

Aus

"Ecophysics" von J. Paul Wesley

The application of physics to ecology Illinois, 1974.

Autorisierte Übersetzung ins Deutsche von J. Walkiw

Aus Kapitel III, "An ecophysical definition of life and living"

EINE ÖKO-PHYSIKALISCHE DEFINITION DES LEBENS UND DES LEBENDEN
Während die Ökologie sich dem Studium lebender Organismen und ihren wechselseitigen Beziehungen widmet, sowie ihre Bedeutung für die Umwelt untersucht, haben wir es bei der Ökophysik mit der Anwendung der Physikwissenschaft auf die Ökologie zu tun. Dementsprechend soll hier eine diesem Sachverhalt angemessene Definition von Leben gefunden werden.

Was eine Definition grundsätzlich leisten sollte

Im allgemeinen sollte eine Definition möglichst explizit (ausdrücklich, umfassend) und einfach, sowie von größtmöglichem Nutzen sein. Das Schlüsselwort hier ist Nutzen. Die hier gesuchte Definition sollte von möglichst großem Nutzen für das Studium der Ökophysik sein.

Um mit dem Kürzel "Physik" in Öko-Physik kompatibel zu sein, sollte die Definition der Eigenschaft Leben auf ein (beliebiges) physikalisches System anwendbar sein, unter Verwendung ausschließlich physikalischer Parameter. Um dem "Öko" in Öko-Physik Genüge zu tun, sollte die Definition der Eigenschaft Leben ausschließlich von der Art der Wechselwirkungen (Interaktionen) eines physikalischen Systems mit dem Rest des Kosmos (Universums) bestimmt sein. Ein lebendes System ist so als „black box“ anzusehen. Das Interesse ist somit weitgehendst darauf gerichtet, was ein System tut oder leistet, und weniger auf die innere Beschaffenheit des Systems.

Einige bedeutsame thermodynamische und ökologische Betrachtungen über das Leben

Die Beobachtung bekannter lebender Organismen aus unserer Umwelt zeigt, daß sie offene thermodynamische Systeme darstellen, die sowohl Materie wie auch Energie mit ihrer Umwelt austauschen. Solche Organismen sind aus Atomen zusammengesetzt, die ursprünglich aus dem Umfeld dieser Organismen stammen. Die Entropie dieser Atome in den Organismen ist niedriger als die Entropie der gleichen Atome in ihrer ursprünglichen Umgebung.

Autotrophe Organismen wie Grünpflanzen wandeln unter Lichteinwirkung CO_2 und H_2O hoher Entropie in O_2 hoher Entropie und Bestandteile niedriger Entropie, wie Zellulose, um, die sie in ihrem Inneren ablagern. Allein die Beobachtung dieses Vorgangs läßt eine klare Verringerung der Entropie auf der Erdoberfläche erkennen. Die meisten dieser in den Autotrophen abgelagerten Verbindungen von niedriger Entropie werden schließlich in die Umwelt wieder eingeliedert. Die Atmung der Pflanzen gibt einige davon als CO_2

und H₂O direkt wieder an die Umgebung zurück. Einige dieser Verbindungen werden von Heterotrophen als Nahrung eingenommen und in der Folge oxydiert. Weitere werden durch Busch- und Waldbrände an die Umwelt zurückgegeben. Andere werden im oder als Müll oder Abfallprodukt ausgeschieden, abgelagert und in der Folge durch Aasfresser (people...) oder langsame atmosphärische Oxydation gebunden. Der Kreislauf von chemischen Verbindungen in der Ökosphäre ist allerdings fast ganz ausgeglichen (stationär), und so ergibt sich eine bedeutsame Verringerung in der Entropie der Erdoberfläche nur über geologische Zeitläufe hinweg (was im nächsten Kapitel weiter ausgeführt wird.)

Heterotrophe Organismen sind ebenfalls offene thermodynamische Systeme, die Materie und Energie mit der Umwelt austauschen. Sie sind ebenfalls aus Atomen zusammengesetzt, die ursprünglich aus ihrer Umgebung stammen, wobei diese Atome einen niedrigeren Entropiestand aufweisen, als die gleichen Atome in ihrem ursprünglichen Umfeld. Im Gegensatz zu den Autotrophen allerdings wandeln heterotrophe Organismen, unter Lichteinwirkung, Verbindungen niederen Entropiegrades in Verbindungen hoher Entropie um, die dann an die Umwelt zurückgegeben werden. Dieser Vorgang - allein für sich genommen - ist dazu geeignet die Entropie der Erdoberfläche zu vergrößern. Wie auch immer, berücksichtigt man den nahezu stationären Zustand des Kreislaufs der Verbindungen in der Ökosphäre, kommt man zum Schluß, daß Heterotrophe offenbar, über die Jahrhunderte hinweg, zur Verringerung der Entropie auf der Erdoberfläche beitragen.

Eine ökophysikalische Definition des Begriffs „Leben“

In Anbetracht der bisher angestellten Betrachtungen, wird hier die folgende ökophysikalische Definition von Leben vorgeschlagen: Leben wird als Eigenschaft eines thermodynamischen Systems definiert, das

1. offen ist, indem es Energie und/oder Materie mit der Umwelt austauscht,
2. aus Atomen besteht, deren Entropie im jeweiligen thermodynamischen System niedriger ist, als die Entropie der gleichen Atome im ursprünglichen Umfeld, und
3. einen Teil des allgegenwärtigen, langzeitigen, ganze geologische Epochen umfassenden Vorgangs der Entropieverringerung in der Ökosphäre darstellt.

Diese ökophysikalische Definition von Leben ist zunächst als deskriptiver Leitfaden anzusehen; sie kann nicht als völlig zufriedenstellend gelten. Es kann, zum Beispiel, oft schwer zu entscheiden sein, ob ein gegebenes System in der allgemeinen Entropiebilanz der Ökosphäre tatsächlich eine Rolle spielt. Zum anderen läßt sie offen, wie niedrig die Entropie des inneren Zustands eines Systems genau sein muß, um dieses schon als lebend bezeichnen zu können. Aufgrund der durch das Elektronenmikroskop entdeckten kristallähnlichen Anordnung der Moleküle in Kleinslebewesen (Mollusken), wird hier angenommen, daß Leben eine Eigenschaft physikalischer Systeme ist, die sich im Wesentlichen *in festem Zustand befinden* oder diesem sehr nahekommen.

Der alltägliche Gebrauch des Begriffs Leben und die ökophysikalische Definition

Eine einzelne Definition von Leben, die alle Möglichkeiten abdeckt, in denen dieses Wort normal verwendet wird, ist offensichtlich unmöglich. Die Wahl einer adäquaten Definition wird im Übrigen noch von der starken emotionalen Aura, die dieses Wort umgibt, erschwert. Viele Bedeutungen dieses Wortes beziehen sich auf inneres, persönliches oder geistiges Leben, das hier für unsere Zwecke nicht herangezogen zu werden braucht.

Im alltäglichen Gebrauch wird das Wort Leben in einem *anthropomorphen* Sinn verwendet. Ein Stein ist nicht lebendig, da er sich nicht bewegt oder wächst, und nichts zu tun scheint. Pflanzen geltend als lebend, weil sie, wie der Mensch, wachsen, und weil man sie töten kann, wie Menschen auch. Tiere, die sich bewegen, sind „mehr“ lebend als Pflanzen, die sich nicht bewegen. Wirbeltiere sind „mehr“ lebend als Mollusken. Ein intelligenter Schimpanse ist „mehr“ lebend als ein „unintelligenter“ tumber Barsch, usw. Der alltägliche Begriff des Lebens gründet auf makroskopischen Beobachtungen des Verhaltens makroskopischer Objekte. Der alltägliche Begriff des Lebens kommt ohne das Wissen um die Existenz von Zellen und chemisches Fachwissen aus. In dieser Hinsicht ist der ökophysikalische Begriff des Lebens kompatibel mit dem alltäglichen Gebrauch dieses Wortes, insofern er sich in der Hauptsache darauf bezieht, was ein System tut und nicht auf die Besonderheiten seiner jeweiligen inneren Struktur oder Chemie.

Um dies noch klarer zu machen, seien hier zwei hypothetische Beispiele angeführt. Zum ersten: Nehmen wir an, ein kluger Kopf hätte es zuwege gebracht, Roboter aus Stahl, Messing, Plastik, usw., zu bauen, die sich wie Menschen bewegen, wie diese zu handeln und denken imstande wären. Solange man sie nicht auseinandernähme, würde man keine Unterschiede zum Menschen bemerken können. Solche Roboter, die man nicht von Menschen unterscheiden könnte, würden als Menschen angesehen und folglich als lebende Wesen (=Lebewesen) gelten. Der alltägliche Begriff von Leben, wie auch seine ökophysikalische Definition, bezieht sich auf das dynamische Verhalten eines Objekts und nicht auf seine besondere innere Struktur und Chemie.

Ein weiteres Beispiel: Ein Weltraumfahrer landet auf dem Mars und wird, nach Verlassen des Raumschiffs, sofort von einem siebenarmigen, purpurfarbenen Marswesen angegriffen. Um sich selbst zu schützen, tötet der Raumfahrer den Marsianer mit seiner Laserpistole. Allein das Verhalten des Objekts wies dieses als lebend aus, sowohl im alltäglichen wie auch im ökophysikalischen Sinn des Wortes, ganz absehend von der Beschaffenheit seiner inneren Struktur.

Es ist nicht bloß eine Verirrung der menschlichen Sprache, wenn eine Telefonleitung, die nicht funktioniert, als tot bezeichnet wird, von einem Abwürgen oder Absterben des Motors gesprochen wird, von einer zum Leben erweckten Maschine. Das sind, in der Tat, akkurate Anwendungen des alltäglichen Begriffs von Leben, die gleichzeitig im ökophysikalischen Sinn richtig sind.

Die vorliegende Definition von Leben kommt der wahren Bedeutung dessen, was allgemein unter Leben verstanden wird, näher, als jede andere bisher vorgeschlagene wissenschaftliche Definition.

Einige enger gefaßte wissenschaftliche Definitionen des Lebens

Beim Versuch, eine wissenschaftliche Definition von Leben zu finden, wurden immer wieder einige einschlägige Merkmale vorgeschlagen. Im folgenden eine Teilliste von Merkmalen, die häufig vorgeschlagen worden sind:

- 1. Kohlenstoff-Chemie:** Der Ausdruck Organische Chemie entstand vor gut zweihundert Jahren aufgrund des ursprünglichen Glaubens, daß allein sie mit dem Phänomen Leben in Verbindung stünde. Heute wird sie einfach mit dem allgemeineren Begriff Kohlenstoff-Chemie bezeichnet.
Es gibt jedoch immer noch den weit verbreiteten Glauben, daß Leben notwendigerweise auf Kohlenstoff-Chemie basieren müsse. Entsprechend diesem Glauben wäre dies das definierende Merkmal für Leben.
- 2. Fortpflanzung:** Viele Biologen (e.g. Fox, 1971) bevorzugen als definierendes Kriterium für Leben die Fähigkeit zur Fortpflanzung (Selbst-Reproduktion). Für Genetiker ist das Leben ein sich selbst reproduzierendes System, das in sich selbst die für die eigene Fortpflanzung notwendige Information trägt. Während Kristalle normalerweise durch Selbst-Reproduktion wachsen, und daher nach dieser Definition als lebend gelten würden, dürfte diese Definition offenbar die Möglichkeit ausschließen, Maschinen Leben zuzusprechen.
- 3. Tod:** Es wird häufig angenommen, daß, abgesehen von Keimzellen oder Samen, jeder Organismus schließlich sterben müsse, um der Reproduktion und Evolution Raum zu geben.
- 4. Genetischer Code:** Daß Lebewesen Träger von Information sind und diese an zukünftige Generationen weitergeben, wodurch sie deren Beschaffenheit bestimmen, wird häufig als einzigartiger Aspekt des Lebens betrachtet. Als definierendes Merkmal von Leben wird hier die Existenz eines genetischen Codes angenommen, der Selbst-Reproduktion ermöglicht.
- 5. Fähigkeit zur Evolution:** Die Fähigkeit einer bestimmten Linie einer Spezies, sich weiterzuentwickeln, wird häufig als definierende Eigenschaft von Leben erachtet. Es wird angenommen, daß zufällige Änderungen im genetischen Code zufällige Änderungen im Charakter individueller Organismen bewirken. Es wird angenommen, daß in der Folge durch natürliche Selektion nur jene Individuen mit dem höchsten Überlebenspotential zum Zuge kommen.
- 6. Proteine und Aminosäuren :** Da Proteine und Aminosäuren die wesentlichen Bausteine des auf Kohlenstoff basierenden Lebens sind, wird manchmal vorgeschlagen, die Anwesenheit von Proteinen und Aminosäuren als Entscheidungshilfe bei der Unterscheidung des Lebenden vom Nicht-Lebenden

anzusehen. (e.g. Schwartz, 1971).

7. **Optische Aktivität:** Da gewöhnlich die in lebenden, auf Kohlenstoffchemie basierenden Organismen gefundenen Proteine eine besondere spiralförmige (*helikale*) Symmetrie besitzen, ist vorgeschlagen worden (Stryer, 1966), bei der Suche nach außerirdischem Leben nach optisch aktiven Proteinen Ausschau zu halten.
8. **DNS:** Da es scheint, daß der genetische Code des auf Kohlenstoffchemie basierenden Lebens von DNS-Molekülen dargestellt wird, wurde vorgeschlagen, die DNS als grundlegendes Wesensmerkmal des Lebens anzusehen.
9. **Metabolismus:** Es ist herrschende Auffassung, daß in die Definition von Leben die dynamische Natur des Lebens Einlaß finden sollte. Die Nutzung (Zufuhr) von Energie und Nahrung zum Aufbau von Strukturen und zur Aufrechterhaltung verschiedener (Lebens-) Prozesse wurde oft als einer der wesentlichen Aspekte des Lebens angesehen.
10. **Enzyme:** Gelegentlich wurde die Ansicht ausgesprochen, daß der grundlegende Lebensprozeß in der Hauptsache ein enzymatischer Prozeß sei.
11. **Zellen und Membranen:** Seit der anfänglichen Entdeckung der zellularen Natur des größten Teils des auf Kohlenstoff basierenden Lebens, wurde allgemein angenommen, daß Lebewesen aus Zellen bestehen müssen. Insbesondere wird angenommen, daß die hochselektiven Funktionen der Membranen für Leben unabdingbar seien (Oparin, 1971).
12. **Reaktion auf Stimuli:** Häufig wird angenommen, daß eine hervorragende Eigenschaft des Lebens seine Fähigkeit sei, auf Reize zu antworten. Es wird allgemein angenommen, daß der Respons die Überlebenschancen des Organismus vergrößere. Während jedes physikalische System auf fast jeden Stimulus auf irgendeine Weise antworten wird, wird die Reaktion des nichtlebenden Systems auf Stimuli im allgemeinen, verglichen mit der eines lebenden, verhältnismäßig gering ausfallen.

Alle diese Merkmale sind mit der eingangs vorgeschlagenen allgemeinen ökophysikalischen Definition kompatibel. Die ökophysikalische Definition stellt also eine sehr weite Definition dar, während die in der obigen Liste aufgezählten Punkte zu engeren Definitionen von Leben führen. Während einige dieser engeren Definitionen in manchen begrenzten Feldern der Forschung von Wert sein dürften - wie z. B. in der Genetik, der Physiologie des auf Kohlenstoff basierenden Lebens sowie der Evolution des letzteren-, braucht man beim Studium der Ökophysik - *dem Studium physikalischer Systeme von niedriger innerer Entropie, die eine aktive Rolle in der Ökosphäre spielen* - keine solchen restriktiven Merkmale zu berücksichtigen (ausgenommen möglicherweise 3, 9 und 12 in der obigen Aufzählung).

Der Nutzen der ökophysikalischen Definition des Lebens

Die thermodynamischen Gesetze gehören zu den allgemeinsten, grundlegendsten und fruchtbarsten wissenschaftlichen Gesetzen. Sie sind gleichermaßen auf einfache wie auch komplexe Systeme anwendbar. Die vorliegende Definition von Leben, die auf diesen Grundprinzipien basiert, ist so weit gefaßt wie möglich und dürfte sich als wissenschaftlich fruchtbar erweisen.

Die Beziehung von Leben zu seinem Umfeld ist vor allem eine thermodynamische Beziehung. Daher dürfte sich für das Studium der Ökologie eine Definition von Leben, die auf der thermodynamischen Rolle basiert, die das Leben für seine Umwelt spielt, als sehr produktiv erweisen.

Die hier vorgeschlagene Definition von Leben ist ausreichend allgemein gehalten, um die Möglichkeit aktuell (effectiv) existierender, extrem fremder Lebensformen aufzuzeigen. Was auch immer die morphologischen oder chemischen Züge solch fremder Lebensform wären, sie würde stets noch von den gleichen thermodynamischen Gesetzen beherrscht, die das Leben hier auf Erden regieren. Zum Beispiel muß ein Roboter die gleichen thermodynamischen Bedürfnisse und das gleiche thermodynamische Verhalten aufweisen, wie gewöhnliches auf Kohlenstoffchemie basierendes Leben.

Die thermodynamische Definition betont das dynamische Verhalten lebender Systeme. Es zeigt, was ein lebendes System wahrscheinlich tun wird und wie es sich wahrscheinlich verhalten wird, ohne die Einzelheiten seiner inneren Struktur in Betracht zu ziehen. Die thermodynamischen Bedürfnisse des Menschen und aller anderen Lebensformen sind grundsätzlich die gleichen. Wo immer der Mensch auch hinkommen wird und was auch immer für fremden Lebensformen er begegnen wird - das thermodynamische Verhalten von Lebendem wird im Grunde stets voraussagbar sein.

Die Wahrscheinlichkeit, in einem bestimmten Umfeld Leben zu finden, hängt von den thermodynamischen Eigenschaften dieser Umwelt ab. Das Leben kann sich, vor allem, nur in einem Umfeld entwickeln, das ständig die Entropie des Universums um den Faktor Zeit vergrößert (was im nächsten Kapitel detaillierter besprochen wird).

Die vorgeschlagene Definition zeigt, daß die Entropie von Verbindungen, die aus einem ursprünglichen Umfeld stammen, reduziert werden muß, bevor diese in ein lebendes System eingegliedert werden können. Folglich muß Energie von einem Zustand hohen Nutzens in einen Zustand niederen Nutzens übergeführt werden. Mit anderen Worten, die Definition zeigt, daß Leben zu seiner Existenz einen steten Nachschub an Energie benötigt.

Die thermodynamische Rolle von Maschinen in der Ökosphäre gewinnt zunehmend an Bedeutung. Als Beispiel sei angemerkt, daß das Verbrennen flüssiger Brennstoffe, an dem die Maschinen zu einem großen Bruchteil beteiligt sind, zu einer 13%-igen Steigerung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre geführt hat, in einem Zeitraum von (nur) 50 Jahren (Sawyer, 1972). Es ist relativ einfach, sich eine zukünftige Technologie vorzustellen, wo alle Funktionen des Menschen durch Maschinen und Roboter übernommen werden. Ein solches System von Maschinen ist kompatibel mit der hier dargelegten Definition von Leben. Solches Maschinenleben ist bei seinem Aufbau und

seinem Energiebedarf nicht von der Kohlenstoff-Chemie abhängig, da Sonnenenergie und nuklearer Brennstoff ein solches System mit Energie versorgen können.

Da Maschinen in das vorliegende ökophysikalische Konzept des Lebens mit eingeschlossen werden können, ist es möglich, die Koexistenz von Maschinen und Menschen zu studieren, wobei hier Maschinen wie jede andere wettbewerbsfähige Spezies behandelt werden (*siehe Kapitel IX für eine weitergehende Erörterung dieses Themas*).

Jegliche Voraussage über die Zukunft der irdischen Biosphäre wäre völlig unrealistisch, würde man die Maschinen hier nicht mitberücksichtigen - als eine signifikante Form ökophysikalischen Lebens. Sie beanspruchen Raum. Sie verschmutzen die Luft, den Boden, Ströme, Flüsse, Seen, Ozeane mit ihren Absonderungen. Die vorliegende ökophysikalische Definition des Lebens erlaubt eine realistischere Behandlung des Verhältnisses der Maschinen zu allen anderen Lebensformen.

Tod, Reproduktion und Evolution ökophysikalischen Lebens

Tod, Reproduktion und Evolution sind allgemeine Merkmale ökophysikalischen Lebens. Jeder individuelle Organismus oder lebendes System wird aus dem einen oder anderen Grund zu funktionieren aufhören, dank Unfällen, Verschleiß, oder planmäßiger Substitution wegen Überalterung. Wenn ein individuelles System aufhört zu funktionieren, kann man davon sprechen, daß es stirbt.

Ein lebensfähiges Ökosystem muß dafür sorgen, daß lebende Systeme, die absterben, ersetzt werden. Mit anderen Worten, ökophysikalisches Leben muß ganz allgemein für Reproduktion sorgen. Während Leben, das auf Kohlenstoffchemie basiert, selbst für seine Fortpflanzung sorgt, sind andere Formen ökophysikalischen Lebens nicht dazu imstande. Viren, z. B., liefern nur ihre eigenen Blaupausen (Baupläne) und bringen so ihre Wirtszelle dazu, weitere Virenpartikel zu produzieren. Autos und andere Maschinen werden in Fabriken reproduziert, die die Baupläne für ihre Herstellung besitzen. Nicht nur kohlenstoff-gebundenes Leben hat evolutioniert (während der letzten 4 Milliarden Jahre), auch Maschinenleben hat evolutioniert (während der letzten 4 Tausend Jahre).

Der Prozeß der natürlichen Selektion ist der gleiche für beide Lebensformen, wobei die Mechanismen zur Produktion von Devianten für jede dieser Lebensformen völlig verschieden voneinander sind (*siehe Kapitel VIII und IX*).

Systeme die als lebend angesehen werden, die jedoch ökophysikalisch tot sind.

Wie offen die ökophysikalische Definition von Leben auch ist, es gibt einen Fall, wo ein System, das manchmal als lebend angesehen wird, im ökophysikalischen Sinn tot ist. Eine gefrorene Amöbe, z. B., die weder Materie noch Energie mit ihrer Umwelt austauscht, ist, im Sinne der ökophysikalischen Definition, *nicht-lebend*. Diese gefrorene Amöbe hat jedoch das *Potential* zum Leben, da man sie wieder auftauen kann und sie folglich wieder ein offenes thermodynamisches System darstellen wird, das fähig ist, normale Lebensprozesse in Gang zu halten. Ähnlich können manche Sporen für ökophysikalisch tot angesehen werden - für alle praktischen Zwecke.

Komplexität, Ordnung und Leben

Ab und zu wird die Überzeugung laut, Komplexität sei eine definierende Eigenschaft des Lebens. Z. B. wird manchmal behauptet, Leben müsse auf Kohlenstoff-Chemie gründen, weil nur diese die (für Leben) erforderliche Komplexität bieten würde. Das - allerdings - ist ein Irrtum! Kohlenstoffgebundenes Leben, wie ökophysikalisches Leben allgemein, sind einfache Systeme, die aus einer komplexen Umwelt stammen.

Der Irrtum entsteht aus einem Mißverstehen dessen, was *komplex* und was *einfach* ist. Um Naturphänomene angemessen zu beschreiben, muß man das Wort komplex in seinem strengen, eindeutigen, statistisch-mechanischen Sinn nehmen. Der genaue Zustand eines Systems ist spezifiziert (Ein System gilt als vollständig beschrieben...), wenn die Momente und Positionen aller Atome des Systems bekannt sind. Die Komplexität eines Systems könnte dann die Anzahl selbständiger unabhängiger Sätze (Aussagen) sein, die nötig sind, um das System vollständig zu beschreiben. Eine kleine Menge einer reinen Substanz in gasförmigem Zustand ist deshalb komplex, weil die Position und der Impuls eines jeden Moleküls einzeln spezifiziert werden müssen.

In diesem Fall sind $6N_0$ (wobei $N_0 = 6.02 \times 10^{23}$ Avogadros Zahl ist) Sätze zur vollen Spezifizierung nötig.

Ein perfekter Kristall der gleichen Substanz ist andererseits sehr einfach (wenn man von kleineren Schwingungen absieht), weil der genaue Zustand des Kristalls durch die Abmessungen der Gitterräume, die Position des Kristalls und die Ausrichtung des Kristalls spezifiziert werden kann - wofür in diesen Fall nicht mehr als 9 bis 24 Sätze nötig sind.

Auch die Entropie ist ein Maß für die Komplexität eines Systems: je größer die Entropie, desto größer die Komplexität. Die Ordnung eines Systems könnte durch eine angemessen große Konstante minus die Entropie ausgedrückt werden (oder: die Ordnung wird durch die Negentropie gemessen). Darum ist ein Gas komplex, besitzt hohe Entropie und ist nicht geordnet, während ein perfekter Kristall einfach ist, niedrige Entropie besitzt, und geordnet ist. Naiv betrachtet, könnte man geneigt sein, Gas als etwas einfaches anzusehen, da es scheint, als würde man nur drei Parameter benötigen (Temperatur, Druck und Dichte), um seinen Zustand vollständig zu beschreiben. Diese Sicht der Dinge

ist - allerdings - ein großer Irrtum (siehe Diskussion in Kapitel I).

Da Lebendes aus Atomen niedrigerer Entropie besteht, als in der ursprünglichen Umgebung, ist das Lebende einfacher als die Umwelt, aus der es gekommen ist. Eine korrekte, richtige Sicht von Leben ist also mit dem Begriff *Einfachheit* zu verbinden, und nicht mit Komplexität.

Wachsende Kristalle, die einfachste Form ökophysikalischen Lebens

Ein Salzkristall, das in einer gesättigten Lösung wächst, entspricht den vorliegenden Kriterien des ökophysikalischen Lebens, vorausgesetzt es gibt ein solches in einer Ökosphäre. Ein solcher Kristall ist ein offenes thermodynamisches System, im Prozeß des Austauschs von Materie und Energie. Die Ionen in einer Lösung befinden sich in einem ungeordneten Zustand hoher Entropie. Diese Ionen bilden dann einen Kristall von sehr hoher Ordnung und niedriger Entropie. Um aufzuzeigen, daß wachsenden Kristallen das Attribut Leben durchaus zukommt, seien hier einige Punkte angemerkt:

Elektronenmikroskope enthüllen die Tatsache, daß gewöhnliches Leben viele kristalline Eigenschaften aufweist. Bei Organellen stellt man z.B. fest, daß sie ein geordnetes Gefüge komplexer Moleküle aufweisen (e.g. Fischman und Weinbaum, 1967). Das legt die Möglichkeit nahe, daß gewöhnliches, auf Kohlenstoffchemie basierendes Leben von Natur aus grundlegend kristallin sei, was der im ersten Drittel unseres Jahrhunderts vorherrschenden Meinung zuwiderläuft, Leben sei im Grunde eine Lösung oder Suppe, genannt Protoplasma.

Wachsende Kristalle, wie jede Form ökophysikalischen Lebens, können eine bedeutende Rolle in der Thermodynamik der Erdoberfläche spielen, und können daher in bedeutsame Wechselwirkungen mit den auf Kohlenstoffchemie basierenden, üblicherweise als Lebensformen bezeichneten Organismen treten. Zum Beispiel ist allgemein bekannt, daß die Kristallisation des Wassers eine wichtige Rolle für die Lebensprozesse auf der Erde spielt.

Es ist bedeutsam, daß Kristalle nur in einer Umgebung wachsen können, die den Ablauf Entropie-vermindernder Prozesse gestattet, was ja ganz allgemein für alle Lebensprozesse gilt. Es ist denkbar (und könnte effektive Aktualität sein), daß wachsende Kristalle und gewöhnliches, kohlenstoffbasierendes Leben gleiche Energieformen und gleiche chemische Verbindungen benötigen und nutzen, und daher in Konkurrenz zueinander stehen.

Kristalle aus den verschiedensten Verbindungen haben sich in der Erde als Erze von niedriger Entropie abgelagert. Diese Lagerstätten werden von Mensch und Maschine genutzt. In diesem Zusammenhang können wachsende Kristalle als autotrophe Organismen angesehen werden, deren tote Hüllen als Nahrung für fortgeschrittenere Heterotrophe dienen. Kohle ist eine besonders wichtiges Beispiel für ein solches entropiearmes Erz.

Es scheint, daß die Kristallbildung in der Natur unter gewöhnlichen Umständen nicht spontan erfolgt. Wie bei gewöhnlichen Lebensformen ist hierzu ein Samen, Nukleus,

Keim oder Mutter-Kristall vonnöten. Während des Ersten Weltkriegs waren die Amerikaner, zum Beispiel, nicht fähig TNT (Trinitrotoluene) in kristalliner Form zu synthetisieren. Erst nachdem man kristallines TNT aus einer deutschen Blindgänger-Granate in die USA importierte, wurde es möglich, kristallines TNT herzustellen. Heutzutage gibt es jederzeit genügend Keime (Nuklei) in der Luft, um TNT problemlos herzustellen. Während es unter Laborbedingungen möglich ist, Kristalle aus einem Samen von chemisch fremden Material zu züchten (das jedoch gewöhnlich über eine ähnliche Struktur verfügen muß), bereitet es doch Schwierigkeiten und ist oft nicht zu erreichen. Solche Phänomene kommen in der Natur selten vor.

Solare Energie von hohem Nutzwert, in der Form von Wärmeenergie, hat das Potential dafür gebildet, daß auf der Erdoberfläche - seit die Erde, vor vier einhalb Milliarden Jahren, zum ersten Mal zu ihrer jetzigen Form abkühlte - lebensbildende Ordnungsprozesse stattfinden können. Die Spekulation sei erlaubt, daß gerade die wachsenden Kristalle die frühesten Lebensformen darstellten. Frühe Evolution mag durchaus ganz einfach in der kompetitiven Kristallisation (und/oder Polymerisation) von Aminosäuren bestanden haben (Cairns-Smith, 1971).

Die Suche nach einem kontinuierlichen Maß für „Leben“

Ein jegliches Phänomen, das mit ihm verbundene dichotomische und kontinuierliche Variable aufweist, kann zufriedenstellender verstanden werden, wenn man sich auf die kontinuierlichen Variablen stärker konzentriert als auf die dichotomischen (siehe Kapitel XI für eine weitere Behandlung dieses Punkts). So ist die Dichotomie zwischen Leben und Nicht-Leben (oder Tod) oder zwischen „belebt“ und „unbelebt“ am besten durch eine kontinuierliche Skala dargestellt. So können in der Folge Systeme als „mehr“ oder „weniger“ lebend oder „unbelebt“ betrachtet werden. Das Wort, das hier für ein solches kontinuierliches Maß vorgeschlagen wird, ist „lebend“. Genauso gut könnte man Wörter wie „Lebendigkeit“, „Vitalität“, oder „Belebtsein“ wählen. Die dichotomische Betrachtungsweise von Leben kann dabei noch dadurch zum Ausdruck gebracht erhalten werden, daß man die kontinuierliche Skala des Lebenden in zwei Teile aufbricht, wobei die kleineren Werte (die auch negativ sein können) einen Mangel an Leben ausdrücken und die größeren Werte das Vorhandensein von Leben anzeigen könnten.

Im Einklang mit der hier gegebenen ökophysikalischen Definition von Leben, sollte die Eigenschaft „Leben“ eine Wechselwirkung des lebenden Systems mit dem übrigen Kosmos voraussetzen. Das setzt wiederum Prozesse voraus, die in der Zeit stattfinden. Insbesondere wird vorausgesetzt, daß Leben ein Prozess ist, der anhält (effektiv abläuft). Wenn der Prozeß zum Stillstand kommt, hört das Leben(de) auf. Insofern die Zeitgrößen des Wechsels der kontinuierlichen Variablen und des Fließens von kontinuierlichen Quantitäten ebenfalls kontinuierlich sind, sollte ein kontinuierliches Maß des Lebenden eine Funktion des Energieflusses, des Materieaustauschs oder ähnlicher solcher quantitativer Größen in und aus dem System sein.

Ein Maßstab für "Leben"

Aus den bisherigen Überlegungen ergibt sich, daß das Leben, vor allem, als die Erhaltung eines inneren Zustands niedriger Entropie oder höherer Ordnung interpretiert wird. Eine solche Auffassung beinhaltet eine von der Zeit unabhängige Eigenschaft oder Größe, den Begriff eines statischen oder stationären Zustands. Die zweite Eigenschaft bringt die Rate oder den Grad, in dem ein System mit dem Rest des Ökosystems verbunden ist, zum Ausdruck. Das Maß für das Lebende L wird dann mit der Formel

$$L = (\text{Stationärer Zustand}) \times (\text{Grad der Anbindung}) \quad (III.1)$$

wiedergegeben. Das Maß des Grads oder des inneren stationären Zustands dürfte als die Differenz zwischen der inneren Entropie S_1 im Vergleich zu einem standardmäßigen hohen Entropiezustand der selben Atome S_0 (zum Beispiel, die Entropie derselben Atome wie sie normalerweise in der Umwelt vorkommen) angenommen werden, sodaß

$$(\text{Stationärer Zustand}) = 1 - S_1/S_0 \quad (III.2)$$

Die Größe der Anbindung/Ankoppelung an das Ökosystem kann nicht so einfach dargestellt werden. Für die momentanen Zwecke ist es aber wahrscheinlich ausreichend, den Energiefluß R durch das System pro Einheit Masse M (wobei die Masse des Kohlenstoffs für das auf Kohlenstoffchemie basierende Leben gesetzt wird) des Systems, das mit Ökosystem gekoppelt ist, sodaß

$$(\text{Grad der Koppelung}) = R / M \quad (III.3)$$

Diese Ankoppelungsrate ist im Fall des auf Kohlenstoff basierenden Lebens genau die metabolische Rate.

Aus den Gleichungen *III.1*, *III.2* und *III.3* ergibt sich das Maß für das Lebende durch

$$L = (1 - S_1 / S_0) (R/M) \quad (III.4)$$

Dieses besondere Maß des Lebenden ist, natürlich, willkürlich und arbiträr und nicht ganz zufriedenstellend; es hat jedoch eine ganze Anzahl von Vorteilen und nützlichen Eigenschaften. Es ersetzt ein allgemeines, qualitatives Konzept durch eine konkrete Definition anhand meßbarer Parameter. Insoweit meßbar, wird L eine wissenschaftliche Anwendung ermöglichen. Es ersetzt eine primitive dichotomische Idee von Leben durch einen kontinuierlichen Begriff (Vorstellung, Auffassung) von Lebendem. Nach Wunsch kann man den dichotomischen Begriff des Lebens wiedergewinnen, indem man $L > 0$ für Leben setzt und $L = 0$, um das Fehlen von Leben auszudrücken.

Ist die Entropiereduktion ein besonderes oder einmaliges Merkmal von Leben?

Insofern Leben auf entropiemindernden Prozessen beruht, ergibt sich die Frage, wie das möglich ist und mit dem zweiten Gesetz der Thermodynamik in Einklang zu bringen ist. Dem zweiten Gesetz der Thermodynamik wird Genüge getan, wenn die Entropieminderung durch Lebendes geringer ist, als der entsprechende Zuwachs in der Entropie der Umwelt, oder

dS (innerhalb des Organismus) $<$ ds (Umfeld des Organismus) (III.5)

Jedes isolierte System, sich selbst überlassen, wird allein Entropiezunahmen erfahren. Die meisten bekannten, alltäglichen Prozesse gehen mit einer Entropiezunahme einher, ohne irgendwelche merkbaren Entropieminderungen. Die allgemeine Ansicht ist, daß entropiemindernde Prozesse selten sind. So wird die grundlegende thermodynamische Rolle von Leben oft als etwas besonderes oder einmaliges angesehen. Trotzdem ist eine solche Sicht der Dinge *unberechtigt*, denn das gesamte beobachtbare Universum scheint langsam an Entropie zu verlieren.

Jeder Stern, wie auch ein jedes dazugehörige Planetensystem, evolutionieren aus einer interstellaren Gas- und Staubwolke von hoher Entropie entlang einer langen Reihe von Zuständen (Stadien) von fortschreitender Entropieabnahme und immer größer werdenden Ordnung. Das zweite thermodynamische Gesetz wird dabei nicht verletzt, weil jeder Stern seinen Entropieüberschuß in den Raum abstrahlt - in Form von elektromagnetischer Strahlung. Ein wirkliches Paradox (das bis zur Zeit noch nicht zufriedenstellend gelöst ist) ergibt sich nur, wenn man fragt, warum sich kein Gleichgewicht in der Quantität dieser elektromagnetischen Strahlung beobachten läßt (siehe den Anfang von Kapitel VIII für eine detailliertere Diskussion).

Die Sonne nimmt an Entropie ab, wie alle anderen Sterne. Das Sonnensystem und die Erdoberfläche nehmen an Entropie ab. Leben ist Teil dieser allgemeinen Entropieabnahme des beobachtbaren Universums: Also macht die Entropieabnahme das Leben nicht zu etwas Besonderem oder Einmaligem.