

University of Würzburg
Institute of Computer Science
Research Report Series

Evolution virtueller Pflanzen

Adrian Grigore, Alexander Heffner, Marc Ebner
und Jürgen Albert

Report No. 280

August 2001

Universität Würzburg
Lehrstuhl für Informatik II
Am Hubland, 97074 Würzburg, Germany
{grigore,heffner,ebner,albert}@informatik.uni-wuerzburg.de
<http://www2.informatik.uni-wuerzburg.de>

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden zwei unterschiedliche Bereiche, Virtual Reality und evolutionäre Algorithmen, miteinander kombiniert. Wir setzen evolutionäre Algorithmen ein, um virtuelle Pflanzen automatisch zu generieren. Die Pflanzen werden als Lindenmayer-System repräsentiert und mit OpenGL visualisiert. Zur Bewertung der Pflanzen wird die Fläche herangezogen, durch die Blätter abgedeckt werden. Experimentiert wurde sowohl mit der getrennten Bewertung einzelner Pflanzen, als auch mit der gleichzeitigen Bewertung aller Pflanzen einer Population. Im letzteren Fall befindet sich jedes Individuum in direkter Konkurrenz zu den anderen Individuen derselben Generation. Wir beobachteten, daß im Gegensatz zur getrennten Bewertung der Individuen die Pflanzen stärker in die Höhe wuchsen. Lange und dünne Pflanzen, die erst am Ende einige Blätter ausbreiteten, dominierten.



Abbildung 1: Drei besonders ansprechend aussehende, evolvierte Pflanzen.

1 Einleitung und Motivation

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei interessante Gebiete miteinander verknüpft: Virtual Reality, genauer virtuelle Pflanzen [19], und evolutionäre Algorithmen [5, 8, 17]. Die virtuellen Pflanzen werden mit Hilfe eines sogenannten Lindenmayer-Systems [19] (kurz L-System) beschrieben. Mit L-Systemen können ausgehend von einer relativ kleinen Regelmenge komplexe, Photo-realistische Pflanzen erzeugt werden. Ein genetischer Algorithmus wird eingesetzt, um die virtuellen Pflanzen automatisch zu erzeugen. Wie in der Natur wird mit einer Population von Individuen gearbeitet, die durch Selektion, Reproduktion und Variation verändert werden.

Ziel der Arbeit ist die Evolution virtueller Pflanzen, die möglichst viel Sonnenlicht mit ihren Blättern aufnehmen. Die Pflanzen werden durch ein kontextfreies L-System repräsentiert, mittels eines genetischen Algorithmus evolviert [6] und mit OpenGL dreidimensional dargestellt [7]. Die Evolution wird zunächst an einzelnen Pflanzen und später auch an Gruppen von Pflanzen untersucht. Viele der Pflanzen, die in den Experimenten entstanden sind, sehen allerdings sehr unrealistisch aus. Oft dominieren spiralförmige Strukturen. Es entstanden jedoch auch visuell ansprechende und natürlich aussehende Pflanzen. Drei unterschiedliche Pflanzen, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, sind in Abbildung 1 zu sehen.

2 Darstellung virtueller Pflanzen mit L-Systemen

Für die Darstellung der Pflanzen verwenden wir ein nicht-deterministisches, kontextfreies L-System. Jedes Individuum ist durch ein solches L-System repräsentiert. Durch n -fache (nicht-deterministische) Entwicklung entsteht aus einem Startwort eine Pflanze, die mit Hilfe von OpenGL dreidimensional dargestellt wird.

Ein ähnlicher Ansatz wurde von Jacob [10, 11, 12] verfolgt. Jacob setzte eine Variante des genetischen Programmierens [15, 16] ein, um kontextfreie und kontextsensitive L-Systeme zu evolvieren, die Pflanzen ähneln. Als Fitneßfunktion setzte Jacob die Zahl der Blüten, die Zahl der

Blätter und die Ausdehnung der Pflanze im Raum ein. Broughton et al. [1] evolvierte dreidimensionale Objekte, ähnlich den sogenannten Biomorphs von Dawkins [4]. Der Ansatz wurde von Coates et al. [2] durch die Evolution von Formen, die bestimmte Randbedingungen erfüllen, erweitert. Koevolution wurde eingesetzt, um Objekte zu evolvieren, die einen Raum umschließen. Mock [18] erzeugte Pflanzen für eine virtuelle Welt. Der Anwender konnte als virtueller Gärtner fungieren und selbst Pflanzen zur Reproduktion auswählen. Kokai et al. [13, 14] evolvierten Lindenmayer Systeme, die eine vorgegebene Struktur oder Pflanze beschreiben. Hornby und Pollack [9] untersuchten L-Systeme und direkte Kodierung bei der Evolution von Tischen. Die Kodierung der Individuen durch L-Systeme zeigte dabei einen deutlichen Vorteil gegenüber der direkten Kodierung.

Im Gegensatz zu den Arbeiten von Jacob [10, 11, 12], Mock [18] und Kokai et al. [13, 14], die ebenfalls virtuelle Pflanzen evolvierten, findet in unseren Experimenten eine Interaktion zwischen Pflanze und Umgebung statt. Die Pflanzen müssen möglichst viel virtuelles Sonnenlicht über die Blätter aufnehmen. Die Menge des aufgenommenen Sonnenlichts wird zur Bewertung der Pflanze eingesetzt. Pflanzen, die ihre Blätter nicht in geeigneter Weise auf das Sonnenlicht ausrichten, werden schlechter bewertet, als Pflanzen, die sehr viel virtuelles Sonnenlicht aufnehmen.

2.1 Kontextfreie L-Systeme

Ein kontextfreies L-System besteht aus einem Alphabet V , einem Startwort ω und einer Menge von Regeln P . D.h., ein L-System ist ein geordnetes Tripel $\langle V, \omega, P \rangle$ [19]. Das Startwort ist über dem Alphabet V definiert: $\omega \in V^+$. Die Regeln sind als Teilmenge von $V \times V^+$ definiert, d.h. $P \subset V \times V^+$. Eine Regel $(a, \chi) \in P$ besteht aus einem Vorgänger a und einem Nachfolger χ , wir schreiben $a \rightarrow \chi$. Für einen Vorgänger a können auch mehrere Nachfolger definiert sein. In diesem Fall wird das L-System nicht deterministisch. Wir betrachten alle Regeln, die für einen Vorgänger definiert sind als eine Regel, d.h. wir schreiben $a \rightarrow \chi_1 | \dots | \chi_n$. Der Vorgänger a hat also n mögliche Nachfolger. Falls nur ein Nachfolger existiert, ist die Regel deterministisch, im anderen Fall ist die Regel nicht-deterministisch. Falls kein Nachfolger für den Vorgänger a definiert ist, so wird dieser Nachfolger auf sich selbst abgebildet. In diesem Fall nehmen wir an, daß $a \rightarrow a$ zur Regelmengemenge P gehört.

Aus dem Startwort entsteht durch mehrfache Anwendung der Regeln ein neues Wort. In jedem Schritt werden alle Vorgänger in einem Wort durch ihren Nachfolger ersetzt. Sind mehrere Nachfolger möglich, so wird ein Nachfolger zufällig ausgewählt. Wir sagen, daß das Wort $\nu = \chi_1 \dots \chi_n$ in einem Schritt aus dem Wort $\mu = a_1 \dots a_n$ abgeleitet werden kann, wenn für alle $i \in \{1, \dots, n\}$ eine Regel $a_i \rightarrow \chi_i$ existiert. Ein Wort ν kann in n Schritten aus dem Startwort abgeleitet werden, wenn durch n -malige Anwendung der Regeln aus dem Startwort das Wort ν entsteht. Wichtig ist, daß in jedem Schritt immer alle Buchstaben des Wortes ersetzt werden. Damit unterscheiden sich L-Systeme von der üblichen Chomsky-Grammatik [3]. Die gleichzeitige Anwendung der Regeln soll die Zellteilung multizellulärer Organismen modellieren.

2.2 Alphabet der virtuellen Pflanzen

Für unsere Experimente wählen wir bewußt ein relativ einfaches Alphabet. Dies hat den Vorteil, daß die Zahl der Regeln klein bleibt und damit auch der Suchraum relativ klein ist. Jedes Zeichen des Alphabets entspricht einer Verschiebung oder Drehung eines virtuellen Zeichenwerkzeugs oder dem Zeichnen einer geometrischen Form. Das Alphabet der virtuellen Pflanzen besteht aus den folgenden Zeichen:

$$V = \{f, l, [,], +, -, <, >, /, \backslash, \epsilon\}$$

Aus dem Startwort entsteht durch mehrfache Anwendung der Regeln ein neues Wort. Die Entwicklung wird nach einer festen Zahl von Iterationen abgebrochen. Anschließend werden die Zeichen des Wortes als Kommandos interpretiert, die ein virtuelles Zeichenwerkzeug steuern. Die Liste der Kommandos ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Zeichen des Wortes werden von links nach rechts abgearbeitet.

Symbol	Beschreibung	
f	Zeichne ein Stamm-Segment (Zylinder) und gehe vorwärts.	
l	Zeichne ein Blatt.	
[Lege den aktuellen Zustand (Transformations-Matrix) auf dem Stack ab.	
]	Hole den obersten Zustand (Transformations-Matrix) vom Stack.	
>	Drehung um 22.5°m die X-Achse.	
<	Drehung um -22.5°m die X-Achse.	
\	Drehung um 22.5°m die Y-Achse.	
/	Drehung um -22.5°m die Y-Achse.	
+	Drehung um 22.5°m die Z-Achse.	
-	Drehung um -22.5°m die Z-Achse.	

Tabelle 1: Interpretation der einzelnen Symbole des Alphabets.

Alle Blätter einer Pflanze sehen gleich aus, da zum Zeichnen der Blätter nur der Befehl `l` zur Verfügung steht. Mit Hilfe der eckigen Klammern `[` und `]` lassen sich Verzweigungen realisieren. Der Befehl `[` legt die aktuelle Transformations-Matrix auf dem Stack ab. Die folgenden Symbole werden wie gewohnt interpretiert. Beim Erreichen des Zeichens `]` wird die oberste Transformations-Matrix vom Stack genommen. Anschließend wird von der Stelle weiter gezeichnet, die zuvor gespeichert wurde. Auf diese Weise lassen sich leicht mehrere Äste eines Baumes zeichnen.

2.3 Repräsentation der Individuen

Jedes Individuum besteht aus genau einer Regel für die Zeichen `f`, `l`, `+`, `-`, `<`, `>`, `/` und `\` des Alphabets. Die Reihenfolge der Regeln ist fest vorgegeben und wird nicht verändert. Jede Regel kann beliebig viele Nachfolgewörter besitzen. Existieren mehrere mögliche Nachfolger, so wird bei jeder Anwendung einer der Nachfolger zufällig ausgewählt. Existiert kein Nachfolger, so wird das Vorgängerzeichen auf das leere Wort ϵ abgeleitet. Das Startwort ist nicht Teil des Individuums. Alle Individuen werden auf das gleiche Startwort angewandt. Um die Darstellung eines Individuums während des gesamten Programm durchlaufs konsistent zu halten, besitzt jedes Individuum zusätzlich noch eine eigene Initialisierung für den Zufallszahlengenerator, mit dem die Nachfolger ausgewählt werden. Dadurch wird erreicht, daß die Darstellung einer Pflanze in verschiedenen Generationen gleich bleibt. Die Ableitung eines Wortes wird also wieder deterministisch. Die Struktur eines Individuums ist in Abbildung 2 dargestellt. Ein typisches L-System, wie es in dem Programm verwendet wird, ist in Abbildung 3 dargestellt.

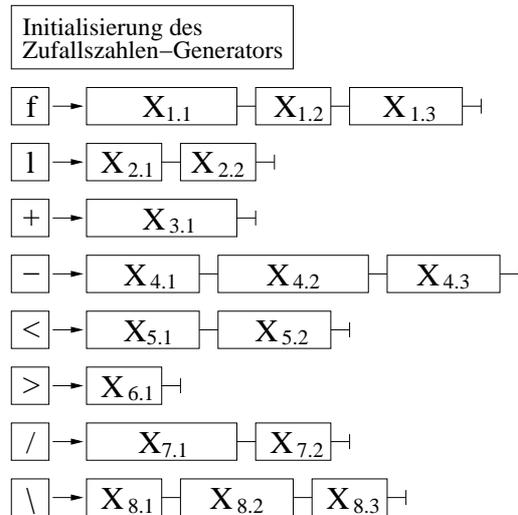


Abbildung 2: Datenstruktur eines Individuums. Ein Individuum besteht aus einer Initialisierung für den Zufallszahlengenerator und 8 Regeln für die Zeichen f, l, +, -, <, >, / und \ des Alphabets. Jeder Vorgänger kann beliebig viele Nachfolger besitzen. Die Länge der Nachfolger ist ebenfalls beliebig.

Startwort: fff
Produktionsregeln:

```

f → f\{f[-lf] | f[-lf]}
l → l
+ → +
- → -
> → \
< → <
\ → /
/ → /

```

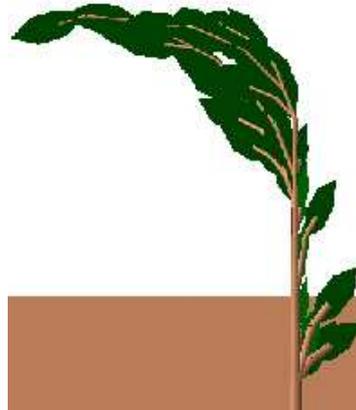


Abbildung 3: Beispiel-Grammatik für eine einfache Pflanze mit zugehöriger dreidimensionaler Darstellung.

2.4 Wachstumshemmende Faktoren

Es wäre offensichtlich weder realistisch, noch technisch umsetzbar, die Pflanzen beliebig lange wachsen zu lassen. Bereits nach wenigen Iterationen kann aus dem Startwort ein so langes Wort werden, daß das Wort nicht mehr in den Speicher paßt. Außerdem braucht man für sehr lange Worte auch sehr viel Zeit, um die Pflanze graphisch darzustellen. Je länger das Wort, desto mehr Zeit wird zum Zeichnen benötigt. Zur Bewertung der Pflanzen messen wir, wieviel der virtuellen Landschaft durch Blätter abgedeckt ist. D.h., wir stellen fest, wie gut die Pflanze das virtuelle Sonnenlicht aufnehmen kann. Für unsere Individuen wäre es von Vorteil, möglichst viel zu wachsen, d.h. in jedem Schritt alle Zeichen durch viele Nachfolger zu ersetzen. Dadurch besteht die Möglichkeit, einen großen Bereich in der virtuellen Welt abzudecken.

Reale Pflanzen sind in ihrem Wachstum unter anderem durch begrenzte Ressourcen (Wasser, Nährstoffe, Sonnenlicht), Umwelteinflüsse (z.B. Gravitation, Lebensraum, Zeit zum Wachsen) und biologische Einflüsse (z.B. Nährstofftransport in der Pflanze) beschränkt. Außerdem ist realer



Abbildung 4: Extrem lange, spiralförmige Pflanze.

Erdboden nicht transparent, so daß es keinen Sinn macht, unter der Erde Blätter wachsen zu lassen. Um dies zumindest teilweise zu modellieren, beschränken wir das Wachstum auf folgende Art:

- Jede Pflanze hat die gleiche, fest vorgegebene Anzahl an Wachstumspunkten. Hierdurch werden die begrenzten Ressourcen simuliert. Jedes Blatt kostet einen, jeder Ast kostet zwei Punkte. Drehungen oder Klammern haben keine Kosten, tragen jedoch auch nicht in unbegrenztem Maße zum Wachstum des Individuums bei. Wir brechen das Wachstum der Pflanze ab, sobald die maximale Punktzahl überschritten ist.
- Die Produktionsregeln werden bei der Entwicklung jedes Individuums nur sechsmal auf das Startwort angewendet. Damit soll die Zeit, die jeder Pflanze zum Wachsen zur Verfügung steht, begrenzt werden.
- Meist läßt sich schon nach kurzer Zeit feststellen, daß sehr lange, spiralförmige Pflanzen gegenüber stark verzweigten Individuen im Vorteil sind (Abbildung 4). Bei der Koevolution mehrerer Pflanzen liegt dies z.B. daran, daß sie am höchsten wachsen und damit besser andere Individuen überschatten können. Oft bestehen diese Pflanzen nur aus einem einzigen Ast. Um realistischere Bedingungen zu schaffen, macht es aus zwei Gründen Sinn, dieses Verhalten zu bestrafen:
 - Reale Pflanzen sind oft auf Nährstoffe und Wasser aus dem Boden für das Wachstum angewiesen.
 - In der Realität würde die Schwerkraft solch längliche Individuen dazu zwingen, den Stamm im unteren Bereich immer dicker wachsen zu lassen, um nicht unter dem eigenen Gewicht einzuknicken.

Aus diesem Grund lassen wir Äste und Blätter mit zunehmendem Abstand zur Wurzel immer teurer werden. Die Kosten erhöhen sich mit jedem Aststück um den Faktor 1,05. Die Pflanzen müssen daher einen sinnvollen Kompromiß aus Länge und Verzweigung eingehen.

- Es macht aus Gründen der Gleichbehandlung aller Individuen Sinn, jedes Individuum mit der gleichen Skalierung darzustellen. Da die Zeichenfläche für alle Individuen gleich groß ist, kann es vorkommen, daß ein Individuum aus dem Zeichenbereich herauswächst. Dies entspricht einem begrenzten Lebensraum, auf den sich die Individuen einstellen müssen.
- Jedes Individuum wird auf einer Scheibe dargestellt, die den Erdboden simuliert. Kollisionen mit dieser Scheibe werden während des Wachstums nicht registriert, eine Pflanze kann daher in den Boden hineinwachsen. Allerdings ist sie dadurch im Nachteil, da Blätter unterhalb der Scheibe für die Kamera nicht sichtbar sind und somit nicht zur Fitneß beitragen können. Dieses Hindernis soll einerseits die Pflanzen natürlicher wachsen lassen und andererseits ein zusätzliches Optimierungsziel bei der Evolution darstellen.

3 Der genetische Algorithmus

Mit Hilfe eines genetischen Algorithmus werden die Pflanzen evolviert. Durch mehrfache Mutation eines einzelnen, fest vorgegebenen Individuums wird die erste Generation erzeugt. Durch Auswahl der besten Individuen und die Anwendung von genetischen Operatoren, wie Reproduktion, Mutation und Kreuzung wird eine neue Generation von Individuen erzeugt. Dieser Prozeß, bestehend aus Selektion, Reproduktion und Variation wird solange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Als Abbruchkriterium kann z.B. eine maximale Zahl an Generationen vorgegeben werden. Das Flußdiagramm des genetischen Algorithmus ist in Abbildung 5 dargestellt.

Die erste Generation wird durch Mutation eines einzelnen Individuums erzeugt. Um die n Individuen der ersten Generation zu erzeugen, wenden wir den Mutationsoperator einfach n -Mal auf das Individuum an. Um weitere Generationen zu erzeugen, werden zunächst die n_{elite} besten Individuen unverändert in die neue Generation kopiert. Zur Selektion der restlichen $n_r = n - n_{\text{elite}}$ Individuen wird die Fitneß-proportionale Selektion eingesetzt. Auf diese Individuen werden die Operatoren Reproduktion, Mutation und Kreuzung mit den Anteilen p_{rep} , p_{mut} und p_{cross} angewandt. D.h. $p_{\text{rep}} \cdot n_r$ Individuen werden unverändert in die neue Generation kopiert, auf $p_{\text{mut}} \cdot n_r$ Individuen wird der Mutations-Operator angewandt, und $p_{\text{cross}} \cdot n_r$ Individuen werden durch Kreuzung erzeugt.

3.1 Genetische Operatoren

Die Reproduktion ist der einfachste Operator. Ein Individuum der aktuellen Generation wird selektiert und unverändert die nächste Generation kopiert. Da die Veränderung eines Individuums durch einen Operator meistens eine Verschlechterung der Fitneß bewirkt, ist die Reproduktion wichtig für die Erhaltung der besten Individuen einer Generation.

Bei der Mutation wird ein Individuum der aktuellen Generation selektiert und mit einigen Veränderungen in die nächste Generation übertragen. Jede der n Produktionsregeln eines Individuums wird mit der Wahrscheinlichkeit $1/n$ mutiert, bzw. mit der Wahrscheinlichkeit $n - 1/n$ unverändert übernommen. Eine Ausnahme bilden Produktionsregeln mit dem Nachfolgerzeichen ϵ . Diese werden mit der Wahrscheinlichkeit $1/2$ mutiert, da ϵ als Nachfolger meist zu einseitigen und eher minderwertigen Pflanzen führt. Werden z.B. sowohl + als auch - nach ϵ abgeleitet, ist die Pflanze kaum noch in der Lage, sich in der Wachstumsphase um die X-Achse zu drehen. Dieser Effekt ist mit einer Erbkrankheit bei realen Lebewesen vergleichbar. Es kann in einem frühen Stadium der Evolution vorkommen, daß ein solches Individuum seine schwachen, aber doch gleichmäßiger gebauten Konkurrenten so stark dominiert, daß das betreffende Zeichen aus der gesamten Population verschwindet. Dies kann auch durch eine Kreuzung zweier Individuen nicht mehr rückgängig gemacht werden. Die Evolution wird gebremst, bis die betreffende Regel durch Mutation wieder eine Funktion bekommt.

Wenn eine Produktionsregel mutiert wird, so werden die m Zeichen des Nachfolgerwortes der Reihe nach durchlaufen und mit der Wahrscheinlichkeit $1/m$ entsprechend einer der drei folgenden Varianten verändert:

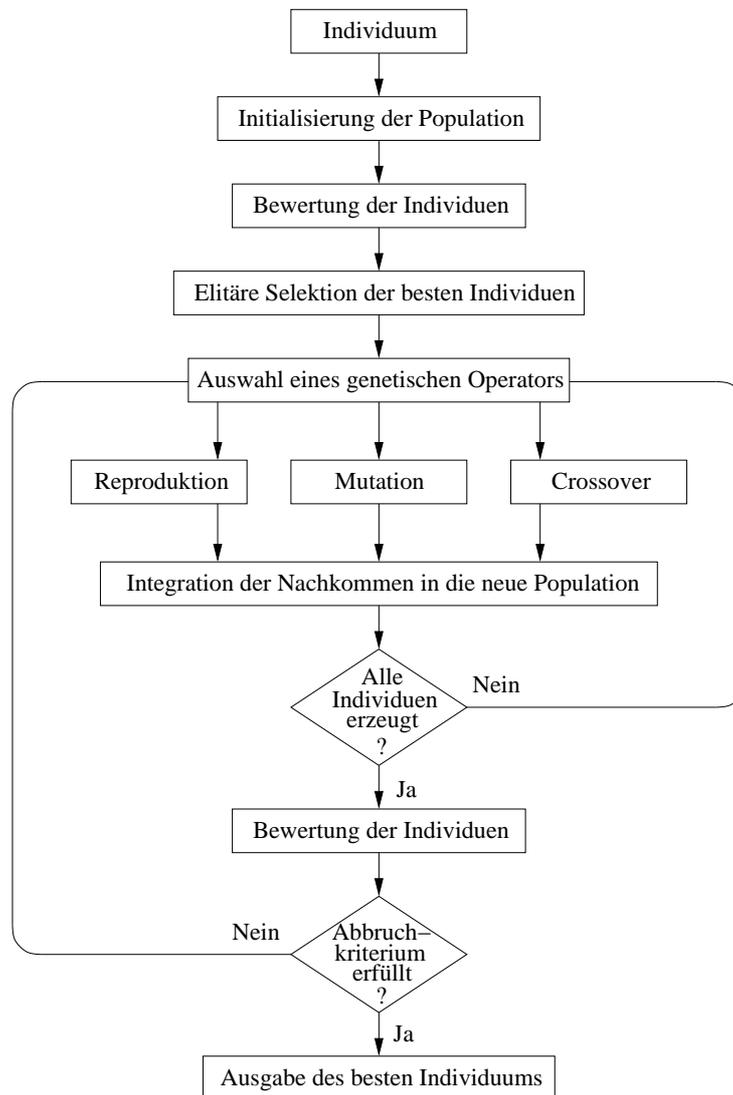


Abbildung 5: Flußdiagramm des genetischen Algorithmus.

- Falls das Zeichen weder [noch] ist, wird es gelöscht. Die Zeichen [und] werden nicht verändert, um eine richtige Klammerung zu gewährleisten.
- Das Zeichen wird durch ein beliebiges anderes Zeichen $a \in V \setminus \{[,], \epsilon\}$ ersetzt. Wieder werden die Zeichen [und] nicht verändert, um eine richtige Klammerung zu gewährleisten.
- Ein beliebiges Zeichen $a \in V \setminus \{[,], \epsilon\}$ wird vor das für die Mutation ausgewählte Zeichen eingefügt. Falls das Zeichen [eingefügt wird, wird zusätzlich noch das Zeichen] eingefügt, um die Klammerung konsistent zu halten.

Kreuzung ist der einzige Operator, der zwei Nachkommen für die neue Generation erzeugt. Wie bei der Fortpflanzung natürlicher Organismen wird bei der Kreuzung ein Teil der Produktionsregeln der Elternindividuen ausgetauscht. Durch die Kreuzung zweier relativ leistungsfähiger Individuen erhofft man sich im Idealfall die Erzeugung eines noch besseren Individuums, das die Vorteile beider Eltern miteinander verbindet. Die Kreuzung findet auf 3 Ebenen statt. Als erstes wird eine beliebige Regel zufällig ausgewählt. Alle folgenden Regeln werden zwischen den bei-

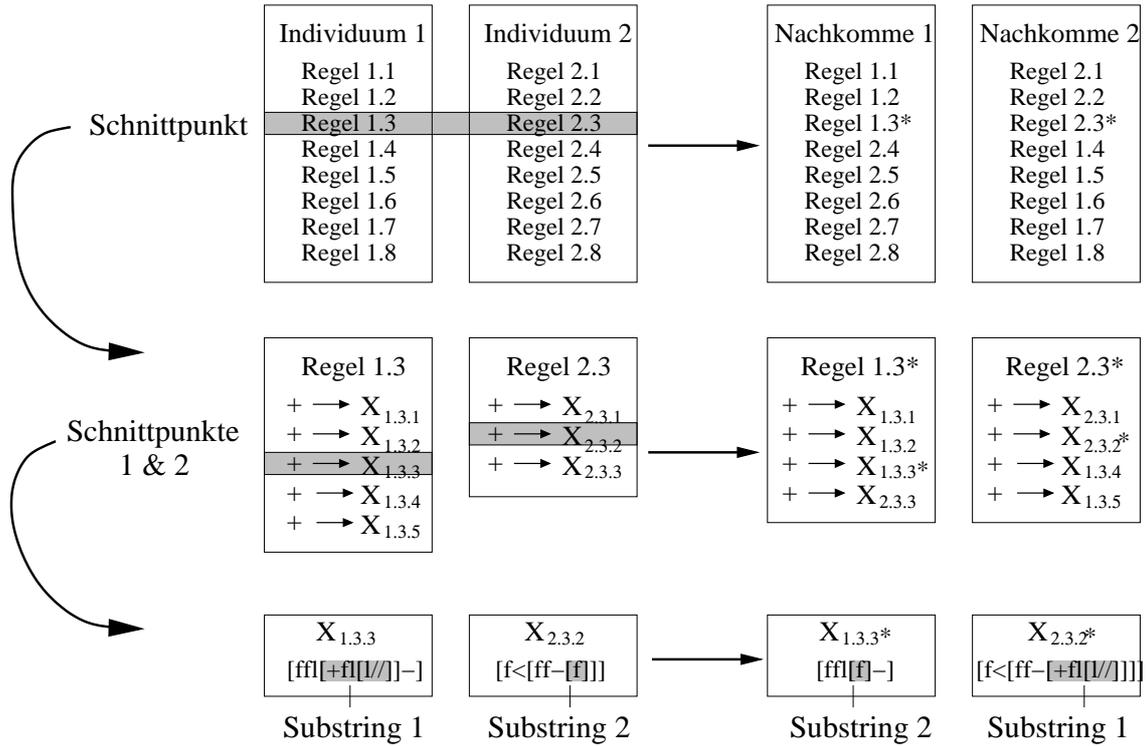


Abbildung 6: Kreuzung zweier Individuen.

den Individuen ausgetauscht, ähnlich wie beim gewöhnlichen 1-Punkt-Crossover. Zusätzlich wird jedoch noch ein Teilbaum-Crossover am Schnittpunkt ausgeführt. D.h., es wird aus jedem der beiden Eltern-Individuen ein korrekt geklammerter Ausdruck aus den Nachfolgern am Crossover-Punkt ausgewählt und anschließend ausgetauscht. Abbildung 6 zeigt, wie der Kreuzungsoperator arbeitet.

3.2 Fitneßbewertung

Zur Bewertung der Pflanzen wird die Menge des Lichts herangezogen, die über die Blätter aufgenommen wird. Um das aufgenommene Licht zu messen, wird die Pflanze dreidimensional dargestellt, wobei die Kamera so plziert wird, daß die Blickrichtung parallel zu den virtuellen Sonnenstrahlen ist. Anschließend werden alle Pixel gezählt, die zu den Blättern der Pflanze gehören. Es ist also für eine Pflanze sinnvoll, möglichst viel Fläche des Bildes mit den Blättern abzudecken. Die Blätter werden in der Farbe grün dargestellt, daher müssen wir lediglich die Zahl der grünen Pixel bestimmen. Die Fitneß f eines Individuums ergibt sich dann aus dem Prozentsatz zwischen grünen Pixeln und der Zahl aller Pixel im Bild:

$$f = \frac{\text{Anzahl der grünen Pixel}}{\text{Zahl der Pixel}}$$

Zur Darstellung der Pflanzen verwenden wir die orthographische Projektion. Da die Entfernung zwischen Sonne und Erde sehr groß ist, können die Sonnenstrahlen als annähernd parallel betrachtet werden. Anfangs haben wir mit perspektivischer Projektion und kleiner Entfernung zwischen Kamera und Pflanze gearbeitet. Dies führte dazu, daß einige Pflanzen sehr hoch wuchsen und schließlich nur ein paar Blätter direkt vor der Kamera ausgebreitet haben.

Startwort: fff
 Produktionsregeln:

```

f → f[-lf] | [f]
l → l
+ → +
- → -
> → >
< → <
\ → \
/ → /

```

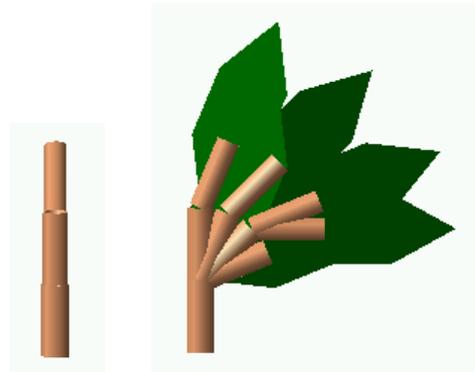


Abbildung 7: Pflanze, die zur Erzeugung der ersten Generation eingesetzt wurde. Das Bild links zeigt die Pflanze von der Seite, das Bild rechts zeigt die Pflanze von vorne. Die Blätter sind parallel zum Sonnenlicht ausgerichtet. Daher ist die Fitneß dieser Pflanze Null.

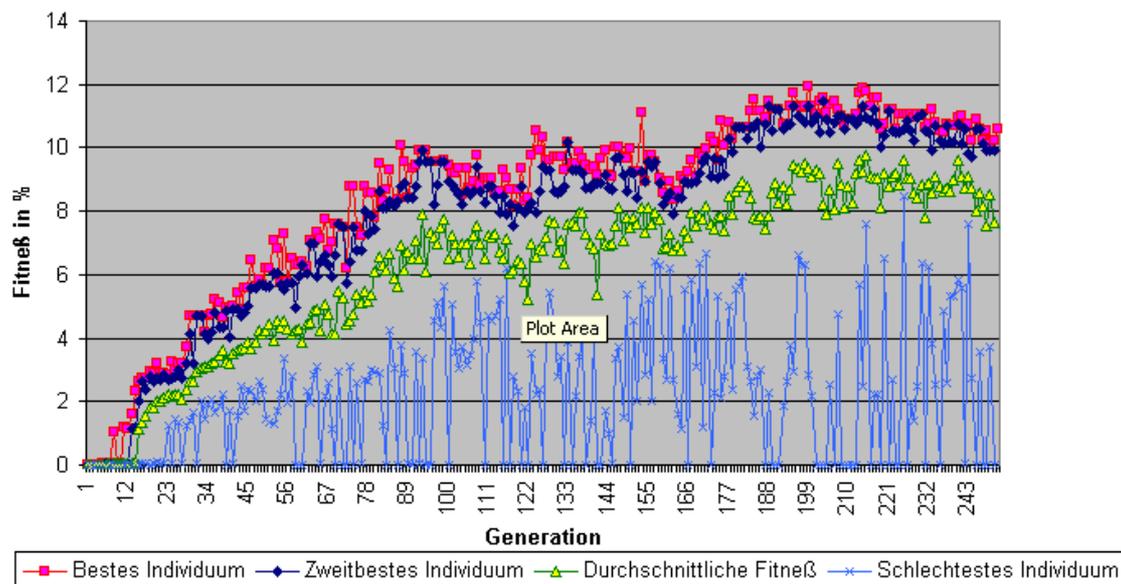


Abbildung 8: Der Verlauf der Fitneß während des ersten Experiments.

4 Experimente

Mit dem oben beschriebenen genetischen Algorithmus wurden eine Reihe von Experimenten durchgeführt, wobei jeweils unterschiedliche Parametereinstellungen gewählt wurden.

4.1 Experiment 1

Im ersten Experiment wurde mit einer Population von 20 Individuen gearbeitet. Die elitäre Selektion wurde nicht eingesetzt, d.h. $p_{elite} = 0$. 10% der Individuen wurden durch Reproduktion erzeugt, 30% durch Mutation und 60% durch Kreuzung. Jede Pflanze erhielt 2000 Wachstumspunkte. Die Produktionsregeln wurden sechsmal auf das Startwort angewandt. Als Startindividuum wurde eine sehr einfache Pflanze gewählt Die Pflanze und das zugehörige L-System ist in Abbildung 7 dargestellt. Diese, fast willkürlich eingetippte Ursprungspflanze, hat zwar einige Blätter, jedoch sind diese genau senkrecht angeordnet, so daß sie zwar von der Seite, jedoch nicht von oben (also

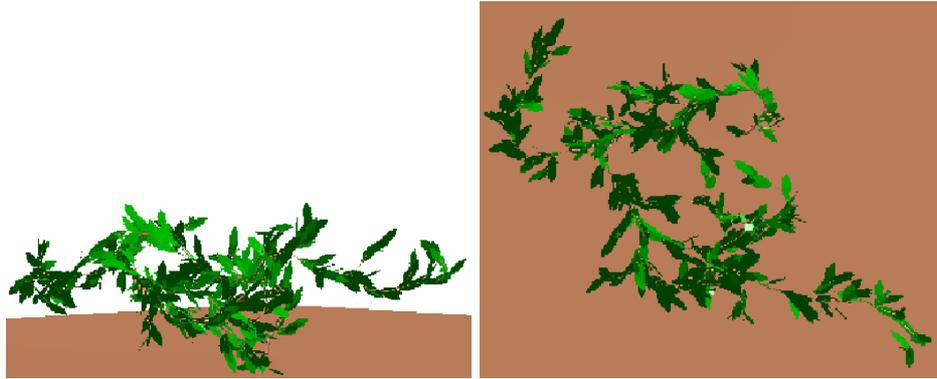


Abbildung 9: Bestes Individuum der letzten Generation. Links ist die Seitenansicht dargestellt, rechts die Pflanze von oben betrachtet dargestellt.

von der Sonnen-Perspektive bei der Bewertung) sichtbar sind. Dadurch ergibt sich am Anfang ein Fitneßwert von 0 Punkten, falls nicht schon die Mutation vor der Bildung der ersten Generation ein besseres Individuum erzeugt.

Durch Mutation und Kreuzung entsteht schon nach wenigen Generationen das erste Individuum mit einem Fitneßwert größer als Null. Die Evolution verläuft insgesamt sehr befriedigend, auch wenn die Fitneß nach 200 Generationen leicht zurückgeht. Der Verlauf der Fitneß des besten und des zweitbesten Individuums während des Experiments sind in Abbildung 8 dargestellt. Die durchschnittliche Fitneß und die Fitneß des schlechtesten Individuums sind ebenfalls dargestellt.

In der letzten Generation sind in der 3D-Ansicht sehr viele artverwandte Pflanzen zu erkennen. Dieser Eindruck bestätigt sich durch einen Blick auf die Produktionsregeln: Alle Individuen besitzen überproportional viele Ableitungen für das Zeichen "-". Viele dieser Ableitungen sind mehrmals vorhanden. Das Fehlen der Duplikate würde den Phänotyp der jeweiligen Individuen wahrscheinlich nur leicht verändern. Die Duplikate stellen eine Art Sicherheitskopie wichtiger Merkmale dar. Die Gefahr, daß wertvolle Merkmale bei einer Mutation oder Kreuzung verloren gehen, sinkt. Dadurch haben solche Individuen einen Vorteil gegenüber ihren Konkurrenten, da ihre Nachkommen oft eine genauso gute Fitneß besitzen, wie sie selbst.

Das beste Individuum deckt 10,51% des zur Verfügung stehenden Raumes mit Blättern ab und liegt damit nur 2% über dem Durchschnittswert der letzten Generation. Die Seitenansicht und die Ansicht von oben ist in Abbildung 9 zu sehen. Die Pflanze ist sehr flach und dafür breit gebaut. Von oben betrachtet, deckt sie viel Fläche ab. Dennoch streckt sie, wie auch die meisten anderen Individuen dieser Generation, kaum Blätter unter die Scheibe, die den Erdboden darstellt. Somit hat der genetische Algorithmus die Individuen erstaunlich gut an dieses natürliche Hindernis angepaßt. Das beste Individuum besitzt die folgenden Produktionsregeln:

```

f → f//[>1f>1] | f//[>1f>1]
l → \l
+ → l
- → [<]lf-< | \f[]//+< | [<]lf-< | \f[]//+< |
    \f[]\+++/ | >f[]\/+< | \f[]\/+< | \l[]\+++ |
    \f[]/+< | \f[]\+++ | \f[]/+< | \f[]\+++ |
    [[]]lf/-< | >[]\/< | \f[]/+>+< | [] |
    []\f[]/f+< | []lf/-< | \f[]\/+< | \f[]\/+>+< |
    \f[]\/+ | \f[]\/+< | \[]\/+1+> | \f[]\/<
> → <+> | <-\
< → l
\ → \
/ → +f
  
```

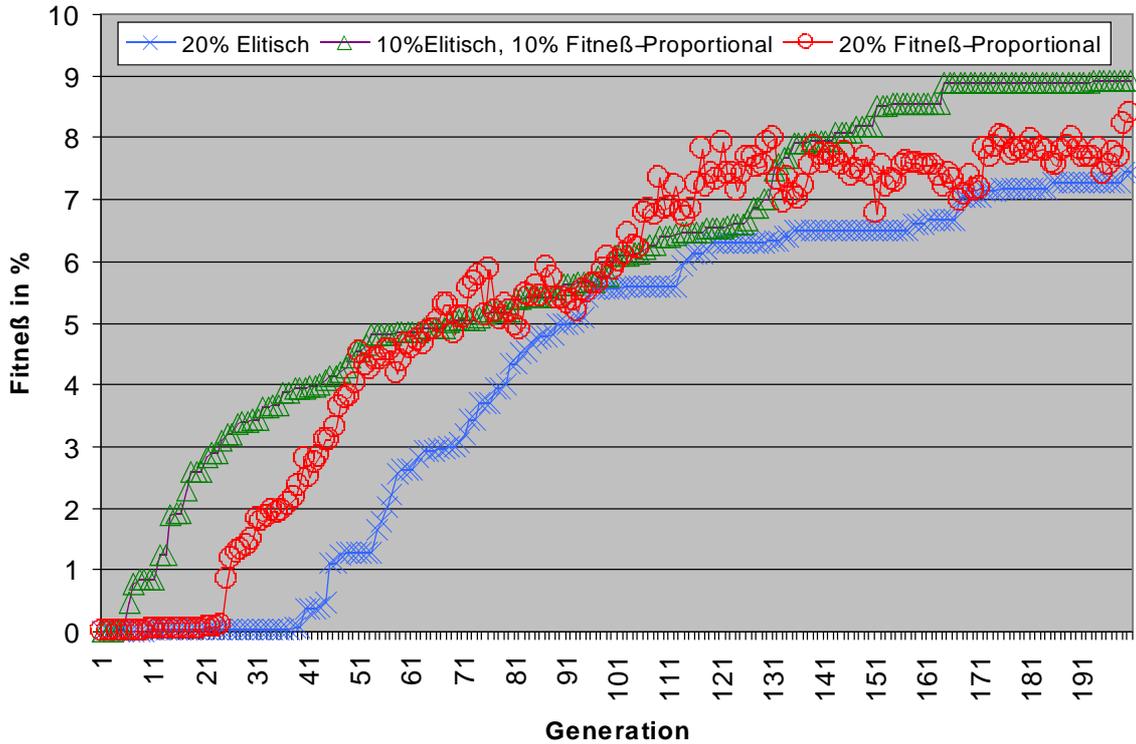


Abbildung 10: Vergleich verschiedener Reproduktionsmethoden.

Die Fitnesswerte der besten Pflanzen bei mehreren Evolutionsdurchgängen mit gleichen Parametern aber variierender Initialisierung des Zufallszahlengenerators weichen sehr stark voneinander ab. Oft treten ruckartig Evolutions sprünge auf, die den Verlauf der restlichen Entwicklung sehr stark beeinflussen. Es wurden drei Läufe mit unterschiedlicher Initialisierung des Zufallszahlengenerators durchgeführt. Abbildung 8 zeigt die durchschnittliche Fitness gemittelt über drei Experimente. Eine noch größere Anzahl an Durchläufen wäre wünschenswert, allerdings wird zur Berechnung eines Laufs mit 250 Generationen und einer Population von 20 Individuen auf einem Pentium III 450 mit 256MB RAM und Geforce 2 Mx Grafikkarte ca. 40 Minuten Rechenzeit benötigt.

4.2 Experiment 2

Eines der auffälligsten Merkmale von Abbildung 8 ist das nicht-monotone Ansteigen der Fitness des jeweils besten Individuums. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da in Experiment 1 keine elitäre, sondern nur Fitness-proportionale Selektion bei der Reproduktion verwendet wurde. Wie ebenfalls zu erkennen ist, liegen die Fitnesswerte des ersten und zweiten Individuums in jeder Generation sehr nahe beisammen. Dies gilt meistens sogar für die besten 5-10 Individuen jeder Generation. Aus diesem Grund ist die Auswahl des zu reproduzierenden Individuums oft abhängig vom Zufall. Es könnte sein, daß der Einsatz der elitären Selektion zu besseren Ergebnissen führt.

In Experiment 2 untersuchen wir daher den Einfluß, den das Selektionsverfahren auf das Ergebnis der Evolution hat. Für dieses Experiment werden 25% der Individuen durch Mutation und 55% der Individuen durch Kreuzung erzeugt. Die restlichen 20% werden mit Hilfe des Reproduktions-Operators gefüllt, wobei wir das Selektionsverfahren für die Reproduktion variieren. Wir führen drei Durchläufe durch, bei denen 20% der Individuen einer Population durch elitäre Selektion

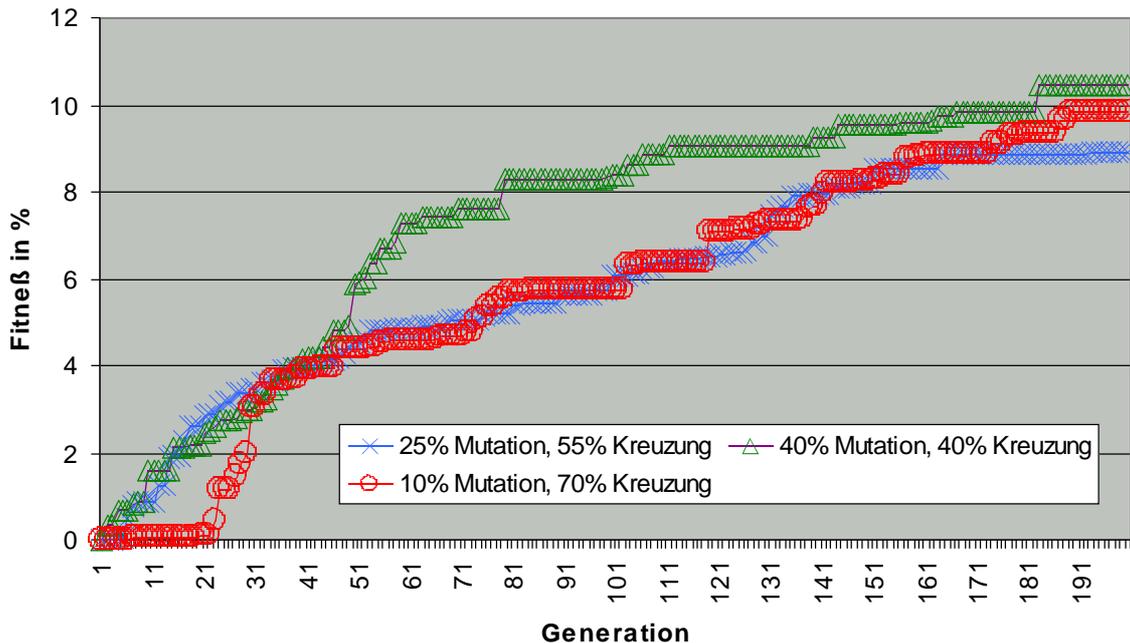


Abbildung 11: Vergleich unterschiedlicher Verhältnisse von Kreuzung und Mutation.

ausgewählt werden, drei weitere Läufe, bei denen 10% der Individuen durch elitäre Selektion und 10% der Individuen durch Fitneß-proportionale Selektion ausgewählt werden und schließlich drei Läufe, bei denen 20% durch Fitneß-proportionale Selektion ausgewählt werden. Die Läufe wurden jeweils nach 200 Generationen abgebrochen. Die Ergebnisse dieses Experiments sind in Abbildung 10 dargestellt.

Der Graph zeigt vergleichbare Ergebnisse bei allen drei Selektionsverfahren, die für die Reproduktion verwendet werden. Die elitäre Selektion schneidet am schlechtesten ab. Interessant ist, daß es bei der elitären Selektion etwa doppelt so lange dauert wie bei der reinen Fitneß-proportionalen Selektion, eine deutliche Steigerung der Fitneß am Anfang des Laufs zu produzieren. Die Kombination beider Selektionsverfahren scheint sinnvoll zu sein.

4.3 Experiment 3

Da das bisher benutzte Verhältnis von 25% Mutation zu 55% Kreuzung willkürlich gewählt war, liegt es nahe, auch die Auswirkung verschiedener Zusammensetzungen dieser Operatoren zu untersuchen. Die Ergebnisse dieses Experiments sind in Abbildung 11 dargestellt. Das vergleichsweise frühe Ansteigen der Fitneß bei 25% sowie bei 40% Mutation ist leicht erklärbar. Die Individuen der ersten Generation ähneln sich sehr stark. Daher bringt eine Kreuzung keine allzu starke Veränderung des Erbguts und ist auch nicht so aussichtsvoll wie die Mutation. Die über 200 Generationen betrachtete Leistung ist jedoch fast gleich, mit leichten Vorteilen für die gleichmäßige Gewichtung von Kreuzung und Mutation. Um eine Aussage über eine bessere Wahl des Anteils der Individuen, die durch Mutation und Kreuzung produziert werden, treffen zu können, müßte das Experiment länger als 200 Generationen durchgeführt werden.

4.4 Experiment 4

Auch die Größe jeder Population will gut überlegt sein. Wählt man die Zahl der Individuen zu groß, so wird viel Rechenzeit benötigt, ohne nennenswert bessere Fitneßwerte zu erhalten. Ist die Population zu klein, reicht dagegen die genetische Vielfalt nicht aus, um höhere Fitneßwerte zu

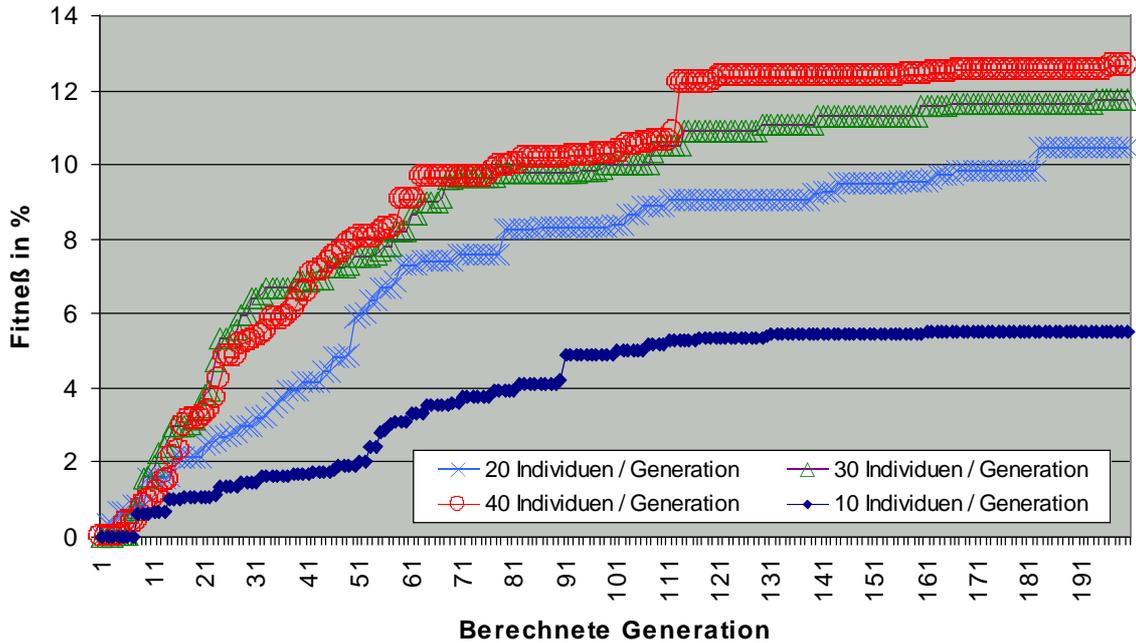


Abbildung 12: Vergleich verschiedener Generationsgrößen.

erhalten.

Abbildung 12 zeigt das Ergebnis eines Experiments, bei dem mit einer Populationsgröße variiert wurde. Untersucht wurden Populationsgrößen von jeweils 10, 20, 30 und 40 Individuen. Besonders auffällig ist der späte, aber doch sehr starke Anstieg der Kurve bei einer Population von 40 Individuen. Die Kurve stellt zwar den Mittelwert von drei Durchgängen dar, jedoch trat beim letzten Durchlauf an dieser Stelle ein ungewöhnlich großer Leistungssprung von fast 4% ein, der auch zu dem besten Individuum aller bisher durchgeführten Testläufe geführt hat. Dieses Individuum deckt 14.23% der sichtbaren Fläche ab. Ein sicherlich stark zufallsabhängiges Ereignis, das jedoch auch durch die größere Artenvielfalt begünstigt wurde.

Wie zu erwarten war, steigt die maximale Fitneß, die nach 200 Generationen erreicht wurde, mit der Größe der Population. Die Versuche mit 30 bzw. 40 Individuen zeigen eindeutig bessere Ergebnisse, zumindest wenn man ausschließlich die maximale Fitneß am Ende des Laufs betrachtet. Wir betrachten nun die Fitneß im Verhältnis zu den bewerteten Individuen. Dies ist in Abbildung 13 dargestellt. Unter diesem Gesichtspunkt zeigt sich, daß die Auswahl der richtigen Populationsgröße wesentlich schwerer ist. Insgesamt erscheint eine Generationsgröße von 20-30 Individuen am sinnvollsten zu sein.

4.5 Experiment 5

Die bisherige Evolution der virtuellen Pflanzen fand unter stets gleichbleibenden Bedingungen statt. Wenn ein und dieselbe Pflanze mehrfach bewertet wurde (weil sie durch den Reproduktions-Operator dupliziert wurde), so erhielt sie stets die gleiche Fitneß. Die Fitneß einer Pflanze wurde nicht von den anderen Pflanzen derselben Generation beeinflusst. Eine reale Pflanze muß sich jedoch evtl. an widrige Bedingungen anpassen um zu überleben. Wenn z.B. hohe Bäume sehr dicht beieinander wachsen, so treten sie in einen direkten Wettbewerb um das zur Verfügung stehende Sonnenlicht. Eine Simulation dieses Szenarios ist sehr interessant, da sich die Pflanzen hier anders entwickeln sollten als in getrennten Lebensräumen.

Daher bewerten wir in Experiment 5 die Individuen einer Population indem wir alle Individuen gleichzeitig darstellen (Abbildung 14). Dabei kann es vorkommen, daß ein Blatt einer Pflanze von

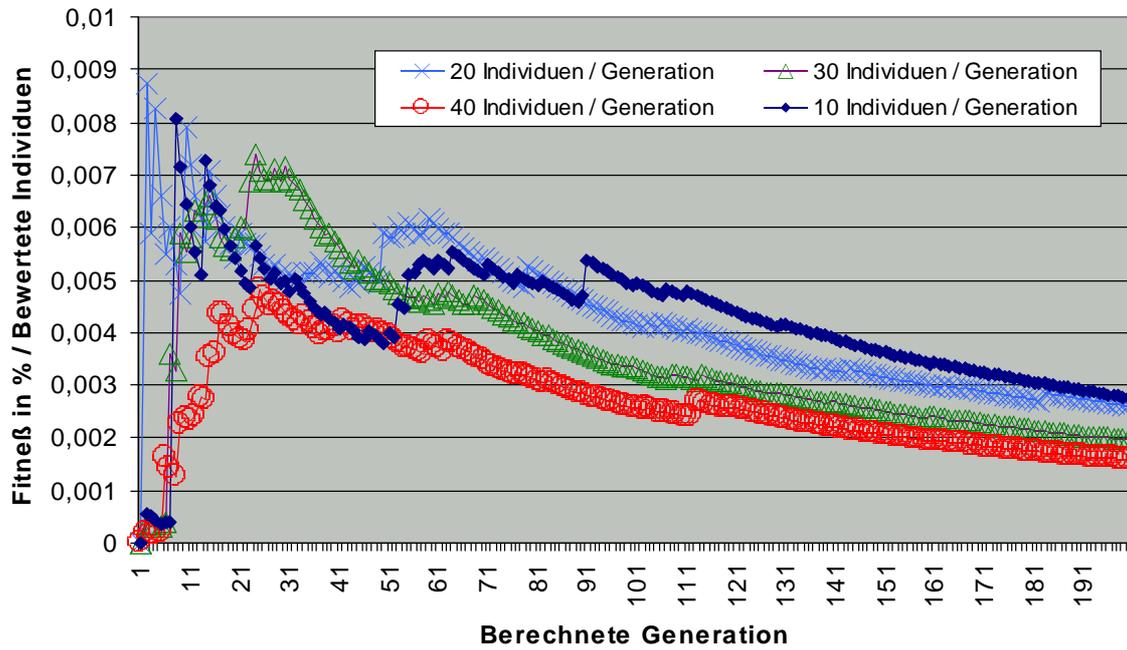


Abbildung 13: Fitneß im Verhältnis zur Anzahl der berechneten Individuen.



Abbildung 14: In Experiment 5 werden alle Individuen einer Population gleichzeitig dargestellt und bewertet. Die Plazierung der Individuen erfolgt zufällig.

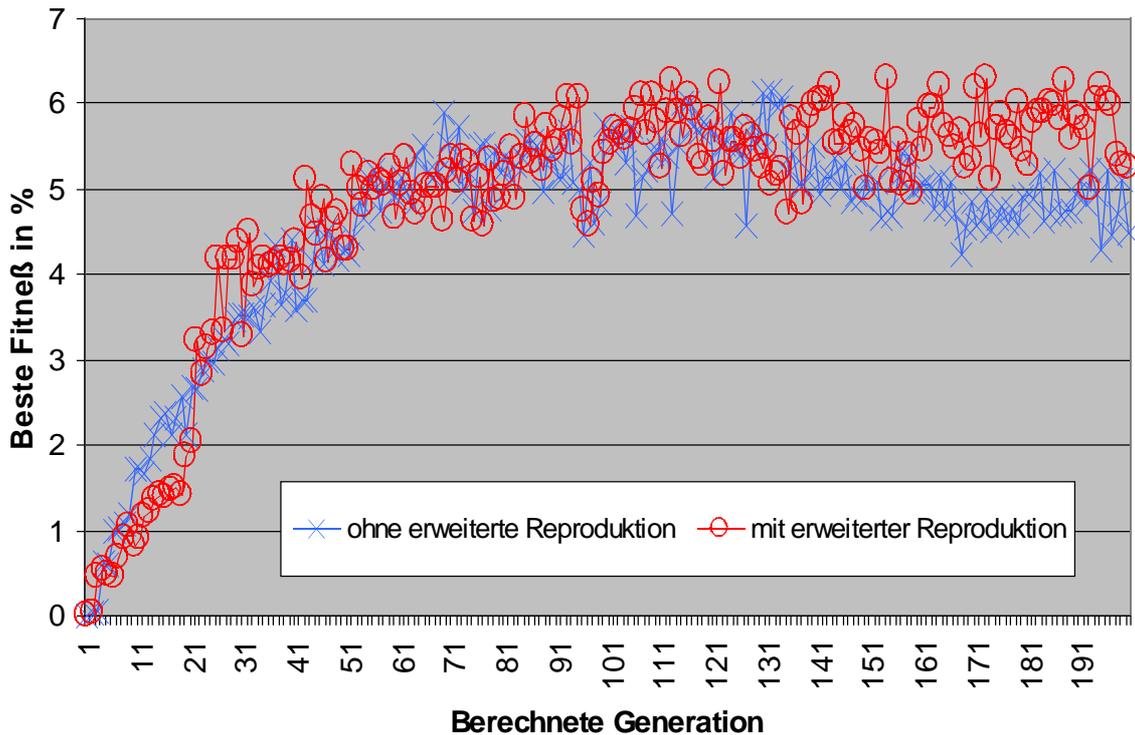


Abbildung 15: Fitneß des besten Individuums bei Koevolution. Gezeigt sind zwei Kurven, eine mit einfacher Reproduktion und eine mit erweiterter Reproduktion.

den Blättern einer anderen Pflanze überlagert wird. In diesem Fall trägt dieses Blatt nicht zur Fitneß des Individuums bei. Bei getrennter Bewertung werden es sinnvoll, sehr steil in die Höhe und möglichst nur im oberen Bereich in die Breite zu wachsen, um andere Pflanzen zu überlagern.

Für unser Experiment wählen wir eine Populationsgröße von 20 Individuen. 20% der Individuen werden durch Reproduktion erzeugt, 40% durch Mutation und 40% durch Kreuzung. Da mehrere Pflanzen gleichzeitig dargestellt werden, verwenden wir eine geringfügig größere Fläche für die Darstellung. Innerhalb dieser Fläche werden die Pflanzen einer Generation zufällig plazierte. Die Pflanze hat also in jeder Generation andere Nachbarn und muß sich gegen diese behaupten.

Abbildung 15 zeigt den Verlauf der Fitneß während des Experiments. Es wurden zwei Läufe mit unterschiedlicher Initialisierung des Zufallszahlengenerators und leicht verändertem Algorithmus durchgeführt. Für den zweiten Lauf wurden die 2 besten Individuen in jeder Generation mit einer Markierung versehen. In der nächsten Generation werden alle Individuen mit dieser Markierung auf jeden Fall in die nächste Generation übernommen. Daher erhalten die 2 besten Individuen jeder Generation zweimal die Chance, sich gegen die anderen Individuen zu behaupten. Durch diese Veränderung bleibt die Fitneß nach der 100. Generation relativ konstant, während die Fitneß beim Lauf ohne diese Markierung leicht absinkt.

Das Ergebnis der beiden Läufe ist in Abbildung 16 dargestellt. Wie man sieht, sind sich die beiden Populationen qualitativ sehr ähnlich. Die Individuen sind extrem hoch und teilweise sehr geschickt darin, erst im obersten Bereich in die Breite zu wachsen. Es scheint ganz so, als ob die zusätzlichen Anforderungen an die Pflanzen eine zielgerichtete Evolution begünstigen.

Eine ebenfalls denkbare, aber in diesem Projekt nicht eingesetzte Variante der Koevolution wäre der Gebrauch der Tournament-Selektion statt der Fitneß-proportionalen Selektion. Anstatt

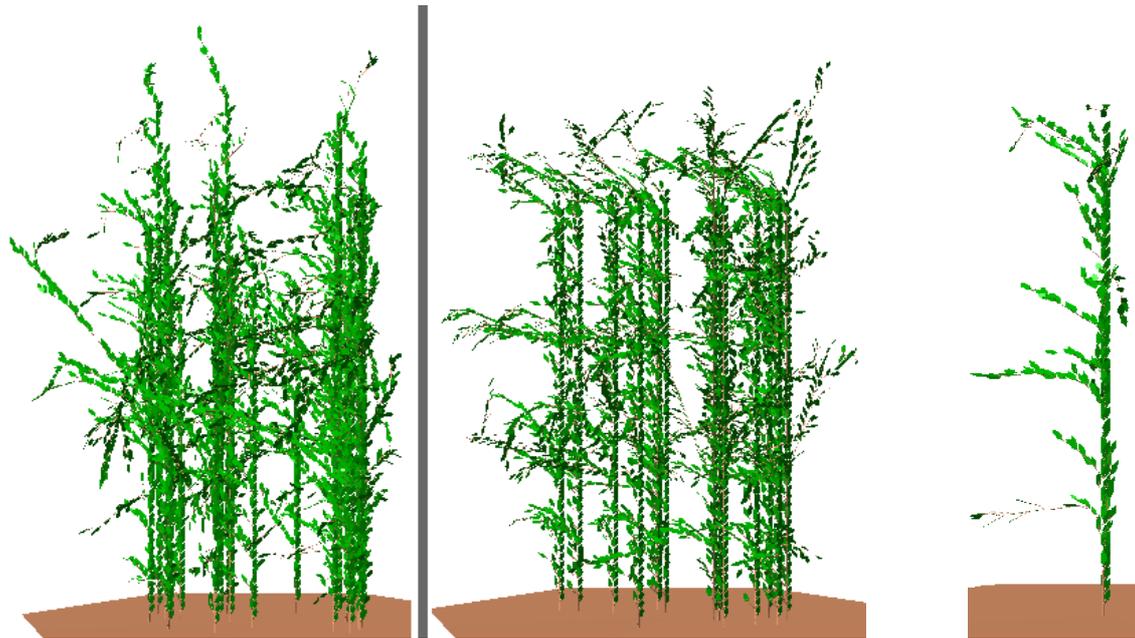


Abbildung 16: Die Grafik links zeigt zwei Populationen, die bei unterschiedlichen Durchläufen des genetischen Algorithmus entstanden sind. Rechts ist das beste Individuum einzeln dargestellt.

alle Pflanzen auf einmal darzustellen, könnte man auch zufällig ausgewählte Untermengen darstellen (z.B. mit jeweils 6 Individuen). Das beste Individuum jeder Untermenge könnte dann für die Reproduktion, Mutation oder Kreuzung verwendet werden. Der Nachteil dieser Methode ist jedoch ein erheblicher Mehraufwand bei der Bewertung der Individuen, da jedes Individuum mehrfach gezeichnet werden müßte.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden virtuelle Pflanzen evolviert. Zur Bewertung der Pflanzen wurde das von den Blättern eingefangene Sonnenlicht herangezogen. Ein einzelnes Individuum wurde als Ausgangspunkt verwendet. Alle weiteren Individuen entstanden durch die Anwendung genetischer Operatoren. Die Nachkommen dieses Ursprungsindividuum waren deutlich besser an ihre Umgebung angepaßt. Besonders interessante Ergebnisse entstanden beim Einsatz der Koevolution, wenn alle Individuen einer Generation gleichzeitig bewertet wurden. Die Evolution brachte in diesem Fall Pflanzen hervor, die besonders stark in Richtung der Lichtquelle wuchsen. Es entstand also eine Art Wettlauf um das Sonnenlicht, wobei die Pflanzen im Laufe der Generationen immer höher wuchsen.

In weiteren Experimenten könnten die Pflanzen aus verschiedenen Blickrichtungen dargestellt werden. Dadurch könnt z.B. der Lauf der Sonne simuliert werden. Wesentlich komplizierter, aber doch denkbar ist z.B. die Einführung von Gravitation, um die Bildung allzu unrealistischer Pflanzen einzudämmen. Hierzu wäre jedoch auch eine Kollisionsabfrage notwendig, so daß die Pflanzen nicht durch den Erdboden fallen können. Ebenfalls interessant wäre eine erweiterte Form der Koevolution mit einem viel größeren Lebensraum, auf dem sich gute Individuen stärker vermehren und ihre Nachkommen in der Nähe ablegen. Im Zeitraffer betrachtet, könnte man bei einer solchen Evolution aus der Vogel-Perspektive möglicherweise die Ausbreitung von erfolgreichen Pflanzenarten beobachten.

Außerdem könnte man prüfen, ob mit einer Anfangs-Population, gebildet aus den besten Individuen mehrerer getrennter Durchläufe noch höhere Fitneßwerte erreicht werden können.

Literatur

- [1] T. Broughton, A. Tan, and P. S. Coates. The use of genetic programming in exploring 3d design worlds. In R. Junge, editor, *CAAD futures 1997. Proceedings of the 7th International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures, Munich, Germany, 4-6 August*, pages 885–915, Dordrecht, 1997. Kluwer Academic Publishers.
- [2] P. Coates, T. Broughton, and H. Jackson. Exploring three-dimensional design worlds using lindenmeyer systems and genetic programming. In P. J. Bentley, editor, *Evolutionary Design by Computers*, pages 323–341. Morgan Kaufmann, 1999.
- [3] M. D. Davis and E. J. Weyuker. *Computability, Complexity, and Languages*. Academic Press Limited, San Diego, California, 1983.
- [4] R. Dawkins. *The Blind Watchmaker*. W. W. Norton & Company, New York, 1996.
- [5] D. E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1989.
- [6] A. Grigore. *Evolution virtueller Pflanzen: Genetischer Algorithmus*. Projektpraktikum, Universität Würzburg, Institut für Informatik, Lehrstuhl für Informatik II, February 2000.
- [7] A. Heffner. *Evolution virtueller Pflanzen: Visualisierung und Bewertung virtueller Pflanzen*. Projektpraktikum, Universität Würzburg, Institut für Informatik, Lehrstuhl für Informatik II, February 2000.
- [8] J. H. Holland. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992.
- [9] G. S. Hornby and J. B. Pollack. The advantages of generative grammatical encodings for physical design. In *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation, COEX, Seoul, Korea*, pages 600–607. IEEE Press, 2001.
- [10] C. Jacob. Genetic l-system programming. In Y. Davudor, H.-P. Schwefel, and R. Männer, editors, *Parallel Problem Solving from Nature – PPSN III. The Third International Conference on Evolutionary Computation. Jerusalem, Israel, October 9-14*, pages 334–343, Berlin, 1994. Springer-Verlag.
- [11] C. Jacob. Evolution programs evolved. In H.-M. Voigt, W. Ebeling, I. Rechenberg, and H.-P. Schwefel, editors, *Parallel Problem Solving from Nature – PPSN IV. The Fourth International Conference on Evolutionary Computation. Berlin, Germany, September 22-26*, pages 42–51, Berlin, 1996. Springer-Verlag.
- [12] C. Jacob. Evolving evolution programs: Genetic programming and l-systems. In J. R. Koza, D. E. Goldberg, D. B. Fogel, and R. L. Riolo, editors, *Proceedings of the First Annual Conference on Genetic Programming*, pages 107–115, Cambridge, Massachusetts, 1996. The MIT Press.
- [13] G. Kókai, Z. Tóth, and R. Ványi. Application of genetic algorithms with more populations for lindenmayer systems. In E. Alpaydin and C. Fyfe, editors, *International ICSC Symposium on Engineering of Intelligent Systems EIS '98, February 11-13, 1998, University of La Laguna, Tenerife, Spain*, pages 324–331, Canada/Switzerland, 1998. ICSC Academic Press.
- [14] G. Kókai, Z. Tóth, and R. Ványi. Evolving artificial trees described by parametric l-systems. In *Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Shaw Conference Center, Edmonton, Alberta, Canada, May 9-12*, pages 1722–1727. IEEE Press, 1999.

- [15] J. R. Koza. *Genetic Programming. On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992.
- [16] J. R. Koza. *Genetic Programming II. Automatic Discovery of Reusable Programs*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1994.
- [17] M. Mitchell. *An Introduction to Genetic Algorithms*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1996.
- [18] K. J. Mock. Wildwood: The evolution of l-system plants for virtual environments. In *International Conference on Evolutionary Computation, Anchorage, Alaska*, pages 476–480, 1998.
- [19] P. Prusinkiewicz and A. Lindenmayer. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer Verlag, New York, 1990.