IBRI
REPORT NO. 36
1987

SICH SELBST-REPRODUZIERENDES AUTOMATON UND DER URSPRUNG DES LEBENS

Robert C. Newman
Biblical Theological Seminary
Hatfield, Pennsylvania

INTERDISCIPLINARY BIBLICAL RESEARCH INSTITUTE

P.O. Box 423, Hatfield, Pennsylvania 19440-0423

IBRI
REPORT NO. 36
1987

SICH SELBST-REPRODUZIERENDES AUTOMATON UND DER URSPRUNG DES LEBENS

Robert C. Newman
Biblical Theological Seminary
Hatfield, Pennsylvania

KURZE INHALTSANGABE

Unter der Annahme, daß das einfachste Lebewesen ein sich selbst-reproduzierendes Automaton darstellt, wird die kleinste Komplexität untersucht, die für Leben notwendig ist. Es werden in kurzer Form die Arbeiten von von Neumann, Codd und Langton vorgestellt, wobei Langtons äußerst einfaches sich selbst-reproduzierendes Automaton im einzelnen beschrieben wird. Die Komplexität von Langtons Automaton weist stark darauf hin, daß Leben nicht zufällig entstanden ist, sondern vielmehr einem Plan entspringt.

EINLEITUNG

In den vergangenen Jahrzehnten bemühten sich eine Reihe von Wissenschaftlern nachzuweisen, daß Leben auf Grund von Naturprozessen aus unbelebter Materie entstanden ist.[1] Der größte Teil ihrer Arbeit umfaßte die Untersuchung der Biochemie einfacher Lebensformen, um Schritte vorzuschlagen, die es mit Hilfe mehr oder weniger ähnlicher chemischer Reaktionen ermöglichen, den notwendigen Grad an Komplexität zu erreichen.

Um solche Vorschläge zu ermöglichen, stellte man viele Annahmen auf über die Beschaffenheit der frühen Erdatmosphäre, über die Energiequellen, die benötigt werden, die erforderlichen Reaktionen auszulösen, und über spezielle Umgebungen, die die Umwandlung von unorganischen Stoffen in einfache organische Stoffe wie Zucker, Aminosäuren und Nukleotide ermöglichen. In verschiedenen Arbeiten wurde auch versucht, aus solchen einfachen Organismen polymere Körper zu bilden, um die sehr komplexen Biopolymere wie Proteine und die Nukleinsäuren DNS und RNS zu erzeugen, die die entscheidenden Biochemikalien von lebenden Zellen sind. Die bisherigen Ergebnisse sind nicht sehr überzeugend.[2]

Die hohe Komplexität von Biopolymeren wie der DNS und der Proteine machen es fast unmöglich zu glauben, daß die Chemie heute vorhandener Lebensformen tatsächlich nur durch Naturprozesse entstanden sein soll. Der Komplexitätssprung von einfachen Organismen zu derartigen Biopolymeren ist einfach zu groß, als daß man ihn mit einem bloßen Zufallsprozeß erklären könnte. Als Antwort darauf behaupten diejenigen, die an den natürlichen Ursprung von Leben glauben, daß viel kleinere Moleküle vorhanden sein müssen, die in der Lage sind, sich selbst zu reproduzieren, und daß nur diese durch einen zufälligen Prozeß entstanden sind. Diese Moleküle entwickelten sich dann durch Mutation und natürliche Auslese - ein Prozeß, der als ein kräftiges Mittel angesehen wird, um Ordnung in eine sonst sich zufällig gestaltende Situation zu bringen - zu den heute verwendeten umfangreichen und komplexen Proteinen und Nukleinsäuren. Diese kleineren Moleküle wurden dann wegen ihrer komplexeren Nachkömmlinge überflüssig und verschwanden durch natürliche Auslese.

Wir beabsichtigen in der vorliegenden Abhandlung nicht, diese Behauptung durch eine Diskussion über Biochemie zu überprüfen, sondern wir möchten statt dessen die mathematische Komplexität der Selbst-Reproduktion untersuchen. Das Definieren eines Lebewesens als eine sich selbst-reproduzierende Maschine dürfte zumindest die zufriedenstellen, die an den natürlichen Ursprung von Leben glauben, auch wenn die Christen sich fragen mögen, ob solch eine Definition nicht zu einfach sei. Was können wir nun auf mathematischem Wege über die einfachste sich selbst-reproduzierende Struktur herausfinden? Wie komplex ist solch eine Struktur? Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, daß sich solch eine Struktur zufällig in der vorhandenen Zeit und dem Raum, die unser Universum zur Verfügung stellt, gebildet hat? Diese Fragen führen uns zu der mathematischen Theorie des sich selbst-reproduzierenden Automatons.

DAS SICH SELBST-REPRODUZIERENDE AUTOMATON VON VON NEUMANN

Meines Wissens (beruhend auf der Literatur) war John von Neumann (1903 - 1957) der erste, der eine mathematisch machbare Maschine entworfen hat, die sich selbst reproduziert. Nachdem von Neumann, ein gebürtiger Ungare, seinen mathematischen Doktortitel an der Universität von Budapest erlangt hatte, kam er 1930 in die USA. 1931 wurde er Professor an der Princeton Universität und zwei Jahre später Mitglied des dort ansässigen 'Institute for Advanced Study' (Institut für fortgeschrittene Forschung). Von Neumann hob sich in ungewöhnlicher Weise von den anderen Mathematikern dadurch ab, daß er an allen möglichen Anwendungen interessiert war und daß er sich ohne große Schwierigkeit mit Wissenschaftlern und Ingenieuren verständigen konnte. Während des zweiten Weltkrieges arbeitete er aktiv an militärisch nutzbaren mathematischen Anwendungen mit. Später arbeitete er in der US Atomic Energy Commission (Amerikanische Atomenergiekommission) mit.

Obwohl von Neumann die mathematische Spieltheorie erfunden hat und wichtige Beiträge zur Ergodischen Theorie und zu den mathematischen Grundlagen der Quantenmechanik geliefert hat, gilt unser Interesse hierbei jedoch seiner Pionierarbeit in Bezug auf Computer, die schließlich zu seiner mathematischen Theorie der sich selbst-reproduzierenden Automata führte. Von Neumann kam in Berührung mit Computern, weil er sich mit der Lösung von nicht-linearen partiellen Differentialgleichungen beschäftigte. Hierbei erkannte er, daß die Mathematik in eine Sackgasse geraten war, weil sie versuchte, allgemeine Lösungen für solche Gleichungen zu erzielen. Doch bestimmte Fälle konnten numerisch gelöst werden. Diese Lösungen konnte man dann als Leitfaden benutzen, um über allgemeine Lösungen zu theoretisieren.

Da numerische Lösungen solcher Gleichungen sehr zeitaufwendig sind, wenn sie durch Handarbeit erarbeitet werden, beteiligte sich von Neumann an der Pionierarbeit zur Entwicklung elektronischer Rechner. Er arbeitete als Berater bei mehreren frühen Modellen mit (ENIAC, EDVAC, und JONIAC) und brachte Verbesserungsvorschläge für das physikalische Design und den Speicher ein. Außerdem kam er auf die Idee, Ablaufdiagramme für die Programme zu benutzen, und bahnte den Weg für das Konzept, eine Sprache für den Rechner und eine andere für den Programmierer zu benutzen. Indem er eine Theorie für die automatische Kontrolle von Computern durch interne Programme ausarbeitete, wurde er zu einer mathematischen Theorie der Automata geführt.

Insgesamt verfaßte er fünf Arbeiten über Automata: (1) "General and Logical Theory of Automata", 1948 geschrieben und 1951 veröffentlicht; (2) "Theory and Organization of Complicated Atomata", fünf im Jahre 1949 gehaltene Vorlesungen; (3) "Probabilistic Logics and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Parts", 1952; (4) "Theory of Automata: Construction, Reproduction, Homogeneity", 1952-53, und (5) "The Computer and the Brain", 1955-56 verfaßt und 1958 veröffentlicht. Punkt (1) und (3) sind in Band 5 von von Neumanns gesammelten Werken enthalten [3]; Punkt (5) erschien in einem gesonderten Buch [4]; die Punkte (2) und (4), die uns besonders interessieren, wurden nach seinem Tod unter dem Titel "The Theory of Self-

Reproducing Automata" [5] herausgebracht.

Obwohl von Neumann beabsichtigte, ein mathematisches Modell für die Reproduktion zu entwerfen, das in realistischer Weise einen einfachen lebenden Organismus simulieren sollte, reichte seine Lebenszeit nur aus, ein abstraktes Automaton, das sich selbst kopiert , im einzelnen zu entwerfen. Dieses Automaton wurde (mit einigen kleineren Änderungen) von Arthur Berks vervollständigt. Wir wollen uns dieses Automaton kurz anschauen, um uns damit auf unsere weitere Betrachtung eines weitaus einfacheren Automatons vorzubereiten.

Von Neumann dachte sich sein sich selbst-reproduzierendes Automaton als eine geordnete Sammlung von kleinen Automata, die als einzelne Computerchips dargestellt werden können, die eine große zweidimensionale Ebene ausfüllen. Diese Chips sind rechteckig und mit ihren jeweils vier nahesten Nachbarchips verbunden. Jeder Chip kann sich in irgendeinem von 29 verschiedenen Zuständen befinden, die einen ruhenden oder "abgeschalteten" Zustand beinhalten, sowie mehrere "Aufwärm"-Zustände, die einen Ruhezustand in einen funktionsfähigen Zustand verwandeln, und schließlich mehrere funktionsfähige Zustände, die Informationen in verschiedene Richtungen übermitteln bzw. als Bindeglied für Informationsübermittlung dienen.

Von Neumanns sich selbst-reproduzierendes Automaton bestand darin, daß es einem Satz Chips zu einer Zeit t = 0 gewisse Anfangszustandswerte zuteilte, und zwar in der Weise, daß dieser Satz Chips in der Folge einen konstruktiven Arm aussandte und einen in der Nähe liegenden Satz von ruhenden Chips in eine Kopie seiner selbst verwandelte. Dieses Automaton war sehr komplex, da es für die Speicherkontrolleinheit eine Menge von 300 x 500 Chips beinhaltete, eine ähnliche Anzahl für die Konstruktionseinheit und einen "Schweif" von etwa 150.000 Chips, um die Informationen über die Einzelheiten des zu bauenden Automatons zu speichern.[6]

Von Neumanns Automaton ist bemerkenswert, so wie die ersten Computer, und zwar hauptsächlich, weil es zeigt, daß eine solche Maschine machbar ist. Seine enorme Komplexität ermutigt jedoch kaum diejenigen, die hoffen, daß eine sich selbst-reproduziernde Maschine zufällig zustande kommen könnte.

LANGTONS EINFACHES SICH SELBST-REPRODUZIERENDES AUTOMATON

In den Jahren, die auf von Neumanns Vorschlag folgten, sind viele Versuche gemacht worden, sein Automaton zu vereinfachen. E.F. Codd [7] z.B. war in der Lage, ein Automaton zu entwerfen, in dem jeder der dazugehörenden Computerchips nur 8 Zustände statt der 29 von von Neumann benötigte. Doch Codds Automaton war immer noch so komplex wie ein typischer Elektronischer Rechner, bei dem es sehr unwahrscheinlich war, daß er zufällig funktionierte.

Kürzlich hat Christopher Langton [8] eine drastische Vereinfachung des von Neumannschen Automatons vorgeschlagen, indem er einige der von Codd vorgeschlagenen Ideen beharrlich weiterverfolgte. Langton gibt zu verstehen, daß die Automata von von Neumann und von Codd unnötig komplex seien, da sie mit der Absicht entworfen wurden, in der Lage zu sein, jede Art von Automaton zu bilden (in Abhängigkeit von der Information, die in dem langen "Schweif" der Maschine gespeichert war). Deshalb machte jedes Kopien von sich selbst und zwar als Spezialfall seiner Fähigkeiten als allumfassender Konstrukteur. Langton erklärt, daß so etwas Kompliziertes nicht nötig ist, da die Lebewesen, die wir nachzuahmen versuchen, nur Kopien von sich selbst machen und nicht von irgendwelchen weitaus unterschiedlicheren Lebensformen. Langton löst sich somit von dem Gedanken, daß das Automaton in der Lage sein muß, andersartige Automata zu bilden, und sucht die Maschine, die Kopien nur von sich selbst macht. Im folgenden Teil wollen wir in einige Einzelheiten gehen, damit wir Langtons einfaches sich selbst-reproduzierendes Automaton richtig einschätzen können.

Indem er Codd folgt, stellt Langton den Satz von Computerchips mathematisch als ein zweidimensionales Feld von Zahlen dar, eine für jeden Chip. Die Zahlen geben den Zustand an, in dem jeder Chip gerade in Funktion ist. Null stellt den Ruhezustand des Chips dar, und die Zahlen 1 bis 7 stellen die anderen Zustände mit ihren Funktionen dar. Das Automaton kann daher mathematisch als eine zweidimensionale Matrix von Zahlen dargestellt werden, die sich mit jeder Zeiteinheit ändern, während die Maschine arbeitet.

Der Zustand eines bestimmten Chips zur Zeit t berechnet sich sowohl aus seinem eigenen Zustand während des vorhergehenden Zeitschritts t-1 als auch aus dem Zustand seiner Nachbarn bei t-1. Was die sieben funktionalen Zustände des Chips gerade in der Maschine tun, kann von dem Designer bestimmt werden, wenn er die Anzahl der "Übergangsregeln" auswählt, die bestimmen, in welcher Weise jeder Zustand sich mit der Zeit ändert. Indem er Codd folgt, definiert Langton den Zustand 1 als ein Element eines Datenpfades. Zustand 2 wird als Element der Hülle gebraucht, die den Datenpfad schützt. Zustand 1 und 2 arbeiten so ähnlich wie eine Nervenzelle, die einen zentralen Kern hat, der seine Signale übermittelt und der von einer Hülle umgeben ist, damit das Signal nicht zerstreut wird, oder wie ein isoliertes elektrisches Kabel. (Siehe Abb. 1)

```
2 2 2 2 2 2
1 1 1 1 1 1
2 2 2 2 2 2
```

Abbildung 1

Die verbleibenden Zahlen 3 bis 7 geben uns fünf Signale, die das Automaton verschiedene Funktionen ausüben lassen können. Es ist typisch, daß diese Signale sich längs zu dem Datenpfad einer 1 bewegen. Die Bewegungsrichtung eines Signals ist dadurch bestimmt, daß aus jedem Signal ein Zahlenpaar entsteht, bei dem die führende Zahl zu den Zahlen 3 bis 7 gehört, gefolgt von einer Null. Abbildung 2 zeigt ein 7er Signal, das mit jedem Zeittakt einen Schritt nach rechts geht.

```
2 2 2 2 2 2
1 0 7 1 1 1
2 2 2 2 2 2
```

Abbildung 2

Datenpfade bilden Knotenpunkte, an denen sich ein Pfad zweiteilt. (Siehe Abb. 3)

```
      2 1 2
      2 1 2
  2 2 2 1 2 2 2
  1 1 1 1 1 1 1
  2 2 2 2 2 2 2
```

Abbildung 3

Wenn ein Signal sich einem solchen Knotenpunkt nähert, z.B. von links, dann teilt es sich in zwei Kopien des Signals, die jeweils einem der Datenpfade folgen. (Siehe Abb. 4)

```
    2 1 2               2 1 2               2 1 2
    2 1 2               2 1 2               2 1 2
2 2 2 1 2 2 2       2 2 2 1 2 2 2       2 2 2 7 2 2 2
1 0 7 1 1 1 1       1 1 0 7 1 1 1       1 1 1 0 7 1 1
2 2 2 2 2 2 2       2 2 2 2 2 2 2       2 2 2 2 2 2 2

   Zeit t              t + 1               t + 2
```

Abbildung 4

Auf grund dieser Gegebenheiten können wir eine Vorrichtung entwerfen, die ein sich regelmäßig wiederholendes Signal auf einen Datenpfad schickt. Wir machen einfach eine geschlossene Schleife mit einem offenen "Schweif" in einer Ecke. (Siehe Abb. 5)

```
2 2 2 2 2 2 2
2 1 1 1 1 1 2
2 1 2 2 2 1 2
2 1 2   2 1 2
2 1 2 2 2 1 2 2 2
2 1 1 0 7 1 1 1 1
2 2 2 2 2 2 2 2 2
```

Abbildung 5

Die dargestellte Vorrichtung wird sein 7-0 Signal ständig gegen den Uhrzeigersinn durch die kleine Schleife (oder, wenn Sie es vorziehen, das Quadrat) kreisen lassen, indem es jedesmal, wenn das Signal in der Schleife an den Knotenpunkt in der unteren Ecke ankommt, ein 7-0 Signal in den rechts abgehenden Pfad schickt.

All dies hatte Codd schon bemerkt. Es war Langtons geistreicher Einfall zu beobachten, daß wir mit dieser einfachen Vorrichtung schon den Aufbau einer sich selbst-reproduzierenden Maschine haben, ohne noch eine Menge zusätzlicher Komplexität hinzufügen zu müssen.

Nehmen wir einmal an, daß das 7-0 Signal so definiert ist, daß es den Datenpfad um eine Einheit verlängert, wenn es das Ende eines Datenpfades berührt. (Siehe Abb. 6)

2 2 2	2 2 2	2 2 2	2 2 2 2
0 7 1 2	1 0 7 2	1 1 1 1	1 1 1 1 2
2 2 2	2 2 2	2 2 2	2 2 2 2
Zeit t	t + 1	t + 2	t + 3

Abbildung 6

Nehmen wir nun an, daß das 4-0 Signal in der Weise definiert wird, daß, wenn ein Paar dieses Signals das Ende eines Datenpfades berührt, es den Pfad veranlaßt, eine Biegung nach links zu machen. Dazu brauchen wir einen weiteren Zustand (sagen wir 3) als Zwischenschritt in diesem Vorgang. Es verbleiben noch zwei Zustände, 5 und 6, die wir für etwas anderes benutzen können.

An diesem Punkt haben wir die benötigte Apparatur, um ein wiederholtes Signal durch eine Schleife von geeigneter Größe zu schikken, damit das Signal den Schleifenarm (oder -schweif) um n Einheiten verlängern und der Arm eine Linksbewegung machen kann. Wenn wir das Signal viermal die Schleife durchlaufen lassen, wird es den Arm veranlassen, sich in eine weitere Schleife zu falten. Wir können dabei diese neue Schleife so anlegen, daß sie von derselben Größe ist wie die Originalschleife.

Wenn wir mit kluger Oberlegung die Obergangsregeln auswählen (zur Erinnerung sei gesagt, daß diese bestimmen, wie ein Chip seinen Zustand beim nächsten Zeittakt verändert, und zwar in Abhängigkeit von seinem vorherigen Zustand und dem Zustand seiner vier Nachbarn), können wir festlegen, daß die zwei verbleibenden Signale 5 und 6 dann auftauchen, wenn ein Signal, das durch die neue Schleife wandert, mit einem Signal zusammenstößt, das aus der alten Schleife kommt. Die 5 und die 6 bewegen sich in entgegengesetzter Richtung von dem Ort des Zusammenstoßes weg. Die 5 nabelt die "Tochter"-Schleife von der "Mutter"-Schleife ab und veranlaßt die Mutter, an ihrer rechten oberen Ecke einen neuen Arm zu bilden, der sich gegen den Uhrzeigersinn bewegt und dort den Prozeß der Bildung einer weiteren Tochterschleife in Gang setzt. Die 6 bildet einen neuen Arm an der Tochterschleife, sodaß dieser dann anfangen kann, eine "Enkelin" zu bilden.

Zweifellos mußte Langton lange experimentieren, bis er die einfachste in diesem Sinne funktionierende Maschine gefunden hatte, doch schließlich präsentierte er eine Schleife mit einer Seitenlänge von zehn Einheiten, einem Arm von fünf Einheiten und die ihre Konstruktionsanweisungen in einer Folge von sechs 7-0 Signalen, gefolgt von zwei 4-0 Signalen, speicherte. Diese Maschine, die bei der Zeit t=0 angesiedelt ist (Siehe Abb. 7),

```
  2 2 2 2 2 2 2 2
2 1 7 0 1 4 0 1 4 2
2 0 2 2 2 2 2 2 0 2
2 7 2         2 1 2
2 1 2         2 1 2
2 0 2         2 1 2
2 7 2         2 1 2
2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2
2 0 7 1 0 7 1 0 7 1 1 1 1 1 2
  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
```

Abbildung 7

wird ihren Arm um sechs Einheiten ausdehnen und dann eine Biegung nach links machen. In der Zwischenzeit wird die Information die Schleife einmal durchlaufen haben und wieder zurück sein, um den Arm wieder um sechs Einheiten in die neue Richtung zu verlängern und um dann wieder nach links abzubiegen. Nach 35 Zeiteinheiten biegt der Arm zum erstenmal ab, nach 70 zum zweitenmal, nach 105 zum drittenmal. Die neue Schleife schließt sich nach t=124, teilt sich bei t=128 in zwei Schleifen; die Mutterschleife bildet eine Tochter bei t=147, und diese erste Tochter ist bei t=151 in demselben Zustand der Mutter, in dem diese sich bei t=0 befand.

Nachdem ich auf meinem kleinen Personal Computer ein Basic-Programm geschrieben hatte, das auf Langtons Übergangsregeln für die Ausgangsschleife beruhte, kann ich bezeugen, daß es funktioniert! Wegen der beschränkten Speicherkapazität und weil es ein langsamer PC ist, konnte ich das Programm nur bis t=153 austesten, wobei ich die Geburt der dritten und vierten Schleifengeneration nicht so wie Langton beobachten konnte. Er liefert eine interessante Erörterung über die Art und Weise des "Absterbens" der Schleifen, wenn sie den weiteren Töchtern Platz machen. Hierzu empfehle ich seine Originalschrift. Falls Sie es an Ihrem eigenen Computer selbst ausprobieren möchten, finden Sie eine Abschrift meines Programms mit den Übergangsregeln und der Ausgangsschleife im Anhang dieser Schrift. Es ist weitaus ausgeklügelter als das public domain (unterliegt nicht dem Copy Right) Computerspiel "Life" ("Leben").

DIE KOMPLEXITÄT VON LANGTONS AUTOMATON

Langton hat also in brillanter Weise gezeigt, daß man etwas entwerfen kann, was das Leben nachahmt. Weist dies nun darauf hin, daß Leben zufällig oder durch Planung entstanden ist? Um ein Gefühl für die Antwort auf diese Frage zu bekommen, ist es nötig, die Komplexität seines Automatons zu untersuchen.

Es ist offensichtlich, daß Langtons Vorrichtung die minimalste

Komplexität für jede bedeutende Art von Selbst-Reproduzierung erreicht hat oder fast erreicht hat. Die Information, die im Datenstrang gespeichert ist, ist sehr klein, weil die Schleife vierseitig symetrisch ist. Trotzdem müssen wir den Zustand von n Chips bei t=0 angeben, um den besonderen Anfangszustand des Automatons zu bestimmen. Wenn wir uns das Automaton als rechteckiges Feld von 10 zu 15 Chips denken, so ist n=150. Wir können aber auch die Chips außerhalb der Struktur vernächlässigen und n=110 festsetzen. Wenn wir die Chips innerhalb des Rahmens der Schleife ignorieren, ist n=94. Schließlich können wir alle Chips im Null-Zustand unberücksichtigt lassen und haben dann n=86. Abgesehen vom letzten Fall können alle spezifizierten Chips in jedem der acht Zustände sein, was 8^n Kombinationen ergibt. Im letzten Fall kann jeder Chip in jedem der sieben Zustände sein oder 7^n Kombinationen. Die untenstehende Tabelle 1 gibt die Anzahl N der möglichen Kombinationen an, in denen die Chips in jedem einzelnen Fall spezifieziert sein können.

TABELLE 1

n Anzahl der Chips	N Anzahl der Kombinationen	N' Kombinationen mit Übergangsregeln
150	3×10^{135}	5×10^{295}
110	2×10^{99}	5×10^{259}
94	8×10^{84}	1×10^{245}
86	5×10^{72}	2×10^{233}

Um nun die Komplexität des Anfangszustandes des Langtonschen Automatons zu erzeugen, müssen wir also 5×10^{72} Kombinationen durchsuchen, um das eine zu finden, das funktioniert. Oder ungefähr 10^{72} Kombinationen, wenn wir die vier Umdrehungen zu 90 Grad zulassen.

Aber bevor wir versuchen zu schätzen, wie wahrscheinlich die zufällige Bildung eines solchen funktionalen Automatons ist, sollten wir noch darauf hinweisen, daß der größte Teil der Komplexität dieser Vorrichtung sozusagen unter seiner Decke versteckt liegt und zwar in den Einzelheiten der Übergangsregeln. Diese Regeln können gegenüber denen, die in Langtons Tabelle 1 aufgeführt sind, geringfügig vereinfacht werden, indem man alle die Regeln ausschaltet, die den Chip in den Zustand Null gebracht haben, und statt dessen festlegt, daß alle nicht aufgeführten Regeln ein Ergebnis Null bewirken. Aber selbst jetzt noch gibt es 190 Regeln, die die anderen sieben Zustände erzeugen. Um diese zufällig zu bilden, müßten wir 7^{190} Kombinationen durchsuchen, etwa 2×10^{160}. Wenn wir dies nun mit der oben errechneten Komplexität des Anfangszustandes verbinden, erhalten wir die Ergebnisse N' in der rechten Spalte der obigen Tabelle 1. Wenn wir nun wieder die Umdrehungen zulassen, erhalten wir 5×10^{232} Kombinationen.

Die Anzahl der Kombinationen, die für den leichtesten Fall aufgeführt sind (n=86), entspricht der Anzahl von 276-Buchstaben-

Wörtern (276=86+190), die man mit einem sieben-Buchstaben-Alphabet bilden kann. Wie wahrscheinlich ist es, daß solch eine Anzahl von Kombinationen in der Geschichte des Universums erfolgreich durchsucht würde? Um solch eine Berechnung durchzuführen, müssen wir einige Annahmen aufstellen bezüglich der Anzahl der zu durchsuchenden Objekte und der Geschwindigkeit, mit der sie durchsucht werden.

Da wir unser Ergebnis auf die Biochemie beziehen wollen, wollen wir dies in sehr groben Zügen nachahmen. Nehmen wir an, die sieben Buchstaben entsprechen sieben gewöhnlichen Elementen, die im chemischen Leben vorkommen, und die Wörter entsprächen fremden "Molekülen", die aus deren Kombinationen gebildet werden. (Bitte lassen Sie sich darauf hinweisen, daß wir hier nicht eigentliche Chemie betreiben.) Wir sagen, daß Wasserstoff den Zustand Null darstellt, und beziehen es nicht in die Berechnung mit ein. Wir ignorieren Helium als nicht-reaktiv und nennen die sieben Elemente Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Schwefel, Phosphor, Kalium und Natrium. Diese Berechnung wird sehr grob sein. Geben wir deshalb jedem Element die gleiche Menge, nämlich die des Kohlenstoffs, der von allen sieben am häufigsten vorkommt. Dieser entspricht 0,0003 der Menge des Wasserstoffs.[9]

Wir nehmen an, daß alle diese Elemente innerhalb eines vorgegebenen Volumens des Universums nur 276-Elemente-Ketten bilden und daß sie neue Kombinationen mit der Geschwindigkeit bilden, mit der ein Kohlenstoffatom zu einer neuen Kette wandern kann, sagen wir eine Entfernung von 10 Angströms, bei einer Standardtemperatur von 300 Grad Kelvin. (Ist es hierbei noch nötig hervorzuheben, wie unwahrscheinlich günstig all diese Annahmen sind?)

Wenn wir nun die Boltzmannsche Gleichung anwenden, um die Geschwindigkeit des Kohlenstoffatoms bei 300 Grad Kelvin (8×10^4 cm/sek) zu berechnen, bilden sich demnach neue Ketten mit einer Häufigkeit von $R = 8 \times 10^{11}$ pro Sekunde je Kette. Im sichtbaren Universum (eigentlich das Universum mit dem Hubble Radius) gibt es ungefähr 2×10^{12} Galaxien mit jeweils durchschnittlich 10^{11} Sternen.[10] Wenn wir unsere Sonne als einen durchschnittlichen Stern annehmen, so hat sie eine Masse von 2×10^{33} Gramm. Somit beträgt die Wasserstoffmasse ungefähr 4×10^{56} Gramm innerhalb des Hubble Radius. Unter der Annahme, daß jedes der hier benutzten sieben Elemente genauso häufig vorkommt wie Kohlenstoff, beträgt die Masse der reagierenden Elemente ungefähr 8×10^{53} Gramm. Benutzen wir die Avogadrosche Zahl und ein durchschnittliches Atomgrammgewicht von 24 für unsere Elemente, ergibt das eine Anzahl von 2×10^{76} Atome, die in unseren Ketten reagieren, oder, geteilt durch die Anzahl der Atome pro Kette (276), ungefähr 7×10^{73} Ketten. Die Zeit, die benötigt wird, um die gesamte Anzahl der möglichen Kombinationen zu erreichen, ist dann:

$$\text{Zeit} = \frac{\text{Anzahl der Kombinationen } N'}{\text{Anzahl der Ketten} \times \text{Häufigkeit}}$$

$$\text{Zeit} = \frac{5 \times 10^{232}}{(7 \times 10^{73})\ (8 \times 10^{11})}$$

$$\text{Zeit} = 10^{147} \text{ Sekunden}$$

$$\text{Zeit} = 3 \times 10^{139} \text{ Jahre}$$

Das ist eine lange Zeit! Wir können dies sehr leicht in eine Wahrscheinlichkeit umwandeln, daß dies in unserem Universum mit seinen 20 Milliarden Jahren Geschichte passieren wird, wenn wir einfach das Alter des Universums durch die oben genannte Zeit teilen. Dabei kommt folgendes Ergebnis heraus

$$\text{Wahrscheinlichkeit} = 10^{-129}$$

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Man braucht es eigentlich überhaupt nicht zu sagen, daß dies eine astronomisch kleine Wahrscheinlichkeit ist. Man schätzt die Anzahl der Elementarteilchen im Universum auf nur ungefähr 10^{81}.[11] Angenommen, eines dieser Teilchen wäre markiert und wir hätten die Aufgabe, dieses Teilchen per Zufall unter allen anderen Teilchen im Universum herausfinden, ohne die Möglichkeit, es von den anderen unterscheiden zu können. Die Chance, dieses Teilchen erfolgreich zu lokalisieren, würde dann 10^{48} mal größer sein als die Chance, daß sich ein Molekül mit der geordneten Komplexität des Langtonschen Automatons bilden würde.

Es scheint mir, daß jemand, der an die Entstehung des Lebens auf grund natürlicher Prozesse glaubt, nur in zweifacher Weise darauf antworten kann. (1) Vielleicht ist das Leben doch geplant. Dies war kürzlich die Antwort mehrerer ehemals agnostischer Wissenschaftler.[12] (2) Vielleicht ist die einfachste sich selbstreproduzierende Maschine in Wirklichkeit noch viel einfacher als die von uns analysierte. Worauf wir antworten:"Bitte entwerfen Sie solch eine Maschine, damit wir Ihre Antwort ernst nehmen können."

Richard Dawkins glaubt, daß wir ein Naturmodell für den Ursprung des Lebens wählen sollten, selbt wenn dieses Modell voraussagt, daß es unwahrscheinlich ist, daß es eintreffen wird. Er schlägt vor, daß wir jedes Modell zulassen sollten, bei dem die Entstehung von Leben auf einem vorhandenen erdähnlichen Planeten eine Wahrscheinlichkeit von nur 1 zu 10^{20} hat, da es möglicherweise 10^{20} erdähnliche Planeten im Universum geben dürfte und ungefähr 1 Milliarde Jahre nötig waren, damit Leben auf der Erde entstehen konnte.[13] Nach unseren vorliegenden Berechnungen ist die Wahrscheinlichkeit, daß sich ein einfaches sich selbst-kopierendes Molekül bildet, um 10^{100} geringer als die von Dawkin vorgeschlagene Schwelle. Es scheint mir, daß wir hier einen sehr starken Hinweis haben, daß Leben einem Plan entspringt.

LITERATURVERZEICHNIS

1. Siehe z.B. Cyril Ponnamperuma, *The Origins of Life*, New York, Dutton, 1972; Stanley L. Miller und Leslie E. Orgel, *The Origins of Life on Earth*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1974; John Farley, *The Spontaneous Generation Controversy from Descartes to Oparin*, Baltimore, Johns Hopkins, 1977; Sidney W. Fox und Klaus Dose, *Molecular Evolution and the Origins of Life*, New York, Marcel Dekker, 1977.

2. Siehe z.B. Charles B. Thaxton, Walter L. Bradley und Roger L. Olsen, *The Mistery of Life's Origin: Reassessing Current Theories*, New York, Philosophical Library, 1984; Robert Shapiro, *Origins: A Skeptic's Guide to the Creation of Life on Earth*, New York, Summit Books, 1986.

3. John von Neumann, *Collected Works*, Hrsg. A.W. Taub, 6 Bde, New York, Pergamon Press, 1961-1963.

4. John von Neumann, *The Computer and the Brain*, New Haven, CT, Yale University Press, 1958.

5. John von Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automata*, hrsg. und vollendet von Arthur W. Berks, Urbana, IL, University of Illinois Press, 1966. Die biographischen Angaben zu von Neumann sind dieser Quelle entnommen.

6. Das Werk *Theory of Self-Reproducing Automata* gibt keine Informationen über die Größe der ganzen Maschine. Auf S. 261 gibt Berks 337 x 547 als Größe für die Speicherkontrolleinheit an und bemerkt auf S. 280, daß von Neumann die Konstruktionseinheit nie vollendet hatte. Eine bekannte frühere Diskussion über von Neumanns Maschine findet sich in John Kemeny, *Man Viewed as a Machine*, in: Scientific American 192, April 1955, 18, S. 58-67, nachgedruckt in: Mathematics in the Modern World, San Francisco, W.H. Freeman und Co., 1968, Kap. 50. Kemenys geschätzte Größe von 80 x 400 Chips mit einem 'Schweif' von 150.000 Chips ist sicherlich für die funktionierende letzte Version zu klein.

7. E.F. Codd, *Cellular Automata*, New York, Academic press, 1968.

8. Christopher G. Langton, *Self-Reproduction in Cellular Automata*, in: Physica 10D, 1984, S. 135-144.

9. Siehe z.B. *the relative cosmic abundances*, in: The McGraw-Hill Encyclopedia of Astronomy, 1983, S. 108.

10. Berechnungen, die auf Informationen von Martin Harwit beruhen: *Astrophysical Concepts*, New York, Wiley, 1973: S. 42, 61.

11. Gehen Sie von einigen Zehnerpotenzen aus; beachten Sie unsere oben genannte Zahl für die Gesamtmenge von Wasserstoff und multiplizieren Sie sie mit der Avogadroschen Zahl, mal zwei, um die Elektronen mitzuzählen; die Zehnerpotenz nimmt etwas zu, wenn man die Neutronen und Photonen mit berücksichtigt.

12. Siehe z.B. Fred Hoyle und Chandra Wickramasinghe, *Evolution from Space*, New York, Simon and Schuster, 1981; Dean H. Kenyon, Vorwort zu Thaxton, Bradley und Olsen, *Mystery of Life's Origin*.

13. Richard Dawkins, *The Blind Watchmaker*, New York, Norton, 1986, S. 143-146.

ANHANG
Ein BASIC PROGRAMM FÜR LANGTONS AUTOMATON

```
PROGRAMM "REPRO"

COMMENT
  Das Programm in S-Basic zur Emulierung von Langtons sich selbst-
  reproduzierendem Automaton ist beschrieben in Christopher G.
  Langton, Self-Reproduction in Cellular Automata, in: Physica
  10D, 1984, S. 135-144. Mutationen können durch Veränderung des
  ursprünglichen Feldes A(X,Y) (externe Datei "AUTO") oder durch
  Änderung der Übergangsregeln (externe Datei "TRULES") simuliert
  werden.

                                   Dr. Robert C. Neumann
                                   Biblical Seminary
                                   200 N. Main Street
                                   Hatfield, PA 19440
                                   März 1987
End
VAR A,B,C,I,J,L,M,N1,N2,N3,N4,R,T,TIME,TR,TRBL,X,Y,Z = INTEGER
DIM INETGER A(40,40) TR(8,77) TRBL(8,77) Z(40,40)
FILES D, D, SA(1)
CREATE "TRULES"
CREATE "AUTO"
REM Einlesen der Übergangsregeln TRBL(I,J), TR(I,J)
OPEN #2; "TRULES"
FOR I=0 TO 7
  J=1
100        INPUT3 #2; TRBL(I,J), TR(I,J), TRBL(I,J+1), TR(I,J+1),
   TRBL(I,J+2), TR(I,J+2), TRBL(I,J+3), TR(I,J+3), TRBL(I,J+4),
   TR(I,J+4), TRBL(I,J+5), TR(I,J+5), TRBL(I,J+6), TR(I,J+6)
           IF TRBL(I,J+6)=7777 THEN 130 ELSE 120
120        J=J+7
           GOTO 100
130      NEXT I
         CLOSE #2
         REM Einlesen des Feldes A(X,Y)
         OPEN #2; "AUTO"
         FOR Y=0 TO 39
           INPUT3 #2; A(0,Y), A(1,Y), A(2,Y), A(3,Y), A(4,Y),
  A(5,Y), A(6,Y), A(7,Y), A(8,Y), A(9,Y), A(10,Y), A(11,Y),
  A(12,Y), A(13,Y), A(14,Y), A(15,Y), A(16,Y), A(17,Y), A(18,Y),
  A(19,Y), A(20,Y), A(21,Y), A(22,Y), A(23,Y), A(24,Y), A(25,Y),
  A(26,Y), A(27,Y), A(28,Y), A(29,Y), A(30,Y), A(31,Y), A(32,Y),
  A(33,Y), A(34,Y), A(35,Y), A(36,Y), A(37,Y), A(38,Y), A(39,Y)
```

```
        NEXT Y
        TIME=0
        REM Drucke Feld A(X,Y)
500     TEXT 1 ,&
                      COMPUTER SIMULATION VON
          LANGTONS SICH SELBST-REPRODUZIERENDEM AUTOMATOM

        &
        PRINT #1; , , "TIME = ", TIME
        PRINT #1
        PRINT #1
        FOR Y=0 TO 39
          FOR X=0 TO 39
            IF A(X,Y)=0 THEN 510 ELSE 520
510         PRINT #1; "  ";
            GOTO 530
520         PRINT #1; A(X,Y);
530       NEXT X
          PRINT #1; CHR$(13); CHR$(10);
        NEXT Y
        PRINT #1, CHR$(12);
        REM Feld A(X,Y) vorhanden, berechne Nachfolger Z(X,Y)
        REM Haupt-(X,Y)-Schleife
750     FOR Y=1 TO 38
          FOR X=1 TO 38
          REM Weise Zentrum und Nachbarn zu
          C=A(X,Y)
          T=A(X,Y-1)
          R=A(X+1,Y)
          B=A(X,Y+1)
          L=A(X-1,Y)
          REM Vier Zyklische Kombinationen von T, R, B, L
          N1=T*1000+R*100+B*10+L
          N2=R*1000+B*100+L*10+T
          N3=B*1000+L*100+T*10+R
          N4=L*1000+T*100+R*10+B
          REM Auswahl von N mit dem niedrigsten Wert
          IF N1<=N2 THEN 1000 ELSE 1030
1000      IF N1<=N3 THEN 1010 ELSE 1060
1010      IF N1<=N4 THEN 1020 ELSE 1080
1020      M=N1
          GOTO 1100
1030      IF N2<=N3 THEN 1040 ELSE 1060
1040      IF N2<=N4 THEN 1050 ELSE 1080
1050      M=N2
          GOTO 1100
1060      IF N3<=N4 THEN 1070 ELSE 1080
1070      M=N3
          GOTO 1100
1080      M=N4
```

```
          REM Bei den Übergangsregeln nachschauen
1100      CASE C OF
                0: I=0
                1: I=1
                2: I=2
                3: I=3
                4: I=4
                5: I=5
                6: I=6
                7: I=7
          END
          J=1
1200      IF TRBL(I,J)=M THEN 1210 ELSE 1220
1210      Z(X,Y)=TR(I,J)
          GOTO 1250
1220      IF TRBL(I,J)>M THEN 1230 ELSE 1240
1230      Z(X,Y)=0
          GOTO 1250
1240      J=J+1
          GOTO 1200
1250        NEXT X
          NEXT Y
          REM Beenden der Haupt-(X,Y)-Schleife
          REM Ersetze  altes A(X,Y) durch neues
1300      FOR Y=1 TO 39
            FOR X=1 TO 39
            A(X,Y)=Z(X,Y)
            NEXT X
          NEXT Y
          TIME=TIME+1
          GOTO 500
```

DATEI "AUTO"

[Vierzig Zeilen mit jeweils durch Komma getrennte vierzig Zahlen; plaziere das Orginalautomaton irgendwo in der Mitte, mit Platz zum wachsen; die restlichen Zahlen sind Nullen.]

```
...0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0...
...0,0,0,0,0,0,0,2,2,2,2,2,2,2,2,0,0,0,0,0...
...0,0,0,0,0,0,2,1,7,0,1,4,0,1,4,2,0,0,0,0...
...0,0,0,0,0,0,2,0,2,2,2,2,2,2,0,2,0,0,0,0...
...0,0,0,0,0,0,2,7,2,0,0,0,0,2,1,2,0,0,0,0...
...0,0,0,0,0,0,2,1,2,0,0,0,0,2,1,2,0,0,0,0...
...0,0,0,0,0,0,2,0,2,0,0,0,0,2,1,2,0,0,0,0...
...0,0,0,0,0,0,2,7,2,0,0,0,0,2,1,2,0,0,0,0...
...0,0,0,0,0,0,2,1,2,2,2,2,2,2,1,2,2,2,2,2,0...
...0,0,0,0,0,0,2,0,7,1,0,7,1,0,7,1,1,1,1,1,2,0...
...0,0,0,0,0,0,0,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,0,0...
...0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0...
```

DATEI "TRULES"

```
1,2,6,3,7,1,11,2,12,2,13,2,21,2,
26,2,27,2,52,5,62,2,72,2,102,2,212,5,
232,2,522,2,1232,1,1242,1,1252,5,1262,1,1272,1,
1275,1,1422,1,1432,1,1442,1,1472,1,1625,1,1722,1,
1725,5,1752,1,1762,1,1772,1,2527,1,6666,0,7777,0,
1,1,6,1,7,7,11,1,12,1,21,1,24,4,
27,7,51,1,101,1,111,1,124,4,127,7,202,6,
212,1,221,1,224,4,226,3,227,7,232,7,242,4,
262,6,264,4,267,7,272,7,542,7,1112,1,1122,1,
1124,4,1125,1,1126,1,1127,7,1152,2,1212,1,1222,1,
1224,4,1225,1,1227,7,1232,1,1242,4,1262,1,1272,7,
1322,1,2224,4,2227,7,2243,4,2254,7,2324,4,2327,7,
2425,5,2426,7,2527,5,4444,0,5555,0,6666,0.7777,0,
1,2,2,2,4,2,7,1,12,2,15,2,21,2,
22,2,23,2,24,2,26,2,27,2,32,6,42,3,
51,7,52,2,57,5,72,2,102,2,112,2,122,2,
142,2,172,2,202,2,203,2,205,2,207,3,212,2,
215,2,221,2,222,2,227,2,232,1,242,2,245,2,
255,2,262,2,272,2,312,2,321,6,322,6,342,2,
422,2,512,2,521,2,522,2,552,1,572,5,622,2,
672,2,712,2,722,2,742,2,772,2,1122,2,1126,1,
1222,2,1224,2,1226,2,1227,2,1422,2,1522,2,1622,2,
1722,2,2227,2,2244,2,2246,2,2276,2,2277,2,7777,0,
1,3,2,2,4,1,7,6,12,3,42,1,62,2,
102,1,251,1,3333,0,4444,0,5555,0,6666,0,7777,0,
222,1,232,6,322,1,4444,0,5555,0,6666,0,7777,0,
2,2,21,5,22,5,23,2,27,2,202,2,212,2,
215,2,224,4,272,2,1212,2,1242,2,1272,2,7777,0,
1,1,2,1,1212,5,1213,1,1222,5,6666,0,7777,0,
7,7,222,1,225,1,232,1,252,5,6666,0,7777,0,
7777,0,7777,0,7777,0,7777,0,7777,0,7777,0,7777,0,
```