aber sie sind rasch explodiert.

Andererseits ist die Erde, die vor etwa 4,6 Milliarden Jahren entstand, ein Spätankömmling. Denn in einer wichtigen Studie von 2001 hat Charles H. Lineweaver von der University of New South Wales im australischen Sydney hochgerechnet, dass zumindest bei sonnenähnlichen Sternen 75 plus/minus 10 Prozent aller erdähnlichen Welten älter ist als die Erde. Bei solchen Sternen bildeten sich Planeten zum Teil schon vor neun Milliarden Jahren. Das Durchschnittsalter schätzte der Astronom auf 6,4 plus/minus 0,9 Milliarden Jahre – typische terrestrische Himmelskörper in der Milchstraße wären demnach zwei Milliarden Jahre (plus/minus eine Jahrmilliarde) älter als die Erde.

Weitere Analysen erhärteten diesen Befund, etwa von Raphael Gobat und Sungwook E. Hong vom Korea Institute for Advanced Study in Seoul. Auch eine Hochrechnung von Peter Behroozi und Molly Peeples vom Space Telescope Science Institute in Baltimore, Maryland, ergab, dass sich die meisten Planeten im Universum schon vor langer Zeit gebildet haben: Bereits 80 Prozent der erdähnlichen Welten und die Hälfte aller Gasriesen wie Jupiter existierten demnach bereits, als sich unser Sonnensystem formte. Allein in der Milchstraße dürften sich eine Milliarde erd- und zehn Milliarden jupitergroße Planeten befinden.

An Orten für eine Abiogenese mangelte und mangelte es also nicht. Unklar ist gleichwohl, worin Leben überhaupt besteht und seit wann es irgendwo im All existiert.



Neue Heimat: Die Erde bildete sich vor 4,6 Milliarden Jahren, also 9,2 Milliarden Jahre nach dem Urknall. Erdähnliche Planeten konnten jedoch bereits 2,5 Milliarden Jahre nach dem Urknall entstehen. Demnach müssten rund drei Viertel aller terrestrischen Planeten im All älter sein als die Erde – im Durchschnitt etwa 1,8 Milliarden Jahre älter. Eingezeichnet ist auch die Sternentstehungsrate abhängig vom Alter des Universums und normiert auf die Bildung erdähnlicher Planeten heute. Die Planetenformation setzte erst etwa 1,5 Milliarden Jahre nach der Entstehung der Sterne ein, wenn es genug schwere Elemente gab – sie mussten in früheren Sternen mittels Kernfusion erzeugt und dann ins All geblasen werden. (Ein Megaparsec entspricht 3,26 Millionen Lichtjahren.) [Vaas nach Lineweaver 2001; Grafik: Foxdesigner mit einer Abbildung von Paitoon/stock.adobe.com]

Auf der Erde werden die ältesten nachgewiesenen einzelligen Lebensformen auf frühestens rund 800 Millionen Jahre nach der Bildung unseres Planeten datiert. Die Erdoberfläche hatte sich schon über 600 Millionen Jahre zuvor abgekühlt, wie Zirkone belegen; allerdings kam es immer wieder zu heftigen Meteoriteneinschlägen, die Teile der Kruste schmelzen ließen. Sicherlich spielten auch zahlreiche abiotische Faktoren eine limitierende Rolle: So könnte für nachhaltiges Leben die Existenz eines großen Mondes, eines Planetoidengürtels und eines jupiterähnlichen Riesenplaneten wichtig gewesen sein, ebenso die Position innerhalb der Heimatgalaxie sowie deren Art (Spiraltyp) und Lage in der großräumigen Umgebung (am Rand eines Galaxienhaufens).

Auf der Erde war die Erzeugung von Leben für die Natur anscheinend nicht allzu schwierig. *Intelligentes* Leben ähnlich dem auf der Erde kann es jedoch nur auf der Basis vielzelliger Organismen geben. Und die ersten irdischen Vielzeller tauchten erst viel, viel später auf – frühestens vor vielleicht 700 Millionen Jahren. Deren Entstehung oder Überleben scheint einer der großen »Flaschenhälse« der Evolution zu sein. Gerade diese Organismen sind durch globale Katastrophen – wie Meteoriteneinschläge, Sternexplosionen, Vulkanismus, klimatische Umbrüche, Änderungen des Meeresspiegels oder ozeanische Strömungen – besonders gefährdet. »Die Evolution komplexer Lebensformen benötigt sehr stabile Verhältnisse über sehr lange Zeiträume, was ausgesprochen selten vorkommt«, meint Peter Ward. Dies ist eines seiner Hauptargumente, warum höhere Lebensformen in der Milchstraße angeblich rar seien.

Vielleicht ist die Entstehung von Leben also häufig, doch dessen Entwicklung und Fortbestand nicht, weil atmosphärische Bedingungen mangels stabilisierender planetarer Rückkopplungen von Leben, Gesteinen, Meeren und Klima lebensfeindlich werden. Dann wäre das Aussterben der Normalfall, weil sich die Temperaturen oder die Zusammensetzung der Luft zu schnell ändern (was tödliche Kältefallen oder aber Treibhauseffekte zur Folge hat oder gar den Verlust der Atmosphäre). Diese Gaia-Flaschenhals-Hypothese stammt von Charles Lineweaver und seinem Kollegen Aditya Chopra. Sie beziehen sich auf die von James E. Lovelock ab 1972 und Lynn Margulis ausgearbeitete, inzwischen gut bestätigte Gaia-Hypothese mit ihren biogeochemischen Feedback-Modellen. Dieser Hypothese zufolge bilden die belebten und unbelebten Systeme der Erde ein stark vernetztes, selbstregulierendes und -organisiertes Gesamtsystem. Über Rückkopplungen bleiben so wichtige Umweltbedingungen wie Sauerstoff- und Kohlendioxid-Gehalt, Temperatur, ozeanische Salzkonzentrationen und Verwitterung in einem Bereich, der den Fortbestand des Lebens begünstigt. Die Biosphäre beeinflusst also über die Stoffwechselprodukte der Lebewesen die

physikalisch-chemischen Parameter Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre und erhält sich gleichsam selbst – zumindest bislang auf der Erde.

Unklar ist zudem, wie viele kritische Evolutionsschritte genommen werden müssen, damit technische Intelligenz möglich wird. (Auf der Erde waren es neben der Biogenese mindestens die Photosynthese mit der Produktion von Sauerstoff, die Entstehung von komplexen Zellen, von Sexualität, von Vielzellern, Landtieren und großen Gehirnen, die wiederum für Denken und Sprache notwendig sind). Schon die simple Tatsache eines Körperwachstums ist biologisch nicht trivial: Bis sich ein Kilogramm schwere Organismen gebildet haben, mussten auf der Erde viele Hundert Millionen Jahre vergehen.

Statistik mit einem einzigen Fall ...

Noch schwieriger ist es, die Anzahl von intelligenten Lebensformen mit technischen Fähigkeiten abzuschätzen sowie ihre Lebensdauer. Denn wir kennen bislang nur eine einzige solche Spezies – uns selbst.

Skeptiker sagen, mit einem einzelnen Fall, also $N = 1$, könne man keine Statistik treiben. Das ist nicht so, entgegnete der Radioastronom und SETI-Pionier Sebastian von Hoerner, »vorausgesetzt, dass wir die Regeln kennen und korrekt anwenden. Mit $N = 1$ können wir den Mittelwert abschätzen, und das ist eben der Einzelfall, den wir kennen. Folglich sollten wir annehmen, dass wir Durchschnitt sind. Aber andererseits haben wir mit $N = 1$ keine Möglichkeit, den mittleren Fehler abzuschätzen. Auf gut Deutsch heißt das: Unsere Annahme, wir seien Durchschnitt, hat die höchste Wahrscheinlichkeit, wahr zu sein, aber wir haben nicht die geringste Idee, wie falsch sie sein mag.« Insofern lassen sich also keine zuverlässigen Aussagen machen. »Trotzdem ist die Annahme unserer Durchschnittlichkeit nicht unsinnig. Wenn sie wahr ist, stehen die Chancen nicht schlecht, dass es auch auf anderen Planeten Leben gibt, mit dem wir kommunizieren könnten.«

Ward und Brownlee rechnen anders. »Es ist klar, dass viele der Größen nur schemenhaft bekannt sind«, schreiben sie. Aber: »Wenn sich ein einziger Faktor in der Drake-Gleichung dem Wert null nähert, dann liegt auch das Ergebnis nahe null.«

Hier wird ein Problem deutlich, das für die Drake-Gleichung noch allgemeiner gilt: das Postulat, die einzelnen Faktoren seien unabhängig, womit deren Multiplikation rasch zu sehr geringen Wahrscheinlichkeiten führt. Doch einiges spricht dagegen, von solchen absoluten Wahrscheinlichkeiten auszugehen. Vielmehr kann es sich um bedingte Wahrscheinlichkeiten handeln. Ein Ereignis mit geringer absoluter Wahrscheinlichkeit tritt nämlich dennoch oft häufiger auf als jede mögliche Alternative – insbesondere dann, wenn eine Reihe vorheriger Bedingungen gegeben ist. Freilich wissen wir im Fall der Drake-Gleichung noch viel zu wenig, welche Wahrscheinlichkeiten andere Wahrscheinlichkeiten bedingen. Das gilt besonders für die Frage nach der Häufigkeit der Entstehung von Leben und Intelligenz. Möglicherweise existieren viel mehr Wege zur Entwicklung von Lebensformen als Wege, die ein Sonnensystem lebensfrei belassen.

Statistisch lässt sich immerhin zeigen, dass es Tausende von extraterrestrischen Zivilisationen im Universum geben müsste, falls unsere irdische nicht die Erste ist. Wann und wo die anderen entstanden sind, ist damit aber nicht zu ermitteln.

Adam Frank von der University of Rochester in New York und Woodruff T. Sullivan III von der University of Washington in Seattle haben eine noch frappierendere Abschätzung publiziert: Wenn die Wahrscheinlichkeit eines Planeten mit einer Zivilisation größer ist als 1 zu 10^{24} , dann kann die Menschheit nicht allein im beobachtbaren Universum sein. Das leiteten die Astronomen aus der Tatsache ab, dass es darin über 10^{22} Sterne gibt. Daraus kann man allerdings nicht schließen, ob wir gerade »jetzt« allein sind. Obwohl sich die Forscher in ihrem wissenschaftlichen Artikel vorsichtig ausdrückten, hat Adam Frank das Resultat in der *New York Times* so zuge-

spitzt: »Auch wenn wir nicht wissen, ob eine fortgeschrittene extra-terrestrische Zivilisation in unserer Galaxis gegenwärtig existiert, haben wir inzwischen doch genug Informationen, um daraus zu schließen, dass es solche Intelligenzen fast sicher irgendwann in der kosmischen Geschichte gibt.«

Davon ist freilich nicht jeder überzeugt. So erwiderte Alan W. Schwartz von der Radboud-Universität Nijmegen in der von ihm herausgegebenen Zeitschrift *Origins of Life and Evolution of Biospheres*: »Man muss sich fragen, ob der Optimismus derart aufgebläht werden darf, so lange die Erforschung der Entstehung des Lebens noch immer kein überzeugendes präbiotisches Szenario für die Bildung der ersten RNA-Moleküle etablieren konnte.«

... oder unendliche Möglichkeiten

Amir D. Aczel setzt einen anderen Akzent. Er widerspricht der postulierten Seltenheit. Für den Mathematiker vom Bentley College in Waltham, Massachusetts ist die Frage nach außerirdischen Zivilisationen zwar ebenfalls eine Frage der Statistik, er zieht aber andere Schlüsse. Seiner Überzeugung nach muss die schon von den Mathematikern Blaise Pascal und Pierre de Fermat im 17. Jahrhundert gefundene Produktregel für die Vereinigung unabhängiger Ereignisse angewendet werden. Unabhängige Ereignisse sind solche, die sich in der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens nicht beeinflussen, zum Beispiel die Ergebnisse beim Werfen von Würfeln oder Münzen. Die Regel lautet: Die Wahrscheinlichkeit p von mindestens einem der Ereignisse A, B, C und so weiter ist gleich 1 minus p von nicht-A mal p von nicht-B mal p von nicht-C und so weiter. Zum Beispiel beträgt die Wahrscheinlichkeit, bei 24 Würfeln mit zwei Würfeln mindestens eine Doppel-Sechs zu erhalten $1 - (35:36)^{24} = 0,491$ oder 49,1 Prozent. Diese Regel zeigt, dass selbst sehr unwahrscheinliche Ereignisse mit einer Wahrscheinlichkeit von beinahe 1 auftreten, wenn es beliebig viele Ereignisse gibt, also wenn beispielsweise beliebig oft gewürfelt wird.

»Geben Sie einem Ereignis eine hinreichende Möglichkeit zu geschehen, so wird es das irgendwann tatsächlich tun«, sagt Aczel. Dies gelte auch für die Evolution von intelligenten technischen Zivilisationen im Kosmos. Mag die Wahrscheinlichkeit dafür noch so gering, die mit der Drake-Formel abzuschätzende Zahl also noch so klein sein, so wird die Wahrscheinlichkeit insgesamt doch nahe bei eins liegen, also bei 100 Prozent, weil so viele Sterne existieren. Im beobachtbaren Universum gibt es über 1000 Milliarden Galaxien – fast zehnmal so viele wie Sterne in der Milchstraße.

»Die Wahrscheinlichkeit für extraterrestrisches Leben hängt nicht von der tatsächlichen Zahl der Sterne im Universum ab, solange die Zahl sehr groß ist. Zwar mag die Wahrscheinlichkeit, dass es auf einem gegebenen Planeten Leben gibt, extrem klein sein, doch die Gesamtwahrscheinlichkeit dafür steigt stetig an, weil es so viele Orte gibt, auf denen wir danach suchen können. Diese Art von Konvergenz bei einer immer größeren Zahl von Versuchen treffen wir stets an, wenn wir die Regel für die Vereinigung von unabhängigen Ereignissen anwenden«, argumentiert Aczel.

Die aktuellen kosmologischen Daten sind sogar kompatibel damit, dass unser Universum unendlich groß ist. Aczel: »Wenn es unendlich viele Sterne gibt, ist die Wahrscheinlichkeit für außerirdisches Leben identisch gleich eins, und das gilt unabhängig davon, wie gering die Wahrscheinlichkeit für Leben auf irgendeinem Planeten ist, solange die Zahl nicht identisch null ist – und wir wissen, dass sie nicht null ist, da es uns gibt.«

Der Astrophysiker Joseph Silk von der University of Oxford stimmt zu: »Wenn das Universum unendlich ist, müsste es eine unendliche Anzahl von Planeten geben. In diesem Fall müsste sich zwangsläufig irgendwo Leben entwickelt haben, egal wie unwahrscheinlich es ist. Darüber hinaus könnte man logischerweise damit rechnen, dass es dort Lebensformen gibt, die unserer eigenen Intelligenz und Technologie weit überlegen sind.«

Das Argument lässt sich noch weitertreiben: Unter bestimmten Voraussetzungen – insbesondere der Gleichartigkeit der Naturgesetze in einer zusammenhängenden Raumzeit und der quantenphysikalisch begrenzten, also endlichen Menge von Zuständen in einem endlichen Volumen – muss es in einem unendlichen Universum nicht nur unendlich viele intelligente Zivilisationen geben, sondern sogar exakte Doppelgänger von uns selbst. (Der nächste wäre statistisch gesehen allerdings 10 hoch 10 hoch 29 Meter entfernt, das nächste Doppelgänger-Volumen mit 100 Lichtjahren Radius sogar 10 hoch 10 hoch 91 Meter.) »Mehr noch, alles, was denkbar wäre und nicht gegen die physikalischen Gesetze verstöße, würde es wirklich geben«, kommentiert der Astronaut Ulrich Walter, Raumfahrt-Professor an der Technischen Universität München. »Diese schier unfassbare Realität würde die einfache Aussage, es gibt viele außerirdische Intelligenzen, in eine ganz andere logische Dimension heben.«

Außerdem könnten unzählige weitere Universen existieren. Viele haben vielleicht andere Naturgesetze, in denen erdähnliches Leben unmöglich ist; in manchen könnte es hingegen Daseinsformen geben, die auszumalen unsere Fantasie viel zu begrenzt sein mag.

Unbekannte Faktoren

Schon während Drakes Konferenz 1961 wurde erwogen, dass womöglich nur der letzte Faktor seiner Gleichung relevant ist – insbesondere, wenn das Produkt der anderen Größen bei 1 liegt –, sodass die Zahl der galaktischen Zivilisationen ungefähr ihrer mittleren Lebensdauer entspräche. (Diese Hypothese »N Equals L« inspirierte Drake sogar zu NEqlsL als Wahl seines Fahrzeugkennzeichens.) »Alle unsere Argumente hinsichtlich des Werts von $f_1 \cdot f_i \cdot f_c$ verblasen angesichts der Unsicherheit von L«, schrieb der Astronom Carl Sagan 1973, der an der Konferenz teilgenommen hatte.

Doch L kann für SETI irreführend sein. Denn auch ausgestorbene Zivilisationen lassen sich möglicherweise noch aufspüren –

etwa, wenn ihre Sender weiterfunken oder ihre planetaren beziehungsweise sogar interstellaren Hinterlassenschaften entdeckt würden. In dieser Hinsicht ist also nicht die Lebensdauer, sondern eine Zeitspanne der Detektierbarkeit entscheidend. Nur wenn sie lang wäre, würde sie sich vielleicht mit unserer (bisherigen) Zivilisationsdauer überlappen.

»Die Drake-Gleichung behandelt lediglich die Anzahl der Orte, an denen ETs entstehen. Sie sagt nichts direkt über den Kontaktquerschnitt zwischen einer extraterrestrischen Zivilisation und der gegenwärtigen menschlichen Gesellschaft aus«, kritisierte der kalifornische Astrophysiker und SF-Autor David Brin. Dieser »Querschnitt« ist jedoch für SETI entscheidend. Daher wurden einige Modifikationen und Ergänzungen der Formel diskutiert.

Manche Aspekte machen einen Erfolg unwahrscheinlicher. So müssen ETs nicht nur kommunizieren können (oder anderweitig auf sich aufmerksam machen), sondern auch wollen, damit wir beispielsweise Radiosignale von ihnen empfangen. Deshalb schlug der Radioastronom Alexander Zaitsev von der Russischen Akademie der Wissenschaften in Moskau einen zusätzlichen METI-Faktor vor und plädierte für gezielte Radiosendungen von der Erde, um die Kommunikationschancen zu erhöhen (ein paar schickte er selbst los). Und umgekehrt reicht unser Fahndungsvermögen nicht aus, sondern es muss auch realisiert und praktiziert werden, und zwar möglichst umfassend. Folglich ist die Sendebereitschaft der ETs ein weiterer limitierender Faktor, ebenso unsere Suchbereitschaft, sodass N eher etwas über die Zahl der von SETI-Programmen abgetasteten Welten aussagen würde.

Der Historiker Harald Zaun hat in diesem Kontext vorgeschlagen, nicht nur als Scherz, einen weiteren Zusatzfaktor zu berücksichtigen. Er nannte ihn PB. Das steht für »Politician Bigotry« (und für die Nachnamen zweier US-Politiker). Denn politische Engstirnigkeit kann für SETI zum Störfaktor werden. So hat William Proxmire, Senator des Bundesstaats Wisconsin, ab 1978 SETI lächerlich

zu machen versucht und 1982 eine NASA-Finanzierung zu streichen veranlasst; das ließ sich damals noch rückgängig machen, nicht zuletzt durch einen von 70 renommierten Forschern, darunter sechs Nobelpreisträgern, unterzeichneten Protestbrief in der Fachzeitschrift *Science*. 1993 spottete Richard Bryan, Senator in Nevada, erneut über das NASA-Suchprogramm High Resolution Microwave Survey und erzwang dessen Ende – nicht einmal ein Jahr nach seinem Start, als bereits 15 Jahre an Vorbereitungszeit investiert worden waren und 60 Millionen Dollar an öffentlichen Geldern.

Andere Aspekte erhöhen hingegen die Chancen von SETI. So könnte Leben mehrfach in einem Planetensystem entstehen: auf mehreren Trabanten und sogar nacheinander auf demselben. Auch ist es nicht zwingend, dass es auf einem Planeten höchstens einmal intelligente Lebensformen oder technische Zivilisationen gibt. Die Evolution könnte beispielsweise nach einem Aussterben eine weitere zur Wissenschaft befähigte Spezies hervorbringen, falls die Zeit ausreicht; oder eine in die Steinzeit zurückgefallene Kultur erholt sich wieder.

Außerdem kommen für die Lebensentstehung große Monde mit Atmosphären in Betracht. Einerseits könnten sie riesige, selbst lebensfeindliche Gasplaneten in der habitablen Zone umkreisen (wie die bewaldeten Monde Endor und Yavin IV in den Filmen *Star Wars* von George Lucas oder Pandora in *Avatar* von James Cameron). Andererseits hat sich Leben vielleicht geschützt unter dem Eispanzer von Monden entwickelt, falls es dort Ozeane gibt (was im Sonnensystem bei Jupiters Trabanten Europa, Ganymed und Kallisto der Fall zu sein scheint, beim Saturnmond Europa und vielleicht Mimas sowie bei Neptuns Riesenmond Triton). Solche Überlegungen erweitern das Konzept der habitablen Zone oder stellen es infrage. Wasserbasierte Biochemie ist prinzipiell sogar unter der Oberfläche von Merkur denkbar oder in Kometen und den nach dem Astronomen Gerard P. Kuiper benannten Kuiper-Objekten jenseits von Neptun. Für eine Kohlenwasserstoff-Biochemie wird Saturns Groß-

mond Titan erörtert, der in mancher Hinsicht der Uerde ähnelt, eine dichte Stickstoff-Atmosphäre sowie Seen, Flüsse und festes Land besitzt. Ob solche Szenarien jedoch zu Lebewesen mit technischer Intelligenz führen könnten, darf bezweifelt werden.

Vor allem aber, und das ist der wichtigste Aspekt, erhöht sich die Zahl möglicher außerirdischer Sender oder Signaturen beträchtlich, wenn ETs – Lebensformen oder Roboter – den Weltraum kolonisieren. Darauf hat David Brin bereits 1983 hingewiesen und einen zusätzlichen Migrationsfaktor in die Diskussion gebracht. Insbesondere Maschinenzivilisationen können theoretisch leichter interstellare Raumfahrt betreiben, zudem außerhalb von Planeten existieren, sich selbst reproduzieren (und somit unabhängig von Lebewesen werden) und vielleicht sogar neues Leben erzeugen oder gezielt verbreiten (gerichtete Panspermie, wie sie die Biochemiker Francis Crick und Leslie Orgel 1973 erwogen haben).

Interstellare Migration und Kolonisation könnte so stark dominieren, dass sämtliche Faktoren in Drakes ursprünglicher Gleichung irrelevant oder obsolet würden. So sind vielleicht schon heute nahezu alle Sterne in der Milchstraße von robotischen Sonden besucht worden, die in deren Umgebung Ableger stationiert haben. Dann wäre quasi die gesamte Galaxis belebt oder zivilisiert, wenn auch künstlich. Gleichwohl könnten die Maschinen bloß von wenigen, unabhängig voneinander evolvierten Erbauern stammen, oder nur von einer einzigen technischen Kultur. Deshalb – sowie aus weiteren Gründen, etwa denkbaren Superzivilisationen, die über gigantische Distanzen auffindbar wären und von der Drake-Gleichung ebenfalls nicht erfasst werden – sind Technosignaturen eventuell häufiger, länger vorhanden (sogar Biosphären oder Sterne überdauernd), einfacher detektierbar und weniger ambig als Biosignaturen.

Aus all diesen Kritik- und Ergänzungsaspekten folgt nicht, dass die Drake-Formel sinnlos und die Beschäftigung mit ihr Zeitverschwendung ist. Sie war weder zum genauen »Ausrechnen« intendiert noch wird sie sich jemals »lösen« lassen. Denn dazu müsste

man das ganze Universum kennen – und dann wäre sie unnötig. Vielmehr hat sie einen heuristischen Wert. Sie kann dabei helfen, den Möglichkeitsraum zu durchdenken (gerade auch aufgrund ihrer Limitationen) und Diskussionen zu strukturieren; zudem dient sie der populärwissenschaftlichen Veranschaulichung.

Für die praktische Suche ist die Drake-Gleichung ohnehin wertlos. Denn selbst wenn N bekannt wäre, wüsste man nicht, wo sich die ETs befinden. Man müsste trotzdem Stern für Stern absuchen wie auch den Raum dazwischen.

Ein postbiologisches Universum?

Zwar läuft die Jagd nach potenziellen extraterrestrischen Radio- und Laserbotschaften nun so effektiv und effizient wie nie zuvor, eine solche Suchaktion setzt aber Wesen mit einer technischen Intelligenz voraus, die entweder gezielt Nachrichten ins All funken oder Strahlungslecks als Nebenprodukt nicht verhindern können. Doch das ist sehr vermenschlichend gedacht und missversteht die Natur der ETs vielleicht völlig.

Natürlich muss man tun, was man kann, um ETs zu finden, wenn man das will, und zwar mit den Mitteln, die man hat. Falls die Außerirdischen mithilfe von Gravitationswellen oder in Extradimensionen oder gar telepathisch kommunizieren könnten, würde das die irdische Technologie oder das physikalische Wissen heute weit übersteigen. Andererseits muss man den spekulativen Spielraum der Fantasie offenhalten und so weit wie möglich über den terrestrischen Tellerrand hinausdenken. Und das geschieht auch. Denn extraterrestrische Zivilisationen könnten sich ganz anders verraten als ursprünglich gedacht.

Deshalb verändern sich zurzeit die Ideen, wonach man überhaupt fahnden kann und soll. Womöglich leben wir bereits in einem postbiologischen Universum, das von Künstlichen Intelligenzen, Cyborgs und Robotern beherrscht wird – oder von Superzivilisationen, die unser Vorstellungsvermögen weit übertreffen. Daher findet

bei SETI gerade ein Umdenken statt, fast schon ein Paradigmenwechsel.

Zentrales Thema ist die Künstliche Intelligenz (KI). In Gestalt der schon in den 1980er-Jahren formulierten artifiziellen neuronalen Netzwerken beziehungsweise deren Simulation zieht KI inzwischen in den Alltag ein und generiert neue Industriezweige, weil dank enorm gesteigerter Rechenkapazitäten das maschinelle Lernen zu erstaunlichen Resultaten führt.

In der astronomischen SETI-Forschung wurde KI relativ spät ein Thema, hauptsächlich nach dem Jahr 2000. Das spiegelt schlicht die irdische Praxis beziehungsweise deren Bedeutung in Anwendungen und Medien wider. In der Science Fiction waren intelligente Computer und Roboter bereits viele Jahrzehnte vorher ein beliebtes Thema; in der Philosophie wurde es ebenfalls seit den 1970er-Jahren intensiv diskutiert. Auch als Gebiet der Informatik ist Artificial Intelligence schon lange etabliert – der anfangs hochtrabend klingende Begriff wurde 1956 für das Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence eingeführt; das kleine Meeting am Dartmouth College in Hanover, New Hampshire, hatte der dortige Mathematik-Professor John McCarthy organisiert.

Mittlerweile ist KI nicht nur ein Gegenstand bei den Diskussionen um die mutmaßliche Natur der ETs. KI wird immer wichtiger auch in der Praxis der SETI-Projekte selbst. Das ist angesichts der wachsenden Datenmengen und -raten sinnvoll und bald unvermeidlich. Denn eine automatisierte und möglichst »intelligente« Analyse der von Teleskopen in zahlreichen Frequenzbereichen empfangenen Informationen ist nach menschlichem Ermessen kaum mehr zu leisten – und wäre auch Zeitverschwendung sowie in den meisten Fällen weniger valide. Trotzdem bleibt die Beteiligung unserer Gehirne unerlässlich. Aber die Wahrscheinlichkeit ist schon heute groß, dass das erste artifizielle Signal – egal ob als Botschaft oder Nebeneffekt – bei der Datenauswertung nicht von einem übermüdeten Studenten gefunden wird, sondern von einem

KI-Programm. Das hat Isaac Asimov bereits 1979 in seiner Kurzgeschichte *Es kommt (It Is Coming)* vorweggenommen, in welcher der irdische Supercomputer die Menschen pikanterweise als seine »Schoßtiere« betrachtet.

Die KI könnte auf den heimischen PCs von SETI-Enthusiasten laufen, die ihre ansonsten ungenutzte Rechenkapazität einem Citizen Science Project zur Verfügung stellen. Pionier ist hier das selbstgar nicht intelligente, aber intelligent gemachte und vermarktete Programm SETI@home. Dan Werthimer hatte es an der kalifornischen Berkeley University entwickelt. Es lief von 1999 bis 2020. Beteiligt waren insgesamt rund 1,8 Millionen Heimcomputer. Sie durchsuchten Daten, welche hauptsächlich vom Arecibo-Radioteleskop gewonnen wurden, nach artifiziiellen Mustern. Viele irdische Radiointerferenzen wurden gefunden und ein paar Hundert Signale genauer analysiert. Seit 2022 werden die Positionen von rund 90 davon mit dem Radioteleskop FAST in China nachbeobachtet.

Das Intelligenz-Prinzip

Bereits 2003 dachte der NASA-Historiker Steven J. Dick über ein postbiologisches Leben nach. »Das ist mehr als bloß eine Vermutung; es ist die Erkenntnis der Tatsache, dass die kulturelle Evolution genauso berücksichtigt werden muss wie die astronomischen und biologischen Komponenten der kosmischen Evolution«, schrieb er. Dick formulierte damals sogar ein allgemeines Intelligenz-Prinzip: »Die Erhaltung und Erweiterung von Wissen und Intelligenz ist die zentrale Triebkraft der kulturellen Evolution. Und soweit sich Intelligenz verbessern lässt, wird sie verbessert.«

Inzwischen haben andere Wissenschaftler diesen Ansatz aufgegriffen und ihn sowohl vor dem Hintergrund der gegenwärtigen rasanten Entwicklungen im Forschungsbereich der Künstlichen Intelligenz diskutiert als auch für SETI berücksichtigt. So argumentierte der Königlich Astronom Großbritanniens, Sir Martin Rees von der Cambridge University, auf einem Symposium 2015 bei Lon-

don, dass die Menschheit bereits an der Schwelle zu einer posthumanen Existenz stünde, also ihre Biologie transzendiere; offen bliebe allenfalls, ob diese organisch sei in Form von Cyborgs – eine Verschmelzung von Menschen und Maschinen – oder ganz anorganisch in Form von Robotern oder Nanomaschinen mit KI. Auch Mischformen sind denkbar – »biologische Artefakte« wie der sich selbst reparierende Schwarm aus metallischen Partikeln in Stanislaw Lems Roman *Der Unbesiegte* (1964).

Vielleicht erschaffen wir gerade unsere Nachfahren: die nächste intelligente Spezies auf der Erde, die unser kognitives Vermögen bei Weitem übersteigt. Das ist in noch eng begrenzten Bereichen sogar bereits der Fall, etwa bei komplexen Spielen wie Schach und Go, in denen die Künstliche Intelligenz inzwischen jeden Menschen übertrifft. In den 2020er-Jahren begann ein rasanter Aufschwung für die Produkte des maschinellen Lernens, den wenige Jahre vorher kaum jemand erwartet hatte (Übersetzungsprogramme, Sprachmodelle und neue Suchmaschinen, Kreativitätskombinatorik in Wort, Bild, Film und Musik) bis hin zur Robotik. Diese Entwicklung kann sich immer stärker beschleunigen und zu unabsehbaren Konsequenzen führen. Das haben KI-Forscher wie Hans Moravec, Ray Kurzweil oder Nick Bostrom nachdrücklich betont wie schon früher Stanislaw Ulam und Vernor Vinge. Außerdem würde eine rapide Technoevolution die natürliche Selektion gleichsam aushebeln oder radikal verändern.

»Ich gehe davon aus, dass unsere entfernten posthumanen Nachkommen nicht mehr organisch oder biologisch sein werden und dass sie den Planeten verlassen«, spekulierte Martin Rees in einem Essay aus dem Jahr 2017 weiter. »Das gibt uns einen Hinweis darauf, welche Richtung die SETI-Forschung einschlagen sollte. Warum? Weil an der Spitze der posthumanen Evolution superintelligente und ungemein fähige Maschinen stehen werden. Es gibt chemische und stoffwechselbedingte Grenzen für die Größe und Verarbeitungsleistung organischer Gehirne. Solche Grenzen existieren für

elektronische Rechenmaschinen jedoch nicht«, konstatierte er. »Hier könnte das Potenzial für eine weitere Entwicklung ebenso groß sein wie bei der Evolution von Einzellern hin zum Menschen.«

Anderswo kann dies längst geschehen sein. Denn die Erde ist nicht nur ein Planet unter Milliarden in der Milchstraße, sondern auch relativ jung: Leben im All ähnlich dem auf unserem Planeten hätte im Durchschnitt fast zwei Milliarden Jahre mehr Zeit gehabt als auf der Erde, um sich zu entwickeln. Falls die Evolution der menschlichen Intelligenz nicht eine einzigartige kosmische Ausnahme war oder – warum auch immer – besonders rasch im Universum erfolgte, müssten woanders weitaus früher technische Zivilisationen entstanden sein.

Vielleicht haben sich die meisten Völker durch ökologischen Raubbau oder verheerende Kriege selbst vernichtet, wie es die Menschheit zu tun droht. Doch es ist keineswegs zwingend, dass alle in einem solchen sozioplanetaren Flaschenhals stecken geblieben sind. Vielmehr könnten manche zu Superzivilisationen herangereift sein.

»Organische Intelligenz ist nur ein kurzes Zwischenspiel, bevor die Maschinen übernehmen«, meint Rees. Wenn die Leistung organischer Gehirne wie des menschlichen hinsichtlich Umfang und Intensität von Künstlichen Intelligenzen weit übertroffen werden, koppeln diese sich vielleicht rasch ab von der Biologie. Hard- und Software schlagen die »Wetware« der Gehirne. »Außerdem ist die Biosphäre für anorganische Künstliche Intelligenz nicht unbedingt notwendig – und tatsächlich sogar alles andere als optimal«, betont Rees. Im All gibt es einen größeren Konstruktionsspielraum. »Dieses Szenario impliziert, dass selbst dann, wenn nur die Erde Leben hervorgebracht hat, dieses Leben kein belangloses Merkmal des Kosmos bleiben muss: Die Menschen stehen vielleicht nicht am Ende, sondern am Anfang einer Entwicklung, die dazu führt, dass sich komplexere intelligente Lebensformen in der Galaxie ausbreiten.«

Kollektivintelligenzen oder rationale Maschinenhirne frei von individuellen menschlichen Eitelkeiten und destruktiven Monstro-

sitäten kolonisieren womöglich schon heute weite Bereiche des Weltraums. (Ob sie uns bereits entdeckt haben, bewusst aufgrund unserer Primitivität meiden, schlicht ignorieren oder aus der Ferne studieren, wäre dann eine alarmierende Frage.)

Drei Typen fortgeschrittener Zivilisationen

Die aktuellen Entwicklungen der Künstlichen Intelligenz machen mittlerweile die Spekulationen des SETI-Pioniers Nikolai S. Kardashev (deutsch oft Kardaschow) wesentlich plausibler als zu seiner Zeit. Angeregt von Freeman Dysons ab 1960 publizierten Hypothesen über artifizielle Megastrukturen bei anderen Sternen schlug Kardashev, der am Sternberg-Institut für Astronomie der Universität Moskau promoviert hatte, 1964 auf einer SETI-Konferenz in Armenien vor, extraterrestrische Zivilisationen anhand ihres verfügbaren Energie-Budgets zu charakterisieren. Drei Typen unterschied er dabei. Typ I ist eine planetare Zivilisation, die nahezu die ganze Energie des Sterns nutzt, die auf den Planeten trifft. Typ II ist eine stellare Zivilisation, der die gesamte Strahlungsleistung ihres Sterns zur Verfügung steht, die somit lokale Raumfahrt im großen Stil betreibt und mit Energiekollektoren rund um den Stern einen Großteil seines Strahlungsausstoßes einsammeln kann. Und Typ III ist eine galaktische Zivilisation, die den natürlichen Energieausstoß einer ganzen Galaxie zu nutzen weiß, diese also kolonisiert hat und gleichsam die meisten ihrer Sterne anzuzapfen vermag.

Kardashev hatte mit seiner Klassifikation, in der es um eine Abschätzung von Größenordnungen geht, hauptsächlich beabsichtigt, extraterrestrische Technologien anhand ihrer Strahlungsleistung für einen mutmaßlichen Rundumsender zu unterscheiden: Typ I bringt es auf 10^{16} Watt – was der Strahlungsleistung des Sonnenlichts entspricht, das auf die Erde trifft. Typ II hat mindestens 10^{26} Watt zur Verfügung – so viel wie die Sonne insgesamt. Und Typ III kann sich sogar über 10^{36} Watt leisten – so viel wie die Milchstraße, also alle Sterne in der Galaxis.

Kardashev schätzte, dass eine Typ-II-Zivilisation den Informationsgehalt einer Bibliothek in einer nur 100 Sekunden langen Sendung ringsum durch eine Galaxie schicken könnte. Bloß wenige Wochen wären nötig für einen intergalaktischen Umkreis von zehn Millionen Lichtjahren. Eine Typ-III-Zivilisation bräuchte sogar lediglich ein drei Sekunden kurzes Signal, um das ganze erreichbare Universum zu informieren (die Botschaft wäre dazu allerdings viele Milliarden Jahre lang unterwegs). Kardashev argumentierte daher, dass die Suche nach Signalen von Superzivilisationen des Typs II und III viel erfolgversprechender sei als SETI-Projekte, die nach Signalen von erdähnlichen Zivilisationen bei anderen Sternen fahnden. Er schlug auch vor, im Infraroten und Millimeter-Bereich zu schauen und nicht nur nach Radiowellen im Zentimeter-Bereich.

Außerdem unternahm Kardashev bereits 1963 den ersten sowjetischen SETI-Versuch. Dabei visierte er die variable Radioquelle CTA-102 an und dachte kurzfristig, sie sei ein Indiz für eine Superzivilisation vom Typ II oder III. Das machte weltweit Schlagzeilen, war aber ein falscher Alarm. Denn bald darauf zeigten Beobachtungen am Observatorium auf dem Mount Palomar in Kalifornien, dass CTA-102 ein Quasar ist – also das Zentrum einer Aktiven Galaxie. Dort wird Materie von einem supermassereichen Schwarzen Loch verschlungen, was ein heftiges Energiegewitter entfesselt.

Von der Menschheit zu Omega-Superzivilisationen

Carl Sagan hat 1973 Zwischenstufen in Nikolai Kardashevs Skala eingeführt. Er inter- und extrapolierte dessen Skalenwerte (K) mit der Formel $K = (\log_{10} W - 6) / 10$, wobei W die Leistung in Watt bezeichnet und \log_{10} den Logarithmus zur Basis 10. (Demnach entspricht $K = 0$ einer Leistung von einem Megawatt oder etwa 100 Lagerfeuern.)

Die Menschheit hat nach dieser Definition bereits den Zivilisationstyp 0,7 überschritten. Sagan begründete dies mit dem Sender des Arecibo-Teleskops auf Puerto Rico (10^{14} Watt) sowie mit dem

jährlichen Energieverbrauch weltweit. Der ist seither noch weiter angestiegen. 2023 waren es knapp 620 Exajoule (10^{18} oder Trillionen Joule), die »erneuerbaren« Energien eingeschlossen. Das entspricht einer Leistung von 20 Terawatt (10^{12} Watt). Wenn die gegenwärtige Zunahme von jährlich etwa zwei Prozent unverändert anhält, dann würde die Menschheit im Jahr 2500 den Kardashev-Typ I erreichen – doch das wäre auf der Erde allein unmöglich beziehungsweise hätte diese dann völlig ruiniert.

Sagan schlug außerdem vor, den Grad der sozialen Entwicklung zu formalisieren: ausgedrückt in der Informationsmenge, die eine Zivilisation verwendet. Er führte hierzu eine alphabetische Skala ein. Demnach würde eine Zivilisation der Klasse A 10^6 Bit nutzen (weniger als jede bekannte menschliche Kultur), eine der Klasse B 10^7 , eine der Klasse C 10^8 und so weiter. Damals hätte die Menschheit zur Klasse 0,7 H gehört; 2023 betrug die Gesamtmenge der Informationen im Internet schätzungsweise 120 Zettabyte, was auf der Skala 0,73 R/S entspricht. Sagan zufolge könnte die erste Zivilisation, die mit der Menschheit in Kontakt kommt, zwischen 1,5 J und 1,8 K liegen. Eine galaktische Superzivilisation befände sich auf der Stufe 3 Q. Eine Föderation von Galaxien wäre wohl auf 4 Z; doch Sagan meinte, dass das Universum noch nicht alt genug ist, um Informationen über so große Entfernungen hinweg effektiv auszutauschen.

Der Kosmologe John Barrow von der Cambridge University hat Kardashevs Klassifikation der Superzivilisationen 1998 erweitert. Über die Makromanipulatoren vom Typ I, II und III hinaus, die Planeten, Sterne oder ganze Galaxien umstrukturieren können, stellte er sich weitere Zivilisationen vom Typ IV, V ... bis Omega vor, die ganze Galaxiengruppen, -haufen, -superhaufen und sogar das gesamte Universum oder womöglich andere Universen zu manipulieren vermögen.

Außerdem klassifizierte Barrow Zivilisationen nach ihren Fähigkeiten, immer kleinere Gebilde zu kontrollieren: nicht nur makros-

kopische Objekte wie Hügel, Hütten oder Hüte (Typ –I, also »minus eins«), sondern auch Makromoleküle, etwa Gene (–II), Moleküle (–III), Atome (–IV), Atomkerne (–V), Elementarteilchen (–VI) und schließlich die Struktur von Raum und Zeit selbst (–Omega). Die Menschheit weist zwar bereits erste Aspekte einer Zivilisation vom Typ –V auf, hat aber trotzdem in der Nanotechnologie bislang noch kaum Erfahrungen. Diese hätte extreme Vorteile, bis hin zur interstellaren Raumfahrt: »Vielleicht sind die fortgeschrittensten Lebensformen im Universum so klein, dass sie von unseren astronomischen Messinstrumenten nicht entdeckt werden können. Vielleicht sind sie näher, als wir glauben?!«, überlegte Barrow.

Integration in die Umwelt

Man kann einen Zivilisationsfortschritt in vielerlei Hinsicht klassifizieren, nicht nur nach Energie und Größe. Ein weiteres Kriterium ist die Modifikation und Integration in die Umwelt. Diesen Vorschlag machte Valentin D. Ivanov vom Hauptquartier der Europäischen Südsternwarte in Garching bei München mit drei Kollegen im Jahr 2020. Ihnen zufolge nützt die Klasse 0 die Umwelt so, wie sie ist. Die Klasse 1 verändert die Umwelt nach den eigenen Bedürfnissen. Die Klasse 2 modifiziert sich selbst, um besser in die Umwelt zu passen. Und die Klasse 3 ist völlig mit der Umwelt verwoben. Diese Klassifikation steht gewissermaßen senkrecht zu der von Kardashev, bildet also eine zweite Dimension, denn die einzelnen Klassen sind jeweils weitgehend unabhängig voneinander. Die verfügbare Energie ist somit nicht der einzige Indikator eines Zivilisationsfortschritts und vielleicht nicht einmal der wichtigste.

Zur Klasse 0 gehören alle Organismen. Beispiele für Klasse 1 sind Bekleidung, Werkzeuge und Häuser anstelle von Höhlen. Auch Klasse 2 hat die Menschheit partiell längst erreicht: So tragen bereits fast ein Prozent der Personen in technischen Gesellschaften Prothesen in sich (Herzschrittmacher, künstliche Gelenke) und die Mehrzahl Zahnersatz und Brillen oder Kontaktlinsen; gezielte ge-

netische Manipulationen und technische Modifikationen bis hin zum Trans- und Posthumanismus wären weitere Schritte. Klasse 3 würde die Grenze zwischen Intelligenzen und ihrer Umwelt letztlich aufheben und vielleicht sogar approximativ die gesamte Materie im erreichbaren Universum zu einer denkenden Substanz verwandeln – der ultimative intelligente Kosmos (oder eine technokratische Form des Panpsychismus). Dieser Entwicklungsweg könnte einfacher und schneller sein als die Überwindung der vielen Größenordnungen in Kardashevs Energieskala, denn biologische Forschung und Biotechnologie erfordern viel weniger Energie als Teilchenphysik und astronomische Ingenieurskunst.

Diese Klassifikation schmälert die Aussichten von SETI, weil eine stärkere Integration in die Umwelt – statt ihrer Modifikation – mit einer Reduktion der detektierbaren Differenzen einhergeht. Technosignaturen würden womöglich ultimativ ununterscheidbar von natürlichen Phänomenen. »Daher bestehen die besten Chancen für SETI, nach starken Sendern zu suchen, die von Außerirdischen speziell für junge Zivilisationen errichtet wurden, wie wir eine sind«, meint Ivanovs Team. »Es bleibt aber eine Frage der Spekulation, ob fortgeschrittene Kulturen daran interessiert sind, mit uns zu kommunizieren. Die andere Möglichkeit ist, nach Zivilisationen zu suchen, die ungefähr auf demselben technologischen Niveau sind wie wir.«