

2.3.4 Evolution, Zelluläre Automaten und Künstliches Leben

- Evolution

Zwischen dem Menschen und allen Lebewesen besteht eine gemeinsame Vergangenheit, jedoch folgt jede Art ihrem eigenen Evolutionsweg. Alle Lebewesen durchlaufen ähnliche Entwicklungsstadien wie der Mensch, jedoch mit anderen Differenzierungen. Der Mensch ist hierbei, evolutionär betrachtet, ein zweifüßiges, aufrecht laufendes Lebewesen, dessen Strukturen auf Kohlenstoff basieren und das ein hochkomplexes Nervensystem entwickelt hat. Daß der Schimpanse uns näher verwandt ist, als alle anderen Lebewesen zeigt sich u. a. daran, daß sich in der 11. Woche kaum Unterschiede zwischen dem Fötus des Menschen und eines Schimpansen erkennen lassen.^{1/} Das menschliche Leben entsteht durch Faltungen des Embryos, der, wie der Embryo aller Lebewesen, eine Art Simulator der gesamten menschlichen Evolution zu sein scheint, die mittlerweile 4 Milliarden Jahre währt.

Grundsätzlich lassen sich drei Evolutionstheorien unterscheiden, die **Darwinsche** Evolution (zufällige Variation), die **Lamarcksche** Evolution (Übertragung erworbener Eigenschaften) sowie die **Kingsche** Evolution (Arten verändern sich nach äußeren Katastrophen schneller).^{2/} Im Rahmen der Darwinschen Evolution zählt individuelles Lernen nicht viel. Dagegen spielt dieses bei Lamarck eine entscheidende Rolle, um intelligentere Codierungen zu finden. Das Problem der Optimierung liegt bei der Methode von Lamarck darin, erfolgreiche Veränderungen des Phänotyp in die Sprache des Genotyps zu übersetzen, d.h. die erfolgreichen Codierungen herauszufiltern.^{3/} Die Lamarcksche Evolution benötigt einen Organismus, der ein Arbeitsverzeichnis seiner Gene besitzt. Wegen der immensen Rechenkomplexität können dies zukünftig nur außerordentlich leistungsstarke Parallelrechner leisten.

Das Informationszeitalter hat genau genommen bereits vor 3 Milliarden Jahren mit der Entstehung des Lebens und dessen Codierung begonnen.^{4/} Die Evolution erfordert signifikante Veränderungen in den Codierungen und nicht nur eine Veränderung in den Strukturen.^{5/} Die Anpassung der Arten im Rahmen der Evolution ist deshalb das elementare Interface-Problem: Es stellt sich für jede Art die Frage, wieviel Zugang zur übrigen Welt diese für ihr Überleben benötigt. Die molekulardarwinistische Theorie der Lebensentstehung zeigt, daß der Selektionswert eines lebenden Systems

durch seine funktionale Organisation bestimmt wird./6/ Leben ist deshalb nicht ein Ansammlung von Materie, sondern entsteht durch Organisation und Differenzierung von Strukturen durch komplexe Prozesse. Leben scheint somit ein geordnetes und gesetzmäßiges Verhalten von Materie zu repräsentieren./7/ Wiederholung und Variation, d.h. reversible und irreversible Prozesse bilden hierbei die Basis der Evolution. Es war Ludwig **Boltzmanns** (1844-1906) großes Verdienst, daß er seine Evolutionstheorie auf das Nervensystem sowie die Emergenz des Gedächtnisses und des Bewußtseins erweiterte./8/

Leben existiert nach **von Neumann** in Form von Informationsprozessen, ebenso bei **Küppers**, der das Problem der Lebensentstehung als gleichbedeutend mit der Entstehung biologischer Information ansieht./9/ Das für das Leben grundlegende Prinzip der Selbstreproduktion beruht deshalb nicht auf der Materieübertragung, sondern auf Datenübertragung./10/ Zwei charakteristische Phänomene für lebende Systeme sind hierbei die Fähigkeit zu lernen und die Selbstreproduktion./11/ Evolution ist das Ergebnis der Faktoren Umwelt, Auslese, Deterministisches Chaos und innere Lenkung./12/ Laut **Maturana** ist Evolution nicht Optimierung der Nutzung der Umwelt, sondern diese vollzieht sich durch Strukturkopplung von Organismus und Umwelt./13/ **Kauffman** betont, daß Evolution aus einer Kombination spontaner Ordnung durch Selbstorganisation und natürlicher Selektion entsteht./14/

Die Evolution hat Lebensformen von unbeschreiblicher Schönheit, Komplexität und Eleganz geschaffen und sie hat mit dem Menschen ein Lebewesen von hoher Intelligenz hervorgebracht. Diese Intelligenz hat insbesondere die Eigenschaft, neugierig zu sein und Neues hervorbringen zu wollen. Der Mensch ist immer weniger bereit zu akzeptieren, daß Gott mit der Welt würfelt und daß er sich nicht in den Becher schauen läßt./15/ Vielmehr tritt der Mensch zunehmend selbst als Gestalter der Evolution auf, indem er die entschlüsselten Geheimnisse der Evolution für die Gestaltung neuer Prozesse und Strukturen nutzt. Im Schauspiel des Lebens ist der Mensch somit gleichzeitig Beobachter und Teilnehmer./16/ Geschah die Evolution bisher autonom und unabhängig vom menschlichen Willen und von Zwecken/17/, so gilt diese Aussage, spätestens seit der Klonung des Schafes **Dolly**/18/, nicht mehr. Die Theorie der Selbstorganisation legt nahe, daß Mensch und Natur kohärente Konstrukte sind und daß genetische und morphologische Strukturen miteinander verbunden sind./19/

Evolution ist ein offener Lernprozeß mit Koevolution zwischen mikroskopischen und makroskopischen Strukturen, wobei sich Lebewesen ihre Bedingungen im Rahmen einer endogenen Entwicklung teilweise selbst schaffen. Hierbei scheint es so zu sein, daß je komplexer eine dynamische Struktur ist, desto endogener ist ihr Antrieb./20/ Deshalb bedeutet Wandel, der weiteren Wandel ermöglicht, laut **Wesson** nicht nur neue äußere Formen, sondern auch eine innere Umgestaltung./21/ **Spencer-Browns** "Notwendigkeit einer Form"/22/ muß durch eine "Notwendigkeit von neuen Formen" durch Phasenübergänge erweitert werden. Somit ist Evolution eher ein endogener als ein exogener Vorgang./23/24/

Für **Dawkins** muß eine Unterscheidung zwischen der Evolution im allgemeinen und adaptiver Evolution gezogen werden. Letztere ist für die natürliche Selektion überlebensfähigerer Variationen verantwortlich. Der Glaube, daß Gene im Vergleich zu Ursachen aus der Umwelt im besonderen Maße deterministisch sind, ist für Dawkins irreführend./25/ Die Evolutionstheorie benötigt deshalb vor allem eine Theorie der Variationen, d.h. eine Theorie, die sich mit der Selektion von genetischen Varianten beschäftigt./26/ Der einzige Zweck der DNA besteht darin zu überleben, nicht mehr und nicht weniger./27/ Natürliche Selektion bedeutet "Survival of the fittest" und fit sind diejenigen Selektionen die überleben./28/ Hierbei ist zu beachten, daß Adaptionen auf der Selektions-Ebene eines Individuums und einer Gruppe vollständig unterschiedlich sind: Was im Rahmen einer Gruppen-Selektion als mangelhaft erachtet wird, kann für ein Individuum optimal sein./29/

- Kreislauf der Evolution

Das von **Riedl** beschriebene Wechselspiel zwischen Zufall (Mutation) und Notwendigkeit (Selektionsdruck)/30/ ist das erste wesentliche Merkmal des Kreislaufes der Evolution, die nicht nur vorgegebenen Gesetzen folgt, sondern auch den Einfluß des moderaten Zufalls berücksichtigt, beispielsweise durch das plötzliche Auftreten eines Bruchs der Symmetrie durch eine Instabilität. Das zweite Merkmal des Kreislaufes ist das Phänomen der Rückkopplung. Das Leben auf der Erde entwickelt sich seit Urzeiten durch Iteration und Rückkopplungen, wobei unser Gehirn das fortschrittlichste Feedback-System darstellt. Strukturen entwickeln sich durch die eigene Verschaltung und die Verschaltung zur Umwelt weiter./31/ Es sind Rückkopplungen, die ein ganzheitliches Systemgedächtnis

ermöglichen und die dafür sorgen, daß ein System sich hin zu einer neuen Stabilität organisiert.

Die Rekursivität bildet das dritte Merkmal des evolutionären Kreislaufes, wobei das Wechselspiel von Struktur, Funktion und Fluktuationen die Selbstorganisation des Systems ermöglicht.^{32/} Es zeigt sich, daß je mehr Freiheit man einem System läßt, desto mehr Ordnung durch Selbstorganisation entstehen kann.^{33/} Das Erreichen jeweils höherer Komplexitätsniveaus durch dynamische Entfaltung von Ordnung ist das vierte Merkmal des Kreislaufes, bevor räumliche und zeitliche Symmetriebrüche auftreten, die das System über den Weg der Instabilitäten und der Bifurkationen auf das nächst höhere Komplexitätsniveau transformieren. Jantsch führt hierzu aus:^{34/}

"Nicht im Aufbau von Hierarchie, sondern in der Entfaltung von Komplexität, liegt das eigentliche Wirken der Evolution."

Die Evolution eignet sich für drei Arten von Problemstellungen: 1. Um an einen Ort zu kommen, dessen Weg man nicht findet; 2. Um an einen Ort zu kommen, den man sich nicht vorstellen kann; 3. Um völlig neue Orte zu finden, zu denen man gelangen kann.^{35/} Diese Prinzipien werden in der Echtzeitwelt des Cyberspace eine völlig neuartige Dynamik für die Evolution des Menschen erzeugen, indem dieser seine eigene genetische Veränderung simulieren kann. Damit ist der Mensch als erste Spezies in der Lage, seine eigene Codierung gezielt durch eigenen Willen und nicht nur durch Selektion und Mutation zu verändern. Computersimulationen erlauben hierbei ein Spiel mit allen möglichen Variationsmöglichkeiten von genetischen Bausteinen. Die Interaktion der hierdurch entstehenden neuartigen Genotypen, wird zu einer neuartigen Entwicklungsdynamik führen, in deren Verlauf sich die erfolgreichsten Veränderungen durchsetzen werden. Die virtuellen Erfolgscodierungen warten hierbei darauf, aus dem Wissenspool der Realität in unsere Wirklichkeit entfaltet zu werden. Leben wird hierbei virtuell konstruiert und dann in die physische Welt übertragen. Auch bei den Genen zeigt sich somit ein Dekonstruktivismus, der alte Codierungen dekonstruiert und neue Codierungen durch Mikrowelten erzeugt. Mikrokonstruktivismus setzt sich deshalb im Rahmen von simulierten Endo-Welten aus Dekonstruktivismus und Konstruktivismus von molekularen Grundstrukturen zusammen.

- Evolution und Ökonomie

Die Ordnung des Lebendigen ist durch eine extrem strukturelle und funktionelle Komplexität gekennzeichnet./[36](#)/ Eine evolutionäre Ökonomie sollte deshalb fragen, warum Veränderungen auftreten und versuchen, diese durch die strukturellen Differenzen unterschiedlicher Unternehmen zu erklären./[37](#)/ Durch das Phänomen der Echtzeit werden die Evolution, Innovationen und Geschäftsfelder zusammengeführt, d.h. es entsteht eine neuartige Synthese zwischen Biologie, Technologie und Management. Unternehmen leben nicht isoliert voneinander, sondern sind über die Gesellschaft und die Märkte unauflöslich verflochten. Es ist die Abstimmung der Wechselwirkungen untereinander, kombiniert mit den individuellen Zielsetzungen, die nicht nur die Evolution der Arten, sondern auch die der Unternehmensstrukturen vorantreibt. Diese transformieren sich durch das Wechselspiel von Zufall und Notwendigkeit (siehe auch Kapitel 4.3.4.2).

Der Unternehmer hat bei simulierten Populationen drei Aufgaben durchzuführen: 1. Reproduktion der erfolgreichen Strategien (z.B. Kernkompetenzen, Benchmarking), 2. Rekombination der bestehenden Ressourcen (z.B. Business Reengineering, Change Management) und 3. Veränderung der Strukturen durch Fluktuationen in der Codierung (Innovationen, Job-Rotation)./[38](#)/ Alle drei Aufgaben sind notwendig, um die Lebensfähigkeit des Unternehmens aufrecht zu erhalten, wobei im Regelnetzwerk ein impliziter Parallelismus auftritt./[39](#)/ Durch die Vorgehensweise wird sichergestellt, daß erfolgreiche Codierungen beibehalten werden und gleichzeitig die Chance besteht, neue und noch erfolgreichere Codierungen zu finden. Die Evolution hat als Lenkungsprinzip eine ständige Innovation integriert, die zwar nicht dieselben Individuen, jedoch immer wieder die erfolgreichen Codierungen hervorbringt./[40](#)/

Die Vielfalt an Nischen in der Wirtschaft ermöglicht es einerseits, die unterschiedlichen Unternehmensfraktale am Leben zu erhalten andererseits kann durch das plötzliche Aussterben ganzer Branchen und das Aufkommen neuer Technologien die Entwicklung der Gesellschaften in großen Schritten vorankommen. Gleiches gilt auch für den Staat, der sich ebenfalls durch Innovationen erneuern muß. Gesellschaften und Wirtschaften nehmen ebenso an einem wettbewerbsorientierten evolutionären Prozess teil wie biologische Organismen./[41](#)/ Nach **Veblen** ist die Evolution sozialer

Strukturen ein Prozess der natürlichen Selektion von Institutionen./42/ Es ist deshalb abzusehen, daß die Selektion von Netzwerken, bei denen der Kunde Bestandteil eines Interfaces ist, die Selektion der Bürokratie erneuern wird, bei der der Bürger bisher nur als eine externe Störgröße betrachtet wurde.

- Die DNA

Alles Leben basiert auf denselben Grundstrukturen, den Zellen, wovon der Mensch ungefähr 100 Billionen besitzt./43/ Die DNA (**D**esoxyribo**N**ucleic **A**cid), das genetische Material, wird durch die Biotechnologie immer mehr zu einem Forschungsobjekt von High-Tech-Firmen. Es scheint so, daß es das Überleben des Wissens und nicht notwendigerweise des Gens selbst ist, welches den gemeinsamen Faktor zwischen Genen mit und ohne Replikationsfähigkeit darstellt./44/ Ein aktiver Replikator ist hierbei ein Replikator, der Einfluß nehmen kann auf die Wahrscheinlichkeit kopiert zu werden, während ein passiver Replikator diese Möglichkeit nicht hat./45/ Wenn im Rahmen einer Replikation eine Mutation auftritt, wird diese auf die zukünftigen Kopien weitergegeben. Nicht alles, daß kopiert werden kann ist deshalb ein Replikator. So ist z.B. ein Organismus kein Replikator, sondern er ist ein Träger für Replikatoren./46/47/

Die DNA kann als eine Mega-Kryptographie (siehe auch Kapitel 4.2.3), als Höhepunkt der evolutionären Codierung aufgefaßt werden, wobei die genetische Information das Leben selbst repräsentiert. Das genetische Material, die DNA hat algorithmischen Charakter, da die DNA aus einem komplizierten Code besteht, wie bereits **Schrödinger** vermutete. J. D. **Watson** und F. H. C. **Crick** bewiesen 1953 Schrödingers Vermutung, als diese erstmals die chemische Struktur eines DNA-Moleküls als Doppelhelix aus zwei Strängen von Polynukleotiden entdeckten. Die Länge eines einzelnen entfalteten und gestreckten DNA-Moleküls beträgt etwa 2,7 m./48/ Wäre der genetische Code ein ungewöhnlich großes Computerprogramm, so würde man sechs Milliarden Bit benötigen, um einen Menschen zu beschreiben. Die kompliziertesten Computerprogramme haben heutzutage jedoch nur einige Millionen Bit.

Für die genetische Codierung ist die Positionen der Nukleotide entscheidend, wobei es fast unglaublich ist, daß die digitale Speicherung des menschlichen Lebens mit vier Basenpaaren auskommt. Die DNA hat algorithmischen Charakter, da sie aus einem komplizierten Code besteht. Deshalb kann die menschliche DNA als eine kybernetische Maschine

aufgefaßt werden, die im mikroskopischen Bereich codiert ist. Da der menschliche Körper aus der Codierung der DNA besteht, sind die algorithmische Komplexität der DNA (Genotyp) und die des Körpers (Phänotyp) identisch./49/ Der genetische Code und die daraus erwachsenden Strukturen sind deshalb nicht voneinander zu trennen.

Die Herausbildung von Phänotypen erfordert, daß die beteiligten Zellen durch die DNA eine Codierung für die herauszubildende Endstruktur haben, d.h. diese müssen wissen, wo die Grenzen des Systems liegen. Enzyme übernehmen in den biologischen Zellen hierbei die Aufgabe, die Vielzahl von Transformationsprozessen bis zur Ausbildung des Phänotyps zu lenken. Fortschritte im Bereich des Bio-Computing könnten nicht nur zu einer revolutionären Erweiterung der Rechengeschwindigkeiten und der Speichermöglichkeiten im Rahmen komplexer Netzwerkstrukturen führen, sondern darüber hinaus auch zu einem tiefergehenden Verständnis der Codierungen des Lebens beitragen (siehe Kapitel 4.4.3). Die Realisierung entsprechend komplexer Netzwerkmodelle führt natürlich im Rahmen individuenorientierter Modelle auch zu Anwendungsmöglichkeiten für die Medizin, das Verkehrswesen und die Ökonomie, die uns für das Management am meisten interessiert (siehe Kapitel 4.3.4.3).

- Genotyp und Phänotyp

Während der Genotyp die Struktur des zugrunde liegenden Gens repräsentiert, ist der Phänotyp die entstehende Gesamtausprägung eines Organismus. Die Ausprägung eines Organismus kann als dessen Attraktor aufgefaßt werden:/50/

Merkmale von: Genotypen und Phänotypen:

Genotyp:	unvorhersagbar	Phänotyp:	vorhersagbar
	langsame Entwicklung		schnellere Entwicklung
	Potential des Systems		Realisierung von Potentialen
	kein Gleichgewicht möglich		Gleichgewicht möglich
	irreversibel		reversibel

Der Entwicklungsbiologie kommt die Aufgabe zu, die Transformationsregeln vom Genotyp zum Phänotyp zu definieren./51/ Während die Mutation irreversible Veränderung herbeiführt, kann die Selektion auf einem reversiblen Code beruhen. Genmutationen und Selektionen reichen jedoch nicht aus, um sämtliche Veränderungen der biologischen Evolution zu erklären./52/ Vielmehr zeigt sich, daß

Berechnung und Leben eng miteinander verknüpft sind, ja möglicherweise Leben sogar eine Form von emergenter Rechenaktivität am Rande des Chaos ist./53/ Da die molekulare Genetik eine Strukturtheorie ist, hat diese eine besondere Bedeutung für die Gestaltung komplexer Interfaces.

Da die Evolution durch den Computer zunehmend operationalisierbar wird, wird diese auch für das Management an Bedeutung gewinnen. Die Zeithorizonte für Veränderungen werden nicht mehr Jahrtausende betragen, sondern diese können durch die neuesten Technologien in nahezu Echtzeit vollzogen werden. Es zeigt sich somit immer mehr, daß die Evolution selbst evolviert und daß diese sich durch die Nano-, Gen- und Biotechnologien zunehmend beschleunigt. Phänomene wie das Altern oder die Entstehung neuer Arten können vermutlich zukünftig vom Menschen beeinflußt werden, was nicht ohne Konsequenzen für das menschliche Wissen und die Weiterentwicklung der Spezies sein wird. Eine evolutionäre Ökonomie muß sowohl phänotypische als auch genotypische Veränderungen zulassen, wobei der Phänotyp den Genotyp nicht beeinflussen kann./54/

- Strategien des Lebens

Lebensfähige Systeme sind durch komplexe Strukturen, hohe Konnektivität und Interaktion zwischen Teilnehmern sowie Wechselwirkungen zur Umgebung gekennzeichnet./55/ Lebende Systeme bestehen aus Molekülen, haben eine komplexe Organisation, erzeugen eine riesige Vielfalt unterscheidbarer Individuen und haben ein eigenes genetisches Programm (Genotyp), das zur Ausbildung eines Phänotyps führt./56/ Der Mensch ist aus einer ungeheuren Zahl von Zellen (etwa 25 Billionen) zusammengesetzt, die ein hoch komplexes Netzwerk bilden und die die Fähigkeit haben, einen hohen Grad an innerer Ordnung zu bewahren. Zusammenfassend ist Leben ein anti-entropischer, jedoch irreversibler Prozess mit folgenden Merkmalen:/57/

1. Leben ist ein Muster in Raum und Zeit
2. Leben benötigt die Selbstreproduktion
3. Leben speichert die Informationen seiner Selbstrepräsentation
4. Leben existiert durch Stoffwechsel
5. Leben interagiert funktional mit der Umgebung
6. Leben hat eine innere Abhängigkeit der Teile
7. Leben hat eine dynamische Stabilität gegenüber Störungen
8. Leben hat die Fähigkeit zur Evolution in der Geschlechtslinie

Der menschliche Organismus entsteht aus einem hochkomplexen Code, der zu vielfältigen Entfaltungen führt, wobei die Details der Morphologie (Gestaltwerdung) leider noch nicht zufriedenstellend geklärt sind. Interessant ist, daß wir auch bei einfachen Codes rekursiver Gleichungen sehr komplexe Entfaltungen (wie auch bei den Fraktalen) beobachten können. Leben und Komplexität scheinen deshalb die Rekursivität als eine gemeinsame Eigenschaft zu haben. Das Entfalten neuer Ordnung innerhalb von Systemen, wie es beim Phasenübergang von chaotischen Systemen auftritt, ist deshalb ein typischer Prozeß der evolutionären Biologie. Der Fortschritt des Lebens zeigt sich dadurch, daß wir antizipieren können, wie und wann die Strategien geändert werden müssen./58/ Die Entwicklung des Lebens scheint eine Folge von Ungleichgewichtszuständen zu sein, die zunehmend einem Modus integrierter Konstruktion und reversibler Mobilität im Computer weicht (siehe Kapitel 2.2.2)./59/ Lebensprozesse und Virtuelle Realitäten (als konstruierte reversible Modellwelten) stellen somit im Prinzip denselben Prozess dar, der darauf basiert Wissen über die jeweilige Nische anzusammeln/60/, wozu **Deutsch** ausführte:/61/

"Genes are enveloped, just as a user of virtual reality is, in an environment whose detailed constitution and behaviour are specified by a program."/62/

Soziokulturelle Systeme sind nach **Wuketits** auf Grundlage der Bio-Evolution entstanden, d.h. der Träger jedes sozio-kulturellen Systems ist ein lebendiges System, wobei die soziokulturelle Kapazität von der Kapazität der Gehirne dieses Systems und deren Wechselwirkung abhängt./63/ Da Kostenreduzierungen Veränderungen durch Innovationen behindern, sind diese schlechte Strategien im Management, wenn es darum geht das Überleben sicherzustellen. Deshalb gilt es, die innovativen Strategien des Lebens in Endo-Welten zu erproben, um diese bei der Problemlösung in sozialen Systemen einsetzen zu können./64/ Da soziokulturelle Systeme jedoch etwas ganz anderes als lebende Systeme sind, lassen sich die Strategien des Lebens nicht ungeprüft übertragen, auch wenn sich bestimmte Strategien als äußerst erfolgreich erweisen können.

- Zelluläre Automaten

Zelluläre Automaten sind mathematische Systeme, die aufgrund einfacher Regeln hochkomplexes Verhalten zeigen; diese können auch als virtuelle Computer aufgefaßt werden, bei denen die Anfangsbedingungen die Strukturen (Daten) und die Programme die Prozesse (Berechnungen) repräsentieren./65/ Zelluläre Automaten entwickeln sich durch

Selbstreproduktion, wobei beim reversiblen Typ dieselben Strukturen immer wiederkehren, während beim irreversiblen Typ immer neue Strukturen entstehen. Der Physiker Stanislaw **Ulam** entwickelte das Denkmodell der Zellulären Automaten, die sich zunehmend als ideale Modelle für komplexe Systeme erweisen. Demzufolge spielt sogar die Mathematik eine genetische Rolle, da das Leben eine digitale Selbstbeschreibung und eine analoge Wechselwirkung mit der Umgebung besitzt.

Simuliert wurde die Selbstorganisation von Zellpopulationen in den 60er Jahren zum erstenmal durch John **von Neumann**, der Analogien zwischen Computern und den Gesetzmäßigkeiten der Natur sah und das Konzept der Selbstreproduktion in seine Automatentheorie integrierte. Seine Kernthese war, daß Computer und Menschen unterschiedliche Klassen von Automaten repräsentieren./66/ Zelluläre Automaten sind Systeme von Zellen, die in einfacher Weise miteinander interagieren, jedoch komplexes Verhalten mit folgenden Merkmalen zeigen:/67/

1. Das System wird von einem 1-, 2-, oder 3-dimensionalen Netzwerk aus Zellen geformt, die mit ihren Nachbarn interagieren.

2. Jede Zelle kann eine von m möglichen diskreten Zuständen annehmen.

3. Das System folgt einer konkreten Zeitdynamik, bei denen die Zellen beim Übergang zu neuen Zuständen die Zustände der jeweiligen Nachbarzellen berücksichtigen.

In seinem Buch "Theory of Self-Reproducing Automata" führte von Neumann den Beweis, daß ein sich selbst reproduzierender Automat (universaler Konstrukteur) möglich ist, wenn die Maschine ein gewisses Maß an Komplexität überschreitet./68/ Chris **Langton** fand heraus, daß Zelluläre Automaten die Fähigkeit zur Selbstreproduktion besitzen, wobei diese eine Reihe von Zuständen durchlaufen. Jede Zelle prüft in jedem Zustand die Aktivität ihrer Nachbarn und interagiert dann gemäß vorgegebener Regeln./69/ Hierbei zeigen diese je nach Anfangsbedingungen typische Evolutionsmuster, die sich nach Stephen **Wolfram**, einem weiteren Pionier für Zelluläre Automaten, folgendermaßen klassifizieren lassen:/70/

Zellulärer Automat	Zielzustand
Klasse 1	homogener Gleichgewichtszustand
Klasse 2	konstanter oder periodischer Endzustand
Klasse 3	chaotischer Endzustand fraktaler Dimension
Klasse 4	komplexe Muster als Attraktor

Zelluläre Automaten sind nichtlineare, dynamische Systeme mit einem allgemeinen und universellen Repräsentationsschema, die universelle Berechnungen unterstützen, wobei das Lernen über deren Prozesse unser Verständnis der physischen Welt erhöhen kann.^{/71/} Die Zufallskomponente wird durch eine beliebige Wahl von Anfangswerten ins Spiel gebracht, während die Notwendigkeit durch konkrete Entwicklungsregeln und der Interaktion von Elementen mit ihren Nachbarelementen repräsentiert wird. Geht man davon aus, daß eine Matrix-Zelle acht mögliche Nachbarzellen hat, so lassen sich zwei unterschiedliche Nachbarschaften bei Zellulären Automaten unterscheiden, die sogenannte "Von Neumann"- Nachbarschaft (vertikale und horizontale Zellen als Nachbarn) und die "Moore"- Nachbarschaft (darüber hinaus auch diagonale Nachbarzellen).^{/72/} Conway benutzt in seinem Spiel "Game of Life"^{/73/}, mit dem er versucht, virtuelles Leben zu simulieren, besagte Moore- Nachbarschaften.

Wie die Zielzustände der obigen Klassifizierung zeigen, führen uns Zelluläre Automaten direkt zu den Forschungsbereichen der Mustererkennung, der Selbstorganisation, des Chaos, der Fraktale^{/74/} und der Endophysik. Mit dem Zellulären Automaten "Hodepodge", der von **Gerhardt** und **Schuster** entwickelt wurde, konnten Ergebnisse erzielt werden, die denen der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion (siehe Kapitel 2.1.2), einem typischen Selbstorganisationsphänomen, ähnlich waren.^{/75/} Zelluläre Automaten der Klasse 3 liefern nach Wolfram Erklärungsmodelle für die Evolution des Universums, da deren Verhalten ähnlich wie bei dissipativen Systemen irreversibel, d. h. zeitlich nicht symmetrisch ist.^{/76/} Langton zufolge ruft der Übergangsbereich zwischen Chaos und Ordnung das Maximum an Informationserzeugung des zugrunde liegenden Systems hervor (siehe auch Kapitel 2.3.3).^{/77/} Die Klasse 4 der Zellulären Automaten bringt jedoch noch komplexeres Verhalten hervor, wobei Wolfram annimmt, daß diese zu universelle Berechnungen ("universal computation") fähig sind^{/78/}, d.h. das Verhalten jedes anderen Computersystems simulieren können.^{/79/} Da das Verhalten eines universellen Computers völlig unvorhersagbar ist, muß bei Zellulären Automaten auch das Halteproblem (siehe Kapitel 1.2 und Kapitel 4.4.2) berücksichtigt werden.

Fredkin (ein Schüler von Feynmann) setzte sich ebenso wie **Toffoli** vor allem mit Automaten vom reversiblen Typ auseinander und erarbeitete hierzu eine Hypothese, die als Billardkugelmodell bekannt wurde. Während Boltzmann die Welt als eine gewöhnliche Differentialgleichung, d.h. eine molekulardynamische Simulation, betrachtet, Einstein diese durch eine partielle Differentialgleichung repräsentiert sieht, ist diese laut Fredkin ein Zellulärer Automat, der aus einem spezifischen Code besteht./80/ 1982 beschrieb Fredkin das erste explizit computersimulierbare Modell-Universum - einen Zellulären Automaten vom reversiblen Typ./81/ Er entdeckte, daß jeder irreversible Zelluläre Automat in einen größeren reversiblen Automaten (mit dissipativen Gleichungen) eingebettet werden kann und daß sich selbst organisierende Automaten diesen Typs in der Lage sind, die Naturgesetze abzubilden./82/ Toffoli entwarf zusammen mit **Margolus** einen speziellen Computer zur Berechnung von Zellulären Automaten, die sogenannte 'cellular automata machine'. Bei der Berechnung von reversiblen Zellulären Automaten zeigte sich deterministisch chaotisches Verhalten, d.h. der moderate Zufall scheint auch bei Zellulären Automaten ein wichtige Rolle zu spielen.

Die moderne Gehirnphysiologie und Informatik nutzt die Theorie der Selbstorganisation für die Erklärung jener Abläufe im Gehirn, bei denen sich Neuronen vernetzen und durch Phasenübergänge neue Muster erzeugen. Zelluläre Automaten können hierbei als eine vereinfachte Vorstufe Neuronaler Netzwerke betrachtet werden, die durch Konnektionismus und Parallelverarbeitung gekennzeichnet sind. Nachfolgend ist ein Zellulärer Automat (Abbildung 2.45) abgebildet, der nach folgenden zwei Regeln programmiert wurde, wobei die Belegung durch 1, die Nichtbelegung durch 0 charakterisiert wird:

1. Regel: Jede Zelle, die oben keine Nachbarzelle hat, bekommt rechts eine Nachbarzelle.

2. Regel: Jede Zelle, die unten keine Nachbarzelle hat, bekommt schräg rechts unten eine Nachbarzelle

3. Anfangszustand: 1. Zelle mit 1 belegt, andere Zellen mit 0

Das Interessante an diesem Zellulären Automaten ist, daß er ein bekanntes Fraktal, nämlich den Sierpinsky-Gasket/83/ (siehe Abbildung 2.45), erzeugt. Es wird durch dieses Beispiel deutlich, daß Zelluläre Automaten und Fraktale dieselben deterministischen Wurzeln haben, die auch bei der Erzeugung von Chaos eine Rolle spielen. Auch wenn man die Ergebnisse

von Berechnungen nicht vorhersagen kann, so scheint es doch, daß Simulationen durch Computer zu neuen Erkenntnissen führen können:[/84/](#)

"More generally, fractals, cellular automata, chaos, catastrophe and a host of other mathematical developments seem to show that the world, nature and even life itself may, for all messiness and complexity, be computable."

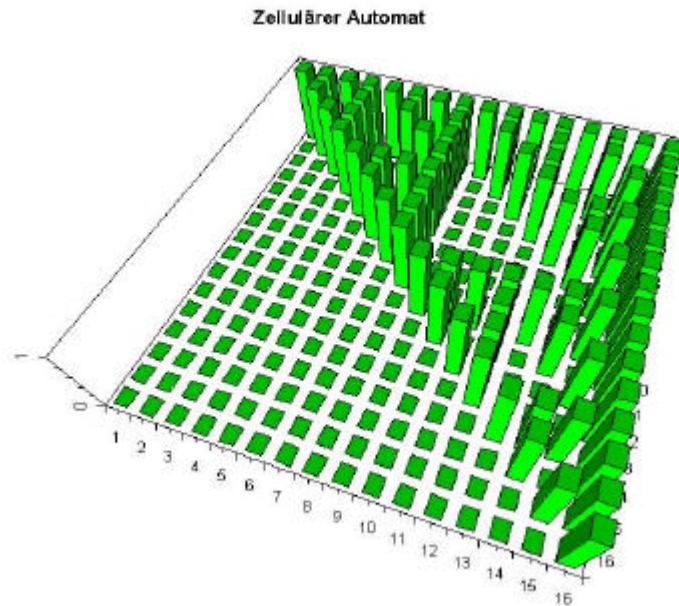


Abb. 2.45: Sierpinski Gasket

- Künstliches Leben

Das Wort künstlich kann, wie bereits zuvor betont, sowohl eine "physische" als auch eine "virtuelle" Bedeutung haben. Künstliche Befruchtung, Genmanipulation und Nanorobotik sind die physischen Ausprägungen, während im Computer erzeugtes, simuliertes Leben die virtuelle Ausprägung von Künstlichem Leben ist.[/85/](#) Künstliches Leben ist die Übertragung biologischer Prinzipien auf den Computer und der Versuch durch Simulationen ein Verständnis über komplexe Dynamiken zu gewinnen. **Rasmussen**, hat sechs Postulate aufgestellt, die für die Konstruktion von Künstlichem Leben von besonderer Bedeutung sind:[/86/](#)

1. Ein universeller Computer kann jeden physischen Prozeß simulieren (siehe Turing).[87/](#)

2. Leben ist ein physikalischer Prozeß (siehe von Neumann).

3. Es gibt Kriterien, Leben von Nicht-Leben zu unterscheiden.

4. Die Wirklichkeit die virtuell wahrgenommen wird, ist genauso wirklich wie unsere physische Wirklichkeit.

5. Die virtuelle und die physische Wirklichkeit haben denselben ontologischen Status.[88](#)

6. Es läßt sich durch Experimente in virtuellen Wirklichkeiten etwas über die physische Wirklichkeit lernen/[89/](#)

Modelle für Künstliches Leben können Computerviren simulieren, ebenso evolvierende Computerprozesse, fraktale Strukturen, Roboter, autokatalytische Netzwerke, Zelluläre Automaten, künstliche RNA-Moleküle, die kulturelle Evolution und auch Unternehmensentwicklungen.[90/](#) Die Gestaltung Künstlichen Lebens kann hardware- oder softwaremäßig realisiert werden, d.h. biotechnologisch oder durch Programme.[91/92/](#) Die Erschaffung Künstlichen Lebens (im engl. Artificial Life) dürfte neben der Schöpfung des Universums und dem Auftreten von Leben die dritte große Epoche der Entwicklung der Evolution einleiten. Künstliches Leben basiert auf nachfolgenden Vorstellungen:[93/](#)

1. Biologie des Möglichen: Leben wie es sein könnte

2. Synthetische Methode: KL-Forschung synthetisiert lebensähnliche Prozesse

3. Echtes (künstliches) Leben: Gestaltung von echten Prozessen

4. Alles Leben ist Form: Leben ist prinzipiell unabhängig vom Medium

5. Aufbau von unten nach oben: Programmierung führt zu ganzheitlichem Verhalten

6. Parallelverarbeitung: z. B durch Neuronale Netze

7. Emergenz: Entstehung neuer Phänomene

Während Expertensysteme globale Regeln für globales Verhalten bereitstellen, liefert das Konzept vom Künstlichen Leben lokale Regeln für globales Verhalten.[94/](#) Die Agenten des Künstlichen Lebens agieren in ihren virtuellen Welten autonom, wobei diese durch Selbstorganisation höchst komplexe Muster hervorbringen können.[95/](#) Ein Beispiel hierfür ist

das Evolutionsmodell Tierra/[96](#)/ von T. **Ray**, bei der innerhalb des Computers ein virtueller Computer simuliert wird, der die eigentliche Modellwelt konstruiert./[97](#)/ In Tierra operieren Organismen als virtuelle Maschinen, wobei zwei Ebenen unterschieden werden können, die Adaptions- und die Innovationsebene./[98](#)/ Nach Ray ist das Leben nicht nur auf kohlenstoffbasierte Formen beschränkt, sondern es gibt auch virtuelles Leben im Computer, das sich selbst reproduzieren kann und die Evolution neuer Strukturen und Prozesse beliebiger Komplexität erlaubt./[99](#)/ In Rays Programm wird den Kreaturen Rechenleistung gemäß ihrer Größe zur Verfügung gestellt. Er sieht die CPU-Zeit des Rechners und den Speicherplatz der virtuellen Evolution in Analogie zu den Energieressourcen und dem Speicherplatz bei der natürlichen Evolution./[100](#)/ Rays experimentelle Evolution und Ökologie verdeutlicht, daß es eine universelle Eigenschaft des Lebens zu sein scheint, daß erfolgreiche Systeme Parasiten anziehen./[101](#)/ Er beobachtete in seinen Endo-Welten, daß erfolgreiche Parasiten sogar von Hyperparasiten ausgesaugt werden.

Von Neumann muß wegen seiner These, daß Menschen und Computer unterschiedliche Klassen von Automaten repräsentieren, auch als ein führender Pionier auf dem Gebiet des Künstlichen Lebens gesehen werden. Sein erster sich selbst reproduzierender Automat wurde als 'kinematic model' bekannt./[102](#)/ Die Molekulardynamik eröffnet die Vision immer komplexere Automaten zu konstruieren und ein interaktives Spiel zwischen Computer und Mensch zu beginnen (siehe Kapitel 4.4.3). Durch das Künstliche Leben spielen wir zunehmend ein Spiel des Lebens, daß uns neuartige Einsichten in komplexe Strukturen ermöglicht. Voraussetzung um aus dem Spielen mit komplexen Interfaces etwas zu lernen, ist jedoch, daß die Wirklichkeit, die ein Computer konstruiert, ähnlich der Wirklichkeit ist, die wir selbst wahrnehmen.

Computerviren, die sich selbst reproduzierende Muster darstellen, sind entgegen ihrem destruktiven Image, die 1. Stufe auf der Entwicklung zu Künstlichem Leben. Das erste Mal wurde der Begriff "Virus" 1972 in der Science Fiction Erzählung "When Harley was One" von David **Gerrold** verwendet./[103](#)/ Den Begriff Computer-Virus prägte Fred **Cohen** 1983. Computerviren können nicht durch reine Textdateien in Rechnern oder Netzwerken übertragen werden, da diese hierfür ausführbare Programme benötigen. Hierbei zeigen sie ein Verhalten, das nahezu dem von Künstlichem Leben entspricht. Ist ein Künstliches Leben im Computer ein nachgeahmtes Leben oder ist es Leben selbst, wenn auch in einer für uns

ungewohnten Form? Sollten die Computer eine eigene evolutionäre Entwicklung starten, so ist es durchaus möglich, daß die Codierung unseres Gehirns uns ein Verständnis dieser Evolution nicht erlaubt. Computer könnten Formen des Bewußtseins entwickeln, die völlig neue Problemlösungen erlauben./104/

Leben hat nichtlineare Eigenschaften, die für die Erforschung von Komplexität von fundamentaler Bedeutung sind, wie **Langton**, **Crutchfield** und **Farmer** hervorheben. Joshua M. **Epstein** und Robert L. **Axtell** versuchen durch Künstliches Leben menschliche Gesellschaften zu verstehen, wobei sie zeigen wollen, wie sich demographische Trends durch die Interaktion von Agenten ergeben./105/ Sie haben ihre künstliche Welt "Sugarscape" genannt, mit der sie versuchen, den Aufstieg und Fall von sozialen Gesellschaften zu verstehen./106/ Stuart **Kauffman** zufolge entwickeln sich alle evolvierenden komplexen Systeme (wie z.B. einfache Zellen, Menschen, Ökosysteme oder Wirtschaftssysteme) am Rande des Chaos./107/

Die entscheidende Frage wird sein, ob künstliche Lebensformen den Turing-Test bestehen und Bürgerrechte erhalten sollten. Wenn wir Leben von virtuellem Leben im Computer nicht mehr unterscheiden können, so ist dies nicht nur ein neuer Horizont für unsere Wahrnehmung, sondern dies wird maßgeblich unsere Evolution beeinflussen. Künstliche Reproduktion von Leben und Künstliches Leben müssen jedoch voneinander unterschieden werden. Während ersteres die Manipulation von Entwicklungsverläufen bedeutet, besitzt letzteres nahezu die gleichen Eigenschaften wie das Leben, obwohl es durch einen Automaten erzeugt wurde. Die Synthese des natürlichen Lebens mit virtuellem Leben bietet nicht nur eine Horrorvision im Sinne von Frankensteins Monster, sondern auch die Möglichkeit eines neuen Zeitalters der sanften Technologien. Es liegt an uns selbst, wozu wir die Evolution gestalten, was wir durch diese hervorbringen und wie wir die Prozesse in Richtung auf Künstliches Leben optimieren (siehe auch Kapitel 4.4.3).

- Fitnesslandschaften

Kauffman erforscht vor allem sogenannte Fitnesslandschaften, d.h. komplexe Netzwerke mit denen evolutionäre Verhaltensweisen simuliert werden können. Er gibt als Beispiel für eine Fitnesslandschaft einen Genotyp von 4 möglichen Genen an, der 16 mögliche Genotypen bildet, die

in einem Hyperkubus graphisch dargestellt werden können, wobei jeder Genotyp mit seinen vier Nachbarn verbunden ist./108/ Kauffman experimentiert mit gleichgewichtsfernen Booleschen Netzwerken, die über Attraktoren verfügen, wobei ein Netzwerk mit 200 binären Variablen über 2200 oder 1060 mögliche Zustände verfügt./109/ Die Dimension N des Booleschen Hyperkubus ist äquivalent zur Anzahl der Nachbarn jeden Genotyps, so daß bei N Genen sich 2^N mögliche Genotypen ergeben./110/ Während weniger dichte Vernetzungen zu interner Ordnung führen, tritt in dicht vernetzten Systemen Deterministisches Chaos auf./111/ Nach Kauffman findet, wenn die Systeme schwach gekoppelt sind, Ko-Evolution statt./112/

"Weak couplings, in short, as supposed by authors such as Herbert Simon, Ross Asbhy and others, on different grounds again emerges as critical to coadaptation in complex interacting systems."

Auch in der Wirtschaft kann in Analogie zum oben gesagten, das Auftreten eines neuen Unternehmens oder eine Änderung der Verhaltensweise eines bestehenden Unternehmens, die Fitnesslandschaft eines Marktes oder einer Branche verändern./113/ Ein optimal geführtes Unternehmen ist eine Art komplexes adaptives System. Es ist hierbei immer auf der Suche nach neuen Gelegenheiten, wobei es bestehende Marktnischen füllt, neue Marktnischen hervorbringt und hierbei ständig versucht, seine Komplexität zu steigern./114/ Unternehmen, die eine Transformation von einem Fitneß-Gipfel zum nächsten durchlaufen wollen, müssen hierzu ein Tal durchqueren./115/ Dieser Anpassungsprozeß ist mühsam und wird von den meisten Managern gescheut. Viele Unternehmen können auf dem Gipfel der Produktivität sein, jedoch kann sich dieser Gipfel langfristig als eine Sackgasse erweisen, wenn Manager das falsche Problem gelöst haben.

- Natürliche Selektion ist ein evolutionäres Prinzip für den Aufbau von Machtpotentialen.

- Künstliches Leben bildet eine Gegenmacht zum physischen Leben im Hinblick auf den Aufbau komplexer Interfaces.

- Viren bilden ein erhebliches Gefahrenpotential für die Manipulierung von Interfaces.

- Das Künstliche Leben eröffnet für den Menschen die Freiheit, am Spiel des Lebens gestaltend mitzuwirken.

Abb. 2.46: Konsequenzen für Macht und Freiheit

Wissenschaftliche Kontexte:	Auswirkungen auf das Management:
- Die Agenten des Künstlichen Lebens agieren in ihren virtuellen Welten autonom, wobei diese durch Selbstorganisation höchst komplexe Muster hervorbringen können.	- Management erfordert von Teilnehmern an Interfaces Selbstplanung und Selbstorganisation, um Komplexität zu lenken.
- Durch Virtuelle Realitäten kann der Mensch die Evolution seiner eigenen Gene simulieren.	- Durch die Möglichkeit der Echtzeit können Evolution und Innovation eine neuartige Synthese bilden.
- Die Entfaltung von Wissen ist letztendlich nichts anderes als ein Spiel der Evolution, welches durch die Simulation eine dramatische Beschleunigung erfährt.	- Management wird zunehmend in der Lage sein, die Evolution selbst zu verändern und muß sich deshalb mit den ethischen Herausforderungen der Gentechnologie beschäftigen.
- Künstliches Leben lehrt uns, daß Evolution kein rein biologischer Vorgang ist, sondern ein Prozeß der Wissenserzeugung.	- Evolutionäres Handeln erfordert, erfolgreiche Strategien zu reproduzieren, bestehende Ressourcen zu rekombinieren und durch zufällige Fluktuationen die Codierungen zu verändern.
- Im speziellen Fall des Künstlichen Lebens spielen wir zunehmend ein Spiel des Lebens, das uns neuartige Einsichten in komplexe Strukturen ermöglicht.	- Da die DNA Prozesse hat, die Ähnlichkeit zur Konzeption von Rechen-Maschinen besitzen, sind durch die Biotechnologie riesige Wachstumsmärkte im Bereich der Bio-Computer, der Reparatur des menschlichen Körpers sowie neuartiger Mensch-Maschine -Symbiosen zu erwarten.
- Zelluläre Automaten entwickeln sich durch Selbstreproduktion, wobei beim reversiblen Typ dieselben Strukturen immer wiederkehren, während beim irreversiblen Typ immer neue Strukturen entstehen.	- Nach dem Vorbild der Zellulären Automaten können sich selbst organisierende Fertigungsstraßen konzipiert werden (siehe dazu auch Kapitel 1.2).

Abb. 2.47: Konsequenzen für das Endo-Management

-
- [1](#) Auch beim Genotyp lassen sich kaum Unterschiede feststellen.
 - [2](#) Während bei den ersten beiden Evolutionsarten die Tendenz zu wachsen aus dem Inneren des Systems kommt, ist bei der Kingschen Evolution ein Anstoß von außen erforderlich.
 - [3](#) Vgl. Kelly (Kontrolle), 424.
 - [4](#) Vgl. Boulding (System), 152.
 - [5](#) Vgl. Uchtmann (Simulation), 32.
 - [6](#) Vgl. Küppers (Information), 228.
 - [7](#) Vgl. Schrödinger (Life), 68.
 - [8](#) Vgl. Mainzer (Complexity), 82.
 - [9](#) Vgl. Küppers (Information), 250.
 - [10](#) Vgl. Jantsch (Selbstorganisation), 190.
 - [11](#) Vgl. Wiener (Kybernetik), 241.
 - [12](#) Vgl. Wesson (Ordnung), 347.
 - [13](#) Vgl. Maturana (Erkenntnis), 127.
 - [14](#) Vgl. Kauffman (Universe), 304.
 - [15](#) Vgl. Lem (GOLEM), 117.
 - [16](#) Vgl. Heisenberg (Physik), 42.
 - [17](#) Vgl. Pagels (Reason), 267.
 - [18](#) Vgl. Sentker (Dolly), 63; in: Die Zeit 7. März 1997 Wissen Special.
 - [19](#) Vgl. Götschl (Naturverständnis), 188ff.
 - [20](#) Vgl. Wesson (Ordnung), 56.
 - [21](#) Vgl. Wesson (Ordnung), 261.
 - [22](#) Vgl. Spencer-Brown (Form), 1.
 - [23](#) Vgl. Allen (Economics), 15.
 - [24](#) Fontana betont hierbei, daß eine Theorie der Evolution konzeptuelle Modelle und Formalisierungen

der funktionalen Organisation entwickeln muß. Vgl. Fontana (Semantik), 72.

[25](#) Vgl. Dawkins (Phenotype), 11.

[26](#) Vgl. Dawkins (Phenotype), 165.

[27](#) Vgl. Dawkins (Phenotype), 156.

[28](#) Vgl. Dawkins (Phenotype), 181. Herbert Spencer und nicht Darwin erfand den Begriff "Survival of the fittest" im Jahr 1864.

[29](#) Vgl. Dawkins (Phenotype), 50. Natürlich gilt dies auch umgekehrt.

[30](#) Vgl. Riedl (Strategie), 185.

[31](#) Je nach Aufgabenstellung sind vernetzte Strukturen in der Lage entweder durch Stabilitäts-erhaltung (negatives Feedback) oder durch Verstärkung (positives Feedback) sich den internen und externen Gegebenheiten anzupassen.

[32](#) Vgl. Jantsch (Systeme), 166.

[33](#) Vgl. Jantsch (Systeme), 164.

[34](#) Vgl. Jantsch (Systeme), 181.

[35](#) Vgl. Kelly (Kontrolle), 480.

[36](#) Vgl. Küppers (Lebendigen), 15.

[37](#) Vgl. Blauwhof (Dynamics), 160.

[38](#) Vgl. Holland (Hidden), 70.

[39](#) Vgl. Holland (Hidden), 79.

[40](#) Vgl. Holland (Hidden), 79f.

[41](#) Vgl. Moravec (Children), 101.

[42](#) Vgl. Veblen (Class), 117.

[43](#) Vgl. Suzuki (Future), 47.

[44](#) Vgl. Deutsch (Reality), 181.

[45](#) Vgl. Dawkins (Phenotype), 83.

[46](#) Vgl. Dawkins (Phenotype), 112.

[47](#) Ein nicht-genetischer Replikator, der in komplexen kommunizierenden Gehirnen auftritt und synonym zum Begriff von Ideen und Attraktoren gesehen werden kann, wird von Dawkins Meme genannt (siehe hierzu auch Kapitel 3.4). Vgl. Dawkins (Phenotype), 109.

[48](#) Vgl. Suzuki (Future), 47.

[49](#) Vgl. Pagels (Reason), 68. Die algorithmische Komplexität ist jedoch nur quantitativ, da diese qualitative Komponenten, z.B. daß eine Person über ein hohes Maß an Wissen und Erfahrungen verfügt, nicht berücksichtigt.

[50](#) Vgl. Faber (Environment), 57.

[51](#) Vgl. Wieser (Vorwort), 11.

[52](#) Vgl. Wieser (Gentheorien), 44.

[53](#) Vgl. Emmeche (Spiel), 119.

[54](#) Vgl. Faber (Environment), 100.

[55](#) Vgl. Clemson (Cybernetics), 254.

[56](#) Vgl. Taylor (Life), 26.

[57](#) Emmeche (Spiel), 42f.

[58](#) Vgl. Allen (Uncertainty), 132.

[59](#) Vgl. Piaget (Biologie), 373.

[60](#) Vgl. Deutsch (Reality), 179.

[61](#) Deutsch (Reality), 178.

[62](#) Allerdings muß hinzugesagt werden, daß die Gene diese Umwelt nicht erfahren können und daß der Phänotyp im Gegensatz zu einer konstruierten Endo-Welt tatsächlich existiert.

[63](#) Vgl. Wuketits (Evolution), 138.

[64](#) Es ist nicht unproblematisch von evolutionärem Management zu sprechen, da wir die Evolution nachträglich nicht beeinflussen können, vielmehr können wir eigentlich nur das Leben lenken

und seine Integration zu soziokulturellen Einheiten. Da soziokulturelle Einheiten eine Metaebene des Lebens repräsentieren, treten dort Regeln auf, die weder in der Evolution noch der Entwicklung des Lebens eine Rolle spielen.

[65](#) Vgl. Wolfram (Automata), 153f.

[66](#) Vgl. Levy (Leben), 25.

[67](#) Vgl. Phipps (Automata), 166.

[68](#) Vgl. Davies (Chaos), 100f.

[69](#) Vgl. Lewin (Komplexitätstheorie), 66.

[70](#) Mainzer (Chaos), 56.

[71](#) Vgl. Langton (Edge), 42.

[72](#) Vgl. Casti (Complexification), 216.

[73](#) Das Spiel "LIFE" repräsentiert einen Zellulären Automaten der Klasse 4.

[74](#) Vgl. Peitgen (Fractals), 411.

[75](#) Vgl. Woolley (Worlds), 86f.

[76](#) Vgl. Woolley (Worlds), 87.

[77](#) Vgl. Lewin (Komplexitätstheorie), 68 u. 71f.

[78](#) Da mit würden Zelluläre Automaten den einfachsten universellen Computer repräsentieren.

Es scheint möglich, daß bei Wahl geeigneter Anfangsbedingungen auch Zelluläre Automaten der Klasse 3 universelle Computer darstellen.

[79](#) Vgl. Wolfram (Automata), 163.

[80](#) Vgl. Rössler (Realität), 263.

[81](#) Gespräch mit Otto E. Rössler

[82](#) Vgl. Rössler (Endophysik), 87f.

[83](#) Der Sierpinski Gasket kann im Computer aus einer einzigen Programmzeile hergestellt werden.

Geometrisch entsteht dieser dadurch, daß aus einem gleichseitigen Dreieck jeweils ein durch die

Punkte der Seitenmitten gebildetes Dreieck ausgeschnitten wird.

Dieser Vorgang wird dann mit jedem neu entstehenden Dreieck rekursiv fortgesetzt.

[84](#) Vgl. Woolley (Worlds), 96.

[85](#) Da chemische Reaktionen reversibel sind, eignen diese sich hervorragend für den Aufbau einer künstlichen Chemie (siehe Farmer-Packard-Modell).

[86](#) Vgl. Rasmussen (Reality), 768ff.

[87](#) Physikalische Church-Turing-Interpretation.

[88](#) Dies ist allerdings nur solange gewährleistet, wie der "verflixte" Ausschalter nicht betätigt wird.

[89](#) Genau dies wird im Rahmen der Endophysik durch die Verbesserung der Interfaces versucht.

[90](#) Vgl. Taylor (Life), 26-30.

[91](#) Vgl. Weibel (Leben), 9.

[92](#) Normalerweise betrachten wir Computer als abstrakte symbolmanipulierende Maschinen, diese können jedoch auch als programmierbare Masse-Energie-Manipulatoren aufgefaßt werden, wobei das Programm die Verteilung von Massen sowie der Energie lenkt und somit eine Nische für elektronisch basiertes Künstliches Leben bietet. Vgl. MacLennan (Ethology), 638.

[93](#) Vgl. Emmeche (Spiel), 24ff.

[94](#) Vgl. Langton (Life), 51ff.

[95](#) Vgl. Maes (Software), 28.

[96](#) Der virtuelle Computer Tierra von Ray ist ein Parallel Computer vom MIMD-Typ.

[97](#) Vgl. Casti (Worlds), 164.

[98](#) Vgl. Kampis (Evolution), 107f.

[99](#) Vgl. Ray (Synthesis), 372.

[100](#) Vgl. Ray (Synthesis), 374.

[101](#) Vgl. Kelly (Kontrolle), 397. Hillis entdeckte, daß Parasiten die Evolutionsrate von sortierenden Organismen sogar beschleunigen, statt diese zu behindern.

[102](#) Vgl. Levy (Leben), 41.

[103](#) Vgl. Spafford (Viruses), 729.

[104](#) Dies macht Computer für den Menschen auch gefährlich, da sie sich als eigene Spezies sehen könnten, die nicht mehr auf den Menschen angewiesen ist. Wichtig ist deshalb in erster Linie, daß der Mensch durch Computer seine eigene Existenz nicht gefährdet.

[105](#) Vgl. Horgan (Sugar), Scientific American Nov. 1994, S. 20.

[106](#) Vgl. Horgan (Sugar), Scientific American Nov. 1994, S. 20.

[107](#) Vgl. Kauffman (Universe), 169. Kauffman geht davon aus, daß sich alles Leben am Rande des Chaos entwickelt.

[108](#) Vgl. Kauffman (Universe), 165.

[109](#) Vgl. Kauffman (Universe), 82.

[110](#) Vgl. Kauffman (Universe), 166. Die Fitnesslandschaften von Kauffman haben einen Bezug zu den Sequenzräumen der Informatik (siehe Kapitel 1.2).

[111](#) Vgl. Kauffman (Universe), 85.

[112](#) Vgl. Kauffman (Webs), 137.

[113](#) Vgl. Gell-Mann (Quark), 362.

[114](#) Vgl. Gell-Mann (Quark), 362.

[115](#) Vgl. Kelly (Economy), in: Wired, September 1997, S. 194.