

Komplexe Systeme und künstliches Leben

Einführung

Stefan Neukamm, Ftan 2004

Was ist komplex? Ist komplex nur kompliziert? Betrachten wir die verwinkelten Gassen einer typischen italienischen Kleinstadt. Fast alle von ihnen sind Einbahnstrassen. Ein Tourist wird grosse Schwierigkeiten haben, den Weg von A nach B zu finden – hat er aber einmal diese KOMPLIZIERTE Strassenführung genau studiert wird er ohne Probleme den gesuchten Weg finden können.

Nehmen wir nun an, dass sich die Richtung der Einbahnstrassen je nach Verkehrslage verändert: Der Verkehrsfluss beeinflusst die Strassenführung und diese regelt den Verkehrsfluss. Einem Verkehrsteilnehmer wird es nun unmöglich sein die Richtung der Einbahnstrassen zuverlässig vorher zuzusagen, selbst dann wenn ihm die Regeln, welche die Verkehrsführung bestimmen bekannt sind.

Das System ist plötzlich KOMPLEX. Auch wenn sich vielleicht zu den Hauptverkehrszeiten bestimmte Verkehrssituationen ergeben, so ist eine genaue Vorhersage nicht mehr möglich.

In dieser Einführung möchte ich am Beispiel von Systemen des natürlichen und des künstlichen Lebens zeigen, welche besonderen Eigenschaften komplexe Systeme besitzen und auf welcher vielfältigen Weise man sich diesen Phänomenen nähern hat und nähern kann. Ausgangspunkt ist das große Mysterium: das Leben.

Was ist Leben?

Wir sind alle intuitiv in der Lage lebendige Dinge von unbelebten Dingen zu unterscheiden. Doch was genau macht diesen Unterschied zwischen Leben und nicht-Leben aus?

Sehen wir uns einmal unvoreingenommen um - was fällt uns auf? Auf den ersten Blick eine ungeweine, fast nicht zu bewältigende Vielfalt an Gestalten. Fragen wir uns jedoch, woraus sie bestehen und welchen Gesetzen sie unterliegen, dann wird in der Vielfalt die Einheit sichtbar.

In allen Gestalten und an allen Orten treffen wir auf die gleichen Grundstoffe und überall gelten die gleichen Gesetze. Dies motiviert uns zu naiver Beschreibung.

„naive“ Beschreibung:

- Leben besitzt Fähigkeiten zur Selbsterhaltung
- Leben besitzt Fähigkeiten zur Selbstreproduktion
- Leben besitzt einen Energie umsetzenden Metabolismus
- Leben besitzt DNS
- Leben kann sich anpassen durch Evolution
- Leben wird zunehmend komplexer

Problem der naiven Beschreibung:

- nur phänomenologisch
- keine Erkenntnisse
- keine Antworten auf Fragen wie:

Wie funktioniert die ständige Anpassung des Lebens an eine sich verändernde Umwelt?

Wie ist Leben entstanden?

Was sind Minimale Eigenschaften, die ein Organismus besitzen muss um zu leben?

Ist das Erschaffen von künstlichem Leben prinzipiell möglich?

Was unterscheidet lebender von unbelebter Materie?

==> Leben wirft vielschichtige Fragen auf und kann aus unterschiedlichsten Perspektiven betrachtet werden.

==> Wir benötigen eine universelle Theorie, welche Leben nicht nur beschreibt sondern es uns ermöglicht Vorhersagen zu machen.

Leben ist...

Die Frage nach dem wesentlichen Charakteristika von Leben wird von Philosophen und Naturwissenschaftlern bereits seit Jahrtausenden gestellt und zum Teil sehr kontrovers beantwortet.

Vitalistische und materialistische Sicht

Vitalismus (lateinisch: *vita* - Leben) ist jene Lehre, die als Grundlage alles Lebendigen ein eigenständiges Prinzip annimmt, um das Besondere des Lebens zu betonen. Dieses Besondere sei nicht *kausal-analytisch*, sondern nur *intuitiv-schauend* zu erfassen. Es wird ein Wesensunterschied zwischen Organischem und Anorganischem behauptet. Sie lehnt die Rückführung auf bloße chemische und physikalische Grundprinzipien ab

Für Aristoteles, einer der ersten Philosophen, der sich intensiv mit der Frage nach dem Leben auseinandergesetzt hatte, war es *der Besitz einer Seele*, welche lebendige Organismen von unbelebter Materie unterschied. Er vermutete das durch den Prozess der *Urzeugung* ständig neues Leben entstünde. Aristoteles gilt damit als erster Vertreter des Vitalismus.

Vitalistisch ist auch die Genesis, der zufolge schuf: „...Gott der Herr den Menschen aus einem Erdenkloß, und er blies ihm ein den lebendigen Odem in seine Nase. Und als ward der Mensch eine lebendige Seele.“

Im Gegensatz dazu steht die materialistische Sicht.

Für den **Materialismus** ist die Welt, belebte wie auch unbelebte, aus der gleichen Materie beschaffen und lässt sich damit einheitlich durch die Wissenschaften beschreiben. Einen besonderen „Lebensstoff“, wie ihn die Vitalisten voraussetzen, gibt es nicht.

Leben aus der Sicht von Descartes und Leibniz

René Descartes, der französische Mathematiker und Philosoph des siebzehnten Jahrhunderts, behauptete, Tiere seien nichts anderes als Maschinen, und Menschen wiederum seien nur Maschinen, denen Gott eine Seele verliehen hatte. Nach Descartes ist an Menschen oder Tieren nichts Mystisches oder Unfassbares, jedenfalls nicht, so weit es ihre Körper betrifft. Körper sind einfach physikalische Systeme, die sich, wie alles andere in der Welt, den Naturgesetzen entsprechend verhalten. Der Körper des Menschen, so sagte Descartes, ist eine «Maschine, die, da sie von der Hand Gottes geschaffen ist, unvergleichlich viel besser angeordnet ist ... als irgendeine vom Menschen erfundene.»

Descartes materialistische Sichtweise basiert auf dem Prinzip, dass alles in der Welt - also jeder physikalische Körper auf die Wirkung von Materie und Bewegung reduziert werden kann. «Alle Naturphänomene», sagte Descartes, «lassen sich auf diese Weise erklären; ich glaube deshalb nicht, dass irgendwelche anderen Grundsätze der Physik nötig oder wünschenswert sind.»

Im Sinne dieses neuzeitlichen mechanistischen Denkens hängt die Verstehbarkeit der Welt geradezu von der Möglichkeit ab, sie als Maschine zu denken.

Gottfried Wilhelm Leibniz formuliert im 17. Jh:

„Es ist kein Zweifel, dass ein Mensch eine Maschine machen könnte, fähig einige Zeit in einer Stadt sich umher zu bewegen und genau an gewissen Straßenecken umzubiegen. Ein unvergleichlich vollkommenerer, obwohl beschränkter Geist könnte auch eine unvergleichlich größere Anzahl von Hindernissen vorhersehen und ihnen ausweichen. So wahr ist dies, dass wenn, wie einige glauben, diese Welt nur aus einer endlichen Anzahl nach den Gesetzen der Mechanik bewegender Atome bestünde, es gewiss ist, dass ein endlicher Geist erhaben genug sein könnte, um alles, was zu bestimmter Zeit darin geschehen muss, zu begreifen und mit mathematischer Gewissheit vorherzusehen; so dass dieser Geist nicht nur ein Schiff bauen könnte, das von selber einen gegebenen Hafen zusteuerte, wenn ihm einmal die gehörige innere Kraft und die Richtung erteilt wäre, sondern er könnte sogar einen Körper bilden, der die Handlungen eines Menschen nachmache“.

In der Tat gab es bereits im 18. Jh. Versuche Leben durch geschickte konstruierte Automaten nachzuahmen. Am berühmtesten wurde die Arbeit von Jacques de Vaucanson, der 1738 ganz Paris mit seiner künstlichen Ente verzauberte: „die aus vergoldetem Kupfer gefertigt war und wie eine echte Ente trinken, fressen, quaken, im Wasser planschen und ihr Futter verdauen konnte.“

Die Konstruktion schien so lebendig, dass in der Zeitung zu lesen war: „...die Bewegungen des Vogelkörpers zeigen deutlich, dass der Magen aufgrund der schnellen Mahlzeit ein wenig verstimmt ist, und die Auswirkungen einer schmerzhaften Verdauung werden sichtbar.“

Versagen der Analyse von Leben

Vaucansons mechanischer Vogel kann als ein früherer Ansatz gesehen werden, sich dem Phänomen Leben zu nähern. Neu ist dieser Ansatz, da er sich von der klassischen Vorgehensweise der Physik prinzipiell unterscheidet.

Das Ganze als Summe seiner Teile

In der klassischen Physik und auch in der Biologie hieß untersuchen zerlegen. Ein kompliziertes System wurde in immer kleinere Teile zerlegt, bis man eine elementaren Ebene einfacher Objekte erreicht hat. Die Idee dieser Dekonstruktion war: Versteht man diese elementaren Objekte, dann versteht man auch das gesamte System.

Der Versuch diese Methode auf lebende Organismen anzuwenden scheitert jedoch: Wird eine Zelle zerlegt, so verschwindet das was untersucht werden soll, nämlich das lebendige. Auch wenn man die verschiedenen Teile (Organellen, Mitochondrien, Membrane...) wieder zusammenfügen wollte, bliebe das Gesamtsystem tot. Die Zelle selbst scheint schon die niedrigste Instanz von Leben zu sein. Die Zerlegung des Organismus in Teilsysteme ist zwar möglich, kann aber Leben nicht erklären.

Der lebendige Organismus ist mehr als die Summe seiner Teile und dieses Mehr ist das Leben.

Der Weg, den Vaucanson geht, ist ein ganz anderer. Er zerlegt nicht – er konstruiert und zwar mit Mitteln die sich vom natürlichen Leben stark unterscheiden. Und auch sein Konstrukt, sein Vogel-Automat, welcher nur die Bewegungen seines Vorbildes mimt, ist weit von Leben entfernt.

Dennoch wird das Konzept der Konstruktion das wichtigste Konzept bei der Erforschung des Lebens durch die artificial life-Wissenschaft werden.

Selbstreproduzierende Automat

Als Descartes der Königin von Frankreich erklären wollte, dass Tiere eigentliche ein Klasse von Automaten seien, zeigte diese auf eine Uhr und sagte ganz pragmatisch: "Sehen Sie zu, dass sie [die Uhr] Junge bekommt!"

Genau an diesem Punkt wollte John von Neumann ansetzen. In den 50er Jahren des 20. Jh. ersann er einen Automaten, welcher „Junge“ bekommen konnte: den selbstreproduzierenden Automaten. Ausgangspunkt seiner Überlegungen war die:

Turing-Maschine

Die Turingmaschine wurde 1936 (vor der Entwicklung erster elektronischer Rechenanlagen) von Alan Turing eingeführt. Sie diente ihm als formales Modell, um den Begriff "berechenbar" zu formalisieren.

Als Speichermedium besitzt eine Turingmaschine ein nach rechts unendliches *Band*, das in Zellen aufgeteilt ist. Eine Zelle kann ein Element aus dem so genannten *Bandalphabet* speichern. Die Turingmaschine besitzt eine Kontrolle und einen Lesekopf, der sich in diskreten Schritten über das Band bewegt. Die Kontrolle befindet sich stets in einem von endlich vielen *Zuständen*. Der Lesekopf kann den Inhalt einer Speicherzelle lesen, aber auch ein neues Zeichen aus dem *Eingabealphabet* in eine Zelle schreiben.

Befindet sich der Lesekopf über einer Zelle, so wird deren Zeichen gelesen. Eine Regel, die *Übertragungsfunktion* ordnet jedem Zustands-Bandzeichen-Paar eine Aktionstripel zu, bestehend aus einem neuen Zustand, den die Kontrolle sodann einnimmt, einem Zeichen, welcher der Lesekopf in die Zelle schreibt und der Anweisung an den Lesekopf, nach Rechts oder Links zu rücken.

Eine Turingmaschine kann so durch ein 4-Tupel M charakterisiert werden. M besteht aus den endlichen, nicht leeren Mengen Z, B, E , mit Z =Zustandsmenge, B =Bandalphabet, E =Eingabealphabet und der Übertragungsfunktion $\Phi: Z \times \{q_{accept}, q_{reject}\} \times B \rightarrow Z \times B \times \{R, L\}$

Man kann auch mehr bändige Turingmaschinen betrachten, z.B. könnte eine solche Turingmaschine Zahlen addieren, die auf jedem der Bänder gespeichert sind.

Man könnte sich aber auch vorstellen, dass ein Band einen Algorithmus enthält, welcher auf die Eingaben in den weiteren Bändern angewendet wird.

Führt man diesen Gedanken fort, stößt man schnell auf die Frage: Gibt es vielleicht so etwas wie eine universelle Maschine, die jede Turingmaschine simulieren kann?

Turing konnte Beweisen, dass ein solcher universeller Computer existiert und als 1-Band-Turingmaschine verwirklicht werden kann. Diese universelle Turing-Maschine

kann jede partiell-rekursive Funktion berechnen, wenn sie nur mit der nötigen Information auf dem Band versorgt wird.

1936 formulierten Turing und der Philosoph Church die Church-Turing-Hypothese:

Die im intuitiven Sinne berechenbaren Funktionen sind genau die, die durch Turingmaschinen berechenbar sind.

Locker formuliert, sagt die These, dass die universelle Turingmaschine, nicht nur jede mathematische Maschine nachahmen kann, sondern auch die Natur.

Wenn aber eine solche universelle Maschine, die Natur nachahmen kann, dann doch auch Lebensprozesse!

Konzept von John von Neumann (1949):

Neumanns Anliegen war der Entwurf einer Selbstreplizierenden Maschine.

- Analog zu Turing, stellte er erst eine komplette Liste von elementaren Bauteilen zusammen, aus denen sich jede Maschine erbauen ließe.
- Er stellte sich dann eine universelle Konstruktionsmaschine A vor, welche in einem unendlichen Vorrat dieser Bauteile, schwimmt und gegeben einer Beschreibung I eine andere Maschine konstruieren kann.
- Weiter sei B eine Kopiermaschine, welche gegeben einer Beschreibung I eine Kopie dieser Beschreibung I' erzeugt.
- C sei ein Kontrollmechanismus, der, gegeben einer Beschreibung I , A mit I instruiert, B beauftragt I zu kopieren und der neu konstruierten Maschine A' I hinzufügt.
- Definiert man D als die zusammengesetzte Maschine (A,B,C) und ist I_D die Beschreibung von D , dann ist $E:=(D, I_D)$ eine universelle sich selbst replizierende Maschine.

Das Geniale an Neumanns Entwurf, war die Analogie zum natürlichen Replikationsprozess, wobei man bedenken muss, dass die Aufschlüsselung der DNA-Struktur durch Watson und Crick erst später erfolgt ist.

Der Physiker Freeman Dyson bestätigte sogar: „Soweit wir wissen, ist der elementare Aufbau von Mikroorganismen, die größer als ein Virus sind, exakt so, wie in von Neumanns Vorstellungen.“

Das Entscheidende an Neumanns Vorstellung ist die Zerteilung des Replikationsprozess:

1. Beschreibung I_D wird als Instruktionsfolge interpretiert
2. dann wird I_D uninterpretiert kopiert und der neuen Maschine angefügt

Analogie zur natürlichen Selbstreplikation:

1. Transkription (DNA wird kopiert und zu mRNA umgewandelt)
2. Translation (mRNA wird interpretiert, um Proteine aufzubauen)

Die erste Umsetzung von Neumanns selbstreproduzierender Maschine, das so genannte kinematische Modell, war nicht als rein-abstraktes Informationsgebilde,

sondern als handfeste Maschine mit Bezug zur Realität gedacht. Das kinematische Modell sollte, z.B. sägeblattartige Träger zur Speicherung der Konstruktionsbeschreibungen besitzen, sensorische Elemente, Elemente zum schneiden, schweißen usw... Die praktische Umsetzung war natürlich (damals wie heute) wegen der hohen Anforderungen an die benötigte Technologie nicht möglich.

Angeregt durch seinen langjährigen Freund, den Mathematiker Stanislaw Ulam, verpflanzte Neumann seine Kreatur in eine andere virtuelle Umgebung in ein unendliches Gitter bestehende aus einzelnen Zellen. Dabei konnte jede Zelle, nach einer global festgelegten Regel, in diskreten Zeitintervallen auf den Zustand ihrer Nachbarzellen reagieren und eine von 29 Möglichen Zuständen einnehmen.

Der selbstreproduzierende Automat, sollte als Organismus, als organisierte Ansammlung von Zellen auf diesem Gitter verwirklicht werden. Das – durch die Organisation der Zellansammlung determinierte Verhalten dieser „Kreatur“ sollte nach und nach auch das umliegende „Land“ einnehmen und so umgestalten, so dass letztlich ein zweiter identischer Zellhaufen entstanden ist.

Wegen seines frühen Todes sollte es Neumann nicht gelingen, seinen Entwurf zu verwirklichen.

1984 konnte jedoch Christopher Langton selbstreproduzierende Strukturen als Loops in Zellularautomaten verwirklichen.

John von Neumann hat mit seiner Theorie über selbstreproduzierende Automaten den nachfolgenden AL-Forschern den Weg gewiesen:

- von Neumann untersuchte einen charakteristischen Prozess natürlichen Lebens, nämlich die Selbstreproduktion
- er versuchte auf konstruktivem Wege, dem logischen Kern dieses Prozesses auf die Spur zu kommen.
- Er implementierte diesen Kern, das Prinzip der Selbstreproduktion, in das virtuelle Universum eines Zellularautomaten und machte es so mathematischer Analyse und Beschreibung zugänglich.

Damit nehmen Neumanns Ansätze bereits die entscheidenden Prinzipien der AL-Forschung vorweg.

Artificial Life

Als Christopher Langton 1987 zur ersten Konferenz zum Thema Artificial Life nach Los Alamos einlud, definiert er Alife sinngemäß wie folgt:

Artificial Life ist die Untersuchung menschen-gemachter Systeme, die charakteristische Verhaltensmerkmale natürlicher lebender Systeme widerspiegeln. Es handelt sich darum, Leben und seine möglichen Erscheinungsformen zu erklären, und zwar ohne Beschränkung auf bestimmte Beispiele, die sich auf der Erde entwickelt haben. Dazu gehören biologische und chemische Experimente, Computersimulationen und rein theoretische Ansätze, wie auch Prozesse von molekularem, sozialem und evolutionärem Umfang. Das Endziel ist es, die logische Basis lebender Systeme herauszuarbeiten.

Zentrale Themen sind:

- Selbstorganisation
- Selbstreproduktion

- Emergentes Verhalten komplexer Systeme
- Evolutionsprozesse
- Morphogenese

„Understanding by building“

AL erforscht Leben „bottom-up“, auf synthetischem Wege, indem versucht wird durch Konstruktion von Systemen, biologische Phänomene hervorzubringen.

Typisch für eine solche Konstruktion sind Systeme, die aus vielen gleichartigen Komponenten zusammengesetzt sind und sich nach einfachen lokalen Regeln entwickeln. Dabei kann es durch Selbstorganisation zur Emergenz von komplexen globalen Gesetzmäßigkeiten kommen; es kann also Komplexität entstehen, die nicht von einem ebenso komplexen Bauplan herrührt, sondern sich aus dem Befolgen eines einfachen Rezeptes ergibt.

Ebenen der Modellierung durch AL

Lebende Systeme kann man auf vier Ebenen mit Artificial Life Modellen untersuchen:

1. Molekulare und
2. Zelluläre Ebene

Modelle auf diesen beiden Ebenen beschäftigen sich mit Molekülen und den mit ihnen kodierten oder kodierbaren Informationen. Z.B. werden in der künstlichen Chemie Bit-Strings in einem virtuellen „gut gerührten Reaktor“ verarbeitet oder mit DNA-Molekülen als Wetware experimentiert.

3. Organismus-Ebene

Im Artificial Life findet man hier häufig Robotik-Ansätze. Ein Roboter wird dabei als Modell einer biologischen Einheit gesehen und in eine Umwelt mit der Fragestellung entsprechenden Merkmalen gesetzt.

4. Gesellschafts-Ebene

Nach AL entstehen komplexe Gesellschaftssysteme durch Interaktionen von relativ einfachen Einheiten, Individuen und Organismen. Im Artificial Life findet man dazu verschiedenste Modelle (meist als Computersimulation).

Die Realisierung solcher Systeme kann sich an der biologischen Vorlage orientieren (Wetware), als Hardware (Robotik) oder als Software, virtuell in Computersimulation geschehen.

Besonders die virtuelle Variante bietet neue Möglichkeiten. Sowohl das System als auch das Universum, in welches das System eingebettet ist, sind virtuell. Das erlaubt:

- Begrenzung und genau Definition der Umwelt und Anfangsbedingungen; exakte Wiederholbarkeit der Simulation (wohldefiniert)
- kontrollierte Manipulation des Systems
- kontrollierte Manipulation der „Physik“ des Universums
- Beschleunigung und Verlangsamung der Abläufe
- ständige und exakte Beobachtung der Abläufe ohne in den Prozess verfallend einzugreifen

Eine solche Realisierung ist a priori immateriell und untersucht damit ausschließlich die logische Organisation der Struktur. Dies ermöglicht eine neue Sichtweise von „Simulation“:

AL versteht Simulation nicht nur als ein Modell eines „wirklichen Objektes“, wobei die Bestandteile der Simulation als Symbole für Reales interpretiert werden, sondern AL kann das virtuelle System an sich, quasi als neu geschaffene Umgebung für lebensähnliche Prozesse, untersuchen.

Damit geht AL über das „Leben wie wir es kennen“ hinaus und nähert sich dem „Leben wie es sein könnte“.

Ursprung des Lebens

Wie konnte sich Leben auf der Erde entwickeln? Durch einen Schöpfungsakt, Panspermie oder Zufall? Die AL geht von Selbstorganisation, d.h. durch einen noch nicht verstandenen Prozess bilden sich komplexe Strukturen von selbst. Zentral in der Betrachtung von Selbstorganisation sind Entropie und Evolution.

Entropie

1865 führte Clausius den Begriff der Entropie ein, was im Griechischen "Änderung der Entwicklung" bedeutet.

Die Formulierung der beiden Hauptsätze der Thermodynamik durch Clausius lautet:

1. Die Energie der Welt ist konstant.
2. Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.

Die Entropie misst die Menge an (moderatem) Zufall, die in einem System vorliegt. Eine geordnete Struktur besitzt geringe Entropie, während eine zufällige Ansammlung von Materie hohe Entropie besitzt.

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik sagt, dass die Entropieerzeugung ein irreversibler Vorgang ist. Locker formuliert heißt das: Strukturen zerfallen im Laufe der Zeit. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich hingegen Strukturen hoher Ordnung bilden ist unwahrscheinlich. Man kann sagen die Entropie verkörpert somit eine Art Zeitpfeil für das System. Alles strebt der Maximalen Entropie, dem thermischen Gleichgewicht entgegen.

Die Entropie eines Systems kann nur abnehmen, wenn das System offen ist und Energie von außen zugeführt wird. Während im Inneren des Systems hierbei Strukturen und höhere Komplexität entstehen, nimmt durch Entropieexport die Entropie der Systemumgebung zu.

Anders ausgedrückt: Ein komplexe Struktur kann ihren Ordnungsgrad nur erhalten oder sogar erhöhen, wenn sie einen Neg-Entropie-verzehrenden Mechanismus besitzen. „Negentropieverzehrend“ wurde von E. Schrödinger geprägt, und meint nichts anderes als Import von Ordnung aus der Umgebung.

Wie sieht also der „Neg-Entropie verzehrende“ Mechanismus von Lebewesen aus, die ja eindeutig komplexe strukturiert sind?

Das biologische Leben löste dies durch die Selbstreplikation:

- der Organismus organisiert seine Umwelt durch Wiederholung seiner Struktur, er kopiert sich selbst.

- Entscheidend ist dabei nicht die Weiterleitung von Materie oder Energie, sondern das Weiterleiten von Struktur, als von Information.

Leben sogar noch einen Schritt weiter: Durch den Mechanismus der darwinschen Evolution erhält Leben nicht nur den Ordnungsgrad der eigenen Struktur, sondern erhöht sogar die Komplexität.

Evolution

Die Kräfte der Evolution wirken, sobald ein System gewisse Grundvoraussetzungen erfüllt:

- Das System muss über einen Mechanismus verfügen, seine eigene Struktur zu Reproduzieren,
- Veränderungen an der Struktur, also Mutation, sollten Veränderung des Reproduktionsverhaltens provozieren.
- Die Fehlerrate des Reproduktionsmechanismus darf weder zu hoch noch zu niedrig sein.

Jedem Organismus kann ein bestimmter Fitnesswert zugeordnet werden, der von der funktionalen Organisation des Organismus und seiner Umwelt abhängt. Dieser Fitnesswert spiegelt die qualitative und quantitative Fähigkeit des Organismus wieder sich selbst zu reproduzieren.

Durch kleine Fluktuationen bei der Selbstreproduktion der Organismen, entstehen Mutationen mit unterschiedlichen Fitnesswerten. Natürliche Auslese heißt nun folgendes: Mutationen mit hohen Fitnesswerten werden sich stärker vermehren und mit der Zeit schlechter bewertete Organismen dominieren.

Artificial Life-Modell nutzen evolutionäre Prozesse auf vielfältige Weise:

1. *Wetware-Experimente: In-Vitro-Evolution von RNA-Ketten*
 - in speziellen Flussreaktoren, den Chemostaten können unter Anwesenheit eines Nährgels bereits kurze RNA-Ketten (ab 25 Basen-Paaren) sich reproduzieren
 - Selektionsstrategie:
 1. Durch eine geschickte Wahl der Versuchsführung werden die Moleküle mit den gewünschte Eigenschaften oder Funktionen direkt aus der oft bis zu 10^{15} verschiedene Moleküle enthaltenden Lösung selektiert
 2. Durch parallel ablaufende Screening-Methoden, werden „fittesten“ RNA-Ketten quasi „per Hand“ für neue Generationenfolgen ausgewählt.
 - „Molekülzüchtung“ ist z.B. für die Pharmazie interessant, wo Enzyme mit speziellen targeting-Eigenschaften gesucht werden.
 - In-Vitro Experimente liefern aber auch interessante Erkenntnisse über den Evolutionsablauf an sich:

Die Fehlerrate, also die Häufigkeit und „stärke“ von Mutationen, wurde als Faktor auf den Evolutionsprozess untersucht:
Es gibt eine kritische Fehlerrate, oberhalb welcher der Vererbungsprozeß zusammenbricht. Oberhalb dieser Fehlerschwelle werden laufend so viele neue Mutanten gebildet, daß die Fitneß der besten Variante nicht mehr ausreicht, um ihr „Überleben“ in den zukünftigen Generationen zu garantieren.

Die Existenz der Fehlerschwelle wurde experimentell in vivo an Hand von RNA-Viren und in vitro am Beispiel der replizierenden RNA-Moleküle verifi-

ziert. Insbesondere konnte gezeigt werden, daß die Genomlängen von RNA-Viren ungefähr der reziproken Fehlerrate der Replikation entsprechen.

2. *Genetische Algorithme, Genetisches Programmieren*

- Genetische Algorithmen haben das Ziel, Programme, die zur Lösung eines spezifizierten Problems dienen sollen, zu optimieren.
 - a. Das Problem wird in eine möglichst breit gefächerte Anzahl von Parametern aufgefächert. Also eine geeignete genetische Kodierung für das "Genom" gewählt
 - b. Eine Population von Genomen (Generation 0) wird zufällig initialisiert
 - c. Evaluation: Bewertet alle Elemente der aktuellen Generation gemäß einer Fitnessfunktion
 - d. Crossover: Selektiert Paare aus der Population und erzeugt durch Crossover Nachkommen der aktuellen Generation
 - e. Mutation: Mutiert die Nachkommen
 - f. Generationenwechsel: Ersetzt Elemente der aktuellen Generation durch Nachkommen, evt. gemäß einem Ersetzungsschema
 - g. Falls die Abbruchbedingung noch nicht erreicht ist, wird ab c. wiederholt

- War die Struktur der Lösung bei den genetischen Algorithmen vorgegeben (nur die Parameter wurden verändert), so kann diese beim genetischen Programmieren auch verändert werden
- Hier werden bei der Mutation ganze Syntaxbäume ausgetauscht oder gekreuzt, die Struktur also verändert
- Weitere Entwicklung ist die „Dynamisierung“ der Fitnessfunktion. Durch die Rückkopplung Organismus ↔ Natur veränderte sich die Fitnessbewertung fortwährend.
Bei den „genetischen Algorithmen“ interagieren die Programme weder direkt noch indirekt. Damit ist Fitnessfunktion statisch.
- Ein schönes Beispiel findet sich in Karl Sims Blockies (siehe PDF)

Wie wir sehen, beschreibt Evolution eine Möglichkeit komplexe Strukturen trotz Entropie zu bilden, aber nur dann wenn bereits selbstreproduktionsfähige Strukturen vorhanden sind.

Ordnung durch Selbstorganisation

Das Konzept der Evolution lautet also Ordnung durch Ordnung.
In unseren Kontext: Leben entsteht aus Leben.
Aber wo nahm dieser Kreislauf seinen Anfang?

Die einfachsten zur Selbstreproduktion fähigen Strukturen in der Natur sind, die Viroiden. Sie besitzen bereits Gensequenzen bestehend aus ca. 300 Nuklotiden. Das Erbmateriale des Menschen besteht sogar aus einigen Milliarden Nukleotiden. Diesen Kettenlängen entsprechen rein kombinatorisch 10^{181} bis $10^{1,81}$ Milliarden mögliche Variationen. Eine rein zufällige Entstehung eines Evolutionsfähigen Gens ist also auszuschließen.

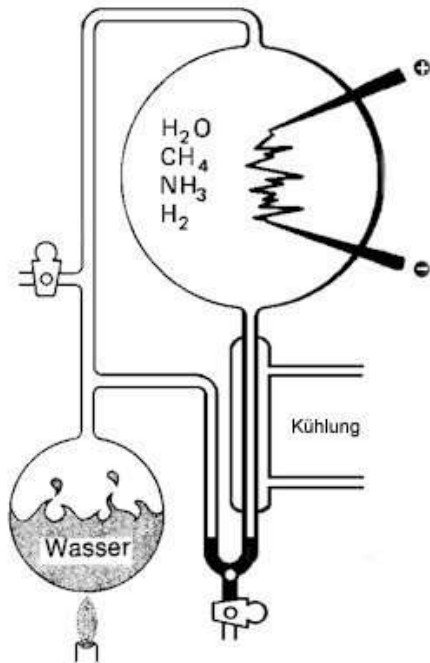
- Wie konnten sich dann die einfachen Strukturen der Uratmosphäre zu so etwas Komplexen, wie dem ersten Leben verdichten?

- Welcher Mechanismus löst dieses Paradoxon der Anfangskomplexität mit dem der Ursprung des Lebens behaftet ist?
- Gibt es Prinzipien der Natur, die es elementaren Strukturen ermöglicht sich zu komplexen Gebilden zu organisieren – eine Konzept Ordnung durch Selbstorganisation?

Probiotische Chemie

Miller-Urey-Experiment

Erste Erkenntnisse zur Entstehung von Leben wurden durch das so genannte Uruppenexperiment erzielt, das von Stanley L. Miller und Harold C. Urey Anfang der fünfziger Jahre (1952) durchgeführt wurde.



Der Versuchsaufbau war einfach. In einem Kolben wurde Wasser verdampft und in einem zweiten Kolben (Inhalt etwa 5 Liter) in einer Atmosphäre, die aus Wasserdampf, Methan, Ammoniak und Wasserstoff bestand, elektrischen Entladungen ausgesetzt. Die kondensierten Reaktionsprodukte wurden gekühlt und konnten dann abgezapft werden. Die Atmosphäre entsprach in etwa den Vorstellungen, die man von der Atmosphäre vor ca 300 Millionen Jahren hatte, also vor der Entstehung des Lebens.

Man konnte davon ausgehen, dass es auf der Erde damals noch mehr Vulkane als heute gab, die mit der glühenden Lava auch Gase ausgestoßen haben. Die tropischen Temperaturen führten zu häufigen Gewittern.

Nach einer Laufzeit von einer Woche entstanden einfache organische Verbindungen wie Ameisen-, Fettsäuren aber auch 4

Aminosäuren, die zur Kettenbildung fähig waren, was notwendige Bedingung für biologisches Leben auf der Erde ist.

Der Anteil der Kettenbildung fähigen Aminosäuren war sehr gering. Zumindest zu gering um die Entstehung komplexer Moleküle im Urozean zu erklären, denn:

1. Die geringe Konzentration an organischen Molekülen verhindert einen ständigen Kontakt.
2. Im „offenen Meer“ finden sich keine katalytischen Elemente, die die Polymerbildung begünstigen.

Bildung kurzer RNA-Ketten, Eigen-Paradoxon

Heute geht man davon, aus dass sich in der Tiefsee komplexere Polymere bilden konnte. Dort herrschten:

- hohe Drücke
- in der Nähe von „schwarzen Rauchern“ hohe Temperaturen
- schwerlösliche Metallsulfide mit katalytischen Eigenschaften.

All dies begünstigt die Bildung größerer Biomoleküle.

Diese reichern sich dann in einem „Biofilm“, der den Meeresboden überzieht, an.

So konnten sich auch erste kurze RNA-Ketten bilden, Nukleotid-Ketten, die rudimentäre Fähigkeiten besitzen ihre eigene Replikation zu katalysieren.

Eigentlich könnten bereits hier die Kräfte der Evolution zu wirken beginnen. Allerdings nimmt die Fehlerrate dieser Selbstkatalysierenden RNA-Ketten mit steigender Fehlerrate drastische zu. Bei Kettenlängen um die 100 Nukleotide ist die Fehlerschwelle bereits überschritten. Es kommt zur Informationsauflösung und der Evolutionsprozess kommt zum Erliegen.

Zur genauen Replikation langer RNA-Ketten sind spezifische Enzyme, Proteine notwendig. Diese müssen allerdings erst durch die RNA-Kette gebildet werden, was wiederum voraussetzt, dass der Bauplan des Enzyms in der RNA-Ketten kodiert ist. Das impliziert jedoch eine bestimmte Mindestlänge der RNA-Kette.

Der Replikation von längeren RNA-Ketten steht also ein großes Hindernis im Weg:

1. Ohne Enzyme ist die Replikationsgenauigkeit zu gering um lange Ketten ausreichend fehlerfrei zu kopieren.
2. Eine kurze RNA-Kette ist wiederum zu klein um den Replikationsmechanismus zu kodieren.

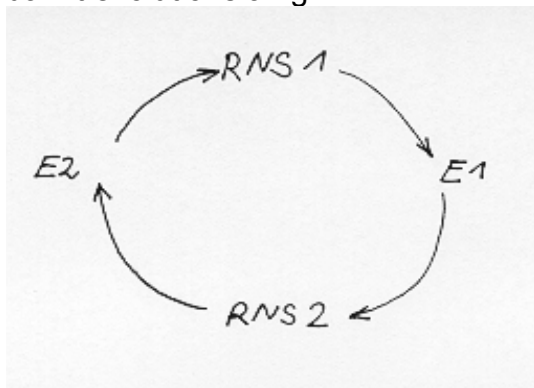
Wir haben also das bekannte Henne/Ei-Problem, hier bekannt als

Eigen-Paradoxon:

Keine Enzyme ohne lange RNA-Kette, keine lange RNA-Kette ohne Enzyme.

Hyperzyklus von Manfred Eigen

Der "Hyperzyklus" wurde von Eigen als erstes evolutionsfähiges Replikationssystem postuliert. In dem einfachsten Hyperzyklus finden zwei RNA-Moleküle zusammen, die sich in gegenseitiger Wechselwirkung aus einer Substratlösung hervorbringen und "vermehren". Dabei koppeln sich entweder zwei oder mehrere selbstreproduzierende RNA-Stränge (Ribozyme) oder aber Ribozyme und Enzyme zu einem stabilen Autozyklus, der sich selbst unerhält und repliziert. Ein solches kooperatives System, erlaubt eine genauere und über einen langen Zeitraum stabile Replikation und ist damit evolutionsfähig.



Durch Experimente, die Eigen und seine Mitarbeiter mit einem, von ihnen konzipierten Evolutionsreaktor durchgeführt haben, konnten sie tatsächlich vorgegebene gekoppelte Replikationssysteme unter entsprechenden Voraussetzungen stabilisieren und optimieren.

Problematisch ist jedoch die Entstehung solcher Hyperzyklen. Eine Hypothese nimmt an, dass sich durch die hohen Fehlerraten bei der Replikation von langen RNA-Ketten sogenannte Quasispezies gebildet haben. Das sind Mutationen die durch

ähnliche Kopiergenauigkeit, Stabilität und Replikationsgeschwindigkeit miteinander in Konkurrenz stehen. Durch Mutation könnten sich dann aus solchen Quasispezies ein autokatalytisches Paar ausgesondert haben.

Boole'sche NK-Netzwerk und Selbstorganisation autokatalytischer Systeme nach Stuart Kauffman

Komplexe Strukturen sind in fast allen von den Natur- und Gesellschaftswissenschaften untersuchten Bereichen zu finden.

Dieses vielfältige Vorhandensein und ihr ähnliches Verhalten motivierten Stuart Kauffman zu der Annahme, dass es allgemeine Gesetzmäßigkeiten gibt, die das Entstehen geordneter Strukturen in komplexen Systemen hinreichender Größe und Komplexität zur Folge haben:

Die Art und Weise dieser Gesetzmäßigkeiten sollten Bottom-Up sein:

Kein übergeordneter Plan schafft Ordnung, sondern das gerichtete globale Verhalten emergiert aus der Akkumulation lokaler Aktionen.

Auch wenn die Anfangskonfigurationen der Teile sogar dem Zufall überlassen wurde, sollte das Gesamtsystem ein globales Verhalten zeigen, das sich vom Chaos signifikant unterscheidet.

Allein aus der Tatsache, dass die Teile auf irgendeine Weise miteinander wechselwirken, sollten diese sich zu einem komplexen Verhalten selbstorganisieren.

Zum Nachweis solcher Kräfte benutzte er das sogenannte Boole'sche NK-Zufallsnetzwerk.

Ein Boole'sches NK-Netzwerk besteht aus N Schaltelementen, die über logische Funktionen mit K Schaltelementen verknüpft sind. Die Schaltelemente (»Gene«) des Netzwerkes sind folglich simple Logikprozessoren, die ihre Aktivität je nach dem angelegten Input binär ändern.

Der Term Zufalls-Netzwerk kommt dadurch zustande, dass Kauffman aus der Klasse aller Booleschen NK-Netzwerke eine zufällige Auswahl trifft. D.h. Kauffman wusste nicht „wer“ mit „wem“ und mit „welcher“ logischen Funktion vernetzt wurde.

Obwohl diese Netzwerkmodelle sehr einfach sind, weisen sie komplexe Verhaltensmuster auf.

1965 entwarf Kauffman FORTRAN-Programm das ein solches Netzwerk realisierte. Es hatte 100 Gene und jedes Gen war mit 2 weiteren vernetzt. Rein theoretisch konnte das Netz 2^{100} also ca. 10^{30} Zustände einnehmen. Angesichts dieser hohen Anzahl, nahm Kauffman an, dass eine hohe Anzahl von Iterationsschritten nötig wären, bis das System sich in einem stabilen Zustand, also einem Zyklus befindet. Beim ersten Durchlauf wurde jedoch schon beim 10ten Iterationsschritt ein Zyklus der Länge 4 erreicht. Wiederholungen mit anderen zufälligen Anfangsbedingungen bestätigten den ersten Erfolg. Immer viel das System nach wenigen Iterationsschritten in einen stabilen Zustand.

Diese schnelle Konvergenz der Systeme zu zyklischem Verhalten deutete Kauffman als Beleg für die Wirkung von Anti-Chaos, von Selbstorganisation.

Können die Ergebnisse der Versuche mit Boole'schen NK-Netzwerken auch auf die Biologie angewendet werden?

Wirkung von Mutation auf die Gen-Regulation

Das Genom höherer Lebewesen lässt sich nach dem derzeitigen Kenntnisstand der Forschung in erster Näherung durch NK-Zufallsnetzwerke beschreiben, deren Elemente den ODER-Funktionen entsprechen und bei denen K etwa den Wert 2 hat. Damit lässt sich beispielsweise auf der Basis des eben beschriebenen Computereperimentes abschätzen, welche Auswirkungen Mutationen auf die Gen-Regulation haben werden:

K=2-Netzwerke mit ODER-Funktionen als Elemente verhalten sich, eher geordnet als chaotisch. Mutationen sollten also keine größeren Kaskaden der Aktivitätsänderungen von Genen nach sich ziehen. Dies wurde experimentell bestätigt. Eine durch ein Hormon herbeigeführte Mutation eines Gens bei der Taufliege *Drosophila* führt zu einer Kaskade von 150 Veränderungen der Genaktivitäten der über 5.000 Gene der Fliege. Bei entsprechenden Computersimulationen mit NK-Zufallsnetzwerken mit $N = 5.000$ wurde ein Wert von 160 vorhergesagt!

Selbstorganisierende Autokatalytische Systeme

Angeregt durch die Ergebnisse seiner Computereperimente formuliert Kauffman ein Modell zur Entstehung Hyperzyklus-ähnlicher Systeme, welche das Eigen-Paradoxon überwinden:

- Ausgangspunkt ist die präbiotische Suppe. Diese ist mit organischem Material, u.a. auch zur Kettenbildung fähigen Monomere, angereichert.
- Kauffmans Idee ist ein autokatalytisches Netz. Dieses soll sich durch Selbstorganisation aus den einfachen elementaren Elementen der Suppe bilden.
- Das autokatalytische Netz verfügt über einen Stoffwechsel, d.h. es bezieht elementare Elemente und Energie aus der Umwelt ein um die innere Ordnung aufzubauen und zu erweitern

Kauffman modellierte dieses Konzept als künstliche Chemie.

Das heißt:

- die elementaren Elemente (hier Monomere:Aminosäuren) werden durch Symbole, z.B. Buchstaben a,b präsentiert;
- treffen zwei Symbole a,b aufeinander, modelliert eine Reaktionsgleichung die Reaktion z.B. $a+b \rightarrow ab$
- Das Symbol „ab“ kann seinerseits wieder mit anderen Symbolen reagieren.
- Ein Systemablaalgorithmus regelt wann welche Symbole miteinander reagieren. Z.B. kann er einen idealen gut gerührten Fließreaktor simulieren.

Es zeigte sich, dass

- in kurzer Zeit so eine Vielzahl an Verbindungen entstand. Jeder Zeitabschnitt vergrößerte die Anzahl der möglichen Verbindungen und damit auch die Anzahl der möglichen Reaktionen.
- Das System schien dem Chaos zuzustreben
- Allerdings begannen einige Verbindung die Bildung bestimmter Polymere zu katalysieren, also zu verstärken.
- In einer „Experimentierphase“ „erprobte“ das System verschiedene Substanzen, und Reaktionsprozesse.
- Nach einem Phasenwechsel konvergierten dann Teile des Systems zu einem stabilen Zustand.
- Bei diesem stabilen Zustand, wurde die Bildung jedes Polymers durch ein anderes Polymer katalysiert. Es handelte sich tatsächlich um ein selbstregulierendes, autokatalytisches System das sich selbstorganisiert hatte.

- Dieses System erhielt nicht nur seine Struktur sondern besaß einen Stoffwechsel und wuchs „explosionsartig“

Zumindest in diesem Modell der künstlichen Chemie konnte Kauffman die spontane Bildung selbstreproduzierender, einen Stoffwechsel besitzender und damit evolutionsfähiger Systeme simulieren.

War das, was Kauffman in seiner künstlichen Chemie gefunden hatte aber „echte“ Selbstorganisation oder nur simulierte? Simulierte das Programm nur einen Stoffwechsel, oder besaß das autokatalytische System wirklich einen?

Akzeptiert man die Simulation als alternatives Universum, in dem echte Lebensprozesse stattfinden, dann impliziert das eine besondere Sichtweise von Leben:

C. Langton schreibt: „Leben sollte als „Besitz der Organisation von Materie und nicht als Besitz einer Materie, die organisiert ist“ angesehen werden.“

Nach Langton, braucht man nicht einmal einen physikalisch aufgebauten Körper, solange die Prozesse und Verhaltensweisen, die typische für Phänomene des Lebens sind, sorgfältig realisiert sind.

Langtons Paradebeispiel für eine solche sorgfältige Realisierung sind Reynolds boids.

Reynolds boids

Craig Reynold entwickelte 1987 zur Simulation des Schwarmverhaltens von Vögeln die boids-Simulation.

Dabei handelt es sich um ein Multiagenten-System, welches das Verhalten von Lebewesen auf der Populationsebene simuliert. Beim Multiagenten-System wird das globale Verhalten nur durch das lokale Agieren von Agenten hervorgerufen.

Ein *Agent* ist ein komplexes, dynamisches System mit folgenden Eigenschaften:

- **activity**: Das System setzt Handlungen (entweder als Antwort auf seine Umwelt - **reactivity** - oder von sich aus - **pro-activity** -).
- **autonomy**: Das System ist von seiner Umwelt funktional unabhängig (funktionale Geschlossenheit bei möglicher energetischer Offenheit).
- **social ability**: Das System kommuniziert mit seiner Umwelt.

Unter **Handlung** (action) versteht man

- eine Änderung des inneren Zustandes
- eine Änderung der Umwelt oder
- Kommunikation mit der Umwelt (v.a. indirekt mit anderen Agenten)

Praktisch ausgedrückt bedeutet das:

- Agenten können bestimmte Handlungen ausführen (z.B. sich bewegen, Aktien kaufen, Futter fressen usw.).
- Sie haben ein klares Ziel (z.B. sie wollen zum Licht, sie wollen den Gewinn maximieren oder haben einfach nur Hunger).
- Sie können mit anderen Agenten kommunizieren (und zeigen dabei z.B. soziales Verhalten wie Kooperation).

Ein Multiagentensystem ist die parallele Simulation vieler Agenten in einem gemeinsamem Raum.

Bei Reynold sind die Agenten die „birdoids“ oder kurz „boids“. Jeder boid reagiert auf seine Umwelt hauptsächlich nach 3 Verhaltensweisen:

1. Separation: Jeder boid hält einen Mindestabstand zu seinen Nachbarn
2. Kohäsion: Jeder boid ist bestrebt ins Zentrum des Schwarms zu gelangen
3. Ausrichtung: Jeder boid passt seine Richtung und Geschwindigkeit den Nachbarn an

1. Separation



2. Kohäsion



3. Ausrichtung



Die Computersimulation zeigte erstaunliche Resultate:

- die boids bildeten tatsächliche Schwärme
- trotz der einfachen Verhaltensregeln ähnelte das Schwarmverhalten der boids sehr stark dem natürlichen Schwarmverhalten von Vögeln

- es zeigte sich emergentes Verhalten: Steven Levy schreibt z.B.:
„Reynolds änderte das Programm dahingehend, dass der Schwarm auf einige Hindernisse stieß, besonders auf dicke Zylinder, die an griechische Säulen erinnerten. Der Schwarm teilte sich an der Säule, wobei die boids rechtzeitig, also noch bevor sie das Hindernis erreicht hatten, aussicherten. Das war bemerkenswert, denn dieses Verhalten war nicht programmiert. Nach dem Ausweichmanöver am Hindernis vereinigte sich der Schwarm wieder, eine Reaktion, die auch ein realer Vogelschwarm zeigte. Reynolds fand heraus, dass sein Modell einige Verhaltensweisen aufwies, die vollkommen unerwartet auftauchten und die ganz sicher nicht in seinem äußerst spartanisch gehaltenen Regelwerk enthalten waren.“

An Reynolds boids lassen sich die Grundprinzipien von AL-Modellen sehr gut zusammenfassen:

- **Synthese-Prinzip:** Reynolds versucht durch Konstruktion einer Simulation natürliches Schwarmverhalten nachzubilden
- **„bottom-up“:** Durch genauer Beobachtung des natürlichen Schwarmverhaltens, formuliert Reynolds elementare Verhaltensregeln, die jeder einzelne Vogel befolgt.
- **Emergenz:** Durch das Befolgen dieser elementaren Verhaltensregeln, also durch lokale Aktion, ergibt sich ein globales gerichtetes Verhalten – das Schwarmverhalten, das auf der Ebene der einzelnen Agenten nicht existierte. Dieses emergente Verhalten gleicht dem natürlichen Vorbild
- **Simulation:** Die Umsetzung als Multiagentensystem, erlaubt das gezielte Modifizieren von Parametern (z.B. Stärke der Separationskraft, Fluggeschwindigkeit...) oder der Umwelt (z.B. Einfügen von Hindernissen, Raubvögel, Wind...).
- **Wissenstransfer:** Die so gewonnenen Erkenntnisse, lassen sich auf natürliche System übertragen. Das Modell kann auf andere Szenarien angewendet werden: Im Rahmen des Swarm-Projekts wurden z.B. prähistorisches Siedlungsverhalten, einfache Aktienmärkte, Honigbienenstämme u.a. modelliert

Fazit:

AL ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, die sich auf konstruktivem Weg dem Verhalten komplexer Systeme nähert. Sie nutzt intensiv die Computersimulation um neue Konzepte zu entwickeln und zu überprüfen. Durch die abstrakte Sicht von Leben als Organisation und Struktur, erweitert AL auch die traditionelle Biologie und schlägt eine Brücke von „Leben wie es ist“ zum „Leben wie es sein könnte“.