

Teil II

Experimente

Kapitel 5

Topologische Optimierung

5.1 Vorbemerkung

Die im folgenden beschriebenen Experimente basieren auf den Ergebnissen der theoretischen Überlegungen in den vorigen Kapiteln. Zusätzlich hierzu müssen jedoch einige Bedingungen erfüllt werden, damit die Ergebnisse auch entsprechenden Ansprüchen genügen.

Die erste Bedingung liegt in der festen Beschreibung der Experimentalumgebung. Diese Experimentalumgebung wird im Anhang ab Seite 111 dargestellt. Wichtig an dieser Stelle ist die Festlegung der modifizierbaren Parameter. Diese Parameter sind in der folgenden Tabelle dargestellt, zusätzlich zu den Parametern werden auch noch die möglichen Einstellungen angegeben:

Parameter	Wertebereich	Bedeutung des Parameters
MaxGeneration	0 - 1000	Anzahl der Generationen
MaxKnoten	0 - 100	Anzahl der Knoten
MaxWesen	0 - 100	Anzahl der Individuen
<i>p_{mut}</i>	0 - 1	Mutationswahrscheinlichkeit
GenerationGap	ja / nein	Generation Gap
Baumförderung	0 - 500	Baumförderung
Constraints	0, 1	0 → keine Graphen 1 → keine Bäume

Diese Parameter werden im Rahmen der Experimente modifiziert und die Veränderung werden protokolliert.

Die zweite Bedingung betrifft die Modifikation der Parameter. Diese Modifikation darf nur in wohldefinierten Schritten mit maximal einem Parameter gleichzeitig vorgenommen werden. Nur auf diese Weise kann gewährleistet werden, daß die Modifikation und die beobachtete Verhaltensänderung im System zusammengehörig sind.

Die dritte Bedingung bei der Durchführung der Experimente bezieht sich auf eine mehrmalige Durchführung der Einzelversuche. Um eine gewisse Sicherheit zu erreichen, daß die aufgetretenen Ergebnisse nicht einmalige Zufälle sind und deshalb nicht reproduzierbar, wurden die Versuche mehrmals, mindestens jedoch fünfmal durchgeführt. Diese Wiederholungen wurden ausgedehnt, wenn

- entweder das Ergebnis sehr uneinheitlich war, oder
- es nicht mit den Erwartungen übereinstimmte.

Einzelne Experimente¹ wurden bei der Durchführung bis zu 20-mal wiederholt. Aus diesem Grunde stellen die im folgenden dargestellten Kurvenverläufe keine exakten Einzelergebnisse dar, sondern es sind qualitative Kurven, bei denen besondere Verhaltensmuster verdeutlicht werden. Einige besonders deutliche Ergebnisse sind ab Seite 105 dargestellt.

Die letzte Bedingung für eine ordnungsgemäße Durchführung der Versuche ist die Vollständigkeit dieser Versuche. Es sollen alle Ergebnisse, die während der Versuche angefallen sind, auch dargestellt werden. Dieser Punkt soll verhindern, daß im weiteren Schlüsse gezogen werden, die nur auf Vermutungen oder Annahmen beruhen, außerdem sollen diese Schlüsse nachvollziehbar sein.

Kurvendarstellungen

Im weiteren werden die Verläufe in Form von Kurven dargestellt. Ein Diagramm besteht hierbei aus drei verschiedenen Kurven, die zusammen das Gesamtbild der Ergebnisse des Experimentes ergeben. Diese drei Kurven sind

1. die Kurve der optimalen Werte: diese Kurve gibt Auskunft über den Entwicklungsverlauf der optimalen Werte, also der Fitnesswerte des besten Individuums der jeweiligen Generation
2. die Kurve des berechneten Durchschnitts: die Kurve des Fitnesswertes, der sich als arithmetisches Mittel über alle Individuen der Generation ergibt
3. die Kurve des schlechtesten Individuums: die Kurve des jeweils schlechtesten Individuums der laufenden Generation.

Alle weiteren Auswertungen beziehen sich auf diese Kurven, es sei denn, sie beziehen sich direkt auf die erzeugten Graphen.

5.2 Festlegung der verschiedenen Größen

Die erste Untersuchungsserie beschäftigte sich mit dem Versuch, sowohl eine repräsentative Knotenzahl als auch eine entsprechende Population zu finden.

¹z.B. bei den Constraints oder der alternativen Fitnessfunktion

Diese Informationen sind für die weiteren Untersuchungen insoweit wichtig, als daß eine zu kleine Knotenzahl Ergebnisse hervorbringt, die nicht das Verhalten größerer Individuen beschreibt, eine zu große Knotenzahl wird unnötige Rechenzeit verbrauchen. Zum anderen ist es bei den Versuchen notwendig, das Zeitverhalten bei unterschiedlichen Knotenzahlen zu schätzen, um eine Aussage über das Zeitverhalten auch größerer Strukturen treffen zu können.

Die zweite Fragestellung bezieht sich auf die Größe der Population. Hierbei gilt: eine zu kleine Population wird sich nach einer gewissen Anzahl von Generationen an ein Individuum anpassen. Anpassung heißt in diesem Zusammenhang die Reduktion der gesamten Population auf das Erbmateriale eines Individuums. Damit ändert sich nach einer gewissen Zeit nichts mehr an dem Erbgut und nur noch die Mutation bringt noch Änderungen in das System. Dieser Effekt wird in der Biologie unter dem Begriff *Inzucht*[Kno83] geführt.

Eine zu große Population ist hinderlich bei der Kristallisation des Gesamtbildes. Denn sowohl bei dem ersten wie bei dem zweiten Parameter interessiert ein kleiner Wert, der dennoch den notwendigen Kriterien entspricht.

Bei den folgenden Versuchen wird deshalb wie folgt vorgegangen: Alle Parameter in dem System werden konstant gehalten; bis auf jene, die untersucht werden. Die beiden Variablen werden ansonsten getrennt untersucht. Die erste Untersuchung betrifft die Populationsgröße, die zweite die repräsentative Knotenzahl.

5.2.1 Untersuchung der Populationsgröße

Zur Bestimmung der optimalen Populationsgröße wurde die Knotenanzahl so hoch angesetzt, daß sie nicht zu klein sein konnte. Hier wurde eine Knotenanzahl von 100 Knoten gewählt. Bei den weiteren Parametern wurde der Fall der größtmöglichen Einschränkung² gewählt.

Es wurde also eine Mutationswahrscheinlichkeit $p_{mut} = 0$, die größte Einschränkung bei den Constraints, kein Generation Gapping und keine Baumpföderung gewählt. Hiernach wurde die Anzahl der Individuen zwischen 0 und 100 variiert. Die Schrittweite wurde dabei auf 5 Individuen eingestellt. Ab einer bestimmten Größe wurde die Schrittgröße zuerst auf 2, dann auf 1 reduziert. Der Anfangswert bei der Untersuchung liegt bei einer Population von 100. Die Anzahl der laufenden Generationen beschränkte sich dabei auf 1000.

Bei der Durchführung der Versuche stellte sich nach kürzester Zeit heraus, daß sich die gesamte Population einem Individuum angleicht. Im Durchschnitt herrscht eine Mortalitätsquote von 70 bis 80 Prozent vor. Dieses negative Ergebnis konnte nach Analyse nur zwei Ursachen haben:

1. Die Population ist zu gering und das Erbmateriale ist deshalb nicht gut genug.

²der *worst case*

2. Die Constraints sind zu streng, d.h. es werden zu viele Individuen erzeugt, die den Anforderungen nicht genügen,

Zur näheren Erforschung des Effektes wurde dann das Programm so modifiziert, daß auch eine größere Anzahl von Individuen bearbeitet werden konnten.

Eine Ausdehnung auf 1000 Individuen brachte bei der Durchführung keine Veränderung im Verhalten. Es läßt sich also feststellen, daß die Geschwindigkeit des Aussterbens linear abhängig von der Anzahl der Individuen ist. Es ist also anzunehmen, daß der beobachtete Effekt nicht auf die Größe der Population zurückzuführen ist.

Deshalb wurde die Versuchsreihe mit einer veränderten Constraint- Einstellung wiederholt. Bei dieser Veränderung wurden alle Constraints aus dem System entfernt. In der Wiederholung stellte sich nun heraus, daß schon geringe Populationen eine recht hohe Lebenserwartung haben. So kann schon eine Population von 10 Individuen ohne Mutation im Durchschnitt etwa 600 Generationen, eine Population von 15 Individuen sogar 1200 Generationen überleben.

Selbstverständlich sind diese Zahlen abhängig von dem Kreuzungsalgorithmus, bei einer Änderung muß diese Untersuchung wiederholt werden. Bei dieser ersten Untersuchung wurde mit dem ersten Kreuzungsverfahren, der Kreuzung mit Austausch des ersten und dritten Quadranten gearbeitet. In diesem, speziellen Fall scheint es so, daß ein Erweitern der Population um 5 Individuen nahezu eine Verdoppelung der Überlebensdauer zu Folge hat. Um diese Aussage zu verifizieren, wurden Versuche mit den Populationsgrößen 5, 10, 15, 20 und 25 gemacht, die gegen diese Vermutung nicht verstießen.

Laufzeitverhalten bei Zunahme der Population

Zur Messung des Laufzeitverhaltens wurden alle interaktiven und graphischen Elemente aus dem System genommen. Die Laufzeitmessung erfolgte mit Hilfe eines Programms des Betriebssystems. Dieses wurde notwendig, da das eingesetzte Betriebssystem als Mehrplatzsystem keine sinnvolle Handmessung zuläßt. Man stellt fest, daß sich die Laufzeit bei Hinzunahme eines Individuums um etwa 15 CPU-Sekunden vergrößert. Die exakten Zeiten können der folgenden Tabelle entnommen werden:

Anzahl der Individuen	CPU - Sekunden
4	1:14
6	1:32
8	2:05
10	2:29
20	5:24
30	7:18
40	9:12

Der ungleich geringere Wert für die erste Messung ergibt sich aus dem Über-

gewicht des Grundprogrammes, bei dem die Größe der Population keine Rolle spielt.

Bei der Hinzunahme der Graphischen Oberfläche und der Interaktiven Komponenten vergrößern sich die Zeiten kaum. Allerdings entsprechen die 5,5 CPU-Minuten der Messung dann etwa 45 Minuten Laufzeit, so daß die Größe von 20 Individuen durchaus die obere Grenze des Sinnvollen darstellt.

5.2.2 Festlegung der Anzahl der Knoten

Für die Durchführung dieser Versuche galten im weiteren die obigen Einstellungen. Lediglich die Anzahl der Individuen wurde konstant mit 20 angenommen, und die Anzahl der Knoten variierte im weiteren. Beginnend bei 5 Knoten wurde die Größe des Graphen bis auf 100 Knoten vergrößert. Diese Vergrößerung ist in Abständen zu je 5 Knoten vorgenommen worden. Bei diesem Vorgang sind die folgenden Ergebnisse aufgetreten:

Das Verhalten des Graphen ändert sich kaum mit der Zahl der verwendeten Knoten. Es ist lediglich zu bemerken, daß der Verlauf der Ergebniskurve bei steigender Knotenanzahl an der Generationenachse gedehnt wird.

Diese Dehnung ist nach einer ersten Einschätzung linear von der Anzahl der Knoten abhängig. Die Verifikation dieser Vermutung erwies sich als sehr schwer durchführbar. Denn es fehlte insbesondere ein Maß zur Bestimmung des Verlaufes der Kurve, so daß für die Verifikation dieser Vermutung ausschließlich eine Abschätzung zur Verfügung stand. Für diese Abschätzung ist das folgende Vorgehen gewählt worden:

Gezählt wurden die Generationen bis zum Erreichen einer bestimmten, hohen Fitness mit der Mehrzahl der Individuen. Hierzu wurde der Verlauf des Durchschnittsteils der Ergebniskurve betrachtet.

Bei der Untersuchung wurde die Generation gemessen, bei der dieser Durchschnittsteil die Grenze von 90 Prozent der möglichen Fitness erreichte. Es ergaben sich die folgenden Werte:

Anzahl der Knoten	Generationen bis zum Erreichen der 90 Prozent
10	4
14	7
20	9
26	13
30	22

Mit Hilfe dieser Messung stellt man nun fest, das bei Hinzunahme eines Knotens mit einer Verschlechterung des Ergebnisverhaltens, d.h. mit einer Dehnung an der Generationenachse um 0,24 Generationen zu rechnen ist.

Unter diesen Voraussetzungen erschien eine Knotenzahl von 20 als sinnvoll, da das Verhalten schon deutlich zu erkennen und außerdem auch ein zügiger Ablauf der Optimierung gewährleistet ist.

Zeitverhalten bei Hinzunahme eines Knotens

Anders als das Verhalten des Ergebnisses bei Hinzunahme eines Knoten verhält sich das System bei dem Verbrauch effektiver Rechenzeit.

Durch die Struktur der Individuen als Matrix wird die Hinzunahme eines Knotens durch Erweiterung der Matrix um eine Zeile und eine Spalte realisiert. Dies heißt, daß bei einer Erweiterung eines Graphen mit n Knoten um einen Knoten die Matrix um $2n + 1$ Gene wachsen wird.

Da dieser Faktor ein Polynom darstellt, wird sich auch die Laufzeit in dem System polynominell vergrößern. Zur Kontrolle dieser These wurde ebenso wie bei der Untersuchung zur Anzahl der Individuen eine Messreihe durchgeführt. Die Ergebnisse sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Anzahl der Knoten	CPU - Sekunden
3	1:06
4	1:15
5	1:21
10	1:56
15	3:15
20	5:05
25	6:26
30	8:47

Das Ergebnis dieser Messung kann man als eine Bestätigung der obigen Vermutung werten, daß das System durchaus nicht \mathcal{NP} -vollständig ist, da feststellbar ist, daß hier ein Wachstum vorliegt, daß mit einem Polynom 2. Grades beschrieben werden kann³.

5.3 Versuche zur Optimierung

Im Gegensatz zu den ersten Versuchen interessiert bei der folgenden Serie das Verhalten des Systems bei der Optimierung. Ziel dieser Untersuchungsserie ist die Bestimmung der Parameter zum Erreichen eines optimalen Fitnessgrades und damit zu dem besten Optimierungsverhalten des Individuums. Hierbei wurden zuerst die Standarteinstellung, danach die einzelnen Parameter variiert und die Veränderungen ausgewertet.

5.3.1 Auswertung des Durchlaufes mit Standartparametern

Wie anhand der folgenden Kurve zu erkennen ist, liegt eine ausgeprägte Konvergenz zum Optimum vor. Schon bei dem Einsatz der Standartparameter ist

³Bei einem Wachstum mit einem Polynom 3. Grades würde eine größere Steigerung erreicht.

eine schnelle und stetige Optimierung zu erkennen. Innerhalb von 20 Generationen wird ein Individuum mit einer Fitness von mehr als 95 Prozent erzeugt. Da dieses Ergebnis so außergewöhnlich war, wurde der Versuch mehrmals wiederholt. Bei dieser Serie von Wiederholungen ergab sich, daß 18 von 20 Versuchen dieses Verhalten zeigen. Ein durchschnittlicher Wert von mehr als 90 Prozent Optimalität wurde in 17 von 20 Versuchen nach spätestens 50 Generationen erreicht. Nur bei einem Versuch wurde eine Fitness unter 91 Prozent erreicht. Bei allen übrigen Versuchen erreichte die Fitness einen Wert von im Durchschnitt 93 Prozent bei den besten Individuen. Dabei war das generelle Verhalten bei allen Versuchen so, wie es in dem Graphen dargestellt wurde.

Bei genauer Betrachtung des Graphen läßt er sich in drei Teilgraphen oder Abschnitte zerlegen. Die Abschnitte werden im weiteren durch I, II und III gekennzeichnet. Wie im weiteren zu sehen sein wird, liegt die Vermutung nahe, daß die Art der Abschnitte abhängig von der Parametereinstellung ist.

Abschnitt I beginnt mit der ersten Generation und endet mit dem Erreichen eines ersten lokalen Maximums, das bei den meisten Versuchen sogar ein globales Maximum ist. Dieser erste Abschnitt hat bei den Versuchen mit den Standardparametern eine durchschnittliche Dauer von 18 bis 20 Generationen. Anschließend an diesem ersten Abschnitt folgt eine Phase mit abfallenden Fitnesswerten, die Individuen verlieren im Schnitt etwa 10 Prozent ihrer Fitness. Diese Phase dauert circa ebenso lange wie Abschnitt I und wird mit der Abschnittnummer II gekennzeichnet. Neben der Länge der Phase interessiert bei diesem Abschnitt auch das Maß des Fitnessverlustes, wobei dieser nach Möglichkeit klein zu halten ist.

Die dritte und letzte Phase zeigt eine Kurve ähnlich eines physikalischen Einschwingvorgangs. Dieser Abschnitt ist bei dem Einsatz der Standardparametern gekennzeichnet durch regelmäßige Schwingungen mit kleiner Amplitude, welche jedoch im Verlauf kontinuierlich abnimmt und schließlich in einer Linie endet. Die Dauer dieser Phase ist innerhalb der Zeit nicht beschränkt.

Entsprechend des Verlaufes der Phasen, ihres Eintrittzeitpunktes und ihrer Ausprägung kann man nun den Verlauf der Optimierung bei der Veränderung der Parameter beschreiben.

Interessant ist aber auch, daß dieser Verlauf der Kurven schon bei anderen Versuchen aufgetreten ist. So beschreibt LUCANSIUS[Luc91] ebenfalls als Ergebnis eine Kurve, die der Kurve in dieser Arbeit entspricht.

Es kann nun ein Ziel für die Veränderung der Parameter definiert werden:

1. Der Abschnitt I sollte verkleinert werden und die Steigung sollte vergrößert werden,
2. der Abschnitt II sollte ebenfalls verkürzt werden oder der Abfall der Amplitude verkleinert werden, und
3. es sollten auch im Abschnitt III Verbesserungen in der Fitness stattfinden.

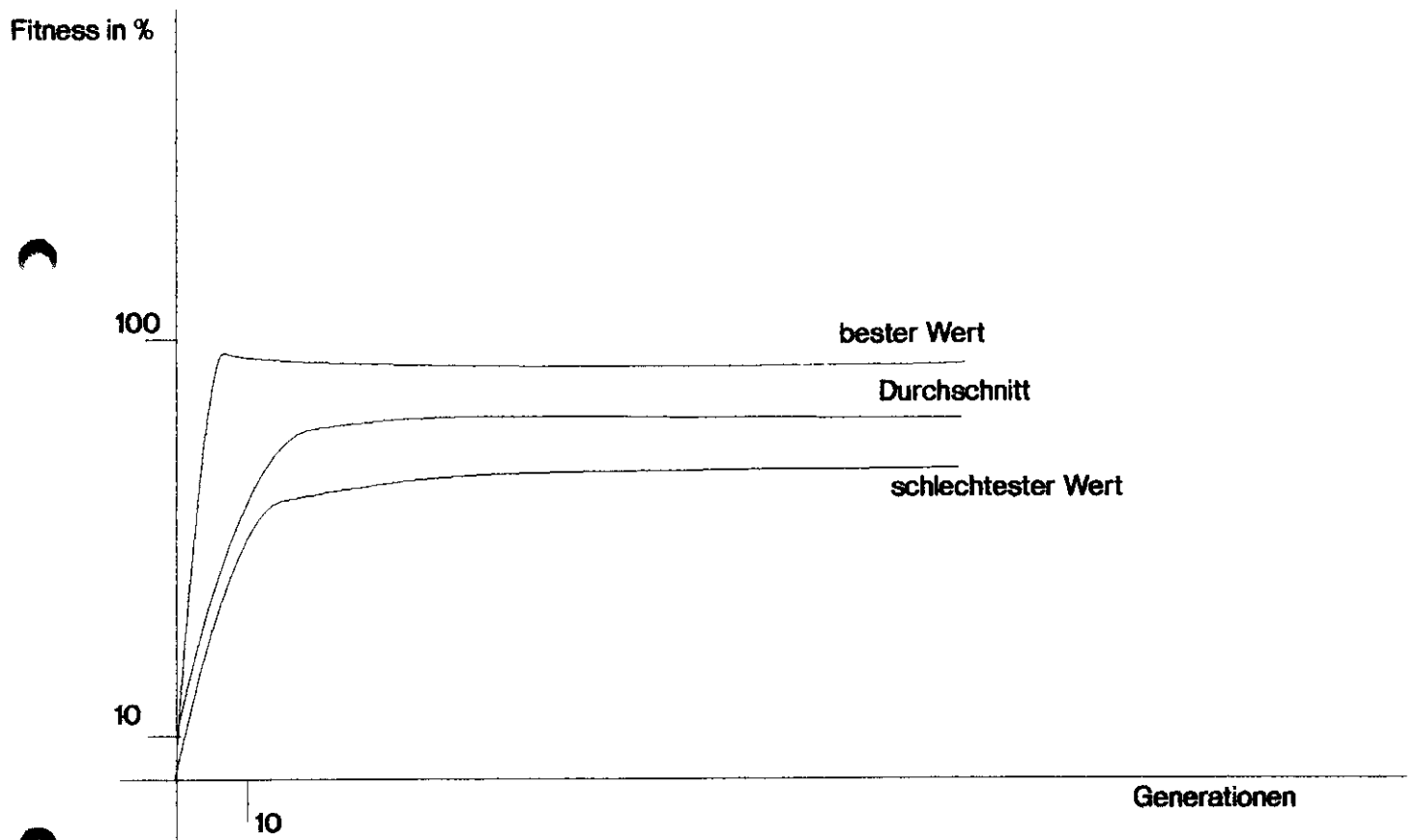


Abbildung 5.1: Kurvenverlauf mit Standardparametern

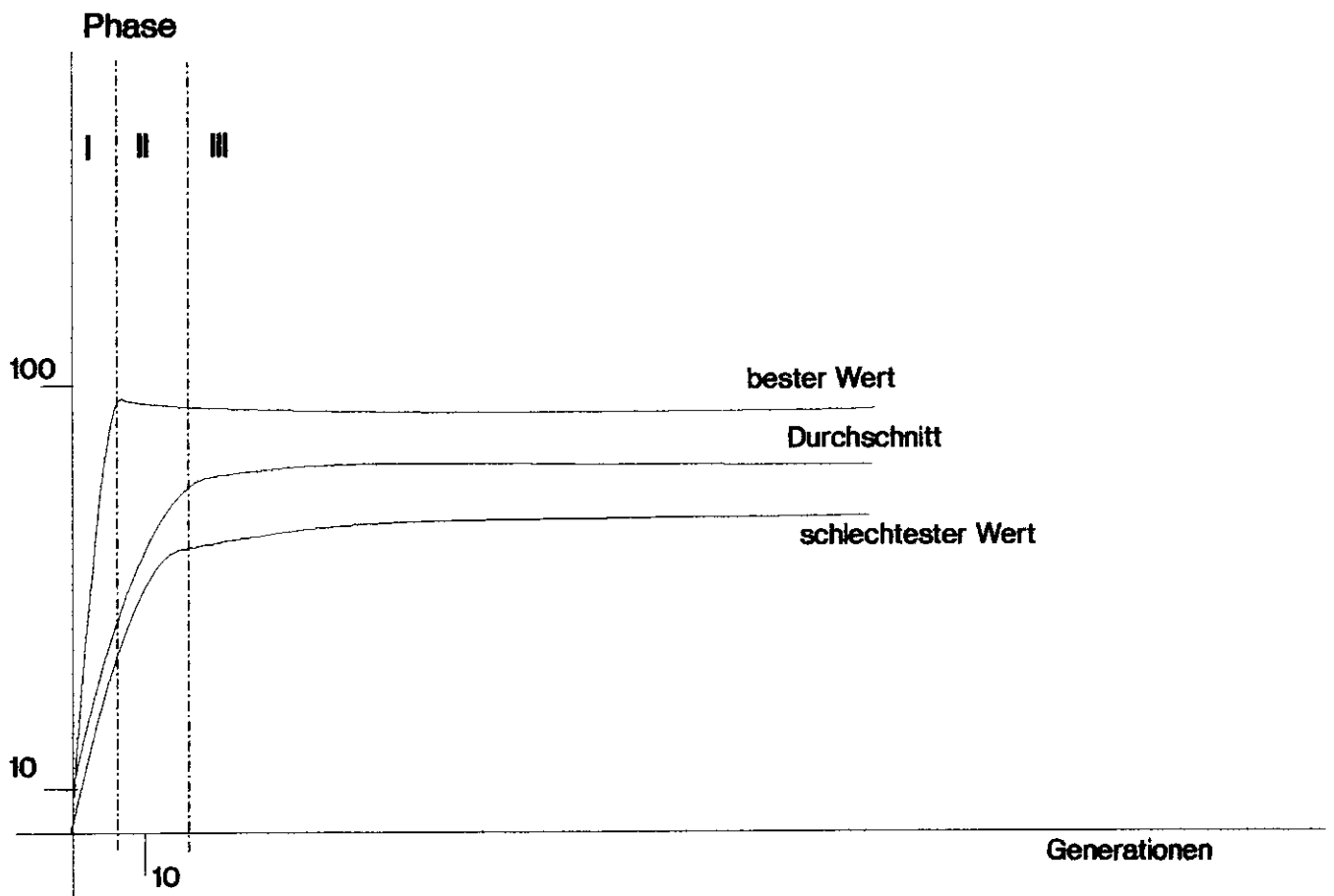


Abbildung 5.2: Darstellung des Phasenschemas

Diese Verbesserung sollten entweder erzeugt werden können oder alternativ ausgeschlossen werden.

Um die Ziele zu erreichen, sollen die verschiedenen Methoden der GENETISCHEN ALGORITHMEN eingesetzt werden.

5.3.2 Der Einsatz von Constraints

Mit dem Einsatz von Constraints soll insbesondere einer Steigerung des Optimierungsverhaltens erreicht werden. Dies geschieht insbesondere dadurch, daß Individuen, die nicht den Anforderungen entsprechen, eliminiert wurden.

Diese Anforderungen sind Beschränkungen in der Form des Graphen. Im Ablauf wird nun zuerst die Existenz der *Wurzellosen Graphen*, danach auch die der *Wälder* verboten. Unter diesen Voraussetzungen werden nun die Experimente durchgeführt.

Verbot von wurzellosen Graphen

Mit dem Verbot der wurzellosen Graphen sollen *Wälder* und *Bäume* in der Population gefördert werden. Hierdurch wird eine Verbesserung der Durchschnitts- und damit auch der besten Fitness erreicht werden.

Bei der Durchführung der Experimente zeigten sich die folgenden Ergebnisse:

Es ergab sich bei keinem Versuch eine Verbesserung der Fitnesswerte, es wurde in keinem Versuch eine Fitness erreicht die über 92 Prozent der möglichen Fitness lag. Auch bei der durchschnittlichen Fitness wurden die Ergebnisse der Versuche ohne Constraints bei keinem Versuch erreicht, sie lagen gewöhnlicherweise um zwei Prozentpunkte niedriger.

Im Gegensatz dazu gleichen sich die Kurvenverläufe. Unterschiede bestehen in Form und Ausprägung der ersten und der dritten Phase, während Phase II der ersten Versuchsserie gleicht. Diese Unterschiede sind bei der ersten Phase am deutlichsten ausgeprägt. Es ergibt sich eine sichtbare Verlängerung dieser Phase um 50 Prozent. Bei der dritten Phase sind die Veränderungen nicht ganz so gut zu beobachten, aber es scheint, daß die Amplitude im Schnitt nicht die Höhe der ersten Versuche erreicht und die Schwingung früher zu einem konstanten Wert führt. Während sich dieser Effekt nur durch subjektive Beobachtung beschreiben läßt, ist der erste durchaus meßbar. Durch eine Wiederholung des Versuches stellte sich heraus, daß die Verlängerung der Phase in der oben beschriebenen Form bei 14 von 15 Versuchen eintritt.

Verbot von wurzellosen Graphen und Wäldern

Im Gegensatz zu dem Verbot von wurzellosen Graphen ergibt sich bei dieser neuen Einstellung ein ganz anderes Ergebnisbild. Wie schon auf Seite 62 beschrieben, herrscht bei dieser Konstellation eine Mortalität von 80 Prozent

vor. Aus dieser Eigenschaft resultieren sicherlich auch die folgenden Ergebnisse: Das Phasenmodell ist auf diesen Ablauf nicht anwendbar. Es findet aber auch keine eigentliche Entwicklung statt. Der Verlauf des Ergebnisgraphen unterscheidet sich vollständig von den vorherigen. Wie deutlich zu erkennen ist, wird bei dieser Einstellung lediglich das beste, in der Population vorkommende Individuum selektiert und es konzentriert sich das gesamte System auf dieses beste Individuum. Die Geschwindigkeit der Selektion scheint direkt abhängig von der Größe der Population zu sein. Dieser Effekt wurde nicht weiter untersucht.

Betrachtung der Ergebnisse

Anhand der durchgeführten Untersuchungen ist das folgende Fazit zu ziehen: Da jeder der beiden Constraints eine deutliche Verschlechterung der Ergebnisse mit sich bringt, ist der Einsatz von Constraints bei den laufenden Untersuchungen abzulehnen. Auch sind bestimmte graphische Strukturen nicht mit Hilfe der Constraints zu erreichen. Insbesondere kann man auf diese Weise keine Bäume erzwingen. Deshalb werden bei den weiteren Untersuchungen keine Constraints mehr eingesetzt.

5.3.3 Einsatz der Baumförderung

Im Gegensatz zu den Constraints geht die Baumförderung einen anderen Weg. Diese Unterschiede sind in den vorderen Kapiteln beschrieben worden. Doch bei der Betrachtung der Ergebnisse stellt man fest, daß der Einsatz der Baumförderung keinen Gewinn für die Aufgabenstellung mit sich bringt. Auch bei dem Einsatz der Baumförderung ist der Ablauf in drei Phasen zu unterteilen, die sich jedoch bei den ersten beiden Phasen grundlegend von den zuerst beschriebenen unterscheiden. In der ersten Phase sinkt der beste Wert von einem recht hohen Anfangswert auf einem durchschnittlichen ab. Dieser Endpunkt stellt ein lokales, oft sogar ein globales Minimum dar. Hiernach tritt das System in die Phase II, bei der die Werte wieder um einen geringen Teil steigen, um dann schließlich in der Phase III wieder in einem Einschwingprozess zu enden.

Das System erreicht jedoch nicht mehr die Anfangswerte, sondern nur noch einen Wert von circa 60 Prozent der Anfangswerte. Diese Anfangswerte selber liegen etwa bei 75 Prozent der optimal erreichbaren Werte. Auch bei mehrfacher Wiederholung ist keine Veränderung in dem Verhalten des Systems festzustellen. Dieses Verhalten disqualifiziert die *Baumförderung*, da die recht guten Anfangswerte nicht auf den Einsatz der GENETISCHEN ALGORITHMEN, sondern nur auf dem Algorithmus zur Erzeugung der Individuen zurückzuführen ist. Deshalb wird im weiteren keine Baumförderung mehr eingesetzt.

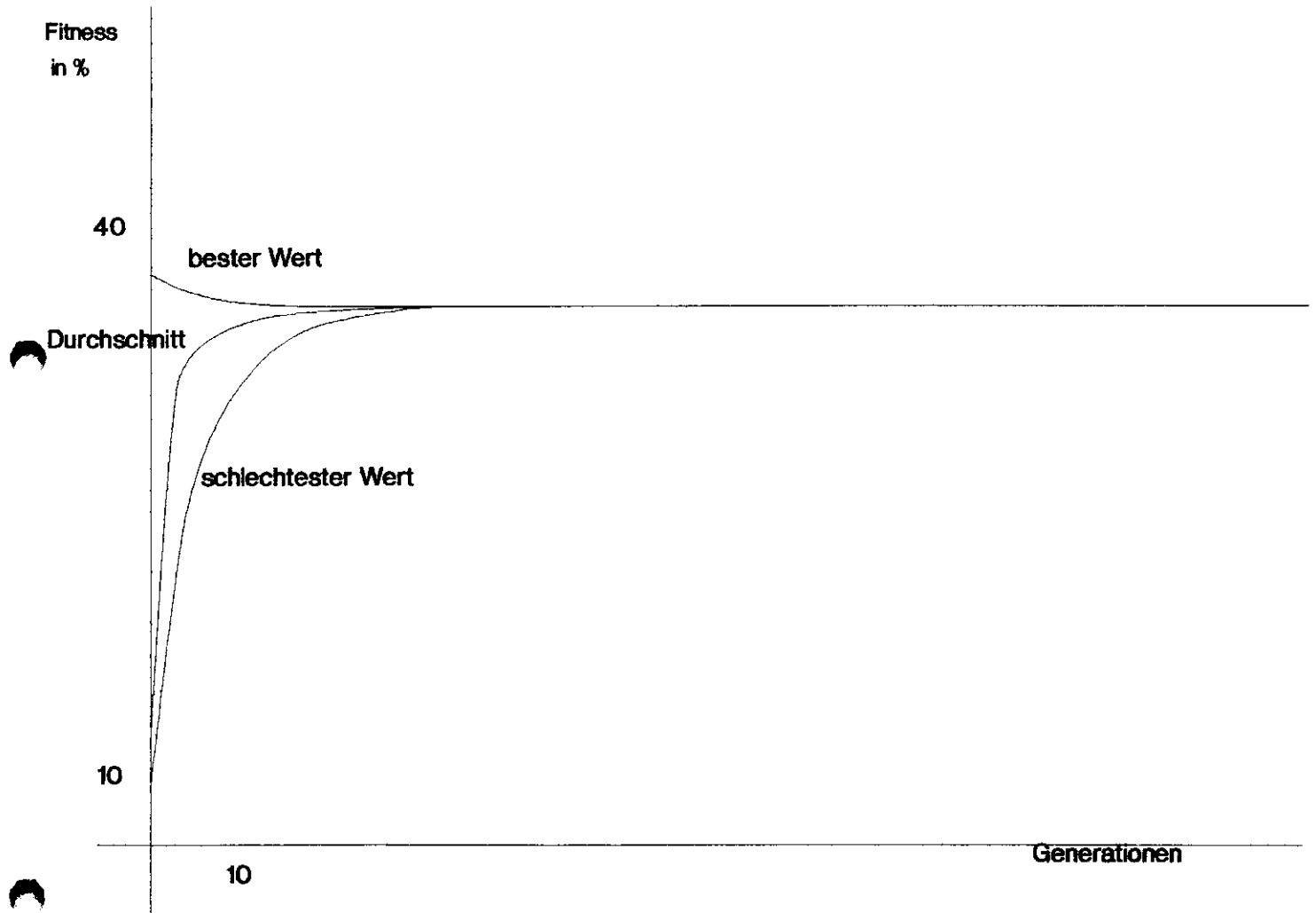


Abbildung 5.3: Kurvenverlauf mit maximalen Constraints

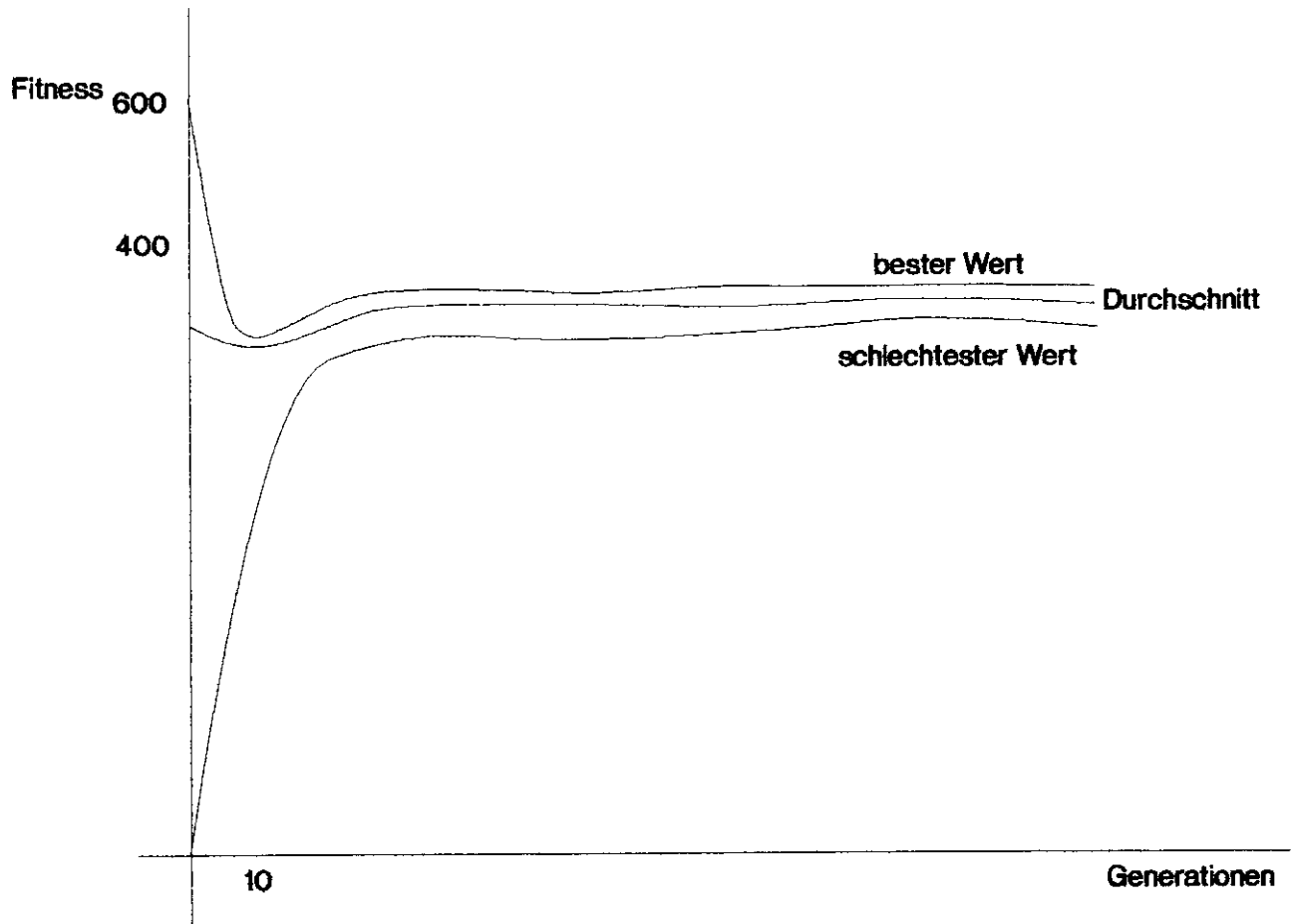


Abbildung 5.4: Kurvenverlauf bei Einsatz der Baumförderung

5.3.4 Einsatz des Generation Gapping

Mit dem Einsatz des *Generation Gapping* soll eine Ventilfunktion eingeführt werden, die ein schnelles Absinken der optimalen Werte verhindern soll. Hierbei wird, wie auf Seite 55 beschrieben, jeweils das beste Individuum der laufenden in die nächste Generation übernommen.

Der Einsatz dieser Funktion in dem System hatte die folgenden Effekte für die Ergebnisse der Durchläufe:

Das *Generation Gapping* hat keinen Effekt auf das Verhalten der schlechtesten Werte. Auch bei den durchschnittlichen Werten ist keine Verhaltensänderung festzustellen. Deutliche Änderungen ergeben sich jedoch bei der Kurve der optimalen Werte. Während bei den Untersuchungen auf Seite 66 eine Ergebnisfunktion in Form einer Schwingung vorliegt, hat bei dem Einsatz des *Generation Gapping* diese Kurve eine vollständig andere Form.

Der Kurvenverlauf ist nicht mehr schwingend, sondern gleicht eher einer Treppenfunktion, die in ihrer Art monoton steigend ist. Trotzdem ist eine Steigerung der Fitness nicht erreicht worden. Es gab bei allen Versuchen keinen einzelnen mit einer Fitness, die höher war als bei den Versuchen ohne *Generation Gapping*.

5.3.5 Veränderungen der Mutationswahrscheinlichkeit

Sinn der Mutation ist eine Auffrischung eventuell zu homogener genetischer Strukturen. Um die Wirkung der Mutation zu untersuchen, wird die folgende Untersuchungsserie durchgeführt. Hierzu wird bei einer Beibehaltung der Standardparameter die Mutationswahrscheinlichkeit von $p_{mut} = 0,00005$ bis auf eine Mutationswahrscheinlichkeit von $p_{mut} = 0,5$ erhöht. Diese Erhöhung findet in Dezimalpotenzen statt, so daß 5 Untersuchungen durchgeführt werden.

Dabei ist die letzte Untersuchung mit einer Mutationswahrscheinlichkeit von 2 : 1 nicht mehr praktikabel, ihre Durchführung dient ausschließlich der Kontrolle und dem prinzipiellen Interesse. Denn diese Mutationswahrscheinlichkeit verändert in dem System jedes zweite Gen.

Bei der Auswertung dieser Versuche stellt man jedoch fest, daß eine Veränderung dieses Parameters keinerlei Einfluß auf das Verhalten der optimalen Werte hat. Die auftretenden Unterschiede können weder als typisch für die eingestellte Mutationswahrscheinlichkeit gelten, noch können sie in irgend einer Form als signifikant bezeichnet werden. Anders ist das Verhalten bei dem Kurvenverlauf der schlechtesten Werte. Bei diesem Kurvenverlauf stellt man bei zunehmender Mutationswahrscheinlichkeit auch eine zunehmende Unstetigkeit dieser Kurve fest. Das Extremum dieser Veränderung wird bei einer Mutationswahrscheinlichkeit von $p_{mut} = 0,5$ erreicht, bei der keine Stetigkeit mehr festzustellen ist. Hierbei erscheint dann auch die Stetigkeit der Durchschnittskurve nicht mehr vorhanden.

Die vergleichsweise besten Werte wurden mit einer Mutationswahrscheinlich-

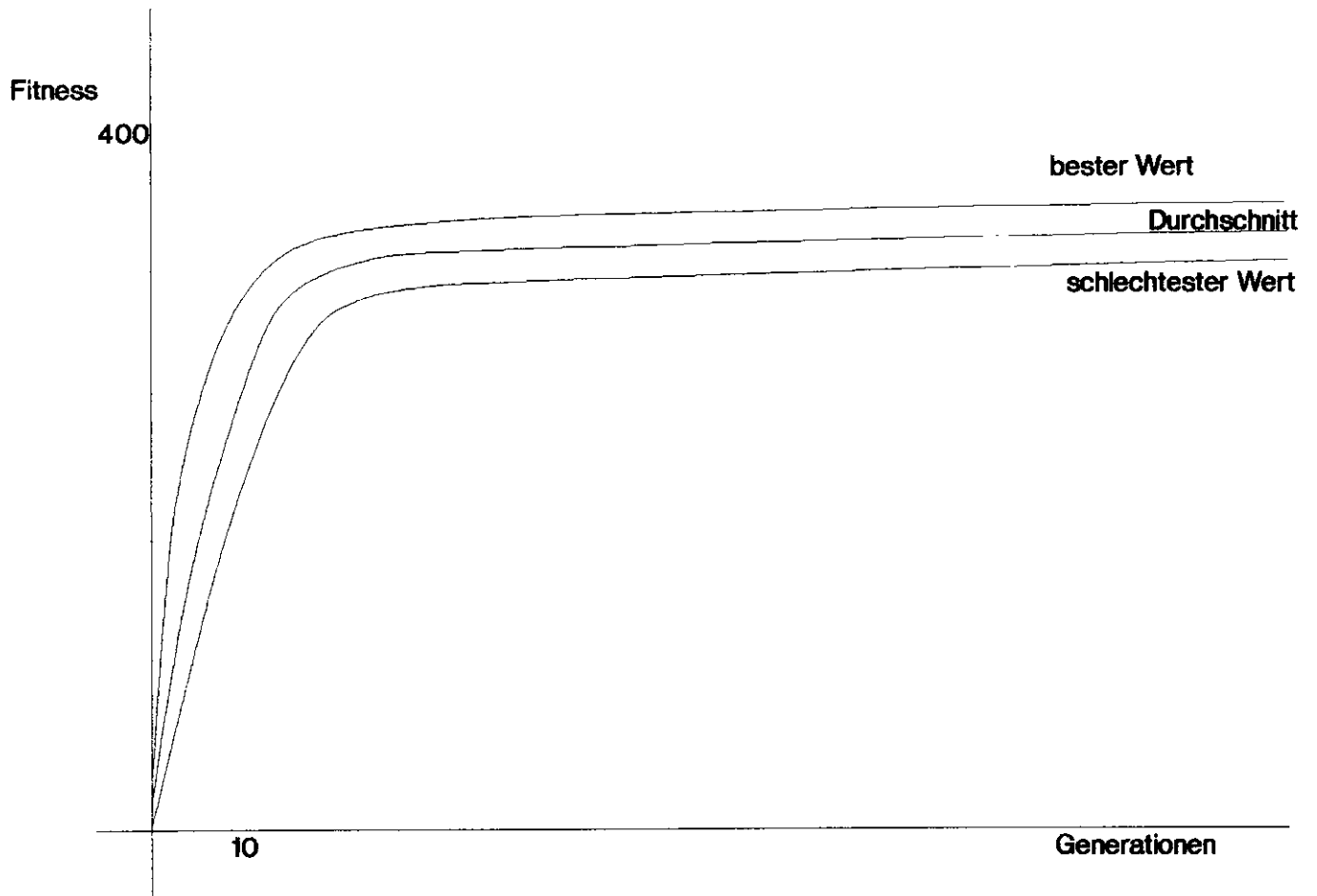


Abbildung 5.5: Kurvenverlauf bei Einsatz des Generation Gapping

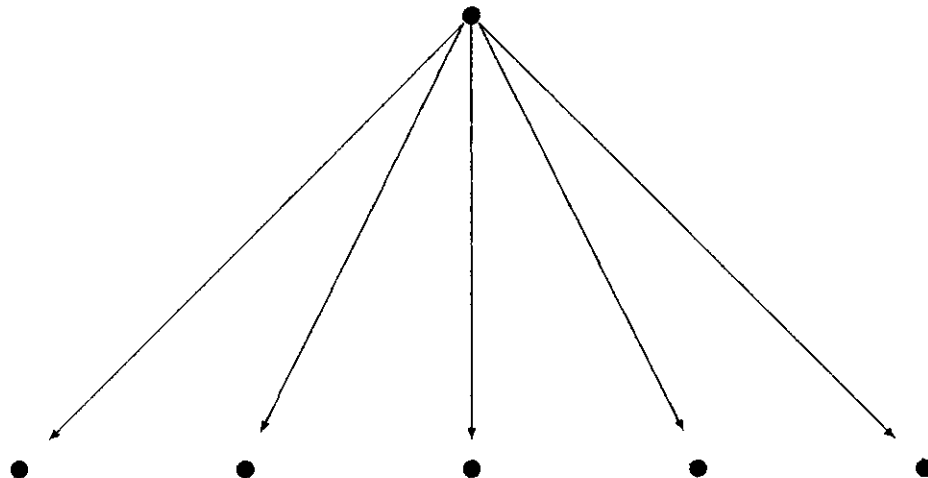
keit von $p_{mut} = 0,0005$ erreicht, obwohl auch hier nicht von signifikanten Ergebnissen geredet werden kann, da nur eine Verbesserung um 1,2 Fitnesspunkten im Vergleich zu den Durchläufen ohne Mutation erreicht wurde. Außerdem ist bei dieser Mutationswahrscheinlichkeit auch noch mit einer stetigen Durchschnittskurve zu rechnen. Von den fünf durchgeführten Versuchen war diese Kurve bei vier Versuchen an nicht mehr als zwei Stellen unstetig. Diese Unstetigkeit war bei 80 Prozent auf eine sprunghafte Verbesserung der optimalen Werte und damit auch auf eine Unstetigkeit in der Kurve der optimalen Werte zurückzuführen.

Abschließend zu den Versuchen mit der Mutationswahrscheinlichkeit kann das folgende festgestellt werden:

Der Einsatz der Mutation wirkt sich in diesem System mehr als störend aus, man kann in diesem Zusammenhang von einer destruktiven Funktion sprechen. Aufkommende feste Strukturen werden durch diese Funktion schon vor der Stabilisierung zerstört und vernichtet. Deshalb sollte auf dem Einsatz der Mutation bei diesem System verzichtet werden.

5.3.6 Darstellung der erzeugten Graphen

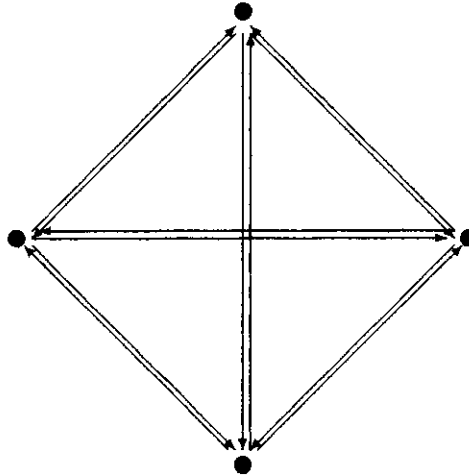
Bei den bisherigen Ergebnissen wurden nur die Ergebnisse der Fitnessfunktion betrachtet, nicht aber die erzeugten Graphen. Ausgehend von den Anfangsgraphen bildet sich stets eine spezielle Form des Graphen heraus. Diese spezielle Form hat das folgende Aussehen:



(Graph mit 6 Knoten)

Wie deutlich zu erkennen ist, handelt es sich um einen Wurzelbaum mit einer Wurzel und $(n - 1)$ Blättern auf der ersten Ebene. Einzelne Exemplare weisen auch Querverbindungen innerhalb der ersten Ebene auf, ohne daß dieses Auswirkungen auf den Fitnesswert hätte. Dieses Bild wird genau dann erzeugt,

wenn die Wurzel konstant gehalten wird. Wird die Wurzel bei jedem Durchlauf neu bestimmt, so hat der erzeugte Graph das folgende Aussehen:



(Graph mit 4 Knoten)

Beiden Graphen ist gemein, daß sie eine minimale Weglänge aufweisen und beide werden von der Fitnessfunktion als optimal anerkannt.

Die Verringerung der Fitness wird durch Blätter auf der zweiten oder gar dritten Stufe erzeugt. Die Grundform bleibt jedoch im ganzen erhalten. Entsprechende Darstellungen finden sich bei den Bildschirmprotokollen im Anhang.

5.4 Versuche mit der alternativen Fitnessfunktion

Zur Kontrolle des Verhaltens der GENETISCHEN ALGORITHMEN und um die Bedeutung der Fitnessfunktion nachzuweisen, wird eine Kontrolluntersuchung mit einer veränderten Fitnessfunktion durchgeführt.

Sollte sich bei der Untersuchung keinerlei Veränderung im Verhalten zeigen, so ist die Wirksamkeit des Systems überhaupt in Frage gestellt. Deshalb muß bei dem Einsatz einer anderen Fitnessfunktion ein deutlich anderes Ergebnis als bei der vorigen auftreten. Unter Beibehaltung der Experimentalumgebung wird statt der Fitnessfunktion *Mittlere Weglänge* in der nächsten Serie die auf Seite 47 beschriebene Kostenfunktion als Fitnessfunktion benutzt.

Nach mehrmaligem Durchlauf ergibt sich das folgende Bild:

Anders als bei den vorigen Versuchen zeigt die Kostenfunktion ein sehr uneinheitliches Bild mit vielen, unvorhersehbaren Sprüngen. Es ist weder eine Monotonie noch eine Stetigkeit in der Kurve der optimalen Werte festzustellen. Die Kurve des berechneten Durchschnitts zeichnet sich ebenfalls durch einen absolut

uneinheitlichen Verlauf aus. Es läßt sich, im Gegensatz zu den ersten Versuchen, weder eine Prognose noch gar ein Phasenmodell erstellen.

Auch nach mehrfachen zusätzlichen Versuchen ist keinerlei Verlaufschema festzustellen, weder signifikante Maxima noch Minima.

Bei oberflächlichen Versuchen mit den Constraints und dem Generation Gap veränderte dieses Verhalten sich nicht, allerdings wurden dieselben Probleme mit den Constraints aus den ersten Versuchen wieder aktuell.

Ganz anders verhält sich das Ergebnis, wenn man sich den erzeugten Graphen betrachtet. Der erzeugte Graph entspricht in seiner Ausprägung genau den Erwartungen vor den Untersuchungen:

Die Knoten ordnen sich in einer linearen Liste an, auch hier wird nach kurzer Zeit der optimale Graph annähernd erreicht. Das Ergebnis hat hierbei die folgende Form:



(Graph mit 5 Knoten)

Dieses Ergebnis wird bei 19 von 22 Versuchen erreicht. Allerdings wurde es in allen Fällen in der nächsten Generation zerstört.

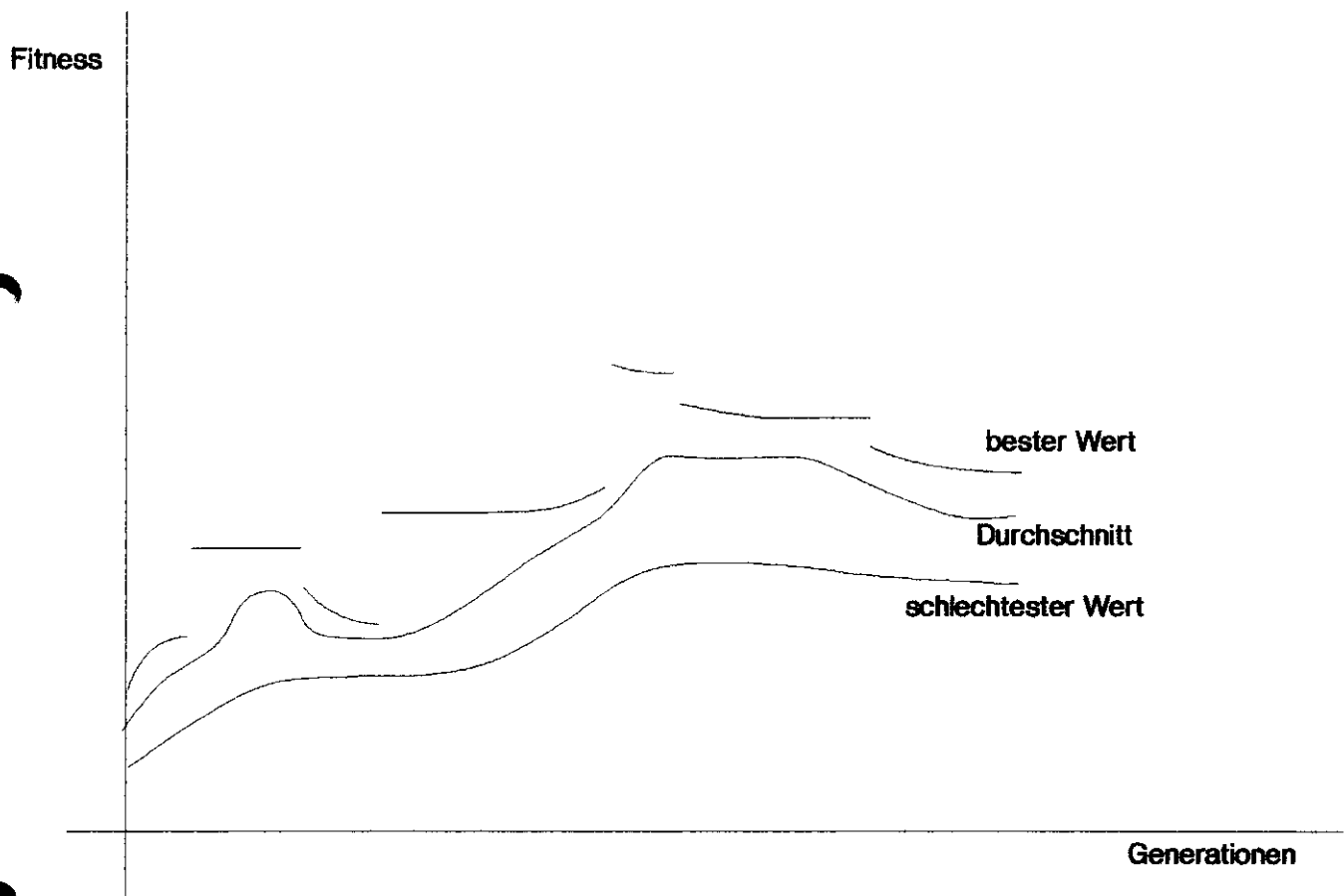


Abbildung 5.6: Kurvenverlauf bei Einsatz der Kostenfunktion

Kapitel 6

Optimierungen der Gesamtfunktion

Außer der Topologischen Optimierung muß die Optimierung der Ordnung betrachtet werden. Diese Untersuchung basiert auf denselben Grundlagen wie die Untersuchungen über die Topologische Optimierung, die einstellbaren Parameter entsprechen denen im vorigen Kapitel.

Auch die Experimente sollen, soweit notwendig, in Art und Reihenfolge denen der Topologischen Optimierung gleichen, ergänzt um jene, die aus der besonderen Natur der veränderten Fitnessfunktion stammen.

Im Anschluß an diese Untersuchungsserie wird die Kombination der Fitnessfunktionen zu der Gesamtfitnessfunktion durchgeführt und diese wird experimentell betrachtet. Das Ergebnis ist dann ein untersuchtes Gesamtsystem, welches in seiner Verhaltensweise bekannt und untersucht ist.

6.1 Untersuchungen der Ordnungsstrukturen

Bei der Untersuchung des Verhaltens der Ordnungsstrukturen bei der Optimierung durch GENETISCHE ALGORITHMEN muß, wie zuvor bei den Topologischen Optimierungen geprüft werden, ob die ausgesuchte Population und die angewendete Knotenzahl repräsentativ für das ganze System sind. Aus diesem Grund wird die Untersuchungsserie von Seite 62 im weiteren wiederholt.

Diese Untersuchungsserie beginnt mit der Bestimmung einer repräsentativen Knotenzahl. Basierend auf den gemachten Erfahrungen in den vorigen Kapiteln wird von einer Population von 20 Individuen ausgegangen. Man stellt im Gegensatz zu den Topologischen Optimierungen fest, daß schon bei sechs Individuen ein repräsentatives Verhalten eintritt. Gezählt werden die Generationen bis zum Eintritt eines Fitnesswertes von mehr als 75 Prozent. Folgende Ergebnisse wurden ermittelt:

Anzahl der Knoten	Generationen
10	77
20	150
30	250
40	340
50	430
60	530
100	1000

Parallel zu den ersten Versuchen und zur besseren Vergleichbarkeit wird auch hier bei den weiteren Versuchen mit einer Größe von 20 Knoten ausgegangen.

Ebenso interessiert die notwendige Population zum Überleben des Spezies. Hier ist, im Gegensatz zu den letzten Versuchen eine Parallelität zu den Versuchen bei der Topologischen Optimierung. Die Population stirbt erst bei einer Größe kleiner 6 Individuen aus. Diese Parallelität erklärt sich aus der Tatsache, daß die eingesetzten Systeme bis auf die Fitnessfunktion gleich sind.

Im weiteren wird also mit der gleichen Knotenanzahl und der selben Population wie bei den Topologischen Optimierungen gearbeitet. Somit kann man die Ergebnisse der Versuche direkt mit den ersten Ergebnissen vergleichen, da alle Voraussetzungen identisch sind.

6.1.1 Ergebnisverlauf bei dem Einsatz von Standartparametern

Der Verlauf der Ergebnisse hat die Form eines stetigen, monoton steigenden geradenartigen Graphen, der sich von einem Punkt nahe dem Koordinatenursprung dem kalkulatorischen Maximum nähert, um sich dann bei einem Fitnesswert von etwa 80 bis 85 Prozent unterhalb von diesem Maximum einzupendeln. Dabei behalten die einzelnen Kurven einen festen Abstand, das Verhalten der Kurve der besten Werte und der Kurven des kalkulatorischen Durchschnitts und der schlechtesten Werte ist identisch, aber zeitversetzt. Der angegebene Fitnesswert wurde in allen Versuchen erreicht, bei acht von zehn Versuchen wird dieser Wert innerhalb von 600 Generationen erreicht.

Auch bei dieser Kurve kann man ein Mehrphasenschema entwickeln, das den Kurvenverlauf charakterisiert. Es können hier zwei Phasen ausgemacht werden. Diese beiden Phasen werden im weiteren durch A und B gekennzeichnet. Die erste Phase A beginnt am Ursprung des Ergebnisgraphen und endet mit dem Übergang von der Steigung in den Einschwingprozess. Dieser Übergang wird als Beginn der Phase B gekennzeichnet. Diese Phase B endet mit dem Erreichen der maximalen Generation.

Bei näherer Betrachtung des Kurvenverlaufes stellt man eine gewisse Übereinstimmung zwischen diesem Phasenschema und dem bei den Topologischen Optimierungen fest. So läßt sich Phase A sicherlich mit der Phase I vergleichen.

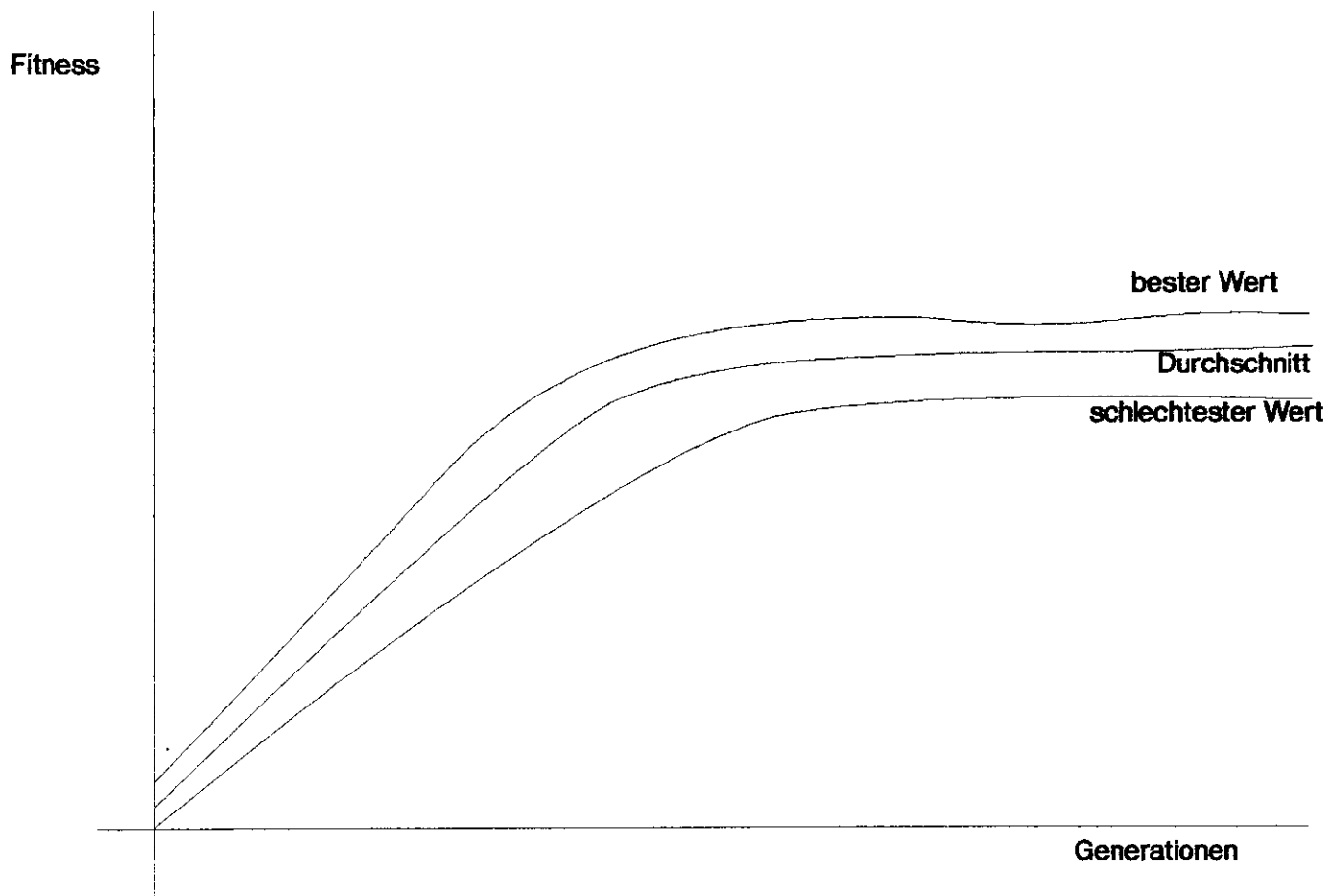


Abbildung 6.1: Kurvenverlauf mit Standardparametern

Sie ist aber deutlich in Richtung der Generationenachse gedehnt. Ebenso läßt sich Phase B mit der Phase III in Verbindung setzen. Hier ist besonders interessant, daß auch in der Phase B ein deutlicher Einschwingprozess zu erkennen ist. Jedoch, und dieses unterscheidet die beiden Phasen, erreicht die Ergebniskurve bei den Optimierungen der Ordnung in der Phase B bessere Werte als in der Phase A. Dieses unterscheidet die beiden Kurvenverläufe, da wie auf Seite 66 beschrieben, nach dem Eintritt der Phase II keinerlei Verbesserung mehr stattfindet.

Vermutlich liegt dieses Verhalten in dem Fehlen einer, der Phase II vergleichbaren Phase. Es hat für den Ablauf der Versuche unterschiedliche Bedeutungen: Zum ersten wird es unmöglich, das Ende der ersten Phase als Abbruchzeitpunkt festzulegen. Das System muß also laufen, bis

- entweder der maximale Wert erreicht wird
- oder eine sehr große Anzahl von Generationen abgelaufen ist.

Sicherlich würde nach dem Ablauf von einer großen Anzahl von Generationen auch ein Maximum erreicht, das nahe dem kalkulatorischen Maximum liegt. Dieses gilt nicht für ersten Versuche im vorigen Kapitel.

6.1.2 Versuche mit verschiedenen Systemparametern

Bei diesen Versuchen werden die, für die Optimierung der Ordnung relevanten Systemparameter getestet. Diese Systemparameter sind

1. die Mutationswahrscheinlichkeit
2. das Generation Gapping

Alle anderen Systemparameter beziehen sich ausschließlich auf die Topologische Optimierung. Die Bedingungen der Tests stimmen mit denen des vorigen Kapitels überein.

Versuche mit der Mutationswahrscheinlichkeit

Entsprechend den Versuchen im vorigen Kapitel mit der Mutationswahrscheinlichkeit werden diese auch hier durchgeführt. Es ergibt sich hierbei das folgende Bild:

Es wurde die gleiche Parametereinstellung wie bei den Versuchen mit der Topologischen Optimierung gewählt, also konstante Knotenanzahl und Population mit 20 Knoten und 20 Individuen. Außerdem wurde auch der Versuchsablauf dem der Topologischen Optimierung nachempfunden. Es wurde mit einer Mutationswahrscheinlichkeit von $p_{mut} = 0,00005$ begonnen und dann in Schritten einer Dezimalpotenz bis zu einer Mutationswahrscheinlichkeit von $p_{mut} = 0,5$ gesteigert. Selbstverständlich gelten alle bekannten Einschränkungen.

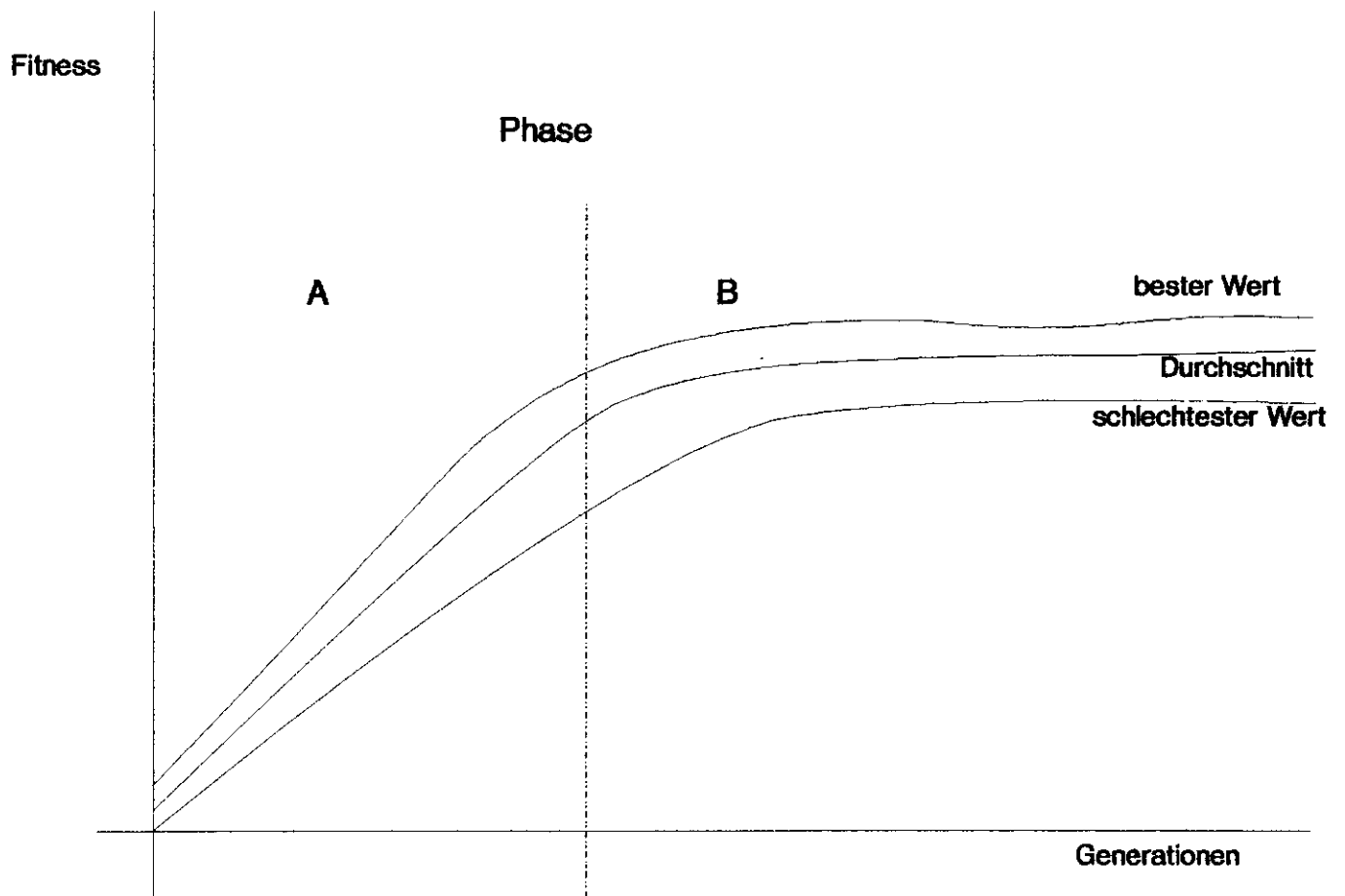


Abbildung 6.2: Kurvenverlauf mit den verschiedenen Phasen

Die verschiedenen Einstellungen erzeugen unterschiedliche Ergebnisse, die sich aber durchaus in zwei Effekte einteilen lassen. Diese Effekte, die im folgenden beschrieben werden, prägen sich mit steigender Mutationswahrscheinlichkeit immer deutlicher aus. Es ist festzustellen, daß sich die Effekte ausschließlich auf die Phase A beschränken. Die Phase B zeigt mit steigender Mutationswahrscheinlichkeit nur eine steigende Auflösung des Werteablaufes. Diese Auflösung betrifft sowohl die Kurve der Optimalen Werte und die Kurve der schlechtesten Werte. Bei dem Einsatz der Mutation streut diese Kurve über dreißig Fitnesswerte. Besonders deutlich wird diese Streuung bei einer Mutationswahrscheinlichkeit von $p_{mut} = 0,5$.

Die beobachtete Streuung gleicht in keiner Weise der Streuung, die auf Seite 73 beschrieben wurde. Dort streut bei einer Mutationswahrscheinlichkeit von $p_{mut} = 0,5$ nur die Kurve der schlechtesten Werte, diese aber über den gesamten, von der Kurve eingeschlossenen Bereich. Interessanter sind jedoch die Veränderungen der Kurven in der Phase A.

Hier ist festzustellen, daß mit steigender Mutationswahrscheinlichkeit die Steigung in der Kurve in dieser Phase A deutlich zunimmt. Dies bedeutet, daß sich die Kurve mit größerer Mutationswahrscheinlichkeit schneller einem Maximum nähert und in ihrer Form der Phase I immer ähnlicher wird. Die Erhöhung der Steigerung wird in der nächsten Graphik gezeigt.

Parallel mit dieser Steigerung der Optimierungsgeschwindigkeit geht aber der zweite Effekt in den Graphen ein. Dieser zweite Effekt ist ein deutlicher Verlust an erreichter Fitness. Nach den gemachten Erfahrungen sind die Steigerung der Kurve und der Verlust der Fitness proportional voneinander abhängig.

Diese Effekte treten bei den Mutationswahrscheinlichkeiten von $p_{mut} = 0,00005$ bis $p_{mut} = 0,05$ auf, bei einer Wahrscheinlichkeit von $p_{mut} = 0,5$ wird die Streuung so groß, daß keinerlei Strukturen mehr erkennbar sind. Hier erscheint nur noch eine gleichförmige, gestreute Menge von Werten.

Bei der hohen Wahrscheinlichkeit kommt zusätzlich hinzu, daß hier willkürlich Kanten erzeugt werden. Auf diese Weise werden, ohne daß es beabsichtigt wurde, neue Topologische Strukturen erzeugt, die mit der einfachen Optimierung nichts mehr zu tun haben.

Auf Grund dieser Erfahrungen ist es sinnvoll, die Mutationswahrscheinlichkeit so gering wie möglich anzusetzen. Also wäre es nur ratsam, mit einer Mutationswahrscheinlichkeit von $p_{mut} = 0,00005$ bzw. $p_{mut} = 0,000005$ zu arbeiten.

Einsatz des Generation Gapping

Beim Einsatz des Generation Gapping verändern sich einige Teile der Ergebniskurven. Dabei gilt, daß wie bei den Versuchen auf Seite 73 das Generation Gapping keinen Einfluß auf die Kurven der durchschnittlichen Werte und der schlechtesten Werte hat. Anders ist die Reaktion der Kurve der besten Werte. Hier findet eine deutliche Veränderung des Kurvenverlaufes statt. Diese Veränderung findet in der Phase B des Ablaufes statt. In der Phase A zeigt

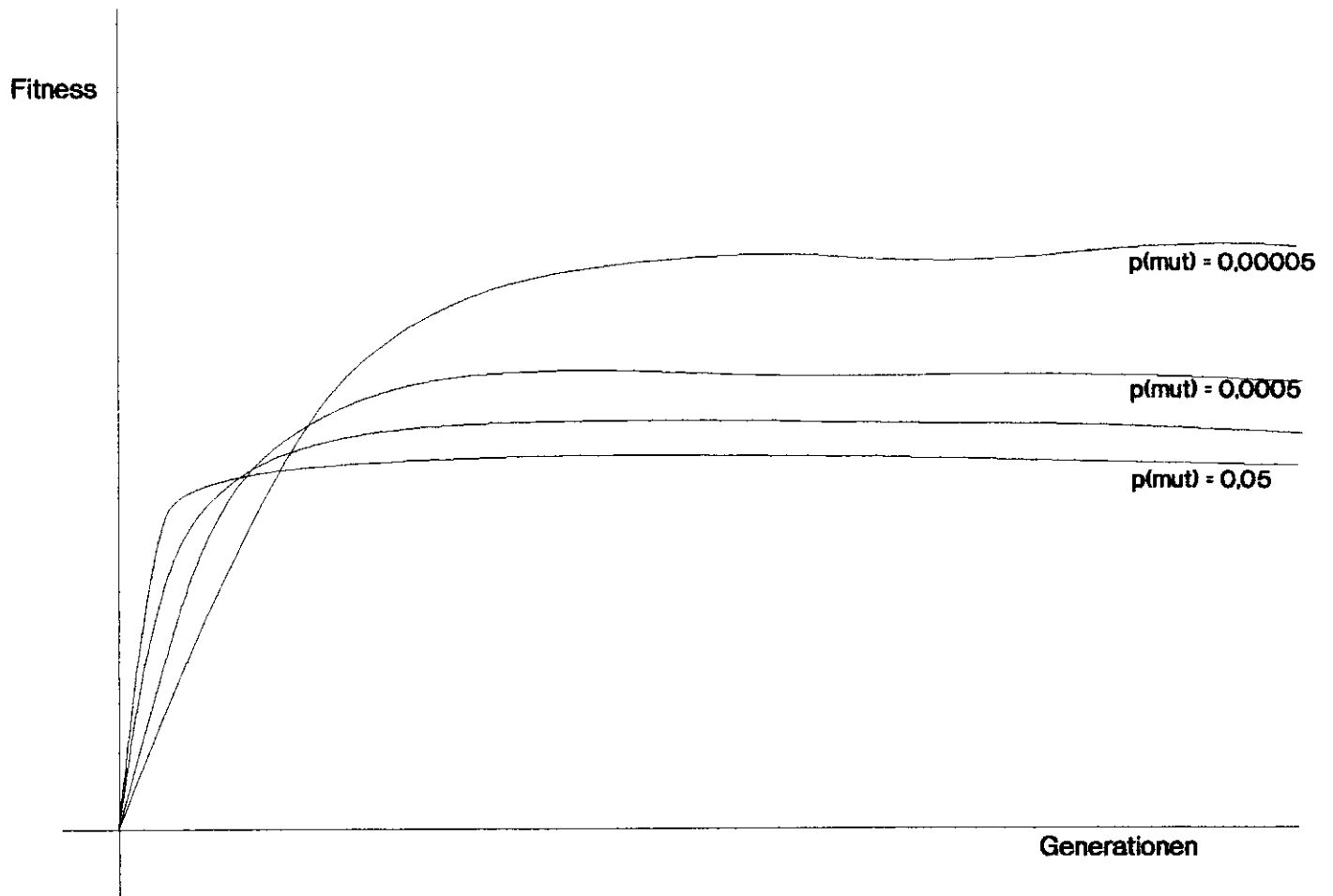


Abbildung 6.3: Kurvenverlauf bei unterschiedlicher Mutationswahrscheinlichkeit

das Generation Gapping keinerlei Wirkung, da hier ein monoton steigender Ergebnisverlauf bei jeder Generation ein besseres Individuum hervorbringt. Dadurch ändert sich das Gap in jeder Generation. In der Phase B jedoch zeigt sich ein anderes Bild. Der schwingungsartige Kurvenverlauf ist auch hier nicht mehr feststellbar. Stattdessen ist eine monoton steigende Treppenfunktion mit deutlichen Tendenzen zum Optimum festzustellen. Bei den durchgeführten Versuchen stellte sich keine Beschleunigung des Optimierungsverhaltens heraus.

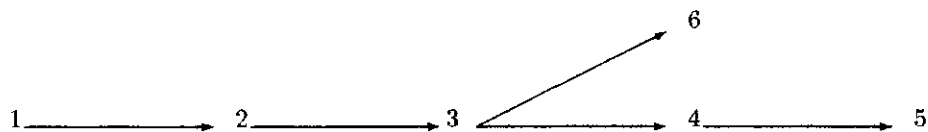
Der subjektive Eindruck jedoch ist der einer Verbesserung des Ablaufes der Kurve der Optimalen Werte. Deshalb wird das Generation Gapping im weiteren für den Einsatz bei der Kombination der Fitnessfunktionen für Topologische Optimierung und der Optimierung der Ordnung vorgesehen.

6.1.3 Darstellung der erzeugten Graphen

Auch im Anschluß zu diesen Untersuchungen sollen die erzeugten Graphen dargestellt werden. Die Topologie dieser Graphen ist hierbei ohne Bedeutung und soll bei der Betrachtung des Ergebnisses nicht berücksichtigt werden.

Im weiteren werden zwei typische Ausprägungen der Graphen dargestellt. Alle Graphen sind optimale Ordnungen und werden als solche von der Fitnessfunktion erkannt. Beide Graphen sind bei den Versuchen aufgetreten.

Der erste erzeugte Graph ist eine der linearen Liste ähnliche Struktur mit dem folgenden Aussehen:



(Graph mit 6 Knoten)

Der zweite Graph ähnelt in der Form eher einem Baum mit entsprechenden Querverbindungen. Dieser Graph wird im folgenden dargestellt:

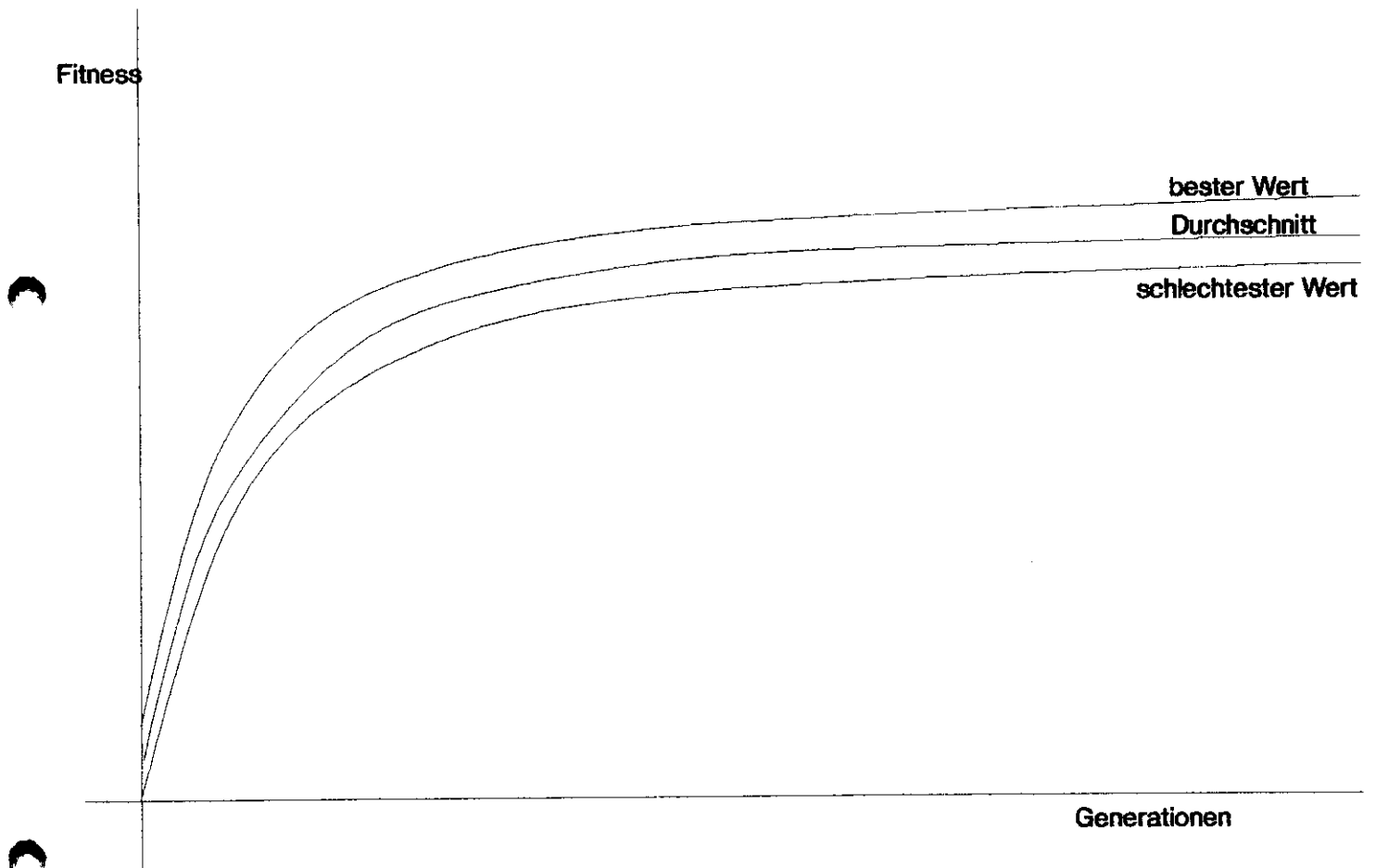
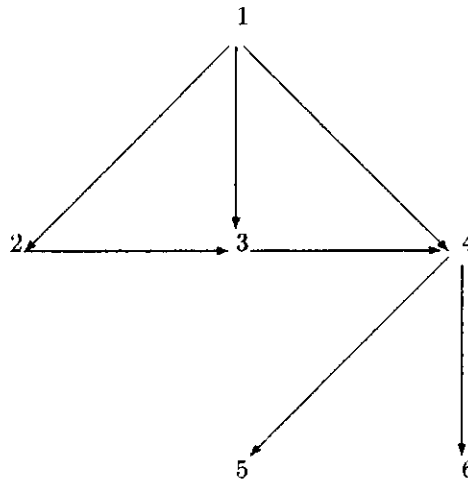


Abbildung 6.4: Das Generation Gapping



(Graph mit 6 Knoten)

Es war deutlich zu erkennen, daß signifikant unterschiedliche Graphen erzeugt wurden, deren Ausprägung durch anfänglich vorhandene Graphen beeinflusst wurden. Allerdings mußte festgestellt werden, daß die Topologie in keinem Fall erhalten wird, sogar eine vollständige Deformierung ist möglich, allerdings trat nur in einem von zwanzig Versuchen dieser Effekt ein.

Damit entfällt die Möglichkeit, diese Funktion im Anschluß an die Topologische Optimierung zu nutzen, um auf diese Weise eine Selbstorganisierende Datenstruktur zu erzeugen.

So wird im weiteren eine andere Form der Kopplung der Fitnessfunktion untersucht.

6.2 Kopplung der Fitnessfunktion

Bei dieser Kopplung der Fitnessfunktionen gehen beide Teilfunktionen in die Gesamtfitnessfunktion ein. Entsprechendes wurde auf Seite 54 beschrieben.

Zur Beurteilung des Verhaltens werden hierbei die Experimente zu den einzelnen Fitnessfunktionen wiederholt und die Ergebnisse werden verglichen. Auf Grund der Tatsache, daß Populationsgröße und Knotenanzahl bei beiden Teilfunktionen gleichgehalten werden konnten, wird auch mit den beiden bekannten Werten im weiteren gearbeitet.

Allerdings werden die Ergebnisse der Teilfunktionen skaliert, bevor sie addiert werden können. Damit wird die Wichtung der Teilfunktionen nur noch von dem entsprechenden Parameter abhängig gemacht. Dieser Wichtungsparemeter, der auf Seite 54 beschrieben wurde, soll zusätzlich zu den anderen Experimenten untersucht werden. Hierzu werden die Wiederholungen der Experimente bei

den verschiedenen Einstellungen des Wichtungsparameters durchgeführt. Die Einstellungen des Parameters für die Experimente sind das Verhältnis der Fitnessfunktionen untereinander. Für die Experimente werden die folgenden Wichtungen gewählt: 1 : 9, 2 : 8, ... bis 9 : 1. Entsprechend wird der Wichtungsparameter mit den Werten 0, 1; 0, 2; 0, 3; ... bis 0, 9 besetzt. Somit sollten nicht nur die Kurvenverläufe mit den Einzelversuchen verglichen werden, sondern auch innerhalb der verschiedenen Wichtungen.

Damit kann das Verhalten aller Komponenten im Ablauf dargestellt und beurteilt werden. In diesem Zusammenhang kann man aber auch die durchgeführten Versuche als eine besondere Einstellung mit dem Wichtungsparameter betrachten. Die vorne durchgeführte Topologische Optimierung stellt sich als eine Einstellung im Verhältnis 1 : 0, die Optimierung der Ordnung als eine Einstellung im Verhältnis 0 : 1, also eine hundertprozentige Wichtung für jeweils eine der Seiten dar.

Die Vermutung bei diesen Versuchen liegt in der Hoffnung, bei einem bestimmten, experimentell zu ermittelnden Wert eine paritätische Nutzung beider Fitnessfunktionen zu erreichen, so daß ein Graph erzeugt wird, der in beiderlei Hinsicht optimal erscheint.

6.2.1 Variation der Wichtungen

In der ersten Versuchsserie werden in dem System lediglich die Wichtungen verändert. Wie erwartet verändern sich hierbei die Kurvenverläufe. Gesucht werden hier Ähnlichkeiten oder signifikante Abweichungen im Verlauf der Kurven. Diese Abweichungen sollten untersucht und beurteilt werden.

Da die größten Unterschiede bei den Kurven der Optimalen Werte auftreten, werden diese besonders betrachtet. Wie deutlich zu erkennen ist, liegt ein gleitender Übergang vom Graphen der Optimierung der Ordnung bis zum Graphen der Topologischen Optimierung vor. Dieser gleitende Übergang führt von einem Graphen mit deutlichem Steigungsverhalten und erkennbaren Phasenschema der Optimierung der Ordnung über zwitterartige Graphen bis zu Graphen mit dem dreistufigen Phasenverlauf der Optimierung der Topologie.

Man kann den Kurvenverlauf in drei Abschnitte unterteilen. Der erste Abschnitt beginnt bei einer Verteilung von 1 : 9 und endet mit der Verteilung 3 : 7. Dieser Abschnitt wird gekennzeichnet durch das deutliche Erscheinen der Charakteristik der Topologischen Optimierung. Der zweite Abschnitt, der mit einer Verteilung von 4 : 6 beginnt und mit einer Verteilung von 6 : 4 endet, kann mit dem Namen *Mischungsgraphen* bezeichnet werden, da hier weder die eine noch die andere Charakteristik deutlich erkennbar ist. Der dritte Abschnitt, beginnend bei einer Verteilung von 7 : 3 und bis zur Verteilung 9 : 1 laufend, ist der Abschnitt der Optimierung der Ordnung.

Die weiteren Untersuchungen betreffen die Kurvenabläufe und die erreichten Werte. Zuerst werden die Charakteristika der Kurven in den einzelnen Abschnitten untersucht. Im Abschluß wird dann der Werteverlauf im einzelnen

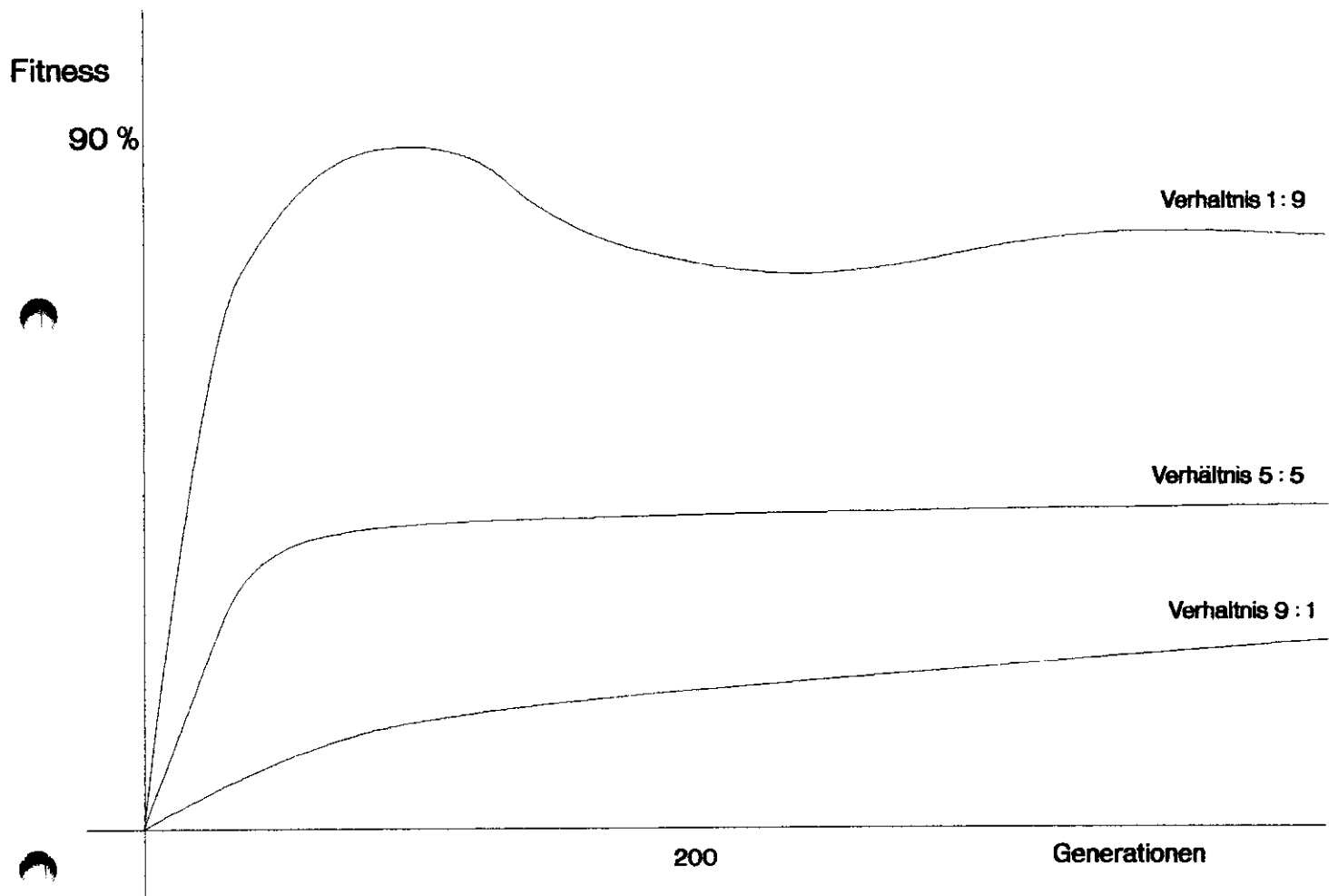


Abbildung 6.5: Darstellung des Verhaltens der optimalen Werte

untersucht.

6.2.2 Darstellung der Kurvencharakteristika

Besonders interessant sind hierbei die Graphen der gemischten Fitnessfunktionen. Diese Graphen treten bei einem Mischungsverhältnis von 4 : 6 bis 6 : 4 auf. Bei den übrigen Graphen überwiegt eine der Fitnessfunktionen, was sich deutlich in dem Ergebnisgraphen niederschlägt.

Betrachtung der Mischungsgraphen

An dieser Stelle soll nun das Verhalten dieser besonderen Mischungsgraphen dargestellt werden. Erstaunlich bei diesen Graphen ist die ausgeprägte Ineffizienz, sowohl in dem Erreichen eines hohen Fitnessniveaus als auch im Steigungsverhalten im Ablauf des Systems. Diese spezielle Ineffizienz äußert sich insbesondere darin, daß entweder ein schnelles Aussterben der gesamten Population oder aber häufiger ein Einpendeln auf einen relativ niedrigen Niveau stattfindet. Dieses niedrige Niveau liegt hierbei zwischen 40 und 60 Prozent erreichbarer Gesamtfitness und wird innerhalb von 20 bis 40 Generationen erreicht. Dabei beträgt der gesamte Fitnessgewinn maximal 30 bis 60 Punkte.

Eine Abänderung bei diesem sehr konstanten Verhalten ist nur selten bei dem Einhalten der erreichten Obergrenze möglich, hier kann es durch die Mutation durchaus auch zu einzelnen punktuellen Verbesserungen kommen, die aber nie mehr als zwei Fitnesspunkte betragen.

Bei der Analyse dieses Verhaltens lag der Verdacht nahe, daß die Ursache dieses Verhaltens in einer zu kleinen Population lag. Um dieses zu verifizieren, wurden Versuche mit erhöhten Populationsgrößen durchgeführt. Diese Versuche begannen bei einer Population von 20 Individuen und endeten bei einer Population von 50 Individuen. Hierbei wurde die Größe der Population in Schritten zu je 6 Individuen vergrößert.

Bei der Durchführung der Versuche stellt sich heraus, daß die Anzahl der Individuen auf den prinzipiellen Ablauf keinerlei Einfluß zu haben scheint. Es wurde lediglich die Anzahl der Generationen bis zum entgeltigen Erreichen des konstanten Zustandes verlängert. Innerhalb dieser Verlängerung stellt sich der Graph als eine wellenförmige Kurve dar. Allerdings wird innerhalb dieser Kurve der später erreichte maximale Wert nicht überschritten.

Es ist also für den Ablauf nicht von Relevanz, wieviele Individuen in der Population vorhanden sind. Damit ist zu vermuten, daß die Anzahl der Generationen nicht für das widrige Verhalten des Graphen verantwortlich sind.

Das Verhalten des Systems gleicht in seiner Art dem Verhalten bei dem Einsatz der Constraints.

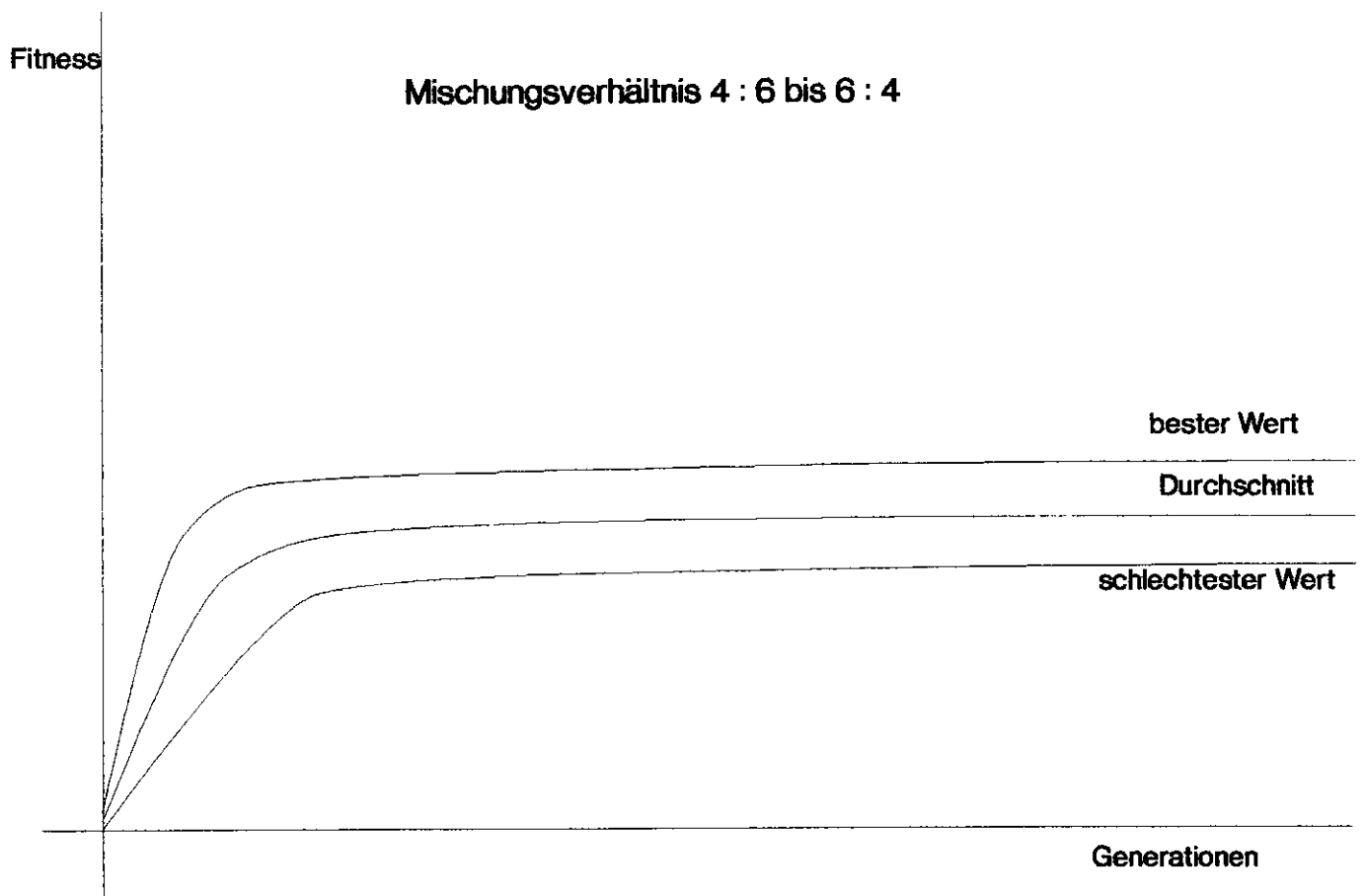


Abbildung 6.6: Verhalten des Mischgraphen in der zweiten Phase

Weitere Versuche zur Verbesserung der Fitness

Ein weiterer Versuch, dieses gleichförmige Verhalten zu verändern liegt in der Modifikation der Mutationswahrscheinlichkeit. Als weitere Versuchsserie wird also dieser Parameter wie in den vorigen Serien modifiziert, um so dieses negative Verhalten zu ändern.

Es wurde also mit einer festen Verteilung der Fitness von 4 : 6 eine Versuchsserie durchgeführt. Jedoch zeigte sich bei der Durchführung der Versuchsserie deutlich, daß die Mutationswahrscheinlichkeit auf die Kurve der optimalen Werte keinen nennenswerten Einfluß hat. Es gibt im Vergleich zu der obrigen Versuchsserie keine erhöhte Häufigkeit von Verbesserungen in dieser Kurve. Einen Einfluß hat diese erhöhte Mutationswahrscheinlichkeit auf die Kurve der schlechtesten Werte. Hier tritt der, schon auf Seite 73 und auf Seite 84 beschriebene Effekt der Auflösung der Kurve auf.

Diese Auflösung ist deutlich stärker, je höher die Mutationswahrscheinlichkeit ist. Dieses bedeutet, daß die Mutation als Förderungsmittel in diesem mittleren Bereich der Mischung der Fitnessfunktionen nicht oder nur sehr mangelhaft geeignet ist.

Es ist sehr wahrscheinlich, daß die gesuchte Einstellung zwischen den beiden Fitnessfunktionen nicht in dem mittleren Bereich liegt. Es muß also versucht werden, die optimale Einstellung im ersten oder im letzten Teil zu finden.

Verhalten der Kurve in der ersten Phase

Bei der Untersuchung dieser Phase kann man deutliche Parallelen zu den Ergebnissen bei den Untersuchungen der Topologischen Optimierung finden. Auch hier kann man die drei Phasen im Kurvenverlauf bestimmen und darstellen. Unterschiede bestehen jedoch in der Phase III des Ablaufs. Bei der Untersuchung der Kurven der Gesamtfunktion stellt man fest, daß diese Phase III nicht mehr wie vorne beschrieben werden kann. Während bei der Topologischen Optimierung die Kurve in der Phase III einen waagerechten Verlauf hatte, verläuft sie hier nun mit einer feststellbaren Steigung. Somit werden hier auch in der Phase III bessere Werte als in der Phase I erzeugt, vergleichbar mit der Optimierung der Ordnung. Insgesamt drängt sich der Eindruck auf, daß hier eine Vermengung der einzelnen Optimierungsmethoden stattfand, genau wie es bei dieser Kopplung beabsichtigt war.

Diese Phasen I und II stammen ihrer Form nach aus dem Bereich der Topologischen Optimierung, die Phase III jedoch entstammt in ihrer Form der Optimierung der Ordnung und wird dort als Phase B bezeichnet.

Dieses Verhalten und die Tatsache, daß die Population auch über eine große Anzahl von Generationen stabil erscheint, prädestiniert eine Einstellung aus diesem Bereich als mögliches Ziel der Untersuchungen.

Jedoch treten bei dem Versuch, gute Werte zu erreichen, Probleme auf, wie im weiteren beschrieben wird.

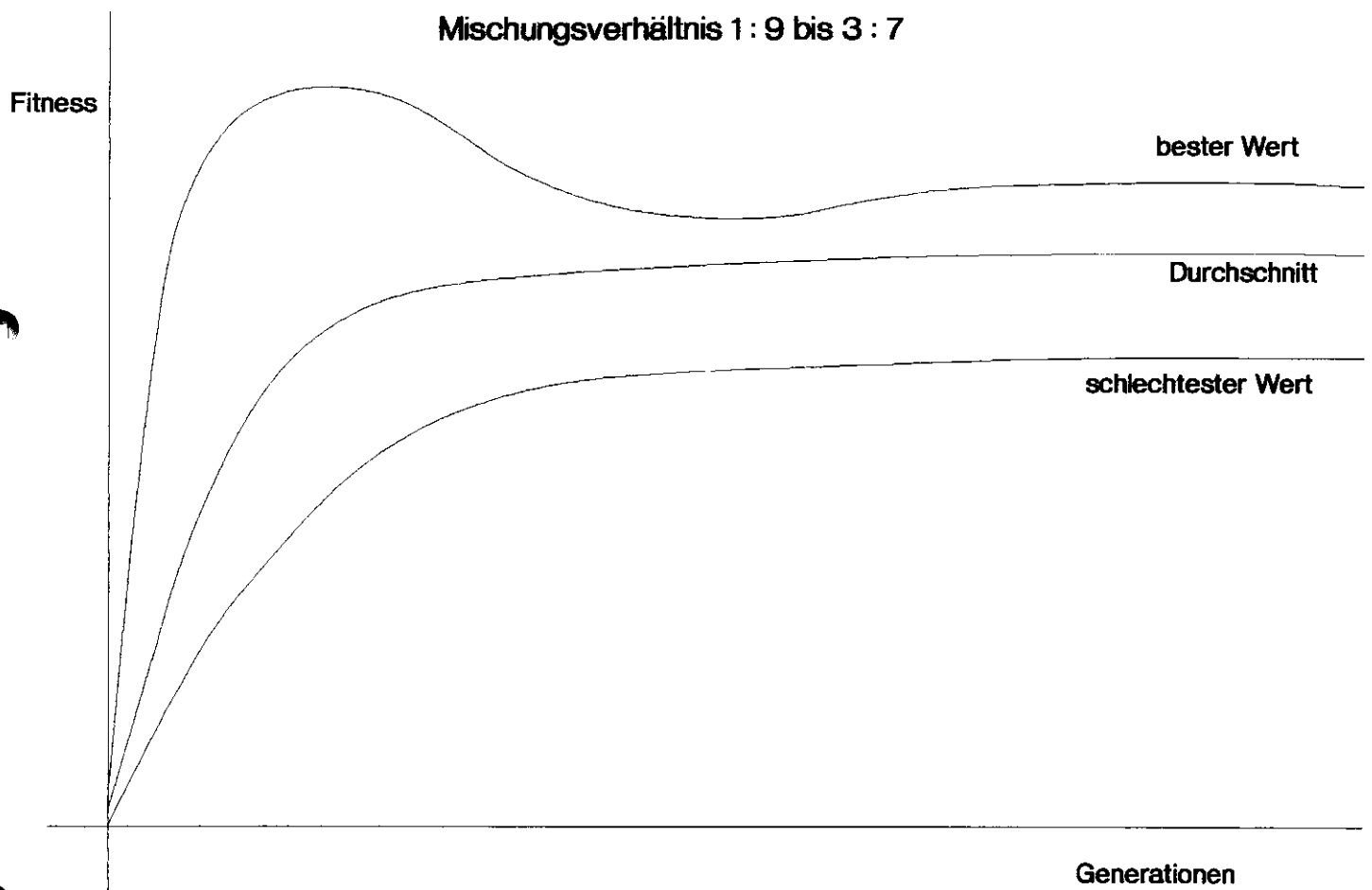


Abbildung 6.7: Kurvenverlauf in der ersten Phase

Verhalten der Kurve in der dritten Phase

In dieser dritten Phase stellt sich die Kurve wieder anders da. Sie gleicht in ihrer Form dem Ergebnis nicht der Optimierung der Ordnung, denn es gibt bestimmte, deutlich erkennbare Abweichungen. Diese Abweichungen wirken sich aber nicht auf das Gesamtergebnis aus.

Die erste Abweichung betrifft den Ablauf der Phase A'. In dieser Phase hat man im Vergleich zu der Optimierung der Ordnung einen deutlich höheren Anstieg festzustellen, außerdem verändert sich die Form des Graphen zu einem leichten, rechtsgerichteten Bogen. Die Phase A' erreicht jedoch nicht den Fitnesswert der Optimierung der Ordnung, sondern erreicht höchstens einen Wert um die 40 Prozent Fitness. In ihrer Form ähnelt diese neue Phase A' einer Mischung aus der Phase A und der Phase I.

Ein weiterer Unterschied liegt in der Form der Phase B'. Hier ist, im Gegensatz zu der vorigen Phase B eine leichte Steigung festzustellen. Es scheint, daß die Phase B' mehr der Phase A als der Phase B ähnelt.

Insgesamt ist aber der Kurvenverlauf von einer sehr kleinen, oft nur minimal erkennbaren Steigung geprägt, so daß von einem Optimierungsverhalten im engeren Sinne nicht die Rede sein kann. Es liegt die Vermutung nahe, daß die Optimierung nur durch den Einsatz des Generation Gapping erzeugt wurde. Dieser Mechanismus ist seit den Versuchen zu der Optimierung der Ordnung ständig aktiv.

6.2.3 Beschreibung des Werteverlaufes

Bei dem Verlauf der Werte stellt man fest, daß beginnend bei der ersten Phase die erreichte Fitness von einem Wert um die achzig Prozent kontinuierlich abnimmt und schließlich einen Wert um die vierzig Prozent erreicht. Dieser Abfall der Fitness wird in der folgenden Graphik dargestellt:

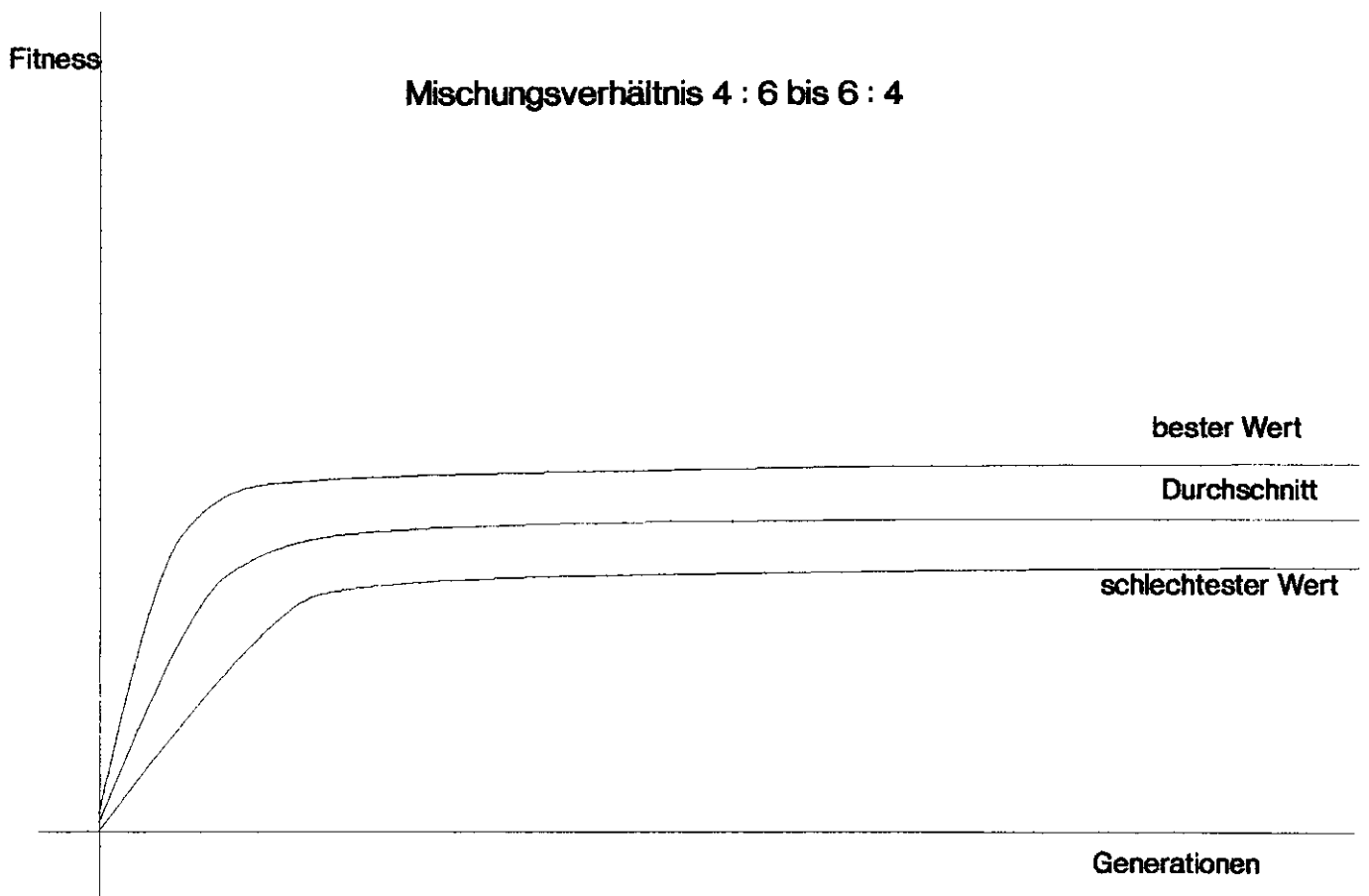
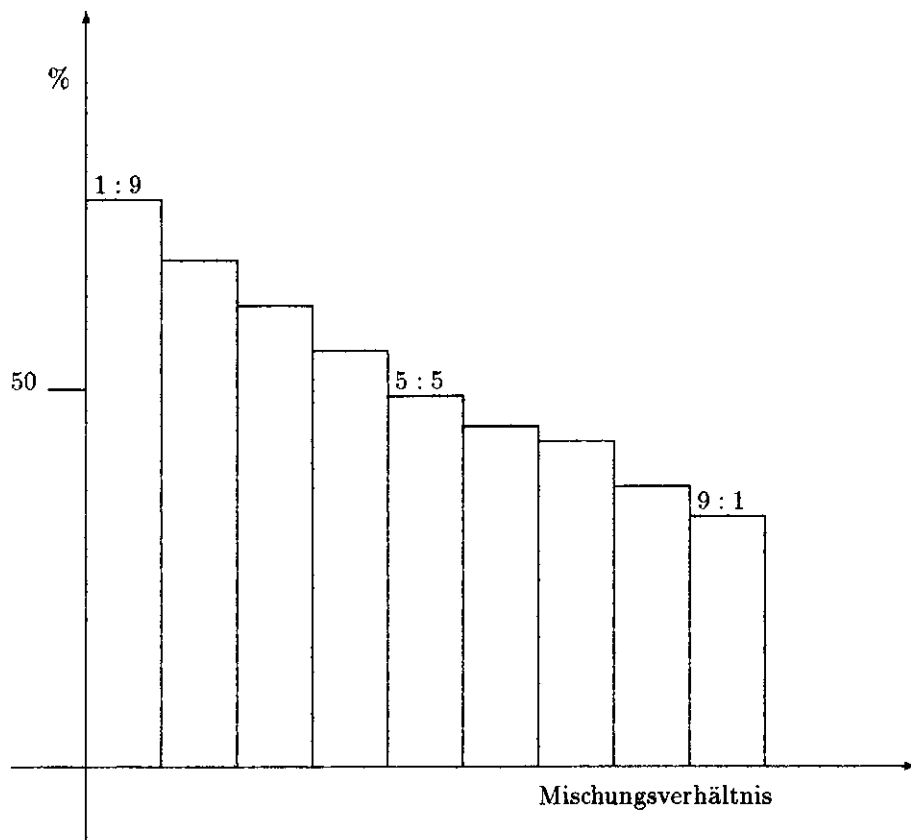


Abbildung 6.8: Kurvenverlauf in der dritten Phase



(Stufendiagramm)

Es scheint, daß der Verlust an Fitness in einem Zusammenhang mit der Parametereinstellung steht. Es wurde versucht, diesen Effekt durch Modifikation anderer Systemeinstellungen abzufangen. Bei einer näheren Betrachtung der vorhandenen Systemeinstellungen stellt man jedoch fest, daß die vorhandenen Mittel beschränkt sind:

- Der Einsatz von Constraints und die Korrekturfunktion erwiesen sich schon bei der Topologischen Optimierung als ungeeignet, bzw. wurden aus methodischen Gründen abgelehnt.
- Ebenso hat der Einsatz der Baumförderung nicht den erwünschten Erfolg gebracht.
- Die Größe der Population hat, wie schon bei speziellen Untersuchungen erkennbar, nichts mit der erreichten Fitness zu tun.

Auch die obligatorischen Versuche mit der Mutationswahrscheinlichkeit erbrachten keinerlei Veränderung in dem Verhalten.

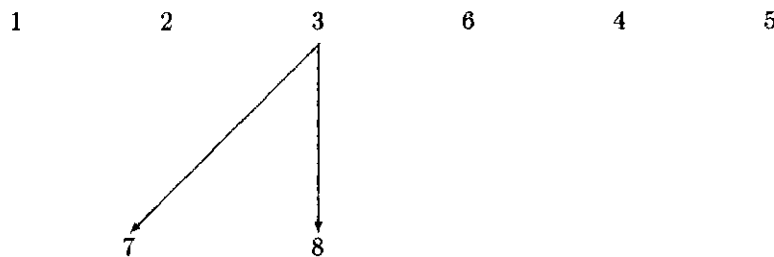
Dieses Verhalten, insbesondere der Abfall in der erreichten Fitness bei der Modifikation des Mischungsparameters zu einer Stärkung der Optimierung der Ordnung und der weiteren Versuche sind Indikatoren für die Richtigkeit der Vermutung, daß die gesuchte Einstellung der Parameter im ersten Bereich der Mischungen zu finden ist.

6.2.4 Darstellung der erzeugten Graphen

In diesem letzten Teil der Darstellung der Experimente sollen die, durch die Gesamtfunktion erzeugten Graphen exemplarisch vorgestellt werden. Entsprechende Darstellungen aus der Experimentalumgebung sind im Anhang enthalten.

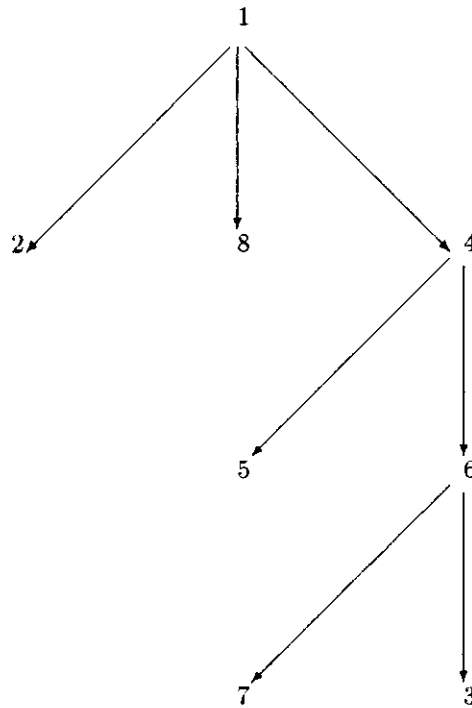
Besonders auffällig zeigt sich das Verhalten der Graphen im Bereich mit besonders guten Fitnesswerten. Hier stellt man bei einer genauen Kontrolle fest, daß das Erreichen von besonders guten Fitnesswerten einhergeht mit einem deutlichen Verlust an Kanten in den Graphen. Die besten Werte erreichten hierbei Graphen mit überdurchschnittlich vielen Wurzeln und wenigen Blättern.

Die erzeugten Graphen haben prinzipiell das folgende Aussehen:



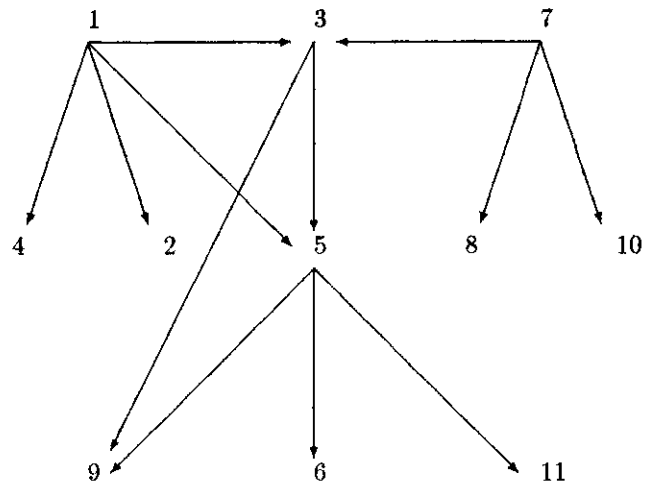
(Graph mit 8 Knoten)

Durch die spezielle Definition der Fitnessfunktion erreicht dieser Graph jedoch nicht eine Fitness über 90 Prozent. Ein anderer Graph wird bei der Mischung der Fitnessfunktionen erzeugt. Diese Graphen haben ein uneinheitliches Aussehen. Exemplarisch sei der folgende Graph dargestellt:



(Graph mit 8 Knoten)

Als letztes sei noch ein Graph mit schlechter Fitness dargestellt, wie er aus der dritten Phase der Mischung hervorgeht. Diese Darstellung ist lediglich als Information über das Verhalten bei dieser Parametereinstellung gedacht, mit dem deutlichen Hinweis, daß der folgende Graph eine Fitness von maximal 45 Prozent erreicht hat:



(Graph mit 11 Knoten)

Kapitel 7

Zusammenfassung

Wenn man die Ergebnisse der Experimente würdigen und diskutieren will, so muß man das, was man erreicht hat mit dem vergleichen, was erreicht werden oder was Ziel der Untersuchung sein sollte.

Die hier zu behandelnde Fragestellung unterteilte sich in drei Einzelkomplexe,

1. Optimierung der Ordnung,
2. Optimierung der Topologie, und
3. die Mischung der einzelnen Probleme zu einem gesamten Komplex.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden diese drei Komplexe gesondert betrachtet und bewertet. Bei diesen Einzelbetrachtungen interessieren die folgenden Fragestellungen besonders:

- Warum läuft die Optimierung so ab, wie sie hier beobachtet wurde ?
- Wie kann man das beobachtete Ergebnis interpretieren ?
- Was kann man mit diesem Ergebnis anfangen ?

Bei der ersten und bei der letzten Frage begibt man sich leider sehr schnell in das Reich der Spekulation. Gerade bei der Fragestellung nach dem Warum ist die Gefahr besonders hoch, den Boden der Tatsachen zu verlassen.

Diese Tatsachen sind die Ergebnisse der Experimente, die zu diesem Zweck durchgeführt wurden. Abschließend ist noch ein Vergleich mit anderen Ergebnissen aus der Literatur von Interesse. Hier werden die Titel von GOLDBERG[Gol89] und DAVIS[Dav91] ausschlaggebend sein.

Die folgende Betrachtung wird in chronologischer Reihenfolge durchgeführt.

7.1 Betrachtung der Topologischen Optimierung

Bei der Topologischen Optimierung liegt ein deutlicher Funktionsablauf vor. Dieser Ablauf ist typisch und taucht bei allen Variationen der Systemparametereinstellung auf. Er ist in Form und Ausprägung in Kapitel 5 beschrieben.

Wichtig für die Interpretation sind die verschiedenen Phasen. Phase I ist eine Phase mit überdurchschnittlich gutem Optimierungsverhalten. Danach pendelt sich das System bei einem sehr guten Wert über 90 Prozent ein. Dieser Einschwingprozess ist als durchaus natürlicher Prozess zu verstehen, ebenso wie die Tatsache, daß nie eine 100 prozentige Fitness erreicht wurde.

Dieses Ergebnis, wie auch das bei der Optimierung der Ordnung entspricht in seiner Form und Ausprägung den, in der Literatur veröffentlichten Ergebnissen. Auf Seite 66 wurde darauf hingewiesen, daß ein vergleichbarer Kurvenverlauf auch an anderer Stelle erzeugt wurde.

Speziell der stark steigende Kurvenverlauf in der Phase I ist sehr positiv. Die Tatsache, daß ein hundert prozentiges Optimum nicht erreicht wird, liegt in der Natur dieser Optimierungsprobleme und wird auch bei anderen Versuchen bemerkt. Insbesondere bei DAVIS[Dav91] wird dieser Effekt beschrieben.

Auch der Kurvenverlauf in der Phase II und III läßt sich erklären und deuten. Nachdem in der Phase I ein sehr gutes lokales Maximum aufgetreten ist, bringt jede Veränderung und jede weitere Generation eine Verschlechterung mit sich, da die guten Individuen zerstört werden. Diese Zerstörung der Fitness findet dabei solange statt, bis sie durch den generellen Drang zur Optimierung abgestoppt und wieder in eine steigende Tendenz umgewandelt wird. Dieser Prozess mit den ausgeprägten Schwingungen im ersten Teil und dem Einschwingprozess in der Phase III erscheint typisch und verständlich, wenn man versucht eine Parallele zu der Genetik zu finden. Auch hier wird das Optimum nicht erreicht, sondern nur sehr gute Individuen. Der Sinn liegt in einer möglichst hohen Flexibilität gegenüber Umweltveränderungen. Hinzu kommt, daß ein Einschwingprozess in der Natur, insbesondere in dem Bereich der Physik sehr häufig vorkommt, so daß der Verdacht nahe liegt, daß das System durchaus natürliche Vorgänge nachempfindet.

Wie schon bei [Gri91] festgestellt wurde, gibt dieses Ergebnis Hoffnung, daß der Einsatz der GENETISCHEN ALGORITHMEN insbesondere bei der Aufgabenstellung im Operations Research oder bei anderen Problemstellungen bei der Optimierung von Graphen eingesetzt werden kann. Diese Aufgabenstellung wurden u.a. von TARASZOW[Tar91] untersucht. Wichtig ist, daß es sich hier nicht um eine Optimierung im Graphen handelt. Die Probleme des Optimalen Weges¹ o.ä. können mit diesem System nicht gelöst werden.

Die erzeugten Graphen entsprechen zwar der Vorstellung von einem optimalen Aufbau, jedoch sind sie für den Einsatz in einer Datenstruktur nicht

¹z.B. Traveling Salesman

geeignet.

7.2 Betrachtung der Optimierung der Ordnung

Auch für diese Betrachtung wird die Darstellung der Kurvenverläufe in den vorigen Kapiteln zu Hilfe genommen. Und auch bei dieser Optimierung stimmt das Ergebnis mit den Ergebnissen ähnlicher Aufgabenstellungen aus der Literatur überein. Auch dieses wird bei [Dav91] beschrieben.

Hier liegt in der Phase A ein deutliches monotones Wachstum vor, welches auf eine stetige Optimierung schließen läßt. Diese stetige Optimierung führt mit einer relativ großen Sicherheit zu dem angepeilten Ziel. Allerdings ist diese Optimierung nicht so schnell wie das entsprechende Verfahren bei der Topologischen Optimierung. Trotzdem kann man bei dieser Phase von einer stabilen Optimierung sprechen.

In der Phase B ist wieder eine Einpendelung zu beobachten, die der in den Phasen II und III entspricht. Auch hier wird ein positiver Zustand nahe des Optimums von den Mechanismen der GENETISCHEN ALGORITHMEN zerstört.

Unter Einbeziehung der einschlägigen Literatur ist für diese Optimierung festzustellen, daß sie in ihrer Form durchaus typische Abläufe erzeugt², und damit genau wie die Topologische Optimierung mit GENETISCHEN ALGORITHMEN ein sicheres Verfahren darstellt.

Der erzeugte Graph zeigt zwar eine recht gute, grobe Ordnung, jedoch muß man folgendes bedenken: Eine Ordnung ist nur dann akzeptabel, wenn alle Elemente dieser Ordnung genügen. Die meisten erzeugten Graphen müßten also nachbehandelt, d.h. mit anderen Algorithmen bearbeitet werden. Trotzdem erscheint es möglich, GENETISCHE ALGORITHMEN als Vorphase eines Sortieralgorithmuses einzusetzen.

7.3 Mischung zu einer Gesamtfitness

Ganz anders stellt sich die Gesamtfitness dar. Durch die Mischung der an sich gutmütigen Einzelfitnessfunktionen entsteht eine Gesamtfitness, die in ihrer Fitness einen Wert über 75 Prozent nur sehr selten überschreitet.

Es muß bei der Mischung folgendes beachtet werden: Die einzelnen Fitnessfunktionen fragen verschiedene Eigenschaften im Graphen ab, es ist möglich, daß die Eigenschaft der Ordnung der topologisch optimalen Struktur schadet. Insbesondere der vollständige Graph³ stellt für die Topologie ein Optimum dar, während er für eine Ordnung eine sehr schlechte Struktur darstellt.

²vgl. [Dav91], S.69

³vgl. S. 76

So ist es nicht verwunderlich, daß bei einer, auch nur annähernden Gleichgewichtung der Teilfunktionen ein schlechtes Ergebnis entsteht.

GOLDBERG[Gol89] schreibt, daß es ausgesprochen schwer ist, zwei Fitnessfunktionen miteinander zu mischen. Dieses gilt auch in Fällen, bei denen die Fitnessfunktionen nicht eine ähnliche Eigenschaft optimieren, also sie nur peripher beeinflussen, so wie bei diesen Versuchen.

Denn die topologische Eigenschaft der minimalen Weglänge im Graphen und die Eigenschaft einer Ordnung scheinen miteinander keine Gemeinsamkeiten zu haben. Trotzdem erscheint es, daß eine Mischung der Einzelfitnessfunktionen kein hinreichend gutes Ergebnis bringt, sich diese Teilfitnessfunktionen also ausschließen.

Um eine Verbesserung des Gesamtergebnisses zu erreichen, also die für den Verlauf nachteilige Mischung zu verhindern, muß man eine Fitnessfunktion aufstellen, die nur aus einer Optimierung besteht.

Ein entsprechender Ansatz kann ein Kapitel von MEHLHORN[Meh88] liefern. Dort schreibt der Autor von einer Selbstorganisierenden Datenstruktur, die sich auf Grund der Zugriffshäufigkeit neu aufbaut. Es handelt sich hierbei um einen gewichteten Baum⁴, der sich je nach Zugriffshäufigkeit bei jedem Durchlauf neu bildet. Hierbei liegt die Topologie des Baumes fest vor, diese ist entweder ein *Binärbaum* oder eine *Lineare Liste*. Es werden lediglich die Elemente nach der Zugriffshäufigkeit hin neu in dieser Struktur verteilt. MEHLHORN spricht in diesem Zusammenhang von einer sich amortisierenden Datenstruktur.

Bei genauerem Betrachten dieses Ansatzes stellt man jedoch fest, daß hier lediglich eine feste Struktur einer bestimmten Ordnung unterworfen wird. Dieser Ansatz ist nicht mit der hier praktizierten Optimierung der Ordnung zu vergleichen, da hier die Topologische Struktur variabel gehalten wird⁵, sondern es handelt sich um ein Anordnungsproblem. Diese Anordnungsprobleme sind an anderer Stelle untersucht worden und hier brachten die GENETISCHEN ALGORITHMEN gute Ergebnisse⁶.

⁴vgl. [Meh88] S.147

⁵obwohl sie bei der Feststellung der Ordnung nicht berücksichtigt wird

⁶vgl. [Gue91]

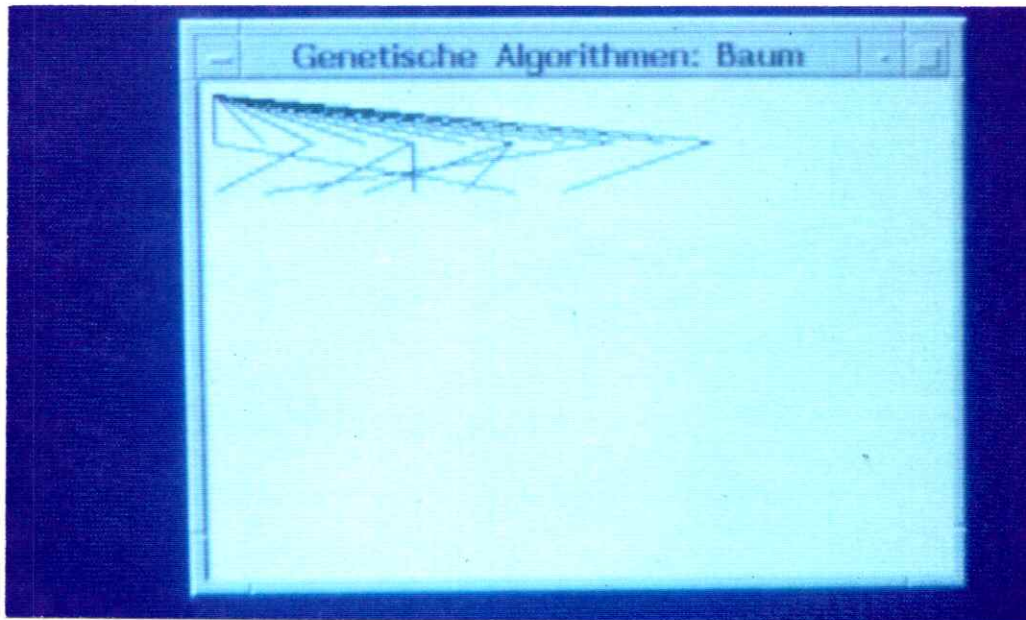


Abbildung 7.1: Beispiel eines erzeugten Baumes

7.4 Einige besondere Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden einige, besonders auffällige Ergebnisse der Untersuchungen dokumentiert. Es handelt sich hierbei um Aufnahmen, die während den Versuchen von dem Monitor genommen wurden.

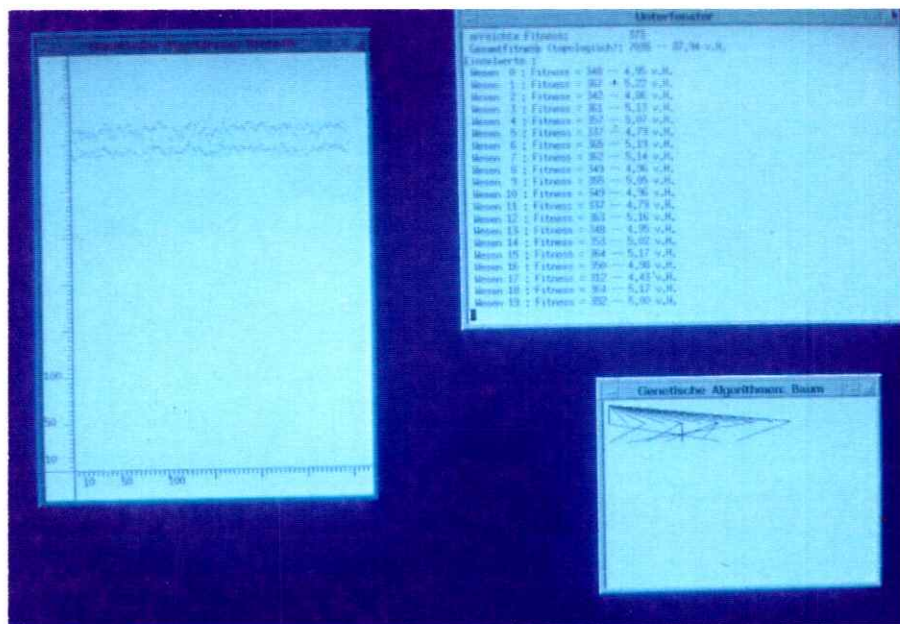


Abbildung 7.2: Versuchablauf bei der Topologischen Optimierung

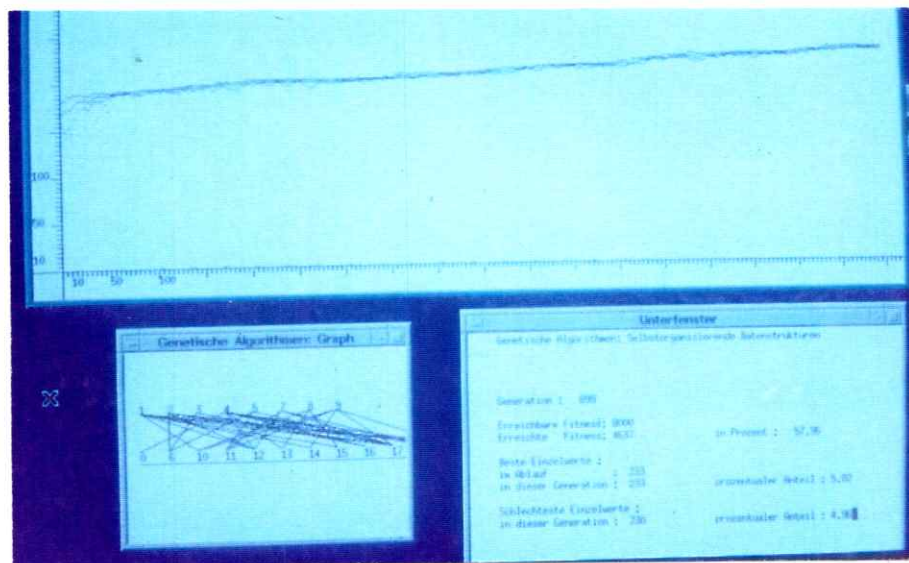


Abbildung 7.3: Darstellung einer optimierten Ordnung

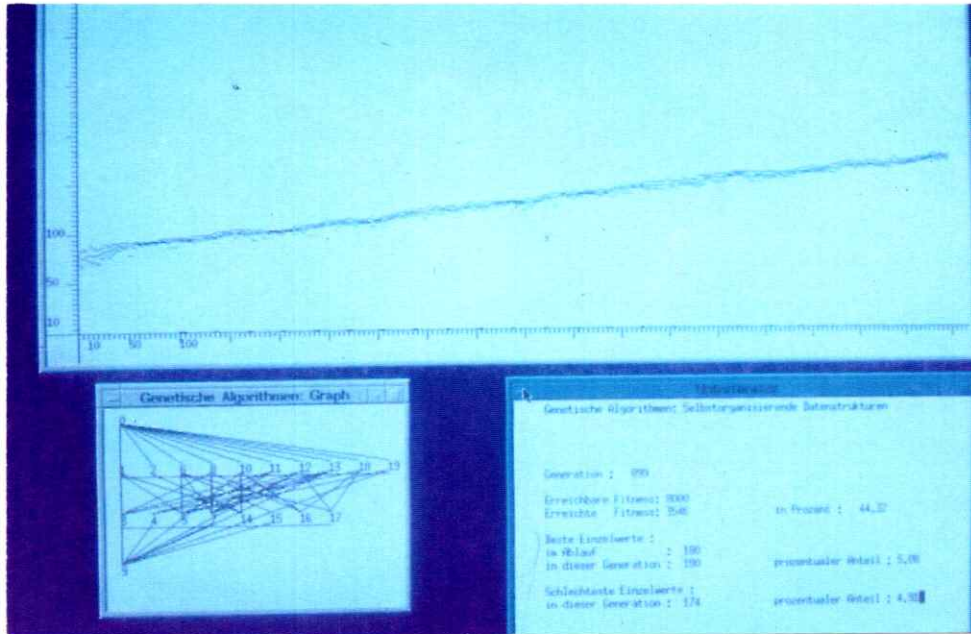


Abbildung 7.4: Versuchablauf bei der Optimierung der Ordnung

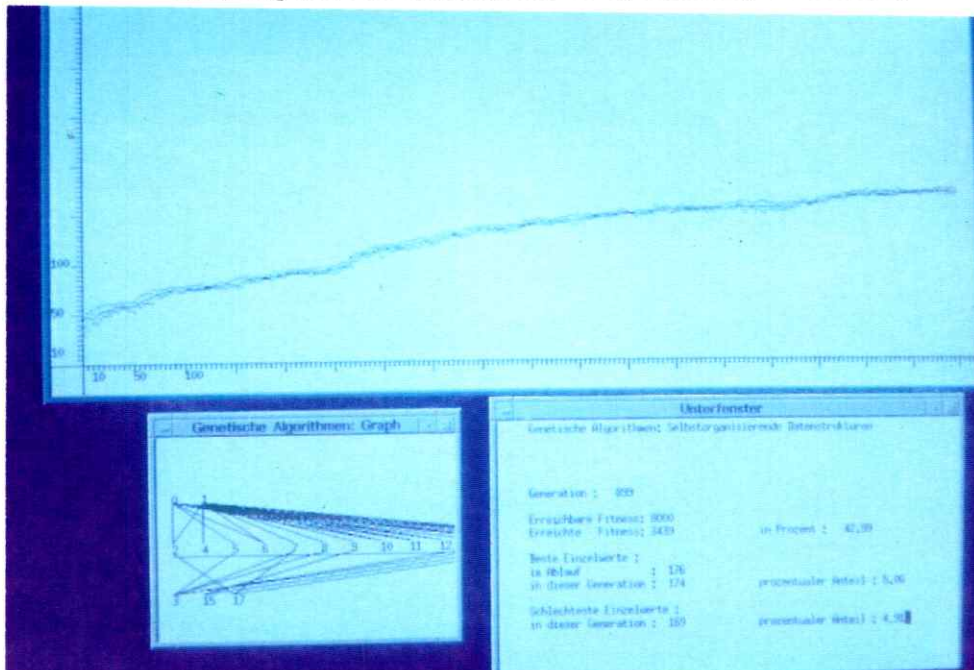


Abbildung 7.5: Gesamtfitnessfunktion, Verteilung 1 : 9

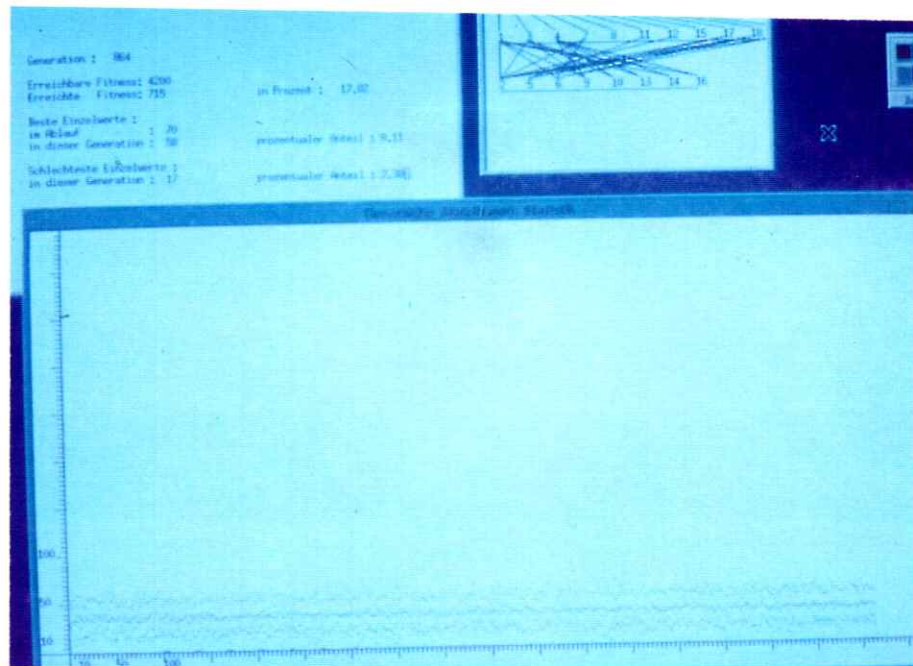


Abbildung 7.6: Gesamtfitnessfunktion, Verteilung 5 : 5

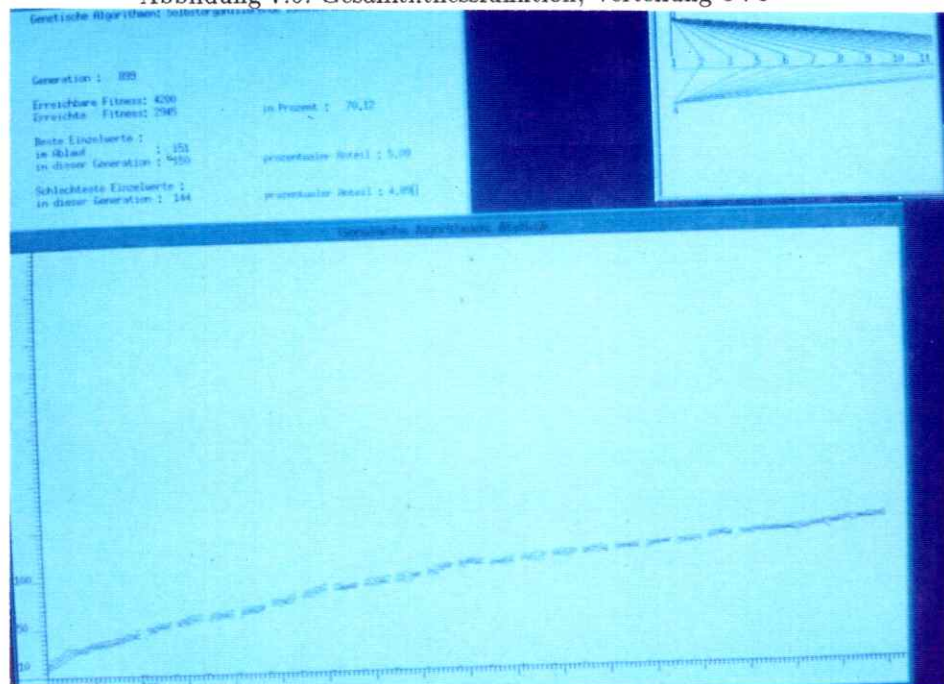


Abbildung 7.7: Gesamtfitnessfunktion, Verteilung 9 : 1

7.5 Abschließende Bemerkung

Nach Abschluß der Versuche und Auswertung der Ergebnisse läßt sich folgendes feststellen:

Das Ziel, durch Optimierung der Ordnung und Topologischer Optimierung eine sich selber organisierende Datenstruktur zu erzeugen, bzw. eine Möglichkeit zur Entwicklung einer solchen aufzuzeigen, wurde nicht erreicht.

Erreicht wurde der Aufbau eines Systems zur Topologischen Optimierung und zur Optimierung der Ordnung. Allerdings kann man mit diesen Ergebnissen sehr viel anfangen. So lassen sich die Erkenntnisse der Topologischen Optimierung z.B. im Bereich Fertigungstechnik bei der Optimierung der Produktionswege nutzen.

Man kann sicherlich Selbstorganisierende Datenstrukturen erzeugen, indem man dem Ansatz von MEHLHORN[Meh88] folgt, wie oben beschrieben wurde.

Jedoch stellt sich die Frage, ob der Effekt nicht auch durch andere Algorithmen erzeugt werden kann.

Denn gerade bei der langsamen Optimierung ist ein entsprechend programmierter konventioneller Algorithmus den GENETISCHEN ALGORITHMEN überlegen.

Auch scheint es kaum sinnvoll, GENETISCHE ALGORITHMEN zum Sortieren von Daten einzusetzen, da die konventionell programmierten Sortieralgorithmen mehr als deutlich diesem System überlegen sind. So läßt sich sagen, daß GENETISCHE ALGORITHMEN für den Einsatz bei Selbstorganisierenden Datenstrukturen nicht sonderlich geeignet sind. Mit den hier erzielten Ergebnissen ist es höchst zweifelhaft, ob es möglich sein wird, mit Hilfe von GENETISCHEN ALGORITHMEN eine Selbstorganisierende Datenstruktur zu erzeugen.