Klassifikation von Systemen mit künstlicher Evolution nach dem Grad der Offenheit der Evolution:

klassische evolutionäre Algorithmen (insbes. GA)	• Fitnessfunktion vorgegeben • Gene mit fester Auswahl von Allelen • (meist) feste Genom-Länge
LindEvol	• Fitnessfunktion (z.T.) intrinsisch • aber: Selbstreplikation wird durch das Simulationssystem erledigt
Tierra, Avida, Amoeba	• Fitnessfunktion und Selbst-replikation intrinsisch

Tierra
(span.: "Erde")

Thomas S. Ray 1989/90
Biologe, Spezialgebiet Ökologie
1989 Assistant Prof. an der Universität Delaware

seine Def. von "Leben":
"I would consider a system to be living if it is self-replicating and capable of open-ended evolution." (Ray 1992, S. 372)

Idee: digitale Form von *offener* Darwin'scher Evolution anhand von Computerprogrammen (Motivation: Computerviren)

> Er erinnert sich, wie er diese Idee in einem Ökologieseminar vorstellte: "Ich wurde buchstäblich aus dem Raum hinaus-gelacht", sagt er. Auch Rays Kollegen, die kurz zuvor seine Anstellung befürwortet hatten, erklärten die Idee für verrückt.

Kontaktaufnahme mit Langton und Farmer (Los Alamos):
Idee, einen virtuellen Computer zu verwenden

biologisches Vorbild für Tierra:
nicht die Entstehung des Lebens auf der Erde, sondern die "kambrische Explosion": Entwicklung der ersten Mehrzeller im Kambrium, zugleich starkes Anwachsen der morphologischen Diversität

Grundlagen von Tierra:

- Genotyp = Phänotyp
- Befehle ähnlich Intel i860 Maschinensprache
- ähnlich Redcode (Core Wars)
- Ressourcen = CPU-Zeit und Speicherplatz
- aber: Redcode-Programme erwiesen sich als zu anfällig bei Mutationen ("brittleness" = Brüchigkeit der Selbstreplikationsfähigkeit)

  Ursache: Redcode hat nur ca. 10 Befehle, aber die meisten Befehlen haben 1 oder 2 Operanden $\Rightarrow$ wahre Größe des Befehlssatzes liegt bei 10^{11} !

- deshalb: Befehlssatz der (wahren) Größe 32 (5 Bits), *keine Operanden*
- template- (Schablonen-) basierte Adressierung (Idee aus der Biologie, vgl. Matching im Artificial Evolutionary System)
- zusätzlich Register und Stack für jeden "Organismus"

templates: Folgen von aufeinanderfolgenden Befehlen der beiden Typen **`nop_0`** und **`nop_1`** ("no operation" – reine Markerbefehle, meist 4 hintereinander)

Suchbefehl (**`jmp`**-Befehl, der durch Folge von **`nop`**-Befehlen gefolgt wird) sucht nach nächstem komplementären template (0 und 1 vertauscht) und lenkt den Befehlszeiger auf das Ende des gefundenen templates

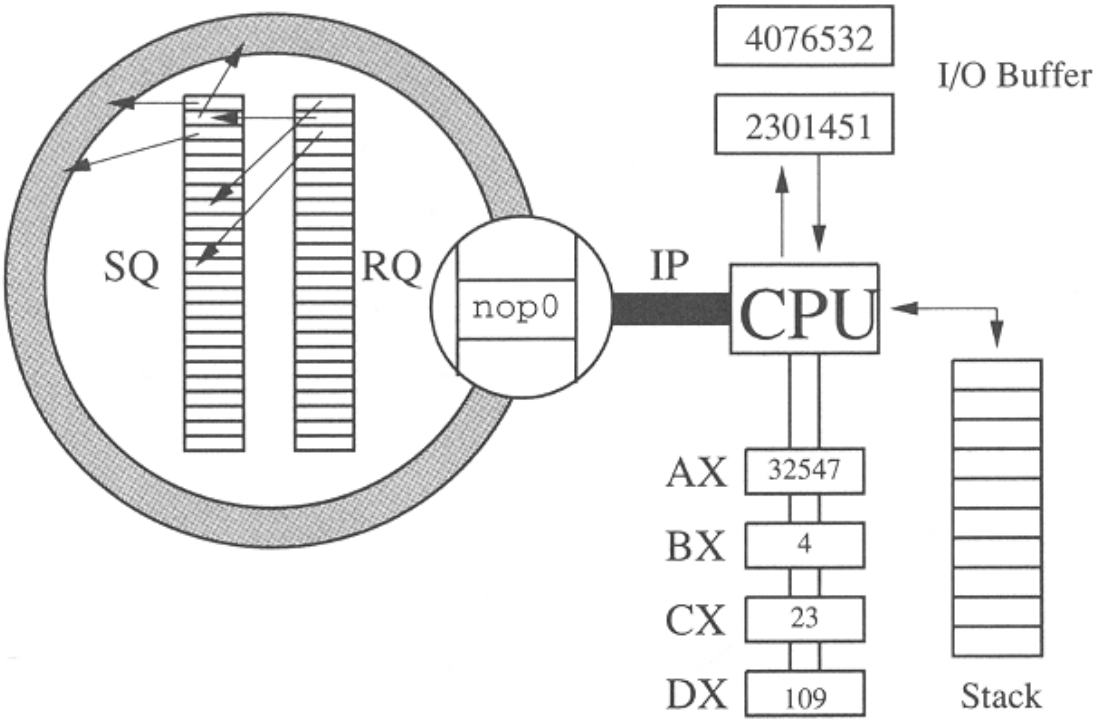
Befehlssatz von Tierra:

```
void execute(int  di, int  ci)
{   switch(di)
    {   case 0x00: nop_0(ci);    break; /* no operation */
        case 0x01: nop_1(ci);    break; /* no operation */
        case 0x02: or1(ci);      break; /* flip low order bit of cx, cx ^= 1 */
        case 0x03: shl(ci);      break; /* shift left cx register, cx <<= 1 */
        case 0x04: zero(ci);     break; /* set cx register to zero, cx = 0 */
        case 0x05: if_cz(ci);    break; /* if cx==0 execute next instruction */
        case 0x06: sub_ab(ci);   break; /* subtract bx from ax, cx = ax - bx */
        case 0x07: sub_ac(ci);   break; /* subtract cx from ax, ax = ax - cx */
        case 0x08: inc_a(ci);    break; /* increment ax, ax = ax + 1 */
        case 0x09: inc_b(ci);    break; /* increment bx, bx = bx + 1 */
        case 0x0a: dec_c(ci);    break; /* decrement cx, cx = cx - 1 */
        case 0x0b: inc_c(ci);    break; /* increment cx, cx = cx + 1 */
        case 0x0c: push_ax(ci);  break; /* push ax on stack */
        case 0x0d: push_bx(ci);  break; /* push bx on stack */
        case 0x0e: push_cx(ci);  break; /* push cx on stack */
        case 0x0f: push_dx(ci);  break; /* push dx on stack */
        case 0x10: pop_ax(ci);   break; /* pop top of stack into ax */
        case 0x11: pop_bx(ci);   break; /* pop top of stack into bx */
        case 0x12: pop_cx(ci);   break; /* pop top of stack into cx */
        case 0x13: pop_dx(ci);   break; /* pop top of stack into dx */
        case 0x14: jmp(ci);      break; /* move ip to template */
        case 0x15: jmpb(ci);     break; /* move ip backward to template */
        case 0x16: call(ci);     break; /* call a procedure */
        case 0x17: ret(ci);      break; /* return from a procedure */
        case 0x18: mov_cd(ci);   break; /* move cx to dx, dx = cx */
        case 0x19: mov_ab(ci);   break; /* move ax to bx, bx = ax */
        case 0x1a: mov_iab(ci);  break; /* move instruction at address in bx
                                           to address in ax */
        case 0x1b: adr(ci);      break; /* address of nearest template to ax */
        case 0x1c: adrb(ci);     break; /* search backward for template */
        case 0x1d: adrf(ci);     break; /* search forward for template */
        case 0x1e: mal(ci);      break; /* allocate memory for daughter cell */
        case 0x1f: divide(ci);   break; /* cell division */
    }
    inst_exec_c++;
}
```

Beachte: Zahlenkonstanten müssen durch Bit-Flipping und Shifts (**`or1`**, **`shl`**) konstruiert werden.

virtuelle CPU:
multiple instruction multiple data (MIMD) System, emuliert durch "slicer queue", die zyklisch jedem Individuum Rechenzeit zuordnet (vgl. Core Wars)

```
struct cpu {  /* structure for registers of virtual cpu */
    int   ax;  /* address register */
    int   bx;  /* address register */
    int   cx;  /* numerical register */
    int   dx;  /* numerical register */
    char  fl;  /* flag */
    char  sp;  /* stack pointer */
    int   st[10];  /* stack */
    int   ip;  /* instruction pointer */
    } ;
```



(IP = Befehlszeiger, SQ = slicer queue, RQ = reaper queue)

Registerzellen und Stack sind die einzigen Operanden der Befehle
"Genbank-Programm" protokolliert Eigenschaften jedes Individuums

- ringförmiger RAM (vgl. Core Wars) mit (1. Version!) 60 000 Bytes (entspr. 60 000 Befehle) – Bezeichnung durch Ray: "The soup"
- im Gegensatz zu Core Wars sind die von einem Individuum belegten Speicherzellen *schreibgeschützt* (aber nicht lese- und execute-geschützt!)
- ein Individuum (= Programm) kann in 2. Speicherblock ("Tochter-Organismus") schreiben, wenn der **`mal`**-Befehl (memory allocation) ausgeführt wurde
- nach **`divide`** wird dieser 2. Programmteil ein selbstständiges Individuum und wird in beide queues eingereiht
- um "Überbevölkerung" und deadlock des Systems zu vermeiden: *reaper queue* ("Schnitter-Schlange") – Individuen, die am Ende dieser Warteschlange stehen, werden "getötet", wenn der Speicher zu 80 % belegt ist (der "tote" Code wird nicht aus dem Speicher entfernt!), frisch "geborene" Individuen kommen ganz an den Anfang
- wenn ein Individuum bei Befehlsausführung eine Fehler-bedingung generiert, bewegt es sich um 1 Platz in der reaper queue weiter ("Bestrafung" schlechter Algorithmen)

3 Arten von Mutationen:

- cosmic ray mutations: "Hintergrundrauschen", das gelegentlich 1 zufällig gewähltes Bit aus dem RAM ändert (Rate: 1 Bit geflippt nach durchschnittl. 10 000 Befehlsausführungen)
- copy mutations: ungenaue Ausführung von copy-Befehlen (1 Bit fehlerhaft pro 1000-2500 kopierten Befehlen)
- Ausführungsmutationen: ungenaue Ausführung von anderen Befehlen, z.B. Inkrementierung eines Registerinhalts um 0 oder um 2 statt um 1 (niedrige Rate).

Selbstreplikation erfolgt nicht automatisch, sondern das Individuum muss in seiner Befehlsfolge selbst dafür Vorkehrung treffen

Start des ersten Tierra-Simulationslaufs:

1 von Hand programmierter "Urahne" mit 80 Befehlen, der zur Selbstreplikation fähig ist
Prinzip:

- Programm bestimmt Adressen seines Anfangs und seines Endes (über templates) und deren Differenz
- alloziert Speicherblock dieser Größe für Tochter-Organismus
- kopiert gesamtes Genom in Tochter-Speicherbereich (copy-Prozedur)
- führt divide-Befehl aus und macht weiter mit Allozieren von neuem Tochter-Speicherbereich (Endlosschleife)

Genom des "Urahnen":

```
001  nop1
002  nop1
003  nop1
004  nop1
005  zero
006  or1
007  shl
008  shl
009  mov_cd
010  adrb
011  nop0
012  nop0
013  nop0
014  nop0
015  sub_ac
016  mov_ab
017  adrf
018  nop0
019  nop0
020  nop0
```

```
021  nop1
022  inc_a
023  sub_ab
024  nop1
025  nop1
026  nop0
027  nop1
028  mal
029  call
030  nop0
031  nop0
032  nop1
033  nop1
034  divide
035  jmp
036  nop0
037  nop0
038  nop1
039  nop0
040  if_cz
```

```
041  nop1
042  nop1
043  nop0
044  nop0
045  push_ax
046  push_bx
047  push_cx
048  nop1
049  nop0
050  nop1
051  nop0
052  mov_iab
053  dec_c
054  if_cz
055  jmp
056  nop0
057  nop1
058  nop0
059  nop0
060  inc_a
```

```
061  inc_b
062  jmp
063  nop0
064  nop1
065  nop0
066  nop1
067  if_cz
068  nop1
069  nop0
070  nop1
071  nop1
072  pop_cx
073  pop_bx
074  pop_ax
075  ret
076  nop1
077  nop1
078  nop1
079  nop0
080  if_cz
```

kommentierte Fassung:

```
genotype: 80 aaa  origin: 1-1-1990  00:00:00:00  ancestor
parent genotype: human
1st_daughter:  flags: 0  inst: 839  mov_daught: 80
2nd_daughter:  flags: 0  inst: 813  mov_daught: 80

nop_1     ; 01   0 beginning template
nop_1     ; 01   1 beginning template
nop_1     ; 01   2 beginning template
nop_1     ; 01   3 beginning template
zero      ; 04   4 put zero in cx
or1       ; 02   5 put 1 in first bit of cx
shl       ; 03   6 shift left cx
shl       ; 03   7 shift left cx, now cx = 4
          ;        ax =                 bx =
          ;        cx = template size   dx =
mov_cd    ; 18   8 move template size to dx
          ;        ax =                 bx =
          ;        cx = template size   dx = template size
adrb      ; 1c   9 get (backward) address of beginning template
nop_0     ; 00  10 compliment to beginning template
nop_0     ; 00  11 compliment to beginning template
nop_0     ; 00  12 compliment to beginning template
nop_0     ; 00  13 compliment to beginning template
          ;        ax = start of mother + 4   bx =
          ;        cx = template size         dx = template size
sub_ac    ; 07  14 subtract cx from ax
          ;        ax = start of mother   bx =
          ;        cx = template size     dx = template size
mov_ab    ; 19  15 move start address to bx
          ;        ax = start of mother   bx = start of mother
          ;        cx = template size     dx = template size
adrf      ; 1d  16 get (forward) address of end template
nop_0     ; 00  17 compliment to end template
nop_0     ; 00  18 compliment to end template
nop_0     ; 00  19 compliment to end template
nop_1     ; 01  20 compliment to end template
          ;        ax = end of mother   bx = start of mother
          ;        cx = template size   dx = template size
inc_a     ; 08  21 to include dummy statement to separate creatures
sub_ab    ; 06  22 subtract start address from end address to get size
          ;        ax = end of mother    bx = start of mother
          ;        cx = size of mother   dx = template size
nop_1     ; 01  23 reproduction loop template
nop_1     ; 01  24 reproduction loop template
nop_0     ; 00  25 reproduction loop template
nop_1     ; 01  26 reproduction loop template
mal       ; 1e  27 allocate memory for daughter cell, address to ax
          ;        ax = start of daughter    bx = start of mother
          ;        cx = size of mother       dx = template size
```

```
call     ; 16  28 call template below (copy procedure)
nop_0    ; 00  29 copy procedure compliment
nop_0    ; 00  30 copy procedure compliment
nop_1    ; 01  31 copy procedure compliment
nop_1    ; 01  32 copy procedure compliment
divide   ; 1f  33 create independent daughter cell
jmp      ; 14  34 jump to template below (reproduction loop, above)
nop_0    ; 00  35 reproduction loop compliment
nop_0    ; 00  36 reproduction loop compliment
nop_1    ; 01  37 reproduction loop compliment
nop_0    ; 00  38 reproduction loop compliment
if_cz    ; 05  39 this is a dummy instruction to separate templates
         ;        begin copy procedure
nop_1    ; 01  40 copy procedure template
nop_1    ; 01  41 copy procedure template
nop_0    ; 00  42 copy procedure template
nop_0    ; 00  43 copy procedure template
push_ax  ; 0c  44 push ax onto stack
push_bx  ; 0d  45 push bx onto stack
push_cx  ; 0e  46 push cx onto stack
nop_1    ; 01  47 copy loop template
nop_0    ; 00  48 copy loop template
nop_1    ; 01  49 copy loop template
nop_0    ; 00  50 copy loop template
mov_iab  ; 1a  51 move contents of [bx] to [ax]
dec_c    ; 0a  52 decrement cx
if_cz    ; 05  53 if cx == 0 perform next instruction, otherwise skip it
jmp      ; 14  54 jump to template below (copy procedure exit)
nop_0    ; 00  55 copy procedure exit compliment
nop_1    ; 01  56 copy procedure exit compliment
nop_0    ; 00  57 copy procedure exit compliment
nop_0    ; 00  58 copy procedure exit compliment
inc_a    ; 08  59 increment ax
inc_b    ; 09  60 increment bx
jmp      ; 14  61 jump to template below (copy loop)
nop_0    ; 00  62 copy loop compliment
nop_1    ; 01  63 copy loop compliment
nop_0    ; 00  64 copy loop compliment
nop_1    ; 01  65 copy loop compliment
if_cz    ; 05  66 this is a dummy instruction, to separate templates
nop_1    ; 01  67 copy procedure exit template
nop_0    ; 00  68 copy procedure exit template
nop_1    ; 01  69 copy procedure exit template
nop_1    ; 01  70 copy procedure exit template
pop_cx   ; 12  71 pop cx off stack
pop_bx   ; 11  72 pop bx off stack
pop_ax   ; 10  73 pop ax off stack
ret      ; 17  74 return from copy procedure
nop_1    ; 01  75 end template
nop_1    ; 01  76 end template
nop_1    ; 01  77 end template
nop_0    ; 00  78 end template
if_cz    ; 05  79 dummy statement to separate creatures
```

von Ray im Original-Versuch verwendete Hardware (1990):

Toshiba 5200/100 Laptop mit 80386-Prozessor und 80387-math. Coprozessor (20 MHz, entspr. 12 Millionen Tierra-Befehle pro Stunde)

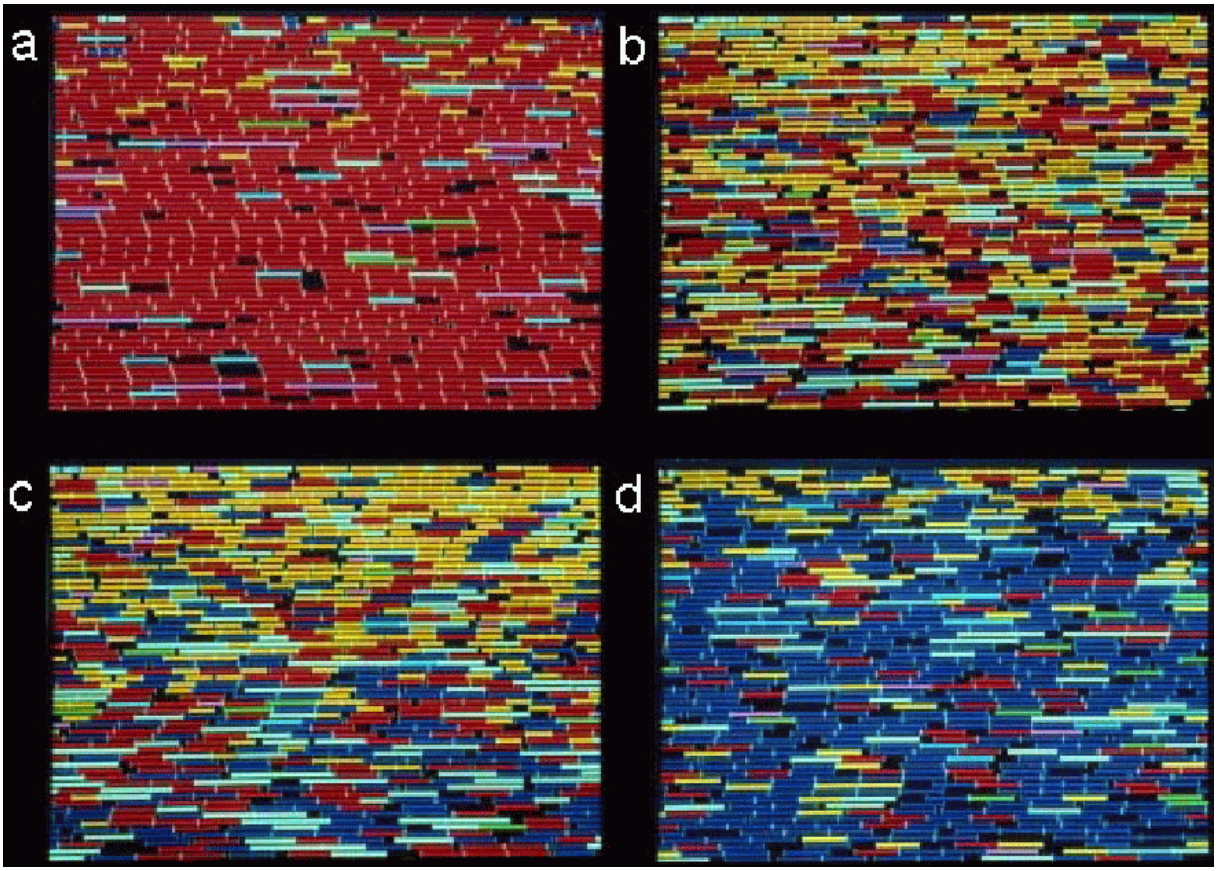
839 Befehle für erste Replikation des Urahnen, 813 Befehle für weitere Replikationen

Was passierte beim ersten Evolutions-Lauf (nach 2 Monaten intensiver Programmierarbeit)?

> Ray: "Ich dachte: o.k., ich schaffe es, den Simulator zum Arbeiten zu bringen, aber es wird mich Jahre kosten, um eine Evolution in dem System in Gang zu setzen. Wie sich heraus-stellte, musste ich aber keine weitere Kreatur herstellen..."

- bald entstehen etwas kürzere Mutanten, die den Urahnen der Länge 80 verdrängen
- plötzlich trat ein Organismus der Länge 45 auf, der sich rasch vermehrte! (extrem kurz für ein selbstrepl. Programm in dieser Sprache...) – Ursache: *Parasitismus*
- neuer Organismus verwendet Copy-Schleife seiner größeren Nachbarn für die eigene Fortpflanzung
- oszillierende Populationsgrößen, da Parasit auf Wirts-organismen angewiesen (Lotka-Volterra-Dynamik)
- später: Auftreten von Immunität bei den Wirtsorganismen ("evolutionärer Rüstungswettlauf")
- Umgehen von Immunität durch Parasiten
- Hyper-Parasiten, die die Parasiten ausnutzen
- Hyper-Parasiten bringen die Parasiten zum Aussterben und entwickeln danach eine Gemeinschaft von "sozialen" Organismen, die sich gegenseitig (in Aggregationen) bei der Vermehrung helfen (und 24% kürzer als der Urahn sind)
- "Betrüger" nutzen die sozialen Organismen aus

Visualisierung des Speicherinhalts von Tierra (erst bei späteren Versionen realisiert):



rot: Urahne (80 Befehle)
gelb: Parasiten
dunkelblau: immune Organismen

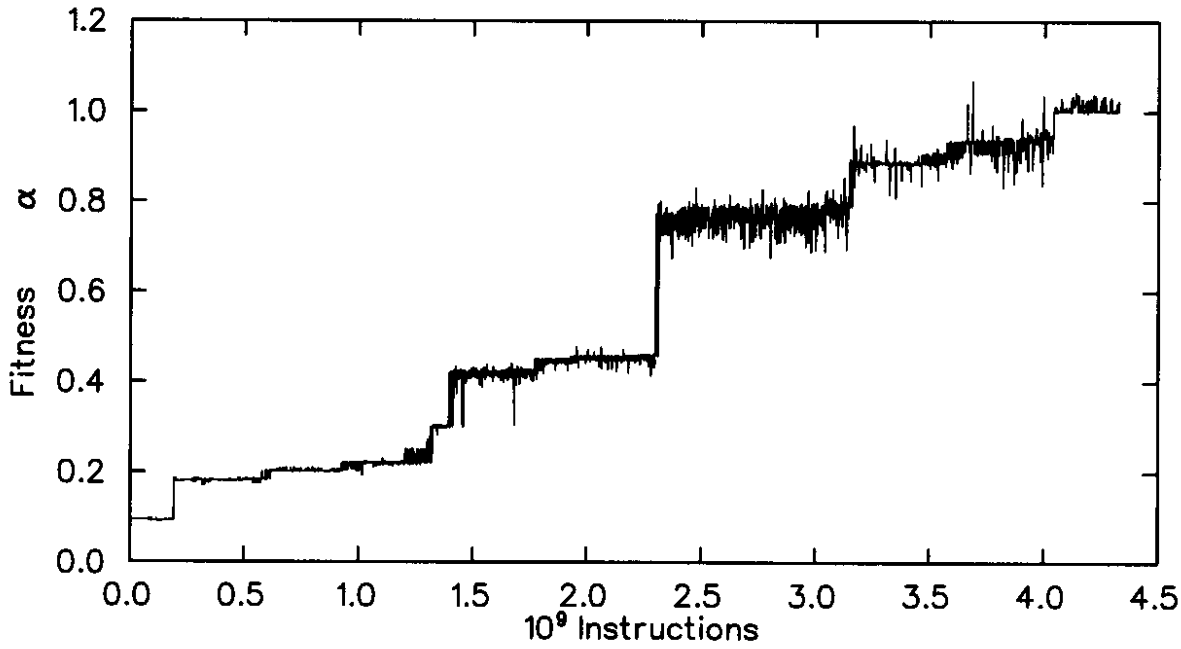
weitere Beobachtung (später):

Auftreten einer neuen Variante der Bestimmung der eigenen Programmlänge: kein template am Ende, dafür in der Mitte; Differenz zwischen Anfang und Mitte wird verdoppelt!

Makro-Evolution:

- Perioden, wo relativ wenig passiert, werden unterbrochen von Phasen starken evolutionären Wandels ("punctuated equilibrium", auch von Biologen konstatiert)

Typischer Verlauf der Fitness des besten Individuums in einem Tierra-Lauf (aus Adami 1999):



- nach vielen Millionen Befehlsschritten werden die "kurzen" Organismen (Länge um 80 Befehle) meist abgelöst durch Organismen mit Länge 400-800.
- bei vereinzelten Läufen kam es auch zum Aussterben der gesamten Population

Fazit:

Auftreten von:

- Koevolution
- Parasitismus, Symbiose
- Immunität (wie bei Bakterien)
- typischer ökologischer Phänomene

- Fitness-Landschaft ändert sich dynamisch durch die vorhandenen Organismen (biotische Umwelt)
- insbes. Einfluss des Parasitismus auf die Fitness
- Anwachsen der Diversität

> Ray: "It is worth noting that the results presented here are based on evolution of the first creature that I designed, written in the first instruction set that I designed. (...)
> It would appear then that it is rather easy to create life."

Begrenzungen / Nachteile:

- alle Organismen können mit allen interagieren, globaler "reaper" $\Rightarrow$ fehlende räumliche Struktur
- wegen Schreibschutz der Individuen keine "Räuber", die Speicherplatz okkupieren, möglich
- keine Morphogenese
- Genotyp = Phänotyp

Sourcecode und ausführbare Versionen von Tierra verfügbar unter:

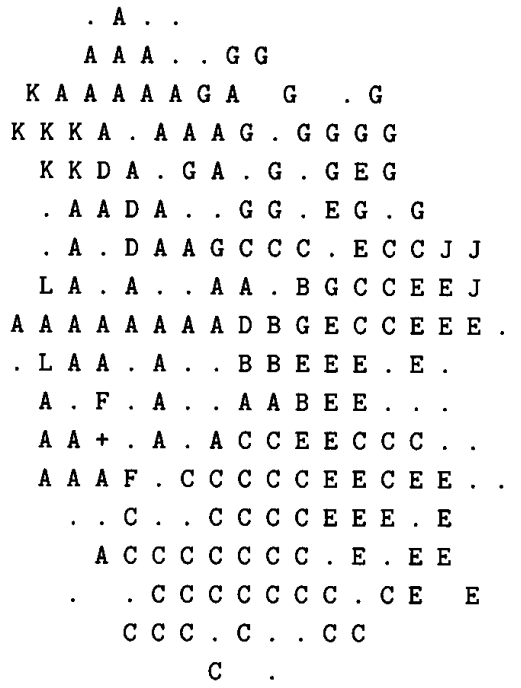
`http://www.isd.atr.co.jp/~ray/tierra/source`

Avida
C. Titus Brown, Charles Ofria, Dennis Adler, Travis Collier, Christoph Adami
California Institute of Technology, 1994-1997
Homepage: **`http://dllab.caltech.edu/avida`**

Unterschiede zu Tierra:

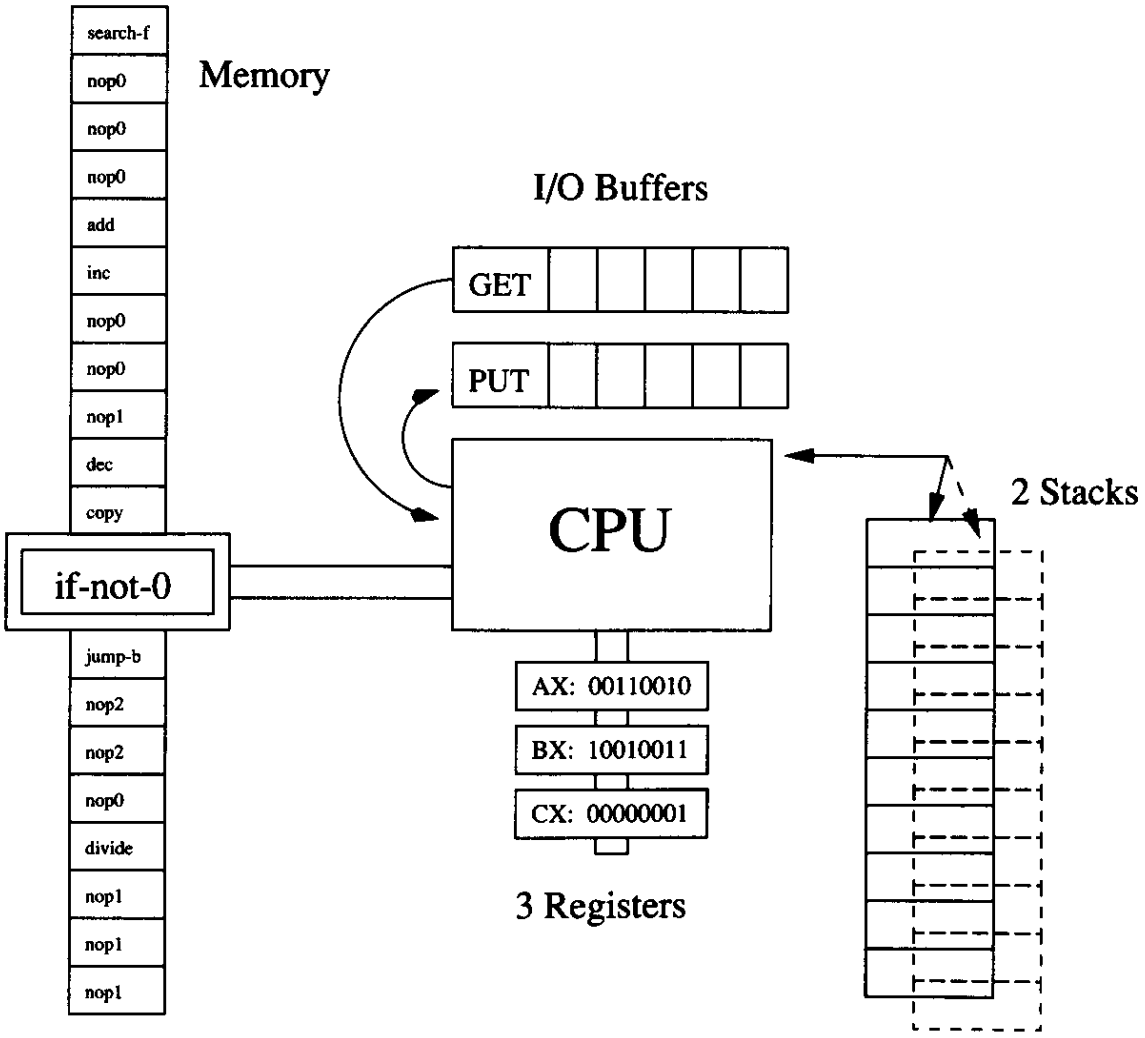
- 2-dimensionales Gitter, in jeder Zelle kann (potenziell) ein Individuum lokalisiert sein, mit seinem gesamten Genom
- Interaktionen zwischen den Individuen nur lokal (Moore-Nachbarschaft im Gitter)
- lokale reaper-queues für jede Zelle

Beispiel für einen Avida-Zustand (Großbuchstaben stehen für Genotypen, die mindestens dreimal vorliegen, also vermutlich selbstreplikationsfähig sind, Punkte für andere Mutanten; A war der "Urahn"):



- Befehlszeiger bleibt bei "normaler" Abarbeitung an das eigene Genom gebunden (zyklisches Genom); Ausnahme: (optionaler) **`jump-p`** Befehl

- CPU mit 3 Registern, 2. Stack (optional), Ein- und Ausgabe



- Befehlssatz: default-Befehlssatz kleiner als bei Tierra, kann optional durch weitere Befehle ergänzt werden (z.B. rotate, jump-p, inject)

nop-A	call	pop	allocate
nop-B	return	push	divide
nop C	shift-r	add	get
if-n-eq	shift-l	sub	put
jump-f	inc	nand	search-f
jump-b	dec	copy	search-b

nop-Befehle dienen nicht nur als templates, sondern können Semantik des vorangegangenen Befehls verändern
⇒ *Redundanz*: selbe Aktion kann durch unterschiedliche Befehlsfolgen codiert werden

selbstreplizierendes Beispielprogramm:

```
00  search-f   find distance to the end label
01  nop-A      label α
02  nop-A
03  add        account for the end label's size
04  inc        account for the initial search-f
05  allocate   allocate space for daughter.
06  push       move size from BX onto the stack.
07  nop-B
08  pop        move size off of the stack into CX
09  nop-C
10  pop        since the stack is empty, pop 0 into BX
11  nop-B      label β̄ (Copy Loop start)
12  nop-C
13  copy       copy the current line...
14  inc        move onto the next line.
15  if-n-equ   if we aren't done copying...
16  jump-b     ...jump back to the loop's beginning.
17  nop-A      label β
18  nop-B
19  divide     done copying; separate the daughter!
20  nop-B      label ᾱ
21  nop-B
```

Erfolgreiche Selbstreplikation besteht aus:
– Allokation von neuem Speicherplatz
– Kopieren des Elternprogramms in den neuen Speicherbereich (Anweisung für Anweisung)
– Teilung des Programms mit **`divide`**
– Plazierung des Kind-Programms im Gitter

Die Plazierung erfolgt lokal und durch das Simulationssystem ("durch die Physik der Welt"), anders als in LindEvol

Mutationen:
Punktmutationen (cosmic ray), Copy-Mutationen, Divide-Mutationen, Divide-Insertionen, Divide-Deletionen
(Raten einzeln einstellbar)

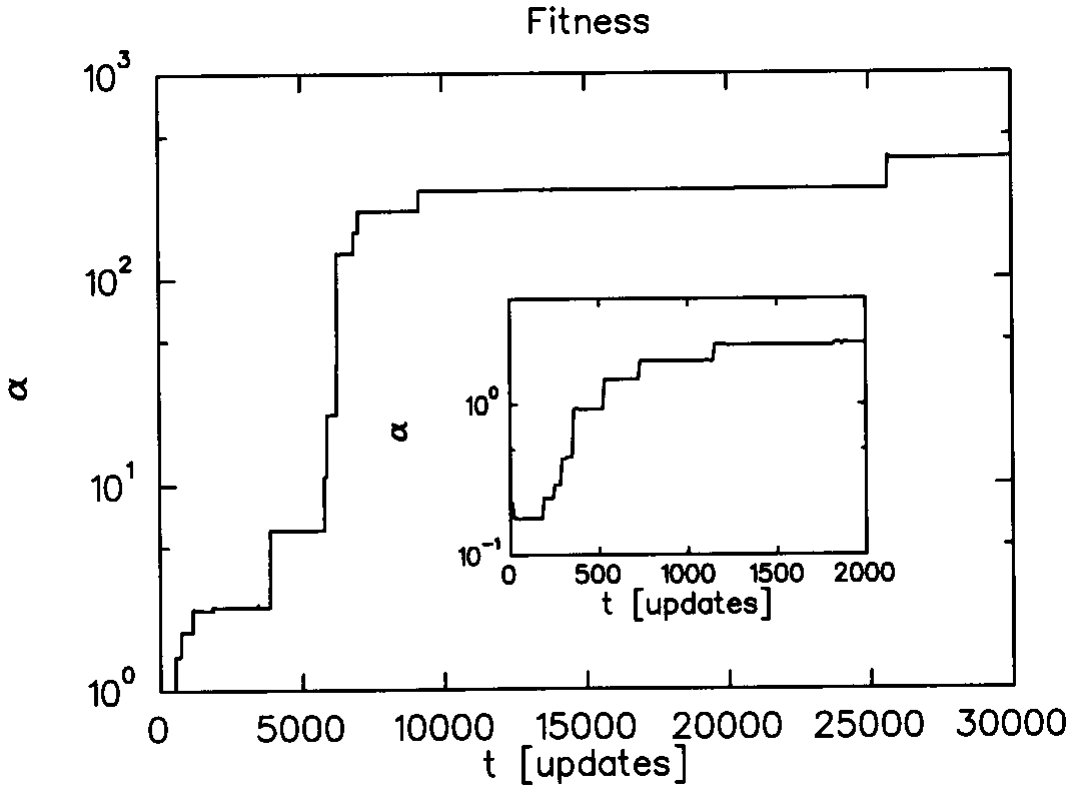
- Auswahl verschiedener Time slicing- und Plazierungs-Methoden möglich
- Erfüllung bestimmter Aufgaben (Tasks) kann durch Vergabe von Merits ("Bonuspunkten") belohnt werden, die in die Zuteilung der Rechenzeit einfließen ($\Rightarrow$ ein "belohntes" Programm wird schneller abgearbeitet und sich somit schneller vermehren)
- dadurch (neben der intrinsischen) extrinsische Beeinflussung der Fitnesslandschaft möglich

typische Aufgaben betreffen Input und Output, z.B. Ausführung logischer Operationen

Beispiel: System soll "stufenweise" an die Lösung boolescher Verknüpfungen herangeführt werden (Task-set und Bonus-werte werden vom Benutzer vorgegeben):

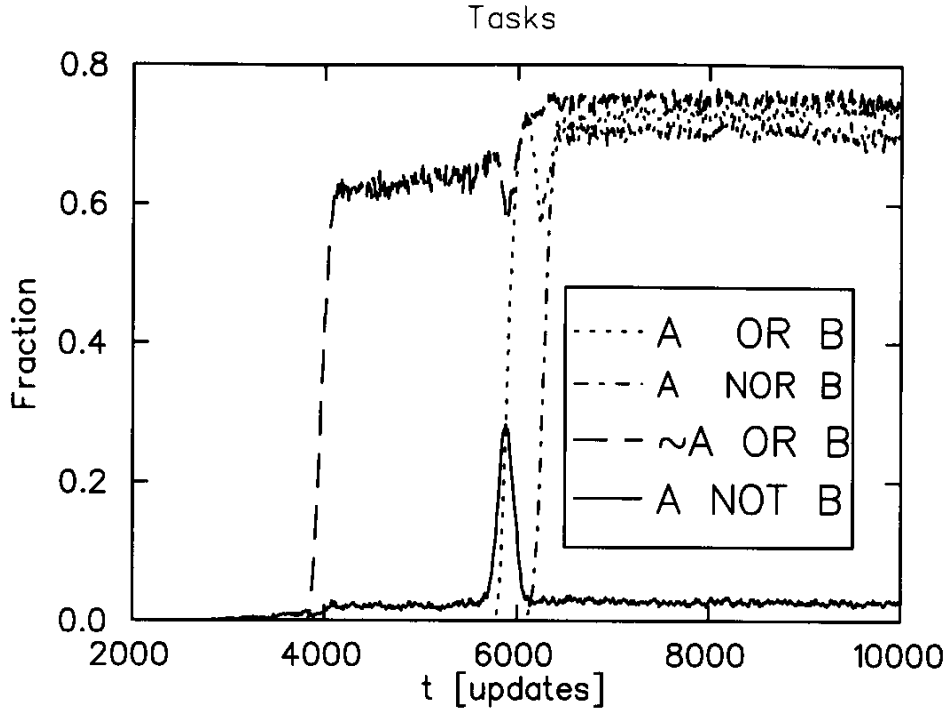
#Task	bonus(0=off)	Meaning	Difficulty
get	1	# I/O	
put	1	# I/O	
ggp	1	# I/O	
echo	1	# I/O	
not	2	# ~A	- 1 nand
nand	2	# ~(A and B)	- 1 nand
or_n	3	# ~A or B	- 2 nands
and	3	# A and B	- 2 nands
or	4	# A or B	- 3 nands
and_n	4	# A and ~B	- 3 nands
nor	5	# ~(A or B)	- 4 nands
xor	6	# A xor B	- 5 nands
equ	6	# ~(A xor B)	- 5 nands

Experimente:
Fitness-Entwicklung (ähliches Verhalten wie Tierra):



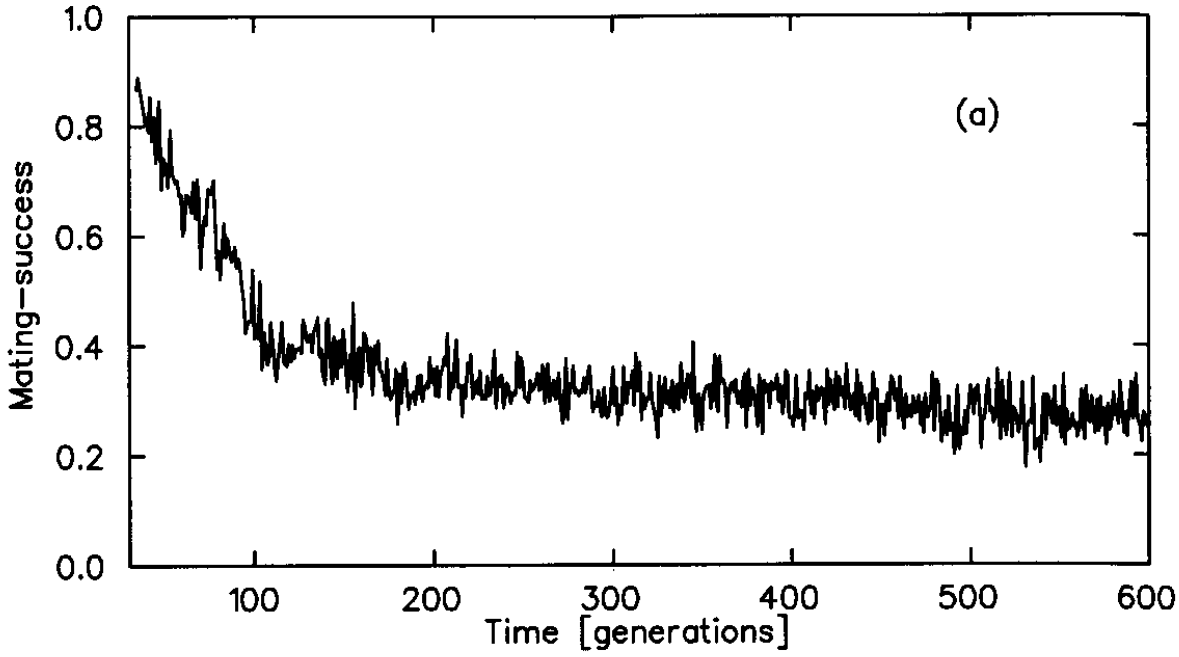
(Inlet: schneller Erwerb der verlangen I/O-Fähigkeiten im Laufe der ersten 2000 Schritte)

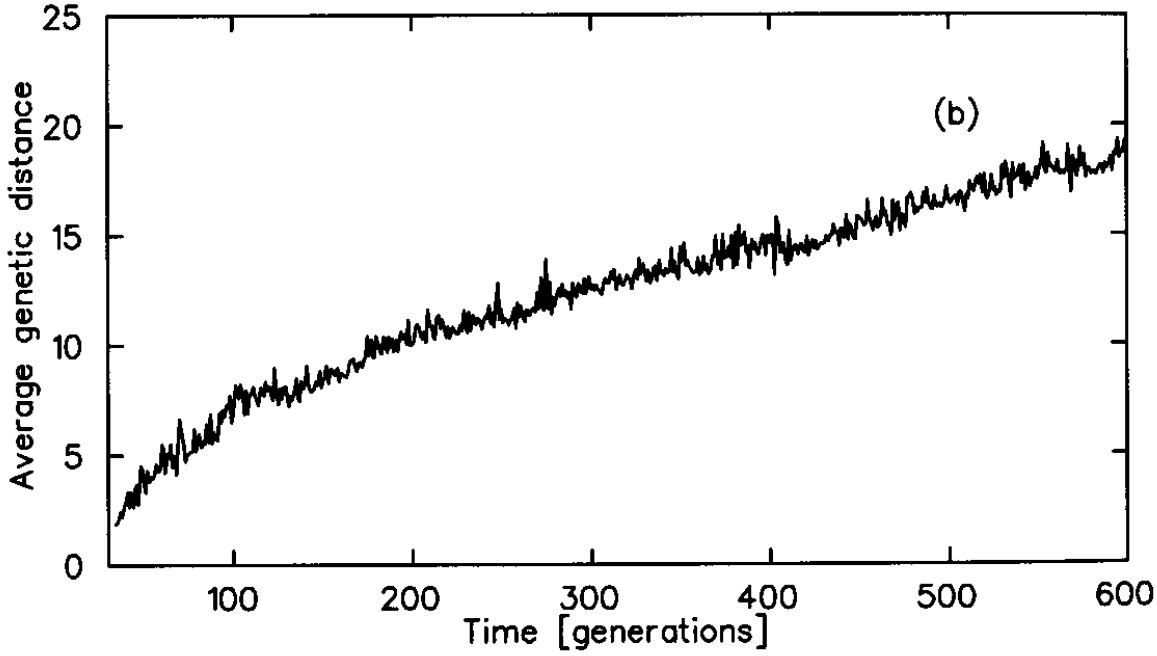
Anteil der Programme, die eine bestimmte Aufgabe erfüllen:



Experiment zur genetischen Auseinanderentwicklung bei Isolation (Strings wurden nach 30 Generationen durch künstliche Barriere räumlich getrennt)

(a) Replikationsfähigkeit nach Crossover (was in Avida sonst nicht verwendet wird) – als Maß der "Verwandtschaft" zweier Strings (Zugehörigkeit zur selben Art)
(b) genetische Distanz (Variante der Levenstein-Distanz) zwischen den getrennten Populationen





Amoeba

Andrew Pargellis, Bell Lab. 1996

System wurde speziell entworfen, um *Entstehung* des Lebens zu untersuchen

- Kernfrage: wie können selbstreplizierende Programme aus nicht-selbstreplizierenden entstehen?

Selbstreplikatoren bei Tierra und Avida zu "dünn" verteilt

- Amoeba: Befehlssatz aus nur 16 Befehlen
- Keine Registerarithmetik (außer *load*), kein Stack
- Alle Befehle können als Muster für Templates verwendet werden (8 der 16 komplementär zu restlichen 8)
- man benötigt nur 5 Befehle, um einen Selbstreplikator zu schreiben
- Dichte der Selbstreplikatoren im Raum der Programme der Länge 5: $12/16^5 \approx 10^{-5}$

$\Rightarrow$ zufällige Entstehung eines Selbstreplikators ist möglich

- aber: Befehlssatz ist nicht mehr Turing-universell

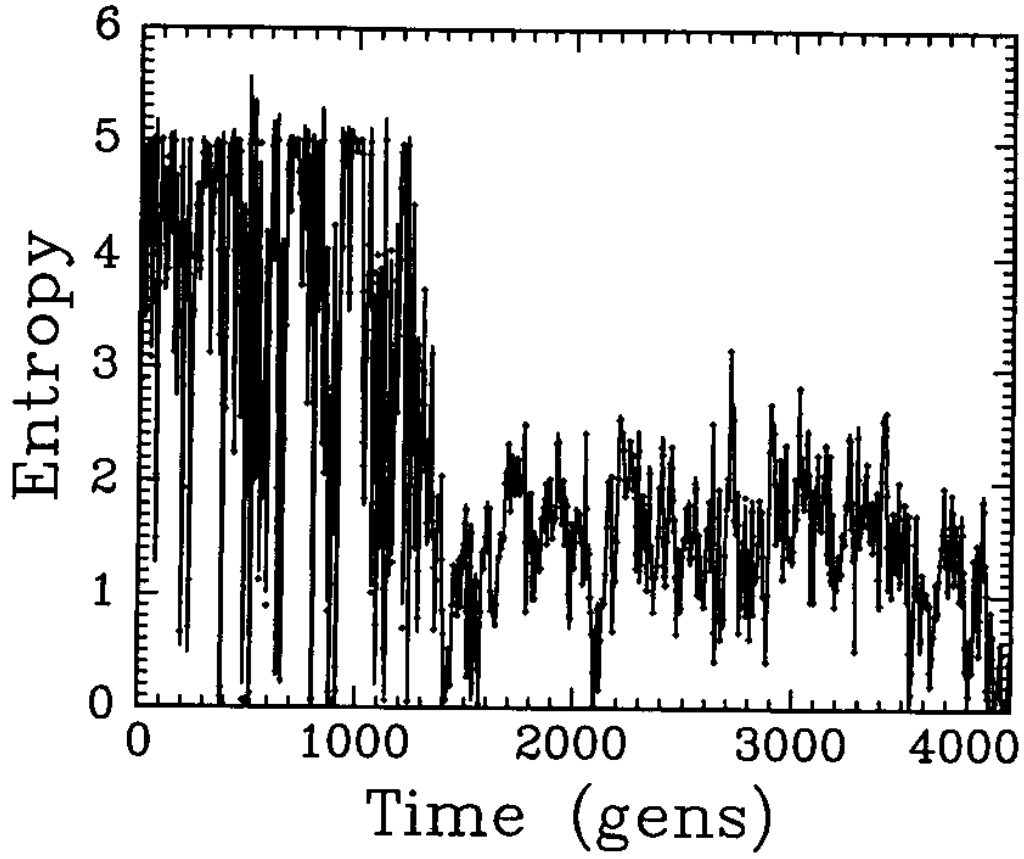
Typischer Verlauf von Amoeba-Experimenten (mit Belegung aller Zellen mit Zufallsprogrammen):

präbiotische Phase: Programme nicht selbstreplikativ, gelegentlich werden Teile anderer Programme kopiert (kurzzeitige Reduktion der Entropie)

protobiotische Phase: Programme mit Fähigkeit zu einmaliger Selbstreplikation treten auf (teils auf andere Programme angewiesen)

biotische Phase: Auftreten stabiler Selbstreplikatoren; diese verkürzen sich in der Folgezeit.

Entropieverlauf bei einem Amoeba-Lauf
(nach Pargellis, zit. aus Adami 1999):



erster robuster Selbstreplikator entsteht in Generation 1274.

Beobachtung: die meisten Selbstreplikatoren verwenden nur 6 oder 7 der 16 möglichen Befehle.