

Optimierung der Kosten für die Produktionslogistik bei der Fertigungssegmentierung mittels genetischer Algorithmen

Prof. Dr. sc. techn. Alfred Förster, Dr.-Ing. Thomas Fischer,
Dipl.-Inf. Jens Arnold, Dipl.-Ing. Anja Fröhner
Technische Universität Chemnitz

1 Problemstellung

Unternehmen und Fertigungen lassen sich nur bis zu einer bestimmten Größe (Zahl der Fertigungsplätze, Zahl der Werker, Größe der Fläche) kostengünstig leiten und steuern.

Wird diese Größe überschritten, ist es erforderlich, solche Unternehmen und Fertigungen in kleinere Einheiten zu strukturieren bzw. zu segmentieren. Dieses Problem stellt sich für viele kleine und mittlere Unternehmen nicht. Allerdings kann für solche Unternehmen eine prozeßspezifische Strukturierung bzw. Segmentierung erforderlich werden, wenn die Standortanforderungen ihrer Arbeitsplätze und Prozesse so unterschiedlich sind, daß ihre Gruppierung und Anordnung danach nicht nur aus Gründen des Arbeits- und Umweltschutzes sondern auch aus Kostengründen geboten ist.

Die Strukturierung und Segmentierung der Unternehmen und ihrer Fertigungen kann in vielfältiger Weise und in unterschiedlicher Tiefe erfolgen. Dabei stehen sich

- konventionelle und integrierte
- tayloristische und ganzheitliche
- technik- und humanzentrierte
- verfahrens- und produkt- bzw. objektorientierte

Ansätze gegenüber.

Eine verfahrensorientierte Strukturierung verspricht eine

- hohe Spezialisierung der Ressourcen und damit eine an die einzelne Arbeitsverrichtung gemessene hohe Produktivität,
- eine Zusammenfassung sich ersetzender Ressourcen, und damit ihre hohe kapazitive Auslastung und
- eine hohe Resistenz der Strukturen gegenüber Änderungen des Produktionssortiments und der Produktionsprozesse.

Die produkt- bzw. objektorientierten Strukturierung führt zu einer Ausrichtung der Fertigung und ihrer Peripherien auf Produkt- und Kundengruppen.

Dabei werden die ganzheitlichen Geschäftsprozesse - beginnend mit der Aquirierung der Kundenaufträge bis zum Versand der Produkte - betrachtet. Die Zielsetzung einer solchen Strukturierung besteht in

- einer schnellen Reaktion (Verkürzung der Auftragsdurchlaufzeiten) und Anpassung des Unternehmens auf die Kundenwünsche und Markterfordernisse,
- einer Erhöhung der Autonomie der einzelnen Segmente und ihrer Produktverantwortung durch die Reduzierung der Schnittstellen und Hierarchieebenen,
- einer höheren Motivation der Arbeitskräfte durch Identifikation mit dem Produkt, Gruppenarbeit und Einbeziehung von Planungs- und Steuerungsaufgaben.

Im Idealfall realisiert jede objektorientierte Struktureinheit autonom ein eigenes Produktionsprogramm von Produktgruppen, Produkten oder Produktteilen (z.B. Baugruppen, Teilefamilien).

Neben diesen Vorteilen führt aber die Produkt- und Objektorientierung solcher Strukturen auch dazu, daß sie nur bedingt resistent gegen gravierende Änderungen des Produktsortimentes bzw. der Marktbedingungen sind.

Die Struktur der Unternehmen und ihrer Fertigungen ist auch Ausdruck ihrer Unternehmensphilosophie und nicht nur die strukturelle Umsetzung einer optimalen Logistikkonzeption, selbst wenn man unter Logistik mehr versteht als das effektive Zusammenwirken von Transport-, Umschlag- und Lagerprozessen.

Allerdings besitzt eine primär logistikausgerichtete Strukturierung dann ihre Berechtigung, wenn der Anteil der Logistik an den Gesamtfertigungskosten nicht marginal ist, und die Qualität des Logistikprozesses auf die Produktivität des Fertigungsprozesses signifikante Auswirkungen hat. Dies ist im Maschinenbau mit seinen relativ großen und massigen Produkten, langen Prozeßketten und großen Produktionssortimenten der Fall.

2 Verfahren zur Strukturierung der Fertigung

Das Ergebnis der Fertigungssegmentierung ist die in Fertigungssegmente und –gruppen (Teilsysteme) gegliederte Fertigung (System) mit den zu integrierenden Funktionen und Ressourcen ihrer peripheren Bereiche.

Das Ziel des Strukturierungsprozesses besteht darin

- ein bestehendes System so in Teilsysteme zu splitten oder
- die Elemente eines Systems so zu Teilsystemen zu integrieren,

daß die durch die Strukturierung bedingten Kosten bei Einhaltung der gegebenen Restriktionen minimiert werden. Dies ist im allgemeinen dann der Fall, wenn

- das in Segmente strukturierte System nicht mehr Fertigungsplätze und andere Ressourcen erfordert als das nicht strukturierte System,
- die Transportintensität zwischen den Segmenten minimal ist,
- in den Segmenten höherwertige Strukturtypen (gerichtete Punkt-, Linien-, Netzstrukturen) oder Formen einer integrierten Arbeitsorganisation mit einer größeren Produktivität realisierbar sind /FÖRS-83, FÖRS-96/.

Bei einer verfahrensorientierten Segmentierung läßt sich nur das erste Partialziel gut erreichen. Wird eine produkt- bzw. objektorientierte Segmentierung auf der Basis gegebener Produktionsprogramme und Produktspektren für jedes Fertigungssegment durchgeführt, so lassen sich nur dann alle Partialziele realisieren, wenn es keine Schnittmengen zwischen den Fertigungsplatzarten (Gruppe sich ersetzender Fertigungsplätze) der einzelnen Segmente gibt. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist in realen Planungsaufgaben minimal. Die gleichzeitige, zumindest näherungsweise, Realisierung aller Partialziele ist nur möglich, wenn im Strukturierungsprozeß selbst die partiellen Produktionsprogramme der einzelnen Segmente bestimmt werden, d.h., es erfolgt eine simultane Dimensionierung und Strukturierung des Produktionsprogrammes und des Fertigungssystems in zwei Hierarchieebenen /FISC-98/. Dafür stehen die in **Bild 1** dargestellten rechnergestützten Strukturierungsverfahren zur Verfügung.

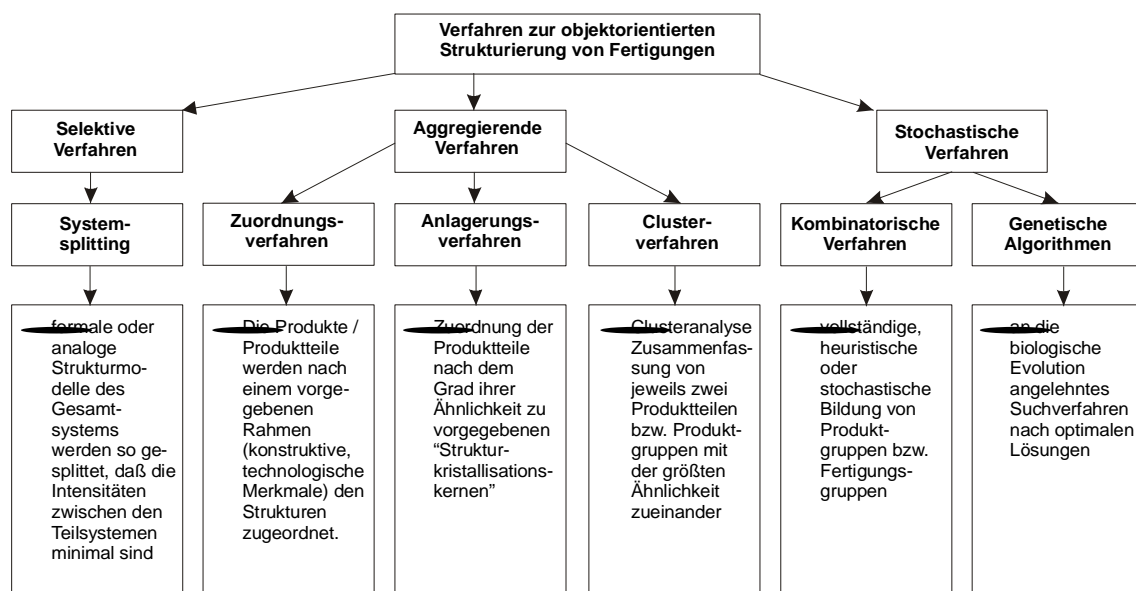


Bild 1: Verfahren zur objektorientierten Strukturierung von Fertigungen

Zur Verfolgung aller Partialziele der Strukturierung sind die selektiven kaum und die aggregierenden Verfahren nur bedingt geeignet. Die Lösungsqualität hängt bei diesem Verfahren in hohem Maße von der subjektiven Auswahl der „Kristallisationskerne“ und der Ähnlichkeitsgrade ab. Die kombinatorischen Verfahren auf der Basis von Produktteilen erlauben zwar die Verfolgung aller Partialziele, sind aber selbst bei Einsatz moderner Rechentechnik bei umfangreichen Produktsortimenten nicht einsetzbar, da die Anzahl der möglichen Lösungen mit der Anzahl der Produktteile exponentiell steigt.

Einen vielversprechenden Lösungsansatz für eine objektorientierte Strukturierung unter Beachtung der praktischen Restriktionen bezüglich Rechenzeit und hinreichender Optimalität der Lösung stellen genetische Algorithmen dar, auf deren Basis der Programmkomplex „CAD-FAIF 4.2“ entwickelt wurde. Er ist Bestandteil des am Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme der TU Chemnitz konzipierten komplexen Fabrikplanungssystems „CAD-FAIF“ /FAIF-96/.

3 Dimensionierung und Strukturierung von Fertigungen mittels genetischer Algorithmen

3.1 Methodische Grundlagen der genetischen Algorithmen

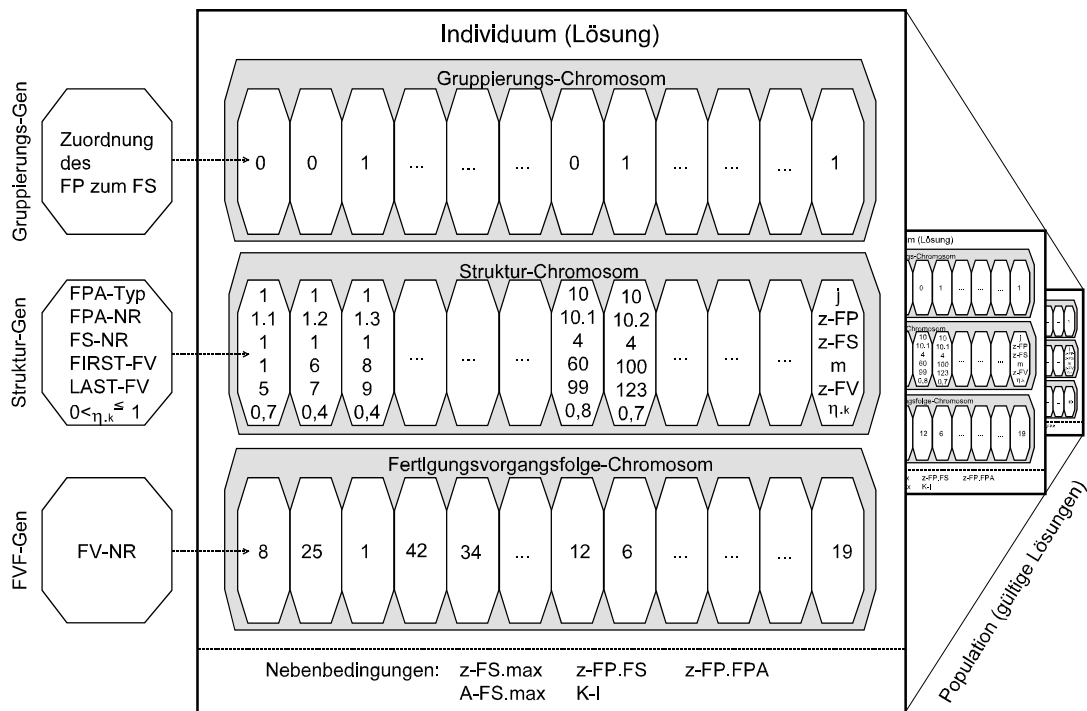
Genetische Algorithmen ermöglichen, in Abhängigkeit von einem vom Benutzer zu definierenden Ziel die Ergebnisse eines Simulationslaufes zu interpretieren und daraus automatisch Schlußfolgerungen für die Veränderung der Eingangsparameter des nächsten Simulationslaufes abzuleiten. Dabei nutzen sie den bestehenden funktionellen Zusammenhang zwischen dem Zustand und den Parametern eines (natürlichen oder künstlichen) Systems und seiner Leistungsfähigkeit. Die stochastische Optimierung mittels Genetischer Algorithmen beruht auf dem biologischen Prinzip der Evolution: „Gute“ *Individuen* (Lösungen) überleben und geben ihre *Gene* (Variablen) an die nächste *Generation* (Lösungsmenge) durch Rekombination und Mutation weiter. Die theoretische Fundierung der Konvergenz eines solchen Iterationsprozesses wurde bereits in den siebziger Jahren gezeigt /HOLL-75/ und in zahlreichen Anwendungen als praktikabel anerkannt /SCHA-89/, /FORR-93/, /ARNO-95/. Die heute verfügbare, leistungsfähige Rechentechnik macht die insbesondere für hohe Suchraumdimensionen mit großer Anzahl zu beachtender Nebenbedingungen prädestinierten Genetischen Algorithmen interessant zur Optimierung von Fertigungsstrukturen und -abläufen. „Aus der Sicht des Mathematikers, Informatikers und Ingenieurs stellt die Evolution ein extrem leistungstarkes Optimierungsverfahren dar.“ /SCHÖ-94/.

Die Anwendung Genetischer Algorithmen verlangt die Formulierung der Problemstellung mit Begriffen der biologischen Evolution.

3.2 Codierung der Problemstellung

Ein Fertigungssystem (FS) besteht aus Fertigungsplätzen (FP), die bei Typgleichheit zu Fertigungsplatzarten (FPA) zusammengefaßt werden. Die Fertigungsaufgaben eines FP werden durch die Fertigungsvorgänge (FV) beschrieben, die in der zeitlichen Aufeinanderfolge der zu realisierenden Fertigungsaufträge die Fertigungsvorgangsfolge (FVF) bilden.

Eine Fertigungsstruktur wird mit dem Gruppierungs-, Struktur- Fertigungsvorgangsfolgechromosom (auch Parametervektor) beschrieben, die in diesem Tripel eine Lösung codieren. Die Komponenten dieser Chromosomen werden als *Gene* bezeichnet. Ihre möglichen Wertebelegungen sind die *Allele*. Dieser Chromosomensatz spannt den Suchraum S (auch Parameterraum) auf, in dem der Teilmenge P (*Population*) unter Beachtung der Nebenbedingungen (Lösungsrestriktionen) alle gültigen Lösungen I (*Individuen*) aus der Menge S (*Suchraum*) angehören (**Bild 2**).



Legende:

A-FS.max	maximale (verfügbare)Fläche je Fertigungssystem	FIRST-FV	Zeiger auf ersten Fertigungsvorgang eines Fertigungsplatzes
FP	Fertigungsplatz	FPA-NR	Nummer der Fertigungsplatzart
FPA-Typ	Typ der Fertigungsplatzart (Ordnungsbegriff)	FS	Fertigungssystem
FS-NR	Nummer des Fertigungssystems	FV-NR	Nummer des Fertigungsvorgangs
η_k	kapazitiver Nutzungsgrad	K-I	Investitionskosten
LAST-FV	Zeiger auf letzten Fertigungsvorgang eines Fertigungsplatzes	z-FP.FPA	Zahl der Fertigungsplätze der Fertigungsplatzart
z-FP.FS	Zahl der Fertigungsplätze des Fertigungssystems (maximal zulässig)	z-FS.max	Zahl der (maximal zu bildenden) Fertigungssysteme

Bild 2: Codierung des Strukturierungsproblems

Die einzelnen Chromosomen besitzen nachfolgend beschriebene Charakteristika und Struktur.

Die Gene des **Gruppierungschromosoms** korrespondieren in ihrer Position mit denen des Strukturchromosoms und können nur die diskreten Allele 0 und 1 annehmen. Eine 0 bedeutet, dieser und der im Reihenfolgevektor unmittelbar nachfolgende Fertigungsplatz gehören zu einem Fertigungssystem. Eine 1 gibt an, daß dieser Fertigungsplatz der letzte Fertigungsplatz eines Fertigungssystems (in Hauptflußrichtung) ist und der im Reihenfolgevektor unmittelbar folgende Fertigungsplatz als erster (in Hauptflußrichtung) in einem neuen Fertigungssystem steht.

In dem **Strukturchromosom** wird die topologische Anordnung der Fertigungsplätze codiert. Es repräsentiert also das Reihenfolgeproblem. Steht der Fertigungsplatz 1.1 vor dem Fertigungsplatz 1.2 im Chromosom, so entspricht diese Reihenfolge der Hauptflußrichtung innerhalb des Fertigungssystems.

Ein Struktur-Gen besteht aus dem FPA-Typ, der eindeutig den einzelnen Fertigungsplatz kennzeichnenden FPA-NR und der FS-NR, die eine eventuell vordefinierte Gruppierung einzelner Fertigungsplätze bestimmt. FIRST-FV und LAST-FV sind Verweise auf die diesem Fertigungsplatz zugewiesenen Fertigungsvorgänge im Fertigungsvorgangsfolgechromosom. Der kapazitive Nutzungsgrad η_K ist eine reelle Zahl zwischen 0 (kein Fertigungsvorgang zugeordnet) und 1 (Fertigungsplatz ist voll ausgelastet).

Die Länge dieses Vektors (Anzahl der Gene) entspricht der durch die statische Dimensionierung bestimmten minimal zur Fertigung des gegebenen Produktionsprogrammes notwendigen Anzahl Fertigungsplätze plus einem definierten Mehrbedarf. Damit kann die Optimierung Fertigungsplätze hinzufügen, falls die damit verbundene Einsparung an Transportaufwand den Gesamtaufwand senkt.

Die Länge des **Fertigungsvorgangsfolgechromosoms** entspricht der Anzahl der Fertigungsvorgänge aller Fertigungsaufträge. Jeder Fertigungsvorgang wird durch eine eindeutige Nummer (Allel) bestimmt, mit der der entsprechende Fertigungsauftrag, die Stellung des Vorgangs im Arbeitsplan sowie die benötigte Kapazität verwaltet wird. Alle Gene mit den Fertigungsvorgängen eines Fertigungsplatzes stehen in Reihenfolge hintereinander. Das Gen des ersten und des letzten Fertigungsvorganges einer so zugeordneten Menge wird durch die im Strukturchromosom enthaltenen Verweise FIRST-FV und LAST-FV referenziert.

Um bei der Erzeugung neuer Individuen das Einhalten der Nebenbedingungen

- Maximale Zahl der zu bildenden Fertigungssysteme ($z\text{-FS.max}$),
- Zahl der Fertigungsplätze je Fertigungssystem ($z\text{-FP.FS}$),
- Zahl der Fertigungsplätze je Fertigungsplatzart ($z\text{-FP.FPA}$),

- Maximale Fläche eines Fertigungssystems (A-FS.max) und
- Maximale Investitionskosten (K-I)

garantieren zu können, muß jedem Individuum noch ein entsprechender Vektor für die Speicherung dieser Werte zugeordnet werden.

Die Güte einer gefundenen Lösung wird durch die Fitneß F (Zielfunktionswert) beschrieben. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Auffassungen im Alltag steht hier Fitneß nicht positiv für Leistungsfähigkeit, sondern negativ für Aufwendungen (Kosten), d.h. kleine Fitneßwerte sind das angestrebte Ziel.

Generiert der evolutionäre Optimierungsprozeß ungültige Lösungen, also Individuen, die nicht zur Population P gehören, so erhalten diese Individuen einen überproportional hohen Aufwandswert (*Strafenfitneß*).

Individuen, die gewissermaßen parallel untersucht werden und dabei direkt konkurrieren, bilden jeweils eine Generation (**Bild 3**).

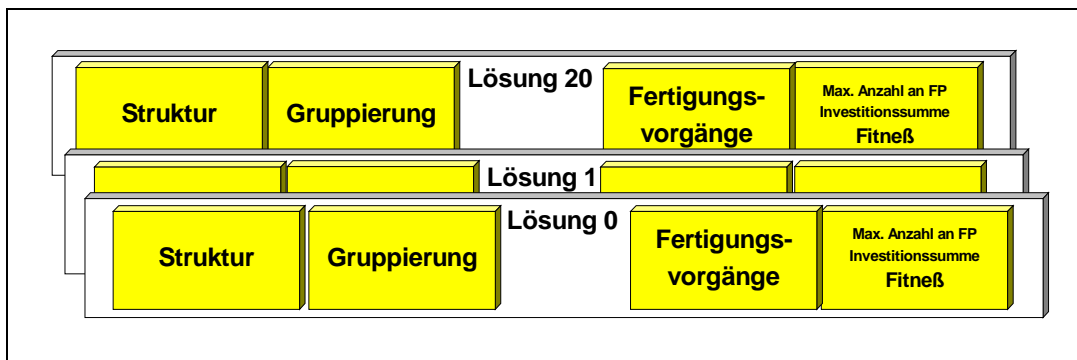


Bild 3: Bestandteile einer Generation

Die in der Literatur angegebenen Werte für die Wahl der Generationsgröße $N=30$ /SCHA-89/, $N=50$ /SCHÖ-94/, $N>50$ /KINN-94/ sind für praxisrelevante Dimensionen der Fertigungsstrukturierung aus Gründen des Speicher- und Rechenaufwandes nicht praktikabel. Mit der Beschränkung der Generationsgröße auf $N=21$ Individuen ist ein guter Kompromiß zwischen Konvergenzgeschwindigkeit der Fitneßwerte gegen das Optimum und dem Speicher- und Rechenaufwand für Personalcomputer gefunden worden.

Die 21 Individuen einer Generation setzen sich aus 6 Eltern und den von ihnen erzeugten 15 Kindern zusammen. Das Verhältnis 6/15 von Eltern zu Kindern hat sich als besonders günstig für den Selektionsdruck erwiesen.

Ein hoher Selektionsdruck vergrößert die Konvergenzgeschwindigkeit, senkt aber die Wahrscheinlichkeit, das globale Optimum zu finden und vergrößert die Gefahr, in einem lokalen Optimum „hängenzubleiben“.

3.3 Schritte des evolutionären Optimierungsalgorithmus

In **Bild 4** sind die einzelnen Schritte des Optimierungsalgorithmus dargestellt.

Im Schritt 1 wird eine Anfangslösung, die beliebig schlecht sein kann, an den Algorithmus in $LsgMenge[0]$ übergeben. Diese Anfangslösung muß allerdings alle Nebenbedingungen (z.B. Anzahl der Fertigungsplätze pro Fertigungssystem), die generell gelten, einhalten. Zur Beschleunigung der Konvergenz des Evolutionsprozesses kann eine (suboptimale) Anfangslösung nach einem Aggregationsverfahren gemäß Bild 1 vorbestimmt und an den genetischen Algorithmus übergeben werden.

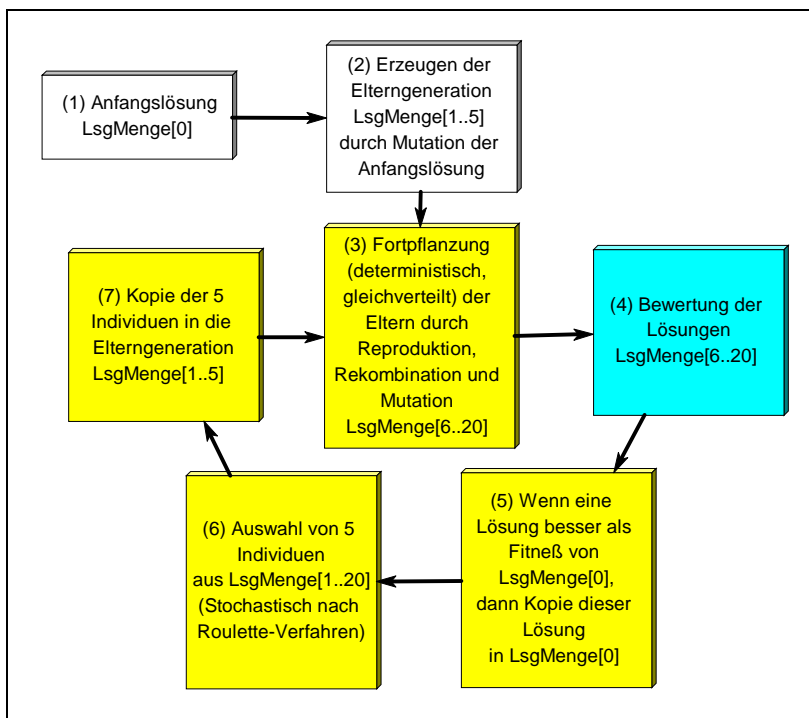


Bild 4: Der evolutionäre Optimierungsalgorithmus

Im Schritt 2 werden die weiteren Individuen der Elterngeneration $LsgMenge[1..5]$ durch den genetischen Operator *Mutation* erzeugt.

In Schritt 3 werden aus den 5 Eltern $LsgMenge[1..5]$ plus dem bisher besten gefundenen Individuum $LsgMenge[0]$ die Kinder generiert. Dabei wird für jedes Chromosom ein eigener genetischer Operator (*Reproduktion, Rekombination, Mutation*) angewandt. Die Wahrscheinlichkeiten, mit denen die jeweiligen Operatoren gewählt werden, sind im Programm festgelegt. Die Eltern werden deterministisch, gleichverteilt zur Fortpflanzung herangezogen.

Im Schritt 4 erfolgt mit der Aufwandsberechnung die Bestimmung der Fitneßwerte für alle Kinder.

Schritt 5 überprüft, ob eine Verringerung der Fitneß eingetreten ist. Wenn dies der Fall ist, wird die bessere Lösung in LsgMenge [0] kopiert. In LsgMenge[0] steht immer die bisher beste gefundene Lösung mit dem geringsten Aufwandswert (kleinste Fitneß).

Schritt 6 wählt aus den 20 Individuen der LsgMenge[1..20] 5 Eltern für die nächste Generation aus. Das geschieht in Abhängigkeit von der relativen Verbesserung der Fitneß nach dem *Roulette-Verfahren* oder dem *Linearen Ranking*.

Da eine Minimierungsaufgabe vorliegt (Aufwand für den Transport und die Fertigungsplätze sollen minimal werden), wird der schlechteste Fitneßwert der Generation (höchster Aufwand) von den Fitneßwerten der anderen Individuen dieser Generation subtrahiert. Die „neuen“ Fitneßwerte der einzelnen Lösungen bestimmen die Sektorgrößen der Individuen auf dem Roulette-Rad. Die Wahrscheinlichkeit, daß eine zufällig geworfene „Kugel“ in einen „großen“ Sektor fällt, also ein „gutes“ Individuum überlebt, ist demzufolge höher, als daß ein „schlechtes“ Individuum seine Gene weitervererben kann.

Der Vorteil des Roulette-Verfahrens besteht darin, daß „gute“ Individuen bei der Vererbung bevorzugt werden, ohne allerdings „schlechtere“ Individuen völlig außer Acht zu lassen. Der Selektionsdruck (die mittlere Wahrscheinlichkeit, mit der ein Individuum in Abhängigkeit von seiner Fitneß ausgewählt wird) dieses Verfahrens ist relativ gering.

Ist die absolute Differenz der Fitneßwerte zwischen dem besten und dem schlechtesten Individuum einer Generation kleiner als 1/10 der letzten Fitneßverringerung, wird jedem Individuum, unabhängig von seiner tatsächlichen Fitneß, eine Fitneß zugeordnet, die direkt proportional zu seiner Rangordnung in der Generation ist. Dieses *Lineare Ranking-Verfahren* erhöht den Selektionsdruck und damit die Konvergenzgeschwindigkeit gegen das tatsächliche Optimum in seiner vermutlich bereits gefundenen, suboptimalen Umgebung.

In Schritt 7 werden nun die in Schritt 6 selektierten Individuen in die Elterngeneration LsgMenge[1..5] kopiert.

Für die Wahl des Abbruchzeitpunktes liefert die Natur keinen Hinweis. Die biologische Evolution ist ein (möglicherweise unendlich) fortdauernder Prozeß ohne erkennbares Endziel.

Der Grund liegt im Sinn der Evolution: Anpassung der Lebewesen an sich permanent ändernde Umweltbedingungen. Da unsere zu optimierenden künstlichen Systeme aber ein konkret definiertes, funktionales Verhalten in einer mehr oder weniger bekannten „Umwelt“ zeigen, sollte der Suchprozeß nach dem Auffinden eines/des Optimums terminieren. Wie kann das erreicht werden?

- Der Abbruch erfolgt, wenn über eine bestimmte Anzahl Generationen keine Verbesserung des Fitneßwertes eingetreten ist.
- Der Abbruch erfolgt nach einer bestimmten Anzahl an Generationen. Die bis dahin errechnete beste Lösung wird als das Optimum angesehen.

Beide Varianten kommen im realisierten Programm in der Form zur Anwendung, daß der Nutzer jederzeit den Evolutionsprozeß unterbrechen kann. Ansonsten beendet das Programm nach einer vorgebbaren maximalen Anzahl Generationen seit der letzten Fitneßverbesserung automatisch die Optimierung.

3.4 Die Lösungsbewertung

Um zu entscheiden, ob eine von den Genetischen Algorithmen erzeugte Lösung gültig ist und ob sie als „gutes“ Individuum überlebt oder als „schlechtes“ Individuum abstirbt, wird diese Lösung in drei grundlegenden Schritten untersucht:

1. Ausschluß des Individuums wegen

- Überschreitung der zulässigen Investitionskosten,
- Überschreitung der zulässigen Zahl der Fertigungssysteme,
- Verletzung vordefinierter Gruppierung von Fertigungsplätzen und
- Zukauf nichtzulässiger Fertigungsplatzarten.

Dieser Schritt erfolgt im Genetischen Algorithmus und garantiert, daß an den Bewerber nur Individuen übergeben werden, die diese Restriktionen einhalten.

2. Verurteilung des Individuums wegen

- Überschreitung der zulässigen Zahl der Fertigungsplätze je Fertigungssystem,
- Überschreitung der zulässigen Zahl der Fertigungsplätze je Fertigungsplatzart und
- Überschreitung der zulässigen maximale Fläche eines Fertigungssystems.

Diese Individuen werden vom Bewerber mit einer Strafenfitneß (extrem schlechter Fitneßwert) belegt und fallen somit als Elter aus.

3. Beurteilung des Individuums bezüglich

- Aufwendungen in Hauptflußrichtung,
- Aufwendungen entgegen Hauptflußrichtung,
- Aufwendungen bei Wechsel zwischen verschiedenen Fertigungssystemen,
- Aufwendungen durch Nichtbelegung von Fertigungsplätzen im Fertigungssystem und
- Aufwendungen durch Nichtbelegung in Reihenfolge der Fertigungsplätzen im Fertigungssystem.

Diese Individuen werden vom Bewerber mit einer Fitneß belegt, deren Höhe über den Anteil am Rouletteverfahren (**Bild 4**, Schritt 6) entscheidet und damit über die Wahrscheinlichkeit, daß dieses Individuum als Eltern der nächsten Generation fungiert.

Die Bewertung erfolgt an Hand des Zielfunktionswertes (Fitneß) der konkreten Lösung (Individuum). Die Basis für die Berechnung des strukturbedingten Fitneßwertes ist die Anzahl der Transportlose.

Bezugsgröße für den Aufwand der im System enthaltenen Ausrüstungen bildet die Zahl der Fertigungsplätze. Die Berechnung des Fitneßwertes für die Fertigungsplätze ist notwendig, um einzuschätzen, ob durch den Zukauf eines Fertigungsplatzes tatsächlich eine Verbesserung der Struktur eingetreten ist, oder ob der Zukauf tatsächlich teurer ist als die Strukturverbesserung, die durch diesen Zukauf erzielt wurde.

Die Fitneß F wird nach folgender Beziehung bestimmt:

$$F = F_{\text{Struktur}} + F_{\text{Fertigungsplätze}} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$F_{\text{Struktur}} = F_{\text{HFR}} + F_{\text{HFR,e}} + F_{\text{FSW}} + F_{\text{NB.FS}} + F_{\text{NB.RF}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Tabelle 1: Fitneßarten

Formelzeichen	Bedeutung	Inhalte
F	Fitneß der Lösung	Zielfunktionswert der Lösung
F_{FSW}	Fitneß bei Fertigungssystemwechseln	Aufwand, der durch Transport, Steuerung und Organisation je Flußbeziehung bei Wechsel zwischen des Systemen verursacht wird
F_{HFR}	Fitneß in Hauptflußrichtung	Aufwand, der durch Transport, Steuerung und Organisation je Flußbeziehung in Hauptflußrichtung verursacht wird
$F_{\text{HFR,e}}$	Fitneß entgegen Hauptflußrichtung	Aufwand, der durch Transport, Steuerung und Organisation je Flußbeziehung entgegen Hauptflußrichtung verursacht wird
$F_{\text{NB.FS}}$	Fitneß durch Nichtbelegung von Fertigungsplätzen in Fertigungssystemen	Aufwand, der durch Transport, Steuerung und Organisation je Flußbeziehung durch Nichtbelegung von Fertigungsplätzen im Fertigungssystem je Fertigungsvorgangsfolge verursacht wird
$F_{\text{NB.RF}}$	Fitneß durch Nichtbelegen von Fertigungsplätzen in der Reihenfolge der Fertigungsplätze des Fertigungssystems	Aufwand, der durch Transport, Steuerung und Organisation je Flußbeziehung durch Nichtbelegung von Fertigungsplätzen in Reihenfolge des Fertigungssystems je Fertigungsvorgangsfolge verursacht wird
$F_{\text{Fertigungsplätze}}$	Fitneß für die Fertigungsplätze	Aufwand, der durch die einzelnen Fertigungsplätze verursacht wird (Lohn, Abschreibung usw.)
F_{Struktur}	Fitneß für die Struktur	Aufwand, der durch die Struktur der Fertigungssysteme verursacht wird

Nach der Bewertung und der Auswahl der neuen Eltern erfolgt eine erneute Optimierung.

4 Anwendungsbeispiel

In der mechanischen Fertigung eines Unternehmens werden ca. 400 verschiedene Teilearten gefertigt.

Die derzeitige Anordnung der Fertigungsplätze erfolgte ursprünglich verfahrensorientiert in der Reihenfolge Drehen - Räumen - Verzahnen, wobei eine zweireihige Aufstellvariante der Maschinen realisiert wurde, wie aus dem Strukturgraf **Bild 5** ersichtlich ist. Im Rahmen der Überplanung soll eine Restrukturierung der Fertigung mit der Zielrichtung

- Einführung von Gruppenarbeit,
 - Reduzierung des Transportaufwandes,
 - Verbesserung der organisatorischen Beherrschung des Auftragsdurchlaufes und des Transportaufwandes
- erfolgen.

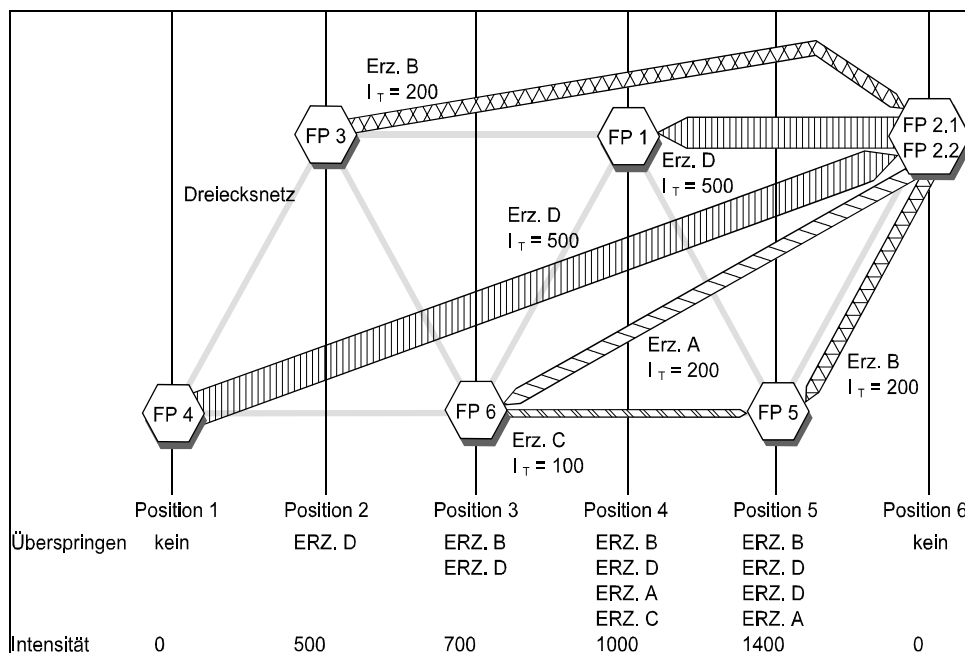


Bild 5: Strukturgraf ungesplittete Fertigung (Ausgangszustand)

Die 400 Teilearten wurden entsprechend ihrer Fertigungsvorgangsfolgen und der Zuordnung zu den betrachteten sechs Fertigungsplatzarten vorsortiert und in vier Teilegruppen mit jeweils einem Repräsentanten eingeordnet. Dieses definitiv eingeeengte Produktionsprogramm ist mit den geplanten Fertigungsmengen sowie den zugehörigen Fertigungsvorgangsfolgen in **Tabelle 2** dargestellt.

Auf der Grundlage dieser Ausgangswerte erfolgt die statische Dimensionierung für die zu untersuchenden Ressourcen. Wie **Tabelle 3** zeigt, sind bei einem maximal zulässigen 2-Schicht-System nur für die FPA 2 zwei Fertigungsplätze erforderlich. Alle anderen

Fertigungsplatzarten benötigen jeweils einen Fertigungsplatz zur Realisierung der anfallenden Fertigungsaufgaben.

Tabelle 2: Teilearten mit FVF

NR-TA	TA	n-FM [Stck.]	n_l [Stck.]	NR-FV	NR-FPA	t-FP [min.]
1	A	10000	50	10	2	10
				20	6	5
2	B	10000	50	10	3	10
				20	2	10
				30	5	5
3	C	10000	100	10	6	5
				20	5	5
4	D	10000	20	10	4	10
				20	2	10
				30	1	10

Tabelle 3: Fertigungsplatzarten

NR-FPA	FPA	z-FV	z-L	T-FP	z-S	z-FP	ETA-k
1	Zsch 500 x 8	1	500	1667	1	1	0,93
2	ZFWZ 500 x 8	3	900	5000	2	2	0,74
3	DLZ 400 x 1000	1	200	1667	1	1	0,93
4	DF 2 LNC	1	500	1667	1	1	0,93
5	ZGW 250 x 6	2	300	1667	1	1	0,93
6	RSIZ 20 x 1250	2	300	1667	1	1	0,93

Abgeleitet aus der Zielsetzung sowie den betrieblichen Bedingungen gelten für die Strukturierung die Restriktionen aus **Tabelle 4**.

Tabelle 4: Restriktionen für die Strukturierung

Restriktion	Kurzzeichen	Wert
Maximale Zahl der zu bildenden Fertigungssysteme	z-FS.max	2
Zahl der Fertigungsplätze je Fertigungssystem	z-FP.FS	7
Zahl der Fertigungsplätze je Fertigungsplatzart	z-FP.FPA	3
Maximale Fläche eines Fertigungssystems	A-FS.max [m ²]	300
Maximale Investitionskosten	K-I [DM]	0

Für die Bewertung der Lösungen sind Basiswerte aus betrieblichen Untersuchungen verfügbar. Die Angaben erfolgen in relativen Geldeinheiten (RGE) und widerspiegeln in ihrem Verhältnis zueinander die praktisch notwendigen Aufwendungen zur Organisation und Realisierung der losweisen Weitergabe (**Tabelle 5**).

Tabelle 5: Basisgrößen der Bewertung

Basisgröße	Kurzzeichen	Wert [RGE]
Aufwendungen in Hauptflußrichtung,	f-HFR	1
Aufwendungen entgegen Hauptflußrichtung,	f-HFR.e	2
Aufwendungen bei Wechsel zwischen verschiedenen Fertigungssystemen,	F-FSW	10
Aufwendungen durch Nichtbelegung von Fertigungsplätzen im Fertigungssystem und	F-NB.FS	4
Aufwendungen durch Nichtbelegung in Reihenfolge der Fertigungsplätzen im Fertigungssystem	F-NB.RF	1

Mit diesen Informationen wurde eine Strukturierung mit dem Programm CAD-FAIF 4.2 /NEST-96/ durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 6** und **Bild 6** zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 6: Entwicklung der Fitneßwerte

Generation	F	F-FP f = 1	F-Struktur	z-TL.HFR f = 1	z-TL.HFR.e f = 2	z-TL.NB.FS f = 4	z-TL.NB.RF f = 1	z-TL.FSW f = 10
0	19407	7	19400	800	900	3300	3600	
5	15124	7	20419	681	681	2133	1162	338
13	14995	7	15117	484	884	2112	968	332
36	11911	7	14104	784	684	1712	584	232
68	10843	7	10936	1468		1712	200	232
92	6743	7	10836	1168	500	912	600	32
98	6143	7	6136	1468	200	912	300	32
104	5843	7	5836	1668		912	200	32
392	5475	7	5468	1684		856	200	16
1771	5245	7	5238	1694		821	200	6
2135	5107	7	5100	1700		800	200	

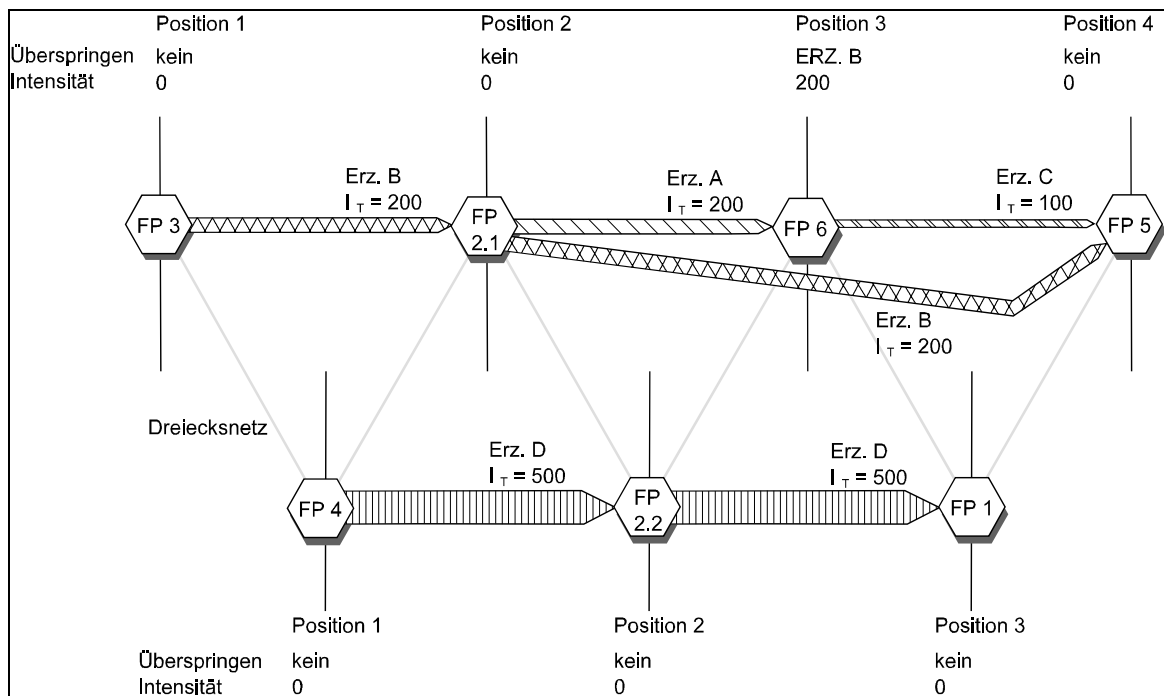


Bild 6: Strukturgraph der gebildeten Fertigungssysteme (Strukturierungsergebnis)

Aus dem Strukturgraph ist deutlich erkennbar, daß zwei völlig autonome Systeme mit gerichteter Linien- bzw. Netzstruktur gebildet werden können. Dieses Ergebnis liegt bereits in der 104. Generation prinzipiell vor. Die nachfolgenden und wesentlich zeitaufwendigeren Berechnungen verbessern nur die transportlose Zuordnung zu den Fertigungsplätzen 2.1 und 2.2. Eine höherwertige Grundstruktur ist aber unter der vor-

liegenden Voraussetzung einer richtigen statischen Dimensionierung nicht mehr durch die Umordnung von einzelnen Losen erzielbar. Dies wird durch die Dimensionierungsergebnisse für die Fertigungsplatzarten der gebildeten Systeme (**Tabelle 7**) ersichtlich, die mit den statischen Ergebnissen (Tabelle 3) identisch sind.

Tabelle 7: Fertigungssysteme nach der Strukturierung

Fertigungssystem	Reihenfolge	lfd.Nr. FPA	lfd.Nr. FP/FPA	Nr-FPA	Fertigungsplatzart	ETA-k	Fläche des FP
1	1	4	1	4	DF 2 LNC	0,93	56,07
1	2	2	2	2	ZFWZ 500 x 8	0,49	27,34
1	3	1	1	1	Zsch 500 x 8	0,93	30,51
1					Gesamt		113,92
2	1	3	1	3	DLZ 400 x 1000	0,93	33,05
2	2	2	1	2	ZFWZ 500 x 8	0,98	27,34
2	3	6	1	6	RSIZ 20 x 1250	0,93	77,30
2	4	5	1	5	ZGW 250 x 6	0,93	21,94
2					Gesamt		159,62

Ein Vergleich der Basislösung mit dem Ergebnis der Strukturierung (Tabelle 6) ergibt eine Verbesserung der Fitneß, d. h. eine Aufwandsreduzierung auf ca. 25 % gegenüber dem bisherigen Stand. Diese Verbesserung ist in RGE quantifizierbar und kann in dieser Form sehr gut für eine Nutzwertanalyse der gesamten Planungslösung zugrunde gelegt werden.

Die Ergebnisse der Strukturierung eröffnen für die weitere Gestaltung der Fertigung alle Möglichkeiten, die gerichteten Strukturen eigen sind.

Die Berechnungen erforderten auf einem PC 486/DX 66 vom Erzeugen der Ausgangslösung mit manueller Strukturierung (CAD-FAIF 4.2.1) und anschließender automatischer Strukturierung mit genetischen Algorithmen (CAD-FAIF 4.2.2) bis zur 104. Generation ca. 40 Minuten, bis zum Abbruch mit der 2135. Generation ca. 24 Stunden.

5. Ergebnisse

Erste Versuche haben gezeigt, daß mit den Genetischen Algorithmen bessere Strukturen erzielt werden als mit den herkömmlichen Verfahren. Nach 60.000 bewerteten Lösungen liegt die Verbesserung des Gesamtaufwandes für große Produktionsprogramme (ca. 100 Fertigungsplätze, über 40000 Fertigungslose) im Mittel bei etwa 20 %. Bei den Versuchen hat sich gezeigt, daß es bezüglich der Rechenzeit günstig ist, die Individuen

der ersten Generation (Urgeneration) mit Hilfe der „klassischen“ Verfahren zu erzeugen.

Weitere Untersuchungen sollen Aufschluß über die Wirkung der Aufwandsfaktoren und deren Relationen, insbesondere auf das Strukturierungsziel bringen. Weiterhin wird die Stabilität der Lösung gegenüber der Änderung von Produktionsprogrammen und -sortimenten untersucht, um so zu Qualitätsmerkmalen der geplanten Struktur zu gelangen. In der Umkehrung der Fragestellung wird ebenfalls die Eignung bestehender Fertigungsstrukturen bezüglich der Zuordnung von Fertigungsaufträgen zu diesen im Rahmen der kurz- und mittelfristigen Produktionsplanung untersucht.

Mit einer verbesserten Feineinstellung der Ausführungswahrscheinlichkeiten für die genetischen Operatoren ist eine schnellere Konvergenz des evolutionären Optimierungsprozesses zu erwarten.

6 Literatur

- /ARNO-95/ Arnold, J.: Die Verwendung von Evolutionären Algorithmen bei der Optimierung von Fertigungssystemen.- Diplomarbeit TU Chemnitz-Zwickau, Fakultät für Informatik.- Chemnitz 1995
- /FAIF-96/ CAD-FAIF - Rechnergestütztes Fabrikplanungs- und Projektierungssystem. Dokumentation zur Einsatzcharakteristik. - TU Chemnitz, 1996
- /FISC-98/ Fischer, Th: Integrierte simultane humanzentrierte Dimensionierung und Strukturierung von Logistikstrukturen der Produktion im Rahmen der Fabrikplanung. Vortrag zum Forschungskolloquium 7/98 am IBF, Tu Chemnitz, Chemnitz, 16.10.1998
- /FORR-93/ Forrest, S. (Hrsg.): Proceedings of the fifth international conference on Genetic Algorithms.- Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Mateo 1993
- /FÖRS-83/ Förster, A.: Strukturierung von Teileflußsystemen der Fertigung im Maschinenbau.- Dissertation B, TH Karl-Marx-Stadt 1983
- /FÖRS-96/ Förster, A.: Standardfertigungssysteme – Zielsetzung, Definition und Modellierung. Forschungsbericht des Innovationskollegs „Bildung eines vernetzten Logistik- und Simulationszentrums“, TU Chemnitz, 1996
- /HOLL-75/ Holland, J.H.:Adaptation in natural and artifical systems.-The University of Michigan Press, Ann Arbor 1975
- /KINN-94/ Kinnebrock, W.: Optimierung mit genetischen und selektiven Algorithmen.- R. Oldenbourg Verlag GmbH, München 1994
- /NEST-96/ Nestler, A.:Rechnergestützte Strukturierung von Fertigungssystemen auf der Basis ähnlicher Vorgangsfolgen mittels Genetischer Algorithmen.- Diplomarbeit, TU Chemnitz-Zwickau, IBF, Chemnitz 1996
- /SCHA-89/ Schaffer, J.D. (Hrsg.): Proceedings of the 3rd International Conference of Genetic Algorithms & Applications.- Arlington 1989
- /SCHÖ-94/ Schöneburg, E., Heinzmann, F. und Feddersen, S: Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien.- Addison-Wesley, Bonn, Paris 1994
- /SYDO-93/ Sydow, A: (Hrsg.): Simulationstechnik - 8. Symposium in Berlin, September 1993.- Tagungsband, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, Wiesbaden 1993