

FACHARBEIT
aus der
BIOLOGIE

Künstliches Leben

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	3
2.	Künstliches Leben	4
2.1	Zellularautomaten	4
2.1.1	Turing-Maschine	4
2.1.2	Automatentheorie	4
2.1.3	Spiel Life	5
2.1.4	L-Systeme	6
2.2	Genetische Algorithmen	9
2.2.1	Evolution in der Biologie	9
2.2.2	Klassifizierungssysteme	9
2.2.3	Biomorphe	12
2.3	Computerviren	14
2.3.1	Natürliche Viren	14
2.3.2	Computerviren	14
2.4	Verhaltensforschung und Computersimulation	16
2.4.1	Schwarmverhalten am Computer	16
2.4.2	Simulation eines Hirnschadens	17
2.5	Kybernetik	18
2.5.1	Subsummierende Architektur	18
2.5.2	Experimente mit Kybernetischen Wesen	19
3.	Schluß	21
Anhang:	Danksagung	22
	Beigelegte Diskette	23
	Quellenverzeichnis	24

1. Einleitung

1. Einleitung

Schon lange träumen Menschen davon, Leben selbst erschaffen und gestalten zu können und nun scheinen sie es auch geschafft zu haben. Zumindest ansatzweise scheinen die Anhänger der KL-Forschung, einer relativ neuen Wissenschaft zur Erforschung und Erschaffung künstlichen Lebens (KL), die ersten Schritte in die richtige Richtung eingeschlagen zu haben. Doch entgegen vielen Vermutungen ist das primäre Ziel der KL nicht die Schaffung eines komplexen künstlichen Lebewesens, sondern der Versuch Leben zunächst künstlich nachzuahmen und schließlich einfaches Leben zu erschaffen. "Bottom up!" ist auch der Schlachtruf der KL-Jünger, es sollen nicht komplexe Lebensformen, sondern zunächst einfache Strukturen des Lebens geschaffen und untersucht werden. Als wichtiger Punkt kommt hier dann auch die Evolution zum Zug.

Die KL-Forschung kann man grob in zwei Bereiche gliedern, die Nachahmung und Simulation einfacher Lebensvorgänge mit Hilfe des Computers, sowie der Versuch, wirkliches künstliches Leben, *Leben in silicio*, wie viele in Anlehnung an den Begriff *Leben in vitro*, Leben aus dem Reagenzglas, sagen. Doch überschneiden sich beide Bereiche, denn mit dem Versuch künstliches Leben zu schaffen, wird meist versucht, die Natur nachzuahmen. So sind die Erschaffer wirklichen künstlichen Lebens damit beschäftigt Darwins Evolutionsgesetz und Mendels Vererbungslehre auf anorganisches Material zu übertragen und noch weit vom Erfolg entfernt. Durchgesetzt haben sich bereits die Zellularautomaten, welche dem *Bottom up*-Konzept durchaus gerecht werden und die *Genetischen Algorithmen*, welche die Evolution mit ins Spiel bringen. Ebenso Anklang gefunden, hat auch die Verhaltensforschung am Computer, insbesondere die Kybernetik. Durch die häufige Verwechslung mit der Erforschung Künstlicher Intelligenz (KI), und der Eingliederung in die Komplexität, haben sich noch viele weitere Untergruppen gebildet, die der Deckmantel KL umfaßt. Diese breite Unterfächerung in verschiedene Teilgebiete kann nur in einem Überblick herausgegriffener Gebiete der KL-Forschung veranschaulicht werden.

Welchen Vorteil Computer in der KL-Forschung liefern, macht John H. Holland, Doktor der Informatik und anerkannter KL-Forscher, deutlich:

"Schon damals glaubten wir, daß es ein riesiger Vorteil wäre, wenn wir solche simulierten Versuchstiere hätten (...). Der Vorteil [des Computers] war, daß wir hineinschauen und uns einzelne >Neurone< ansehen konnten, um das Ding dann unter den gleichen Bedingungen neu zu starten und einen anderen Trainingslauf zu machen." [Steven Levy, KL, Seite 195]

2.1 Zellularautomaten

2.1 Zellularautomaten

"Jeder, der lebende Organismen betrachtet, weiß sehr genau, daß diese in der Lage sind, ihresgleichen zu erzeugen. Das ist ihre normale Aufgabe, denn sie würden nicht existieren, wenn es sich nicht so verhielte, und es scheint glaubhaft, daß sie allein aus diesem Grund auf der Welt sind. Lebende Organismen sind mit anderen Worten sehr komplizierte Zusammenschlüsse elementarer Teile und damit nach jeder Wahrscheinlichkeitstheorie thermodynamisch höchst unwahrscheinlich. Daß sie trotzdem in der Welt aufgetaucht sind, ist letztlich ein großes Wunder..."

John von Neumann [S. Levy, KL, S. 19]

John von Neumann gilt als Vater des Künstlichen Lebens. Seine Automatentheorie gilt als eine der Grundvoraussetzungen für künstliches Leben. Sie geht aus den Theorien Alan Turings und dessen sogenannter Turing-Maschine, dem Vorfahren des heutigen Computers hervor.

2.1.1 Turing-Maschine

Unter der Turing-Maschine kann man sich ein Endlosband vorstellen, über das ein Schreib-Lesekopf fährt, welcher in der Lage ist, die auf dem Band enthaltenen Informationsteile zu lesen, und wenn nötig zu löschen oder neu zu beschreiben. In diesem Schreib-Lesekopf gibt es außerdem einen Kontrollmechanismus, welcher diesem mitteilt, was nach dem Lesen eines solchen Informationsteiles zu tun ist. Sie stellt somit ein einfaches Regelsystem dar.

Alan Turing bewies auch seine Theorie, daß es sich bei seiner Turing-Maschine um einen universellen Computer handelt, was bedeutet, daß sie jede Maschine nachahmen kann, sollte ihr nur genügend Zeit gegeben werden. Zusammen mit dem Philosophen Alonzo Church stellte er die Physikalische Church-Turing-Hypothese auf, die besagt, daß eine solche Maschine nicht nur Funktionen mathematischer Maschinen, sondern sogar die der Natur nachahmen kann, und sogar Gültigkeit für das menschliche Gehirn besitzt.

[S. Levy, KL, S. 33 ff.]

2.1.2 Automaten-Theorie

John von Neumann erkannte einen Zusammenhang zur Natur und entwickelte auf der Basis der Turing-Maschine seine Automatentheorie. Sie beruht auf dem Prinzip von Maschinen, deren Sensoren und Detektoren menschliche Sinnesorgane, elektrische Motoren und Hydraulik Muskeln, und Mikroprozessoren das menschliche Gehirn ersetzen. [Multimedia Encyclopedia, "theory of automata"]

Von Neumann erdachte sich ein künstliches Wesen, welches über UND-, ODER- und NICHT-Schalter verfügte und über die Fähigkeit zur Selbstreproduktion verfügen sollte. Es galt als erster sich selbst reproduzierender Automat, besaß jedoch noch zahlreiche

2.1 Zellularautomaten

Kritikpunkte. Der größte war, daß es noch nicht zu bauen war, ein weiterer, daß es zu viele "black boxes" gab, komplexe Strukturen, die dem Betrachter keinen Einblick in die Funktionsweise schafften, sowie, daß die Nachkommen noch keine Unterschiede zum ursprünglichen Wesen aufwiesen. Doch dies war zumindest ein Anfang, deren Probleme im Laufe der Zeit gelöst wurden.

Auf der Automatentheorie basieren nun die Zellularautomaten. Der Ausgangspunkt ist ein horizontales Schachbrett, bei dem sich jede Zelle in einem von 29 verschiedene Zustände befinden kann. Die jeweilige Kombination dieser Zellen bestimmt nun das Verhalten einer Kreatur, genaugenommen aneinanderliegende Zellen die Kreatur selbst. Der Zustand jeder einzelnen Zelle beeinflusst den der anliegenden Zellen, wodurch die Kreatur, die Ansammlung verschiedener Zellen in der Lage ist, sich auszubreiten und neuen Raum in Besitz zu nehmen. Durch Abspaltung von Zellen pflanzt es sich sozusagen fort. Überträgt man dies nun in einen dreidimensionalen Raum ergeben sich weitaus komplexere Strukturen, welche einem einfachen Organismus ähnlich sein könnten, stellt man sich statt den Zellen einzelne Moleküle vor.

2.1.3 Spiel Life

Horton Conway übertrug diese Idee auf den zweidimensionalen Raum, und erlaubte den Zellen nur die zwei möglichen Zustände aktiv und inaktiv, beziehungsweise lebendig und tot. Er nannte das Spiel "*Life*", und es wurde eines der bekanntesten Anwendungen von Zellularautomaten.

Die Spielregeln sind einfach. Jede Zelle kann sich in einem von zwei möglichen Zuständen befinden, lebend oder tot, und besitzt acht potentielle Nachbarn, die an den Ecken angrenzenden Zellen. Eine Zelle kann im jeweils nächsten Taktzyklus nur dann aktiv sein, wenn zwei oder drei der angrenzenden Zellen auch aktiv sind, gibt es mehr als drei angrenzende Nachbarn, wird sie inaktiviert- sie stirbt an Überbevölkerung, sind weniger als zwei angrenzende Zellen aktiv, wird die Zelle ebenso inaktiviert - sie stirbt an Vereinsamung. Hat eine inaktivierte Zelle genau drei aktive angrenzende Zellen, ist sie im nächsten Taktzyklus, also in der nächsten Generation wieder aktiv.

Durch zufällige Anfangskonfigurationen ergaben sich nun bereits nach wenigen Taktzyklen komplexe Muster. Hier setzte auch der Computer ein, denn durch ihn wurde es möglich, tausende von Zyklen in kürzester Zeit ausführen zu lassen.

2.1 Zellularautomaten

Man fand recht schnell interessante Muster, wie Gleiter, aneinandergrenzende Zellen, welche nach vier Zyklen wieder die selbe Konfiguration aufwiesen, sich jedoch um ein paar Zellen weiterbewegt hatten. Conway und seine Gruppe versuchte nun zu beweisen, daß das Spiel *Life* ein Universum aufbauen konnte, in welchem eine universelle Turing-Maschine ihren Platz fand und somit jeden anderen Automaten nachahmen konnte, ob in elektronischer oder natürlicher Art. Hierzu benötigten sie schaltkreisähnliche Muster, welche nötig waren, um zu beweisen, daß *Life* ein universeller Computer war.

[S. Levy, KL, S. 71].

Um die Suche nach weiteren Mustern zu beschleunigen, wurde ein Wettbewerb in der Kolumne "Mathematical Games" der *Scientific American* mit diesem Problem veröffentlicht, welche einen großen Anhang an Interessierten nach sich zog. Schließlich fand man auch die nötigen Muster, welche Conways Theorie, daß *Life* eine universelle Rechenleistung erbringen konnte, bekräftigte. Demnach wäre *Life* theoretisch in der Lage jedes bekannte, sowie unendlich viele unbekannte Tiere hervorzubringen.

"In einem ausreichend großen Maßstab müßte man wirklich lebende Anordnungen erkennen können, (...) lebend in des Wortes eigentlicher Bedeutung, welche Definition man auch vermeiden mag. Sie würden sich entwickeln und vermehren, sich um Territorien streiten, immer intelligenter werden und schließlich sogar ihre Doktorarbeit schreiben. Auf einem ausreichend großen Spielbrett, und daran zweifle ich nicht im geringsten, würden Dinge dieser Art passieren."

[John Conway, S. Levy, KL, S. 75 f.]

Noch heute ist *Life* eines der interessantesten Erfindungen auf dem Gebiet des KL.¹

2.1.4 L-Systeme

Ähnlichkeiten mit Zellularautomaten weisen auch die L-Systeme des Botanikers Astrid Lindenmayer auf. Diese laufen in bestimmten Zeittakten ab, wobei jedes einzelne Symbol sich zunächst an seinem Nachbarn und dann an einem speziellen Regelsatz orientiert, um festzulegen, welches Symbol es im nächsten Zeittakt darstellt.

Durch die Anwendung einer algorithmischen Formel zur Berechnung des Algenwachstums wurde nachgewiesen, daß diese zur Berechnung komplizierter Wachstumsprozesse einer Pflanze herangezogen werden können. Bei Algen gibt es im Anfangsstadium ihres Wachstums zwei sich in Größe und Teilungsbereitschaft unterscheidende Zelltypen, welche im Beispiel durch die Symbole a und b dargestellt wurden. Der Wachstum wurde durch zwei Regeln bestimmt:

- **Regel 1: Ein a im gegenwärtigen Schritt 1 wird im nächsten Schritt zu ab.**
- **Regel 2: Ein b im gegenwärtigen Schritt 1 wird im nächsten Schritt zu a.**

(ab → aba → abaab → abaababa → abaababaabaab → ...)

2.1 Zellularautomaten

Indem man nach einer bestimmten Anzahl von Zyklen das mathematische Ergebnis des Beispiels mit dem Fortschritt einer wirklichen Alge verglich, konnte man zeigen, daß die Ergebnisse identisch waren und dieses Beispiel der Realität entsprach.

[S. Levy, KL, S. 288 f.]

Später versuchten Ben Hesper und Pauline Hogeweg Hybride, am Computer berechnete pflanzliche Modelle, zu erstellen. Sie mussten hierzu ein Programm entwerfen, welches die Regelsätze eines L-Systems interpretieren konnte.

"Die L-Systeme selbst fertigen keine Bilder an, erklärt Hogeweg, Sie schaffen nur lange Zahlenketten. Um Bilder anzufertigen, benötigt man einen weiteren Schritt. Man muß die Zahlenketten als Zweig oder ähnliches interpretieren." [S. Levy, KL, S. 289]

Die Ergebnisse, die das Programm lieferte, glichen erstaunenswerterweise einem Farn, obwohl sie rein mathematisch errechnet wurden und auf der Zahlenkette eines L-Systems basierten. Es ist verständlich, daß es sich bei den sogenannten *Morphemen* nicht um natürliche Pflanzen handelte, jedoch läßt es vermuten, daß der komplexe Aufbau von Pflanzen auf ähnlichen mathematischen Formeln basieren könne.

Mit anderen Programmen und deren Ergebnissen erkannten Lindenmayer und seine Studenten, Ähnlichkeiten zu weiteren Pflanzen. So ähnelte eine fotorealistische Berechnung dem Foto einer Sonnenblume, oder die unterschiedlichen Stadien der Embryonalentwicklung eines künstlichen Farns denen von *Microsorium linguaeforme*.

[S. Levy, KL, S. 296]

Weitere Wissenschaftler und Informatiker nahmen sich des Problems der L-Systeme an und entwickelten Programme, welche lebensähnliche Bäume, Sträucher und sonstige Pflanzen darstellen konnten. Sie wußten sehr wohl, daß es sich hierbei nicht um künstliche Lebensformen, ihre Ergebnisse doch aber lebensähnliche Formen aufwiesen. Es liegt also nahe, daß sich das Leben auf mathematischen, noch unbekanntem Regeln der Komplexität stützt. (Abb.1)

2.2 Genetische Algorithmen

2.2 Genetische Algorithmen

2.2.1 Evolution in der Biologie

Ein wichtiger Teilbereich der Biologie, der auch die KI-Forscher recht angetan hat, ist die Evolution. Die Evolution umschreibt in der Biologie den Prozeß, bei dem sich im Verlaufe von Jahrmillionen durch zufällige Mutationen, meist Veränderungen des genetischen Erbmaterials, Durchmischung der Erbinformation und natürliche Selektion die heutige mannigfaltige Artenvielfalt entwickelt hat. [Multimedia Encyclopedia, evolution]

Die dazu nötigen Mutationen in Genen und Chromosomen sind hierbei verantwortlich für die Veränderung genetischer Information in einem Organismus und die daraus entstehenden neuen Arten und Formen, durch natürliche Selektion werden vorteilhafte Phänotypen ausgewählt und führt durch die ständige Anpassung an die Umweltverhältnisse zu einer allmählichen Umbildung der Arten.

Evolution ist somit ein idealer Problemlöser, Durchmischung der Erbinformation, Mutation und anschließende natürliche Selektion - besser angepasste Arten überleben - ermöglichen Populationen eine bessere Anpassung und Überlebensfähigkeit in ihrer Umwelt.

2.2.2 Klassifizierungssysteme

John Henry Holland, Doktor der Informatik, war, angeregt durch das Buch des angesehenen Evolutionsforschers R.A. Fisher "The Genetic Theorie of Natural Selection" (Die genetische Theorie der natürlichen Selektion), der erste, der die Evolution auf künstliche Populationen im Computer übertrug. Der von ihm geprägte Begriff "Genetische Algorithmen" (GA) bezeichnet einen durch Evolution entstehenden Algorithmus, eine Folge von exakten Arbeitsanweisungen durch die der Lösungsweg einer Rechenaufgabe eindeutig beschrieben wird. Das Ergebnis Hollands Überlegungen war ein Konzept, welches er Klassifizierungssystem (classifier system) nannte.

Ein Computerprogramm besteht aus einem System von Regeln der Form "Wenn die Bedingungen a,b,c,... erfüllt sind, dann führe die Handlungen x,y,z,... aus". Hierdurch wird dem Computer genau vorgeschrieben, was zu tun ist, wenn eine bestimmte Bedingung eintritt. Werden Bedingung und Handlung in Bitfolgen umgewandelt, kann nun eine 1 für eine erfüllte, und eine 0 für eine unerfüllte Bedingung stehen, somit für jede 1 das Auslösen, für eine 0 kein Auslösen einer Handlung. Eine Bitkette steht nun übertragen für den genetischen Code eines Programms, jedes Bit für ein Gen. Ebenso können unterschiedlich

2.2 Genetische Algorithmen

lange Bitfolgen, komplexere Erbinformationen, Reaktionen auf einen Reiz auslösen.

[J. Holland, Genetische Algorithmen]

Ein Frosch soll hier als einfaches Beispiel eines solchen Regelsystems dienen.

Ein Frosch reagiert auf mögliche Reize, die ein Objekt erfüllt, mit verschiedenen Reaktionen.

So reagiert er auf ein großes, sich schnell näherndes Objekt mit Flucht, auf ein kleineres Objekt mit Verfolgung, auf ein gestreiftes jedoch ohne Reaktion.

So kann man die Reize Größe, Entfernung, Streifung als Bedingungen für die Auslösung einer durch den Algorithmus bedingten Reaktion, wie Flucht oder Verfolgung interpretieren, sollten diese auf ein bestimmtes Auslösemuster im Algorithmus zutreffen. Als schlechtes Ergebnis, und somit als ungünstige Reaktion auf eine Reizfolge, würde sich die Verfolgung eines gestreiften Objekts, einer möglichen Biene, erweisen. Die abgebildete Darstellung (Abb. 2) veranschaulicht dies.

Indem nun anhand der Qualität der Ergebnisse, der Handlungen unterschiedliche Bitfolgen miteinander verglichen werden, und schlechte Ergebnisse ausselektiert, gute Ergebnisse dagegen mit weiteren guten kombiniert werden, kommt Evolution mit ins Spiel der Klassifizierungssysteme. Im Laufe der Generationen miteinander kombinierter, gepaarter und mutierter Bitketten, setzen sich diejenigen durch, welche die bessere Lösung einer Aufgabe liefern, schlechtere, also an ihre Umwelt unangepaßte Algorithmen werden auf natürliche Weise ausselektiert, sie überleben nicht. So ergeben sich immer besser an ihre Umwelt angepaßte Algorithmen.

Obwohl Genetische Algorithmen noch nicht genau erforscht wurden, zeigen bisherige Ergebnisse doch bemerkenswertes komplexes Verhalten.

Ein Beispiel für Genetische Algorithmen bietet das sogenannte Gefangenendilemma.

Bei diesem Spiel haben zwei Spieler die Möglichkeit zwischen Betrug und Kooperation.

Betrügt beispielsweise der eine Spieler, während der andere kooperiert, gewinnt der Betrüger, kooperieren beide, erhalten beide den selben hohen Betrag. Sollten beide betrügen, erhalten beide einen Minimal-Betrag.

Politologen und Sozialwissenschaftler haben dieses Spiel intensiv studiert, da es ein einfaches Modell für die Kooperationsproblematik bietet. Eine der effektivsten Strategien hier ist "Tit for Tat" ("Wie du mir, so ich dir"). Der Spieler macht es in diesem Fall seinem

2.2 Genetische Algorithmen

Gegner gleich, er betrügt, wurde er im vorherigen Spiel betrogen und kooperiert, sollte der Gegner im vorherigen Spiel auch zur Kooperation bereit gewesen sein.

Man versuchte nun herauszufinden, ob ein genetischer Algorithmus diese Strategie auch herausfinden könnte. Hierbei mußten die möglichen Strategien zunächst in Bit-Ketten umgewandelt werden, ebenso wie die Ergebnisse der letzten Spiele. Als Tauglichkeit einer Strategie wurde der durchschnittliche Gewinn betrachtet, den ein Spieler bei wiederholtem Spiel erhielt. Der genetische Algorithmus fand durch seine Evolution "Tit for Tat" und verbesserte diese Strategie sogar noch um eine den Wissenschaftlern noch nicht bekannte Variante. Diese nutzte Spieler aus, die sich zur Kooperation verleiten ließen, auch wenn sie betrogen wurden, kehrte jedoch zu "Tit for Tat" zurück, wenn sich der Gegner nicht hereinlegen ließ. [J. Holland, Genetische Algorithmen]

Weiterhin hat man an der Universität von Michigan latentes Lernen bei Genetischen Algorithmen beobachtet, ähnlich einer Ratte, die in einem Labyrinth, ohne für einen bestimmten Weg belohnt oder bestraft zu werden, im selben Labyrinth wieder ausgesetzt verstecktes Futter schneller wiederfindet. Auch fand man bei Genetischen Algorithmen Ähnlichkeiten mit natürlichen Ökosystemen, Symbiose und Parasitismus, Räuber-Beute-Koevolution, Nischenbildung, Aufspaltung einer Art in neue Stammeslinien, als auch Hinweise auf sexuelle und asexuelle Fortpflanzung.

2.2.3 Biomorphe

Richard Dawkins, ein Professor aus Oxford, dagegen verwendete Genetische Algorithmen, um tierähnliche Figuren, seine *Biomorphe* zu erzeugen. Hierbei handelt es sich um einfache Strichzeichnungen, welche Bäumen ähneln. Ihre Gestalt ist abhängig von bestimmten Genen, Parametern, die Merkmale wie Verzweigung, Symmetrie und Gliederung bestimmen. Jedes dieser Gene verändert sich durch Mutation, welche den *Biomorphen* eine neue Gestalt geben.

Im Gegensatz zu anderen Versuchen mit Genetischen Algorithmen, bei welchen die Selektion durch die Qualität der Ergebnisse zustande kam, selektierte bei Dawkins die Person, die den Computer verwendet nach eigenem Ermessen, ähnlich der Selektion des Züchters bei einer Tierzucht.

Von den so entstehenden Gebilden ähnelten viele bald nicht mehr nur Vorbildern aus der Pflanzen-, sondern auch aus der Insektenwelt, die Nachkommen unterschieden sich zunehmend von ihren ursprünglichen Gebilden, eine beeindruckende Demonstration Genetischer Algorithmen über die Wirkung der Evolution.

2.2 Genetische Algorithmen

Genetische Algorithmen stellen somit einen entscheidenden Schritt in die richtige Richtung auf dem Weg zum künstlichen Leben dar. Sie sind mit den Genen, und der DNS, also der Erbinformation lebender Organismen vergleichbar, ihr Ursprung ist jedoch der Computer.

"Vielleicht werden wir also zum Ausgleich dafür, daß wir der Natur soviel abgeschaut haben, zum besseren Verständnis der lebendigen Umwelt und anderer komplexer adaptiver Systeme beitragen können." [John H. Holland - Genetische Algorithmen]

2.3 Viren

2.3 Viren

Eine besondere Stellung Genetischer Algorithmen nehmen Computerviren ein. Als Vater der Computerviren gilt Fred Cohen, welcher, mit der Theorie sich selbst replizierender Automaten von Neumanns vertraut, in Folge seiner Doktorarbeit, ein sich selbst replizierendes Programm entwickelte. Seinem Professor Leonard Adleman fiel für dieses Projekt sofort die biologische Entsprechung ein: Viren. Vergleicht man Viren am Computer mit natürlichen Viren, erkennt man schnell die Gemeinsamkeiten.

2.3.1 Natürliche Viren

Viren bestehen aus einem oder mehreren Nukleinsäuremolekülen, die von einer Proteinhülle umgeben sind, sie besitzen keinen Stoffwechsel und können sich nicht selbst fortpflanzen, sondern veranlassen Wirtszellen Virus-Nukleinsäure und Virus-Protein zum Bau neuer Viren zu bilden. Lysogene Viren gehen hier noch einen Schritt weiter und lassen die Wirtszellen, welche die virale DNS in sich tragen, sich vermehren. Erst durch einen beeinflussenden äußeren Faktor, dem Aktivator, kommt es zur Herstellung und schließlich Freisetzungen der neugebildeten Viren.

2.3.2 Computerviren

Computerviren können durchaus mit natürlichen Viren verglichen werden. Sie besitzen eine vergleichbare Komplexität und bestehen ähnlich ihren natürlichen Vorbildern aus reiner Information, einem kompilierten Quellcode. Um sich fortzupflanzen befallen sie den Quellcode häufig benutzter Anwendersoftware oder den Bootblock von Disketten und Festplattenpartitionen, um den eigenen Code in den Quellcode befallener Programme zu schreiben. Beim Ausführen der befallenen Programme breitet sich der Virus weiter aus, ohne dem Programm vorerst zu schaden. Erst durch einen Aktivator, beispielsweise einem festgesetzten Datum, aktiviert sich der Virus. Mögliche Folgen können die Zerstörung wichtiger Dateien, Partitionen, oder aber nur einfache Mitteilungen am Bildschirm des Benutzers sein. Mittlerweile sind sogar Computerviren bekannt, welche in der Lage sind, sich durch zufällige Änderung ihres Quellcodes (einer Mutation ihrer Erbinformation) vor Anti-Virenprogrammen zu schützen. Anti-Virenprogramme sind es auch, welche Selektionsdruck auf die Viren ausüben, denn nur angepasste Mutationen haben Chancen, von einem Anti-Virenprogramm nicht entdeckt und vernichtet zu werden. Sowohl Computer- als auch natürliche Viren sind reine Überlebensmechanismen mit der Aufgabe, ihre Substanz, den Programmcode, beziehungsweise die Erbinformation zu erhalten.

2.3 Viren

Durch den fehlenden Stoffwechsel, die eingeschränkte Möglichkeit zur Fortpflanzung, sowie die Zellen begrenzende Membran, ist es jedoch unter Biologen strittig, ob Viren zu den lebenden Organismen zählen. Da dem Ebenbild am Computer die selben Merkmale lebender Organismen fehlen, ist es auch hier umstritten, ob man sie als wirkliche Lebensformen bezeichnen kann.

"Computerviren stehen gegenwärtig genau an der Grenzlinie zum Leben - und werden diese bald überschreiten." [S. Levy, KL, S. 406]

2.4 Verhaltensforschung und Computersimulation

2.4.1 Schwarmverhalten

Weitere Erfolge haben Verhaltensforscher und Informatiker auf dem Gebiet der KL-Forschung erzielt. Craig Reynolds, ein Computeranimator aus Kalifornien, beispielsweise übertrug einfache Regeln des Schwarmverhaltens, welche er bei Vögeln auf einem nahegelegenen Friedhof beobachtete, auf ein Computerprogramm, welches er "*boids*" (von *birdoids*) nannte. Folgende drei primäre Komponenten waren in seinem Schwarmverhalten zusammengefasst:

- **Eine zwingende Kraft, die den Schwarm zusammenhält.**
- **Eine Fähigkeit, die Geschwindigkeit zu bestimmen, so daß die Vögel sich gleichschnell fortbewegen.**
- **Eine Fähigkeit, Abstände einzuhalten, damit die Vögel sich nicht zu nahe kommen.**

Die Verhaltensweise seiner simulierten Vögel (eigentlich nichts weiteres als Zellen eines Zellularautomaten) zeigte eine erstaunliche Ähnlichkeit mit dem komplexen Verhalten eines natürlichen Vogelschwarms. Zu Beginn der Simulation formierten sich die *boids* zu einem geordneten Schwarm, wobei die *boids* im Zentrum in einer relativ stabilen Konfiguration flogen, die *boids* an den Außenseiten des Schwarms dagegen immer wieder abbremsen und beschleunigen mussten, um den Schwarm zusammenzuhalten. Vor Hindernissen teilte sich der Schwarm, wobei jeder *boi*d, ohne daß es programmiert war, kurz vor dem Hindernis in eine Richtung ausscherte. Nach dem Hindernis vereinigte sich der Schwarm gleich einem realen Vogelschwarm wieder.

Während des Programmverlaufs zeigte der Schwarm weitere Verhaltensweisen auf, die Reynolds nicht programmiert hatte. Wurde beispielsweise ein *boi*d vor einem Hindernis durch andere *boi*ds daran gehindert, dem Hindernis auszuweichen, hielt er einen Augenblick vor dem Hindernis inne, um dann beschleunigt zu versuchen den Schwarm wieder einzuholen.

Weiter wies das Programm auch Ähnlichkeiten mit Fischeschwärmen auf. Ornithologen interessierten sich schnell für Reynolds Programm, welches sogar eine Perspektive aus der Sicht der einzelnen *boi*ds aufwies, und dessen Regeln, denen die *boi*ds folgten. Fraglich ist sicher, ob diese Regeln auch auf natürliches Schwarmverhalten zutreffen und inwieweit Ornithologen von dem Programm profitieren können. Der Vorteil eines solchen Programms ist jedoch, daß es zu gleichen Bedingungen mehrmals aufgerufen werden und beobachtet werden kann, was unter experimentellen Bedingungen in freier Natur meist nicht möglich ist. [S.Levy, KL, S. 98 ff.]

2.4 Verhaltensforschung und Computersimulation

So untersuchte man auch das Verhalten von Termiten. Durch ein Programm wurde versucht das Verhalten von Termiten zu simulieren. Änderte man die Versuchsparameter des Programms (beispielsweise die Größe der Futterbrocken) und verglich das Verhalten der simulierten mit dem der natürlichen Termiten, konnte man bei einer Übereinstimmung schließen, daß die im Programm verwendeten Regeln auch in der Wirklichkeit ihre Existenz besaßen. Hierdurch kann man sich lange Zeit beanspruchende Untersuchungen in der freien Natur, durch Computersimulationen verkürzen. Treffen die Theorien, welche man in eine Simulation einbaut, auch auf das Verhalten natürlicher Lebewesen zu, kann man davon ausgehen, daß sie in einem gewissen Verhältnis der Realität entsprechen.

2.4.2 Simulation eines Hirnschadens

Aber auch in der Medizin findet diese Forschung zunehmend Anwendung. So versucht man sich anhand eines Modells eines neuronalen Netzwerkes Einblick in den Ursprung von Oberflächen- und Tiefendyslexie, einer Schädigung des Gehirns, bei der das Sprach-, Lesezentrum des Gehirns erheblich beeinträchtigt wird, zu verschaffen. Diese seltene Schädigung des Gehirns äußert sich dadurch, daß Patienten gelesene Wörter falsch umsetzen und somit verkehrt wiedergeben, wobei die wiedergegebenen Wörter jedoch einen Bezug zu den gelesenen Wörtern besitzen. Ein Patient mit Tiefendyslexie liest beispielsweise *antik* als "Vase" und *Onkel* als "Neffe", oder aber *crowd* (Menschenmenge) als "crown" (Krone). Patienten mit Oberflächendyslexie neigen dazu, schwer sprechbare Wörter falsch vorzulesen, beispielsweise das Wort *Yacht* (im Englischen "jot" mit offenem "o" ausgesprochen) wie "yatched" ("jätschd").

Zur Untersuchung dieses Phänomens entwickelte man neuronale Netzwerke, welche die Rolle der semantischen Route übernahmen. Durch gezielte Entfernung bestimmter Neuronenverbindungen wurden mehrere der Tiefendyslexie ähnliche Symptome hervorgerufen. Der Computer machte ähnliche Lesefehler wie der menschliche Patient.

Durch die Entdeckung weiterer Indizien bekannter Hirnschäden zeigt die Verwendung neuronaler Netze einen erfolgreichen Einsatz einer neuen Technik zur Erforschung der Hirntätigkeit auf. Der Unterschied zu anderen Erklärungen der Tiefendyslexie ist dabei die Art der Hypothesenbildung. Im Gegensatz zur konservativen Methode, der verbalen Charakterisierung eines komplexen neuronalen Mechanismus und intuitiver Vorhersage des Einflusses des Hirnschadens, simuliert man den Mechanismus, beschädigt ihn und beobachtet das Ergebnis. Computersimulationen werden in diesem Bereich der Medizin in Zukunft wohl eine noch bedeutendere Rolle zur Erforschung der Hirnfunktion und möglicher Schäden spielen. [Hinton,Plaut,Shallice:Computersimulation eines Hirnschadens]

2.5 Kybernetik

2.5 Kybernetik

Zuletzt soll ein weiterer wichtiger Punkt der Erforschung Künstlichen Lebens angesprochen werden, die Kybernetik. Bisher spielten sich Versuche und Simulationen nur auf dem Computer ab, doch ein weiterer Schritt, den die Forscher gehen, ist die Übertragung der bisher gewonnenen Erfahrungen auf Roboter. Diese sind mittlerweile sehr weit entwickelt und zeigen bereits ein sehr ausgeprägtes *Verhalten*.

2.5.1 Subsumierendes Verhalten

Was Rodney A. Brooks, ursprünglicher Anhänger der KI-Forschung, an den damals vorherrschenden Robotern der KI mißfiel, war das KI-Paradigma an dem sie hingen und ihre damit verbundene Trägheit. Ein Roboter mußte seine Welt erst wahrnehmen, um dann über sie *nachdenken* zu können - stieß ein Roboter auf ein Hindernis, welches ihm in den Weg gelegt wurde, dauerte es zunächst eine Ewigkeit von Rechenzeit, bis er reagierte. Seiner Ansicht nach sollten Roboter auf Wahrnehmungen reagieren, nicht erst die nächsten Schritte im voraus berechnen, nach dem *Bottom up*-Prinzip sollte ihr Verhalten aus einer fortlaufenden Serie sich entwickelnder Handlungen entstehen. Seine Idee war eine *subsumierende Architektur*, wie er sie nannte. Durch diese wurde Brooks zu einem der Vorreiter der KL-Kybernetiker.

Ähnlich Insekten sollten Brooks Roboter einfache Wesen sein, die nur mit einfachen Sensoren ausgestattet waren, die ihnen meldeten, wenn sie irgendwo angestoßen waren, keine rechenintensive Roboter, welche erst ein Videobild ihrer Umgebung auswerten mussten, um den nächsten Schritt zu unternehmen.

"Insekten werden normalerweise nicht für intelligent gehalten. Dennoch ... leben sie in einer dynamischen Welt, führen zahlreiche, komplexe Aufgaben durch, wie Jagen, Fressen, Paaren, Nestbau und Aufzucht von Jungen. Es mag Regen und Stürme geben, Feinde können auftauchen, und zuweilen können Futterquellen knapp werden, alles Dinge, die die Überlebenschancen der Insekten beeinträchtigen können. Statistisch gesehen, sind die Insekten jedoch erfolgreich. Kein von Menschen erschaffenes System ist nur annähernd so zuverlässig." R. A. Brooks [S.Levy, KL, S. 348]

2.5.2 Experimente mit kybernetischen Wesen

Valentin Braitenberg, ein deutscher Neuroanatom, veröffentlichte auf Brooks Konzept aufbauend sein Buch "Vehikel - Experimente mit kybernetischen Wesen". In seiner Theorie geht er hier von einfachen Wesen aus, deren komplexen Aufbau er von Vehikel zu Vehikel steigert. Bei seiner Beschreibung interpretiert Braitenberg Motivation durch Emotionen und Bedürfnisse in das Verhalten seiner Vehikel, vermeidet aber sinnvollerweise die Definition

2.5 Kybernetik

von Leben.

Sein *Wesen 1* ist mit einem Sensor und einem Motor, dessen Geschwindigkeit sich proportional zur Einwirkung des Sensors steigert, ausgestattet. Misst der Sensor beispielsweise die Temperatur der Umgebung, wird das Wesen sich in warmen Gegenden schneller bewegen als in Kalten. Hierzu Braitenberg:

"Stellen Sie sich nun vor, Sie sähen ein solches Wesen in einem Teich herumschwimmen. Sie würden sagen, es ist ruhelos und mag kein warmes Wasser. Es ist aber ziemlich dumm, denn es kann nicht zu der schönen kalten Stelle zurückkehren, wenn es in seiner Unruhe darüber hinausgeschossen ist. Aber auf jeden Fall würden Sie sagen, LEBT es, da Sie nie ein Stück toter Materie gesehen haben, das sich auf solche Weise umherbewegt." [V. Braitenberg, Vehikel, S. 16]

Bei seinen *Wesen* vom Typ 6 bringt Braitenberg die Evolution ins Spiel seiner Vehikel. Er wählt hierzu die kompliziertesten Vehikel seiner Kollektion aus, und stellt sie in eine künstliche Umgebung, welche mit Sensoren, Licht- und sonstigen Quellen, sowie Gefahrenstellen ausgestattet ist. Dazu besorgt er sich einen großen Materialvorrat. Von den umherfahrenden Vehikeln greift er sich nun von Zeit zu Zeit eines raus, und versucht es anhand seines Materialvorrates nachzubilden. Dadurch daß ihm bei der Produktion kleinere Fehler unterlaufen (er nennt es Mutationen), verändert sich die Verhaltensweise des neuen Vehikels. Auf natürliche Weise werden schlechte Produkte jedoch an Gefahrenstellen ausselektiert, Vehikel mit nützlichen Veränderungen bleiben im Spiel und werden weiter von ihm dupliziert.

Bei *Wesen 7* verbessert Braitenberg besondere Verknüpfungen in einem *Wesen 5* mit einem Spezial-Draht, der seine Leitfähigkeit zu bestimmten Bedingungen ändern kann, aggressive Wesen färbt er rot an. Trifft nun ein Vehikel vom Typ 7 auf ein rot gefärbtes Wesen, würde der Sensor für Rot öfters gleichzeitig mit dem Schwellenelement, welches auf aggressives Verhalten reagiert, aktiviert, und die Leitfähigkeit des Spezial-Drahtes, welcher die beiden verbindet, würde sich ändern. *Wesen 7* würde im wahrsten Sinne des Wortes *rot sehen*. Immer wenn *Wesen 7* daraufhin rot erkennt, würde der Bewegungsablauf aktiviert, welcher sonst für aggressives Verhalten zuständig ist.

Bisher hat man nur geringe Vorstellungen davon, was sich bei Lernvorgängen im inneren des Nervengewebes abspielt. Wird beispielsweise eine Ratte durch Bestrafung darauf dressiert, nicht mehr auf eine bestimmte Stelle zu treten, so verknüpfen sich in ihrem neuronalen Netzwerk vermutlich neue synaptische Verbindungen, welche sie dazu bewegen, nicht mehr auf diese Stelle zu treten.

Auf diese Weise erfindet Braitenberg in seinem Buch immer kompliziertere Wesen, welche sich in ihrem Verhalten und in ihrem komplexen Aufbau nur noch wenig von ihren

2.5 Kybernetik

organischen Vorbildern unterscheiden.

Generell ist es durch einfache Regeln möglich, Schwarmverhalten, innerartliche Kommunikation, aber auch jegliche andere Verhaltensweisen bei Robotern hervorzurufen, oder aber besondere Verhaltensweisen und Reaktionen durch Erfahrungen zu erlernen. Wie Braitenberg am Beispiel seines *Wesen 6* darstellte, wäre im begrenzten Ausmasse auch Evolution möglich. Wie in einem Artikel des Magazins der Süddeutschen Zeitung geschrieben, können Roboter insektenähnliches Verhalten zeigen, es ist ihnen sogar möglich, miteinander Fußball zu spielen. Probleme, mit denen sich die Kybernetiker jedoch noch auseinandersetzen müssen, ist die Fähigkeit zur Fortpflanzung, und der Vorwurf, Leben müsse aus organischen Materialien bestehen.

3. Schluß

3. Schluß

In den letzten Jahren hat sich auf dem Gebiet des Künstlichen Lebens allein durch die rasante Entwicklung von Computern und Hochleistungsrechnern einiges getan. Mit dem technologischen Fortschritt steigen auch die Möglichkeiten der KL-Forscher.

Simulationen sind sowohl auf dem Gebiet der Klima- und Wetterforschung, der Soziologie, als auch der Medizin oftmals nicht mehr wegzudenken. Wetterprognosen, Wirtschaftsprognosen und -strategien, aber auch die medizinische Forschung wären ohne Computerunterstützung im heutigen Maße nicht mehr möglich. Die Wirkung neuer Medikamente wird heute bereits häufig am Computer simuliert. Und auch die Kybernetik hat ihren Platz in der Gegenwart, autonome Roboter werden versuchsweise in Kanalisationen zur Reinigung eingesetzt, ohne dabei von Menschen bedient zu werden. Sowohl in der Tiefsee, als auch im All werden gefährliche Erkundungen mit autonomen unbemannten Robotern eingeholt.

Mit dem Gedanken an künstlich erschaffene *lebende* Wesen will man sich jedoch noch nicht abgeben. Kritiker und Gegner der KL sehen in anorganischen, nicht auf natürlichem Wege entstandenen Gebilden keine *lebende* Wesen, auch wenn sie lebensähnliche Verhaltensweisen aufzeigen. Als Antwort darauf werden dann oft die Worte des Astrophysikers Carl Sagan aus der Encyclopedia Britannica zitiert:

"Es gibt keine endgültige Definition von Leben".

Danksagung

Danksagung

Ich möchte mich hiermit bei den Betreibern der *Connection Universe*, Christian Kleinheinz, Christian Dietrich und insbesondere Rainer Buchty für die freundliche Unterstützung bei der Quellensuche im Internet und die Benutzung ihrer Computer bedanken, weiterhin bei Thomas Kronberger für den Hinweis auf das Buch "Vehikel - Experimente mit Kybernetische Wesen" von Valentin Braitenberg, sowie meinem Bruder Richard Staufer für die endlosen Stunden, die er nicht an seinen Computer konnte, während ich diese Arbeit schrieb.

Quellenverzeichnis

Quellenverzeichnis

Levy, Steven: *KL - Künstliches Leben aus dem Computer*
München: Droemer Knaur, 1993

Braitenberg, Valentin: *Vehikel, Experimente mit kybernetischen Wesen*
Reinbek bei Hamburg: Rowolt Taschenbuch Verlag GmbH, 1993

Bayrhuber, H.; Kull, U.: *Linder, Biologie*
Stuttgart: J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Carl Ernst Poeschel Verlag GmbH,
1989²⁰

Murray, J.D.: *Wie der Leopard zu seinen Flecken kommt*
In: Spektrum der Wissenschaft 5 (1988), S. 88 ff.

Manhart, K.; Meier, H.: *Computereperimente zum Commons-Dilemma*
In: Spektrum der Wissenschaft 2 (1991), S. 19 ff.

Springer, M.: *Alan Turing und der Leopard*
In: Spektrum der Wissenschaft 4 (1991), S. 42 ff.

Holland, John H.: *Genetische Algorithmen*
In: Spektrum der Wissenschaft 9 (1992), S. 44 ff.

Hinton, G.E.; Plaut, D.C.; Shallice, T.: *Computersimulation eines Hirnschadens*
In: Spektrum der Wissenschaft 12 (1993), S. 68 ff.

Weil, John: Art. *virus*

Frisinger, Howard: Art. *von Neumann, John*

Logsdon, Donna and Tom: Art. *automata, theorie of*

Sohal, R. S.: Art. *life span*

Levine, Louis: Art. *life (biology)*

Volpe, Peter: Art. *evolution*

Chai, C.K.: Art. *mutation*

In: Multimedia Encyclopedia Version 1.5, The Software Toolworks,
Grolier Electronic Publishing, Inc., 1992

Rötzer, Florian: *Vom Leben im digitalen Zeitalter,*
Über die künftigen Veränderungen der Natur zum Komplexen
In: REGIS, Süddeutsche Zeitung 04.01.1995, Ressort Feuilleton, S. 12

Illinger, Patrick: *Schöpfung in silicio,*
Eine ernstzunehmende Forschergruppe will "Künstliches Leben" kreieren/
Hilfreiche Roboter oder Frankenstein's Monster?
In: REGIS, Süddeutsche Zeitung 15.09.1994, Ressort Wissenschaft, S. 37

Quellenverzeichnis

Blum, Wolfgang: *Evolution im Zeitraffer*,
Ein Computermodell untersucht die Vielfalt der Arten
In: REGIS, Süddeutsche Zeitung 24.12.1992, Ressort Wissenschaft

Schmidt, Egon: Von Parasiten, Betrügern und Hochstaplern,
Künstliches Leben - fast wie echt
Computer simulieren Lebensprozesse mit höchst verblüffenden Resultaten
In: REGIS, Süddeutsche Zeitung 15.03.1994, Ressort Beilage

o.A.: Verhaltensforschung für Computer,
Zwei Bücher über die Schritte zum Künstlichen Leben
In: REGIS, Süddeutsche Zeitung 13.08.1993, Ressort Sachbuch, S. 28

Weber, Eva: *Artificial Life beherrschte die Linzer Ars Electronica*
Die Schoepfungsgeschichte wiederholt sich im Computer
In: REGIS, GENIOS, Computerzeitung 28+29 15. Juli 1993, S. 23

sowie Informationen aus:

WWW: <http://www.spektrum.com> Spektrum der Wissenschaft
 <http://reality.sgi.com/employees/craig/boids.html>
 <http://alife.santafe.edu/~liekens> C.O.P.P.

Internet-Newsgroups und Mailbox-Foren