

Ein Genetischer Algorithmus zur simultanen Dimensionierung und Strukturierung von Fertigungssystemen *

JENS ARNOLD

Fakultät für Informatik
Technische Universität Chemnitz
Professur Modellierung und Simulation
D-09107 Chemnitz
E-Mail: jarn@informatik.tu-chemnitz.de

THOMAS FISCHER, ANJA FRÖHNER

Institut für Betriebswissenschaften und
Fabriksysteme
Technische Universität Chemnitz
Professur Fabrikplanung und -betrieb
D-09107 Chemnitz

Zusammenfassung: Bei der Planung von Fertigungssystemen wurden bisher die Phasen der Dimensionierung (Art und Anzahl der benötigten Maschinen, Anlagen, Puffer, Werker, ...) und die Strukturierung (topologische Anordnung der Fertigungsplätze und Bildung von Fertigungssegmenten) separat in einem sequenziellen oder iterativen Optimierungsprozess betrachtet. Diese Teilung scheint in Anbetracht der Komplexität des zu Grunde liegenden Optimierungsproblems notwendig, ermöglicht allerdings nur das Auffinden suboptimaler Fertigungsstrukturen. Dieser Artikel stellt nach einer kurzen Darstellung bisheriger Fabrikplanungsmethoden einen ganzheitlichen Ansatz zur simultanen Dimensionierung und Strukturierung von Fertigungssystemen auf der Basis Genetischer Algorithmen vor. Dabei werden die bei herkömmlichen Verfahren einzeln untersuchten Partialprobleme als einheitliches Optimierungsproblem modelliert. Ziel ist die Schaffung kostengünstigerer Fertigungsstrukturen für gegebene Produktionsprogramme unter Berücksichtigung der für die Planung verfügbaren Zeit. Am Beispiel der Restrukturierung der mechanischen Fertigung eines mittelständischen Unternehmens wird die Leistungsfähigkeit dieses Ansatzes gezeigt und ein Ausblick auf geplante Verbesserungen und Erweiterungen gegeben.

1 Problemstellung

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 zweckmäßig, teilweise auch erforderlich, solche Fertigungen in kleinere Einheiten zu strukturieren bzw. zu segmentieren. Dies kann in vielfältiger Weise und in unterschiedlicher Tiefe produkt- bzw. objekt- und/oder verfahrensorientiert erfolgen. Konventionelle, tayloristische, technik- oder humanzentrierte Ansätze werden in diesem Artikel nicht betrachtet.

Die objektstrukturierte Fertigung ermöglicht die räumlich-organisatorische Zusammenfassung der zur vollständigen Fertigung von Produktgruppen, Produkten oder Produktteilen (Baugruppen, Unterbaugruppen, Teilegruppen, Teilefamilien, Teilearten) erforderlichen Einrichtungen und des erforderlichen Personals und damit eine hohe Autonomie solcher Struktureinheiten. Im Idealfall entstehen relativ autonome Substrukturen als Fraktale, Fabriken in der Fabrik, Fertigungssegmente, Fertigungsinseln usw. mit all ihren Vorteilen.

* gefördert durch das DFG-Innovationskolleg INK 17/A1-1 „Bildung eines vernetzten Logistik- und Simulationszentrums“

Allerdings kann mit der objektstrukturierten Fertigung nur in Ausnahmefällen eine Reduzierung der benötigten Zahl der Fertigungseinrichtungen erreicht werden. Dies ist vor allem bei komplexen, komplizierten Fertigungsprogrammen, die eine Vielzahl von unterschiedlichen, eng verfahrensspezialisierten Fertigungseinrichtungen in geringen Stückzahlen erfordern und wenn diese Fertigungseinrichtungen für mehrere Produkte (Erzeugnisse) erforderlich sind, der Fall.

Unter den Bedingungen der Klein- und Mittelserienfertigung mit einer umfangreichen Produktpalette lassen sich die Einsatzchancen für eine objektorientierte Fertigung dadurch erhöhen, dass als Objekte Prozessesteilgruppen gewählt werden, wobei die Gruppenrahmen nicht fest vergeben werden (wie zum Beispiel Zahnräder, Deckel usw.), sondern diese so bestimmt werden, dass eine Minimierung der durch die objektorientierte Strukturierung erforderlichen zusätzlichen Fertigungseinrichtungen sowie der Mehraufwendungen¹ für Transport und Steuerung durch die Heterogenität des Prozesses innerhalb und zwischen den Struktureinheiten erfolgt. Eine solche Teilegruppierung ist dann allerdings nicht mehr die Basis einer aufeinander folgenden Dimensionierung und Strukturierung der Fertigung, sondern das Ergebnis einer simultanen Dimensionierung und Strukturierung auf der Basis der einzelnen Teilearten, wie sie in konsequenter Auslegung des Stufengrundsatzes der Planung gefordert wird /FÖRS-83/.

Von den zurzeit bekannten Strukturierungsverfahren ermöglichen nur die kombinatorischen Verfahren auf der Basis von Teilearten die Verfolgung einer solchen Zielstellung (Bild1).

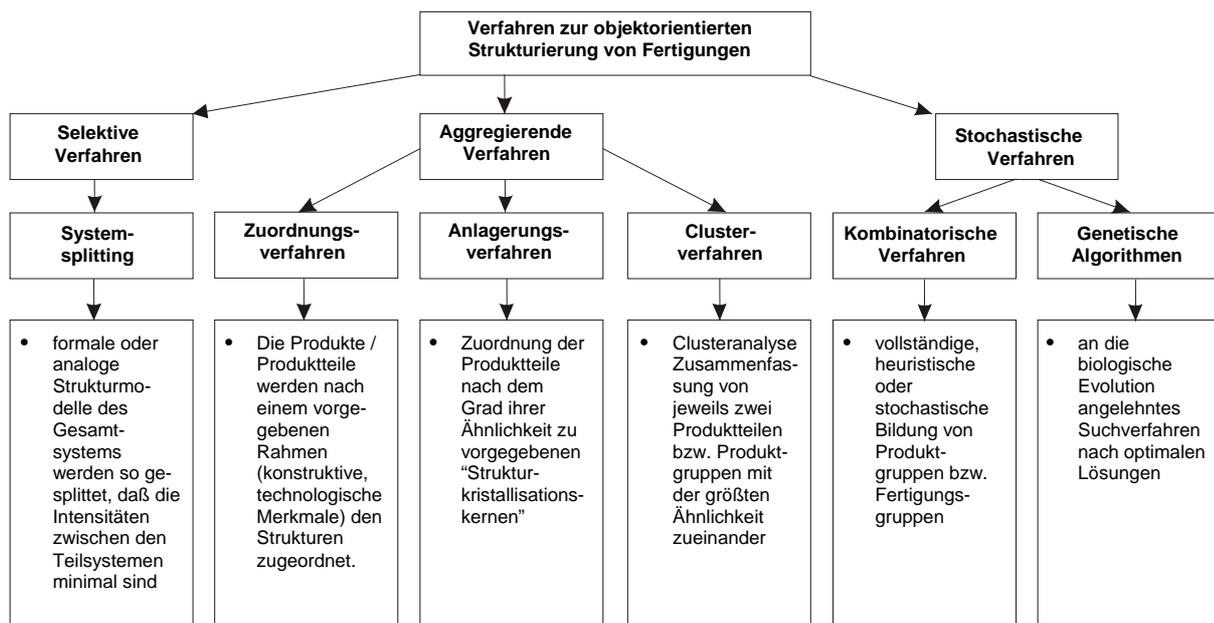


Bild 1: Verfahren zur Strukturierung von Fertigungssystemen

Selbst bei Einsatz von moderner Rechentechnik werden sie auch in absehbarer Zeit nicht für umfangreiche Teilesortimente einsetzbar sein, da die Anzahl der möglichen Lösungen exponentiell zur Anzahl der Fertigungsplätze steigt².

Einen viel versprechenden Lösungsansatz für eine objektorientierte Strukturierung unter Beachtung der praktischen Restriktionen bezüglich Rechenzeit und hinreichender Optimalität der Lösung stellen genetische Algorithmen dar (Bild 4), auf deren Basis der Programmkom-

¹ Mehraufwendungen entstehen durch Fluss entgegen der Hauptflussrichtung, die Nichtbelegung von Fertigungsplätzen durch einzelne Teilearten und durch Wechsel der Fertigungsaufträge zwischen Fertigungssystemen.

² Bei 10 Fertigungsplätzen existieren bereits über drei Millionen zulässiger Lösungen.

plex „CAD-FAIF 4.2“ entwickelt wurde. Er ist Bestandteil des am IBF³ entwickelten komplexen Fabrikplanungssystems „CAD-FAIF“ /FAIF-96/.

2 Methodische Grundlagen der genetischen Algorithmen

Die Optimierung von Systemen mit praxisrelevanten Dimensionen frei veränderbarer Parameter ist mit den klassischen Verfahren der Analytik und Kombinatorik nicht zufriedenstellend lösbar. Genetische Algorithmen ermöglichen es, die von SCHULTE und BECKER /SYDO-93/ erhobene Forderung, dass „Optimierungsalgorithmen (gewünscht sind), die in Abhängigkeit von einem vom Benutzer zu definierenden Ziel die Ergebnisse eines Simulationslaufes interpretieren und daraus automatisch Schlussfolgerungen für die Veränderung der Eingangsparameter des nächsten Simulationslaufes ableiten“ zu erfüllen. 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 Siebzigerjahren 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 leistungsstarkes Optimierungsverfahren dar.“ /SCHÖ-94/.

Hier wird ein Genetischer Algorithmus für die Suche nach einer aufwandsminimalen Fertigungsstruktur vorgestellt. Für diesen Zweck folgt nun die Formulierung der in Abschnitt 1 beschriebenen Problemstellung mit Begriffen der biologischen Evolution.

3 Der genetische Algorithmus

3.1 Codierung der Problemstellung

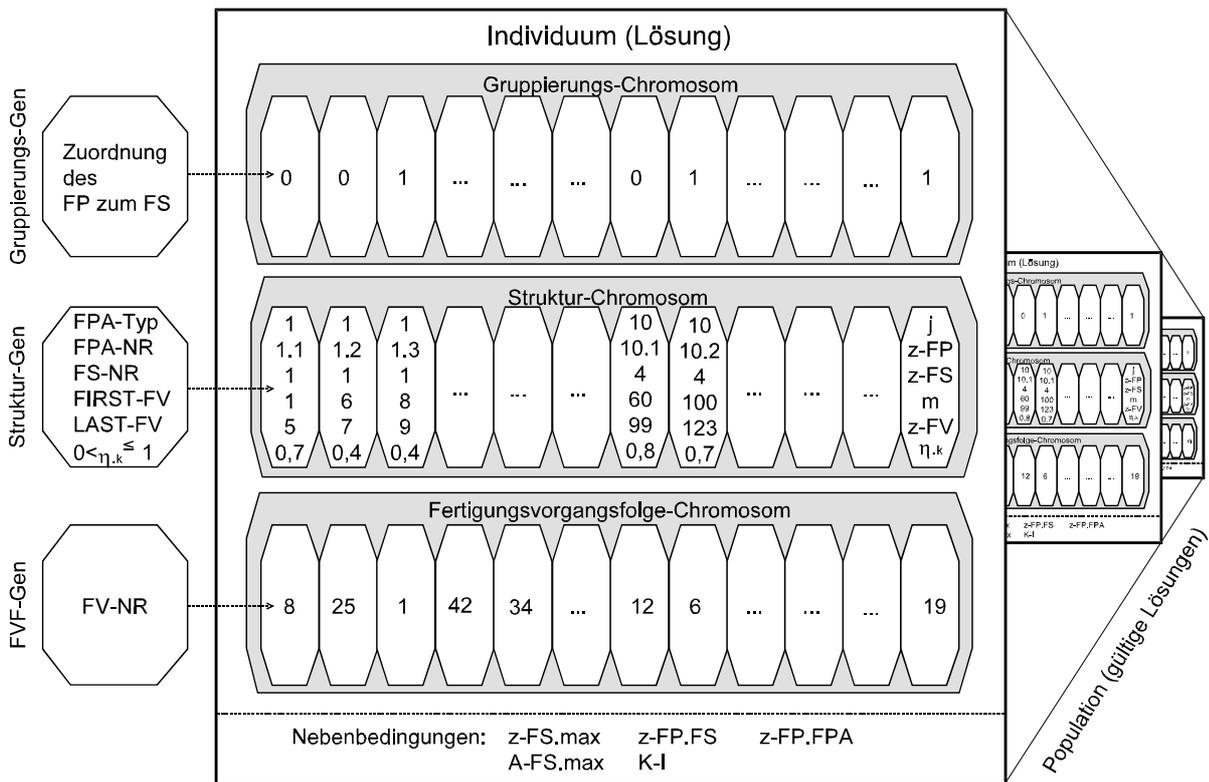
Ein Fertigungssystem (FS) besteht aus Fertigungsplätzen (FP), die bei Typgleichheit logisch zu Fertigungsplatzarten (FPA) zusammengefasst werden. Die Fertigungsaufgaben eines FP werden durch die Fertigungsvorgänge (FV) beschrieben, die in der zeitlichen Aufeinanderfolge der zu realisierenden Fertigungsaufträge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

Eine Fertigungsstruktur wird mit dem Gruppierungs-, Struktur- Fertigungsvorgangsfolgenchromosom (auch Parametervektor) beschrieben, die in diesem Tripel eine Lösung codieren. 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.

$$P = \{I \in S : I \text{ ist eine gültige Lösung in } S\} \quad (\text{Gl. 1})$$

Die Komponenten eines Chromosoms werden als *Gene* bezeichnet. Ihre möglichen Wertebelagungen sind die *Allele*. Bild 2 verdeutlicht diese Begriffe und Beziehungen.

³ Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik



- 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

• Gruppierungschromosom:

Die Gene dieses Chromosoms 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 Strukturchromosom 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 Strukturchromosom unmittelbar folgende Fertigungsplatz als Erster (in Hauptflussrichtung) in einem neuen Fertigungssystems steht.

• Strukturchromosom (Reihenfolgechromosom):

In diesem Chromosom 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 Fertigungsvorgangsfolgenchromosom. 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.

- Fertigungsvorgangsfolgechromosom:

Die Länge dieses Chromosoms 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-FS.max),
- Zahl der Fertigungsplätze je Fertigungssystem (z-FP.FS),
- Zahl der Fertigungsplätze je Fertigungsplatzart (z-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) beschrieben⁴.

Generiert der evolutionäre Optimierungsprozess ungültige Lösungen, also Individuen, die nicht zur Population \mathbf{P} gehören, so erhalten diese Individuen einen überproportional hohen Aufwandswert (*Strafenfitness*). Auf die Berechnung der Fitnesswerte wird im Abschnitt 3.5 eingegangen.

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

Die in der Literatur als sinnvoll angegebenen Werte für die Wahl der Generationsgröße (Anzahl der Individuen in einer Generation) haben sich in vielen Experimenten als Durchschnittswerte bewährt ($N=30$ /SCHA-89/, $N=50$ /SCHÖ-94/, $N>50$ /KINN-94/), sind aber für praxisrelevante Dimensionen der Fertigungsstrukturierung aus Gründen des Speicher- und Rechenzeitaufwandes 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 Rechenzeitaufwand für Personalcomputer gefunden worden.

⁴ Fitness steht für Aufwendung, d.h. kleine Fitnesswerte sind anzustreben.

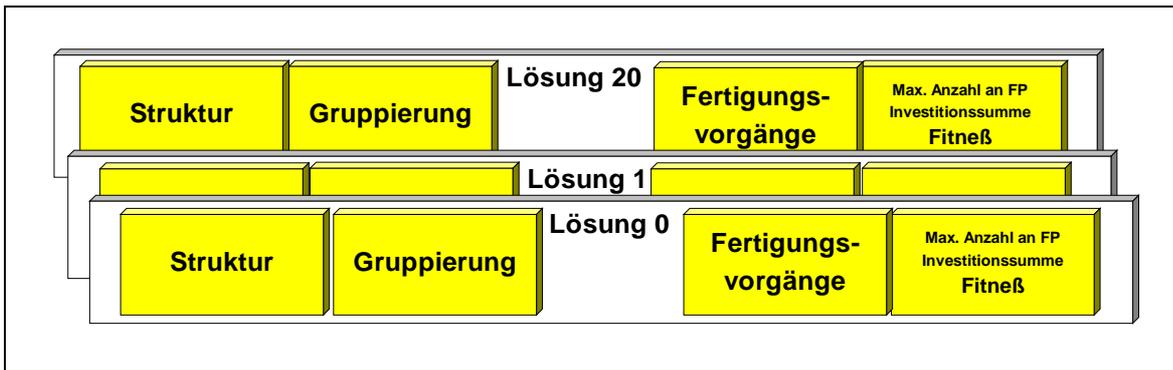


Bild 3: Bestandteile einer Generation

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 „hängen zu bleiben“.

3.2 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 vorgegeben sind, 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.

Im Schritt 2 werden die weiteren Individuen der Elterngeneration `LsgMenge[1..5]` durch den genetischen Operator *Mutation* (siehe Abschnitt 3.3.3.) erzeugt.

Im 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 (siehe Abschnitt 3).

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 (beste Fitness).

Schritt 6 wählt aus den 20 Individuen der `LsgMenge[1..20]` 5 Eltern für die nächste Generation aus. Das geschieht nach dem *Roulette-Verfahren*. In diesem Verfahren werden nach dem Prinzip des Roulette-Rades die einzelnen Individuen (Lösungen) auf einem Kreis abgetragen. 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.

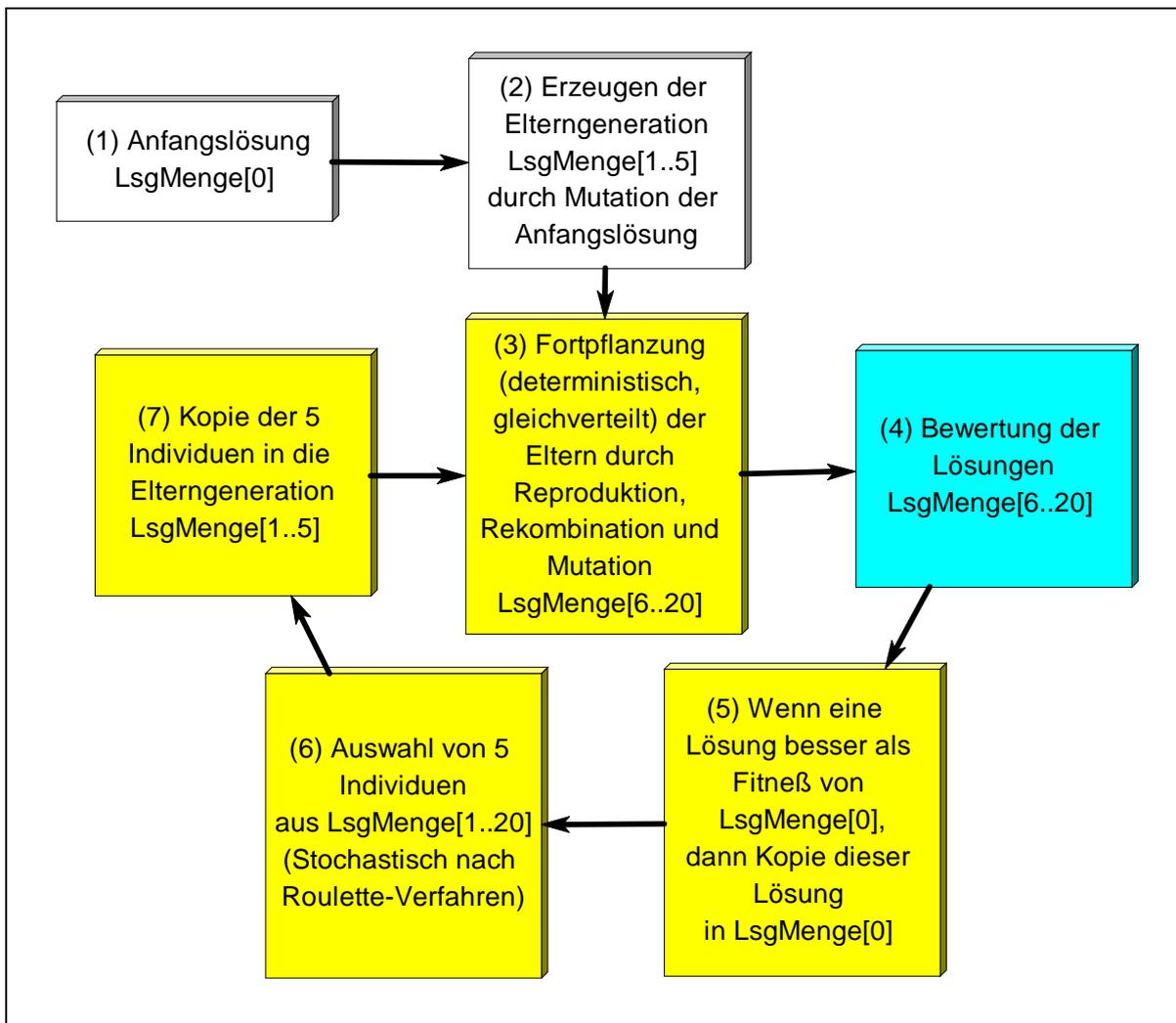


Bild 4: Der evolutionäre Optimierungsalgorithmus

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 Fitnessverbesserung, 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.

3.3 Die genetischen Operatoren

3.3.1 Reproduktion

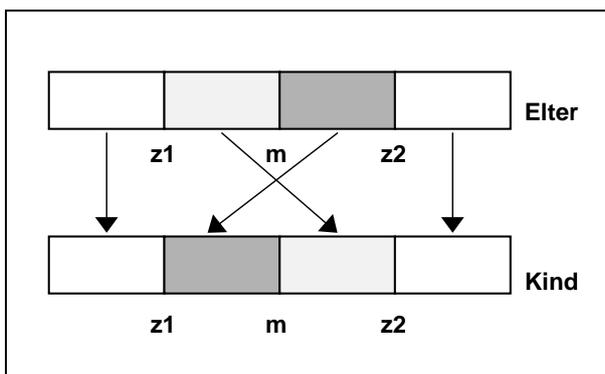
Die Reproduktion ist die ständige Erneuerung und Wiederholung der genetischen Informationen. Die Chromosomen werden einfach von den Eltern übernommen. Die Reproduktion läuft deshalb bei allen Chromosomen gleich ab. Die Reproduktion garantiert die Stabilität der Lösungen, damit der Algorithmus nicht zu sehr im Suchraum „springt“.

3.3.2 Rekombination

Rekombinationen sind Prozesse, die zu einer Umgruppierung der genetischen Informationen führen. Durch die Rekombination werden genetische Informationen zwischen den Individuen (sexuelle Rekombination) und innerhalb der Chromosomen eines Individuums (Selbstrekombination) ausgetauscht.

3.3.2.1 Selbstrekombination des Reihenfolgechromosoms

Die Rekombination der Reihenfolgechromosomen geschieht, indem beim Elter zwei Schnittpunkte z_1 und z_2 zufällig, gleichverteilt ausgewählt werden. Danach wird die Mitte zwischen den beiden Schnittpunkten berechnet.



Zuerst werden die Anfangs- (vom 1.Gen bis $[z_1-1]$. Gen) und die Schlusssequenz $[z_2+1]$. bis letztes Gen) in das Kindchromosom kopiert. Danach werden die Mittelsequenzen vertauscht und in das Kindchromosom kopiert.

Bild 5: Selbstrekombination des Reihenfolgechromosoms

3.3.2.2 Rekombination des Gruppierenchromosoms

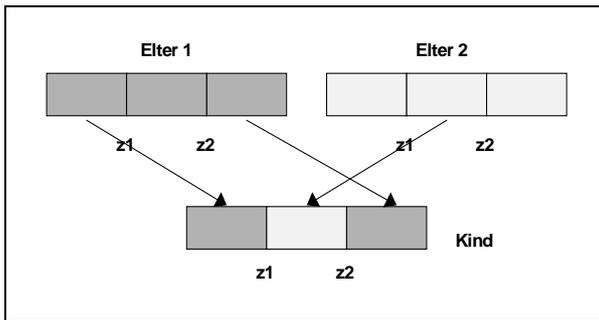
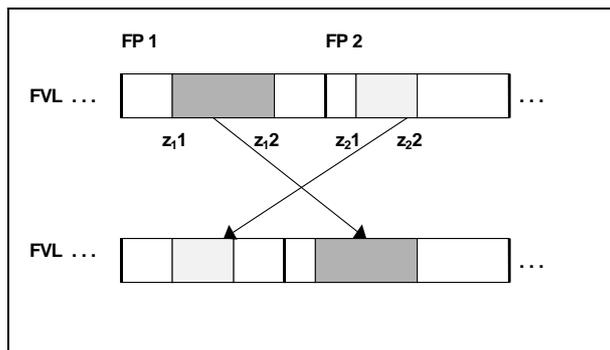


Bild 6: Rekombination des Gruppierenchromosoms

Die Rekombination der Gruppierenchromosomen ist die einzige Rekombination mit 2 Eltern. Als Erstes werden wieder zwei Schnittpunkte z_1 und z_2 zufällig, gleichverteilt festgelegt. Danach wird die Anfangs- und Schlusssequenz vom Elter 1 und die Mittelsequenz vom Elter 2 in das Kindchromosom kopiert.

3.3.2.3 Selbstrekombination des Fertigungsverfahrenschromosoms

Bei der Rekombination des Fertigungsverfahrenschromosoms werden zunächst zufällig, gleichverteilt zwei Fertigungsplätze des gleichen Typs ausgewählt. Aus den beiden Mengen der diesen Fertigungsplätzen zugeordneten Fertigungsverfahren wird jeweils eine Teilmenge ausgewählt. Die Auswahl der Fertigungsverfahren und deren Anzahl geschieht ebenfalls zufällig, gleichverteilt. In einem Iterationsprozess wird nun versucht, unter Hinzunahme und



vorgangschromosoms

Wegnahme von Fertigungsverfahren zu bzw. von den zufällig bestimmten Teilmengen, diese Teilmengen dem jeweils anderen Fertigungsplatz zuzuordnen.

Die Problematik dieses Operators besteht darin, dass nach dem Austausch der Teilmengen die Gesamtkapazität beider Fertigungsplätze nicht überschritten sein darf.

Bild 7: Selbstrekombination des Fertigungsverfahrenschromosoms

3.3.3 Mutation

Die Mutation ist der Zufall der Evolution und für die Anpassungsfähigkeit einer Population an sich ändernde Umweltbedingungen unverzichtbar. Die Mutation ist dafür verantwortlich, dass lokale Optima (suboptimal angepasste Individuen) wieder verlassen werden können und in andere Bereiche des Suchraumes „gesprungen“ wird.

3.3.3.1 Mutation des Reihenfolgechromosoms

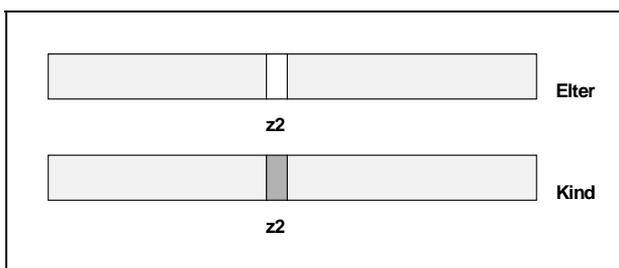
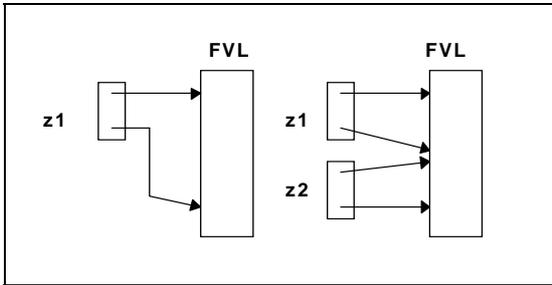


Bild 8: Mutation des Reihenfolgechromosoms

Bei der Mutation des Reihenfolgechromosoms wird ein Fertigungsplatz z_2 zufällig, gleichverteilt ausgewählt.

(a) Ist das Gen z_2 nicht belegt, wird versucht, einen Fertigungsplatz hinzuzufügen. Dabei wird zufällig gleichverteilt eine Fertigungsplatzart (Typ) ausgewählt.

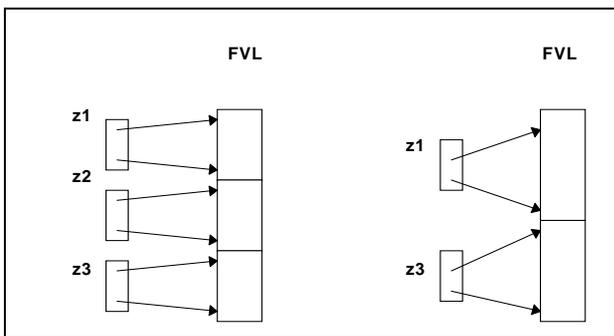
Zunächst wird geprüft, ob der ausgesuchte Fertigungsplatz noch hinzugefügt werden kann, d. h., die maximal mögliche Anzahl der Fertigungsplätze muss größer sein als die aktuelle Anzahl Fertigungsplätze dieser Fertigungsplatzart. Weiterhin darf die maximale Investitionssumme nicht überschritten werden. Zum Schluss muss der neue Fertigungsplatz noch ausgelastet werden. Dies geschieht auf folgende Weise:



Zuerst wird wieder zufällig, gleichverteilt ein Fertigungsplatz z1 gleichen Typs ausgewählt. Ist dieser gefunden, wird kontrolliert, ob er mehr als 2 Fertigungsvorgänge besitzt. Wenn ja, werden seine Fertigungsvorgänge aufgeteilt und der neue Fertigungsplatz wird eingefügt.

Bild 9: Aufteilung der Fertigungsvorgänge beim Einfügen eines Fertigungsplatzes

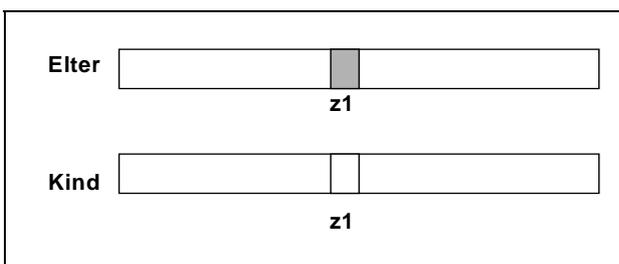
(b) Ist das Gen z2 belegt, wird versucht, diesen Fertigungsplatz zu löschen. Ist der Fertigungsplatz einem Fertigungssystem fest zugeordnet, so darf er nicht gelöscht werden. Weiterhin muss geprüft werden, ob die minimal benötigte Anzahl Fertigungsplätze dieses Typs mit der Löschung nicht unterschritten wird.



Abschließend wird geprüft, ob sich die dem zu löschenden Fertigungsplatz zugeordneten Fertigungsvorgänge auf andere Fertigungsplätze aufteilen lassen. Ist eine Aufteilung der Fertigungsvorgänge möglich, kann der Fertigungsplatz gelöscht werden.

Bild 10: Aufteilung der Fertigungsvorgänge beim Löschen eines Fertigungsplatzes

3.3.3.2 Mutation des Gruppierungschromosoms



Zuerst wird aus dem Gruppierungschromosom des Elters ein Platz z1 zufällig, gleichverteilt ausgewählt. Erfolgt an diesem Platz eine Gruppierung zum Fertigungssystem, wird diese Gruppierung aufgehoben., ansonsten wird eine Gruppierung des Fertigungssystems eingeführt.

Bild 11: Mutation des Gruppierungschromosoms

soms

3.3.3.3 Mutation der Fertigungsvorgänge

Die Mutation des Fertigungsvorgangschromosoms erfordert keinen eigenen Operator, da Fertigungsvorgänge nicht hinzugefügt oder herausgenommen werden können. Eine punktuelle Veränderung dieses Chromosoms auf nur einem Gen wird durch den Operator der Selbstrekombination in dem Fall erreicht, wenn die zufällig gewählten Teilmengen (siehe 3.3.2.3) jeweils aus nur einem zum Austausch bestimmten Fertigungsvorgang bestehen.

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 Roulette-Verfahren (Bild 4, Schritt 6) entscheidet und damit über die Wahrscheinlichkeit, mit der dieses Individuum als Elter 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:

$$F = F_{\text{Struktur}} + F_{\text{Fertigungsplätze}} \quad (\text{Gl. 2})$$

$$F_{\text{Struktur}} = F_{\text{HFR}} + F_{\text{HFR.e}} + F_{\text{FSW}} + F_{\text{NB.FS}} + F_{\text{NB.RF}} \quad (\text{Gl. 3})$$

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
$F_{HFR,e}$	Fitness entgegen Hauptflussrichtung	Aufwand, der durch Transport, Steuerung und Organisation je Flussbeziehung entgegen Hauptflussrichtung verursacht wird
$F_{NB,FS}$	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
$F_{NB,RF}$	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
$F_{Fertigungsplätze}$	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 12 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.

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 eingeengte Produktionsprogramm ist mit den geplanten Fertigungsmengen sowie den zugehörigen Fertigungsvorgangsfolgen in Tabelle 2 dargestellt.

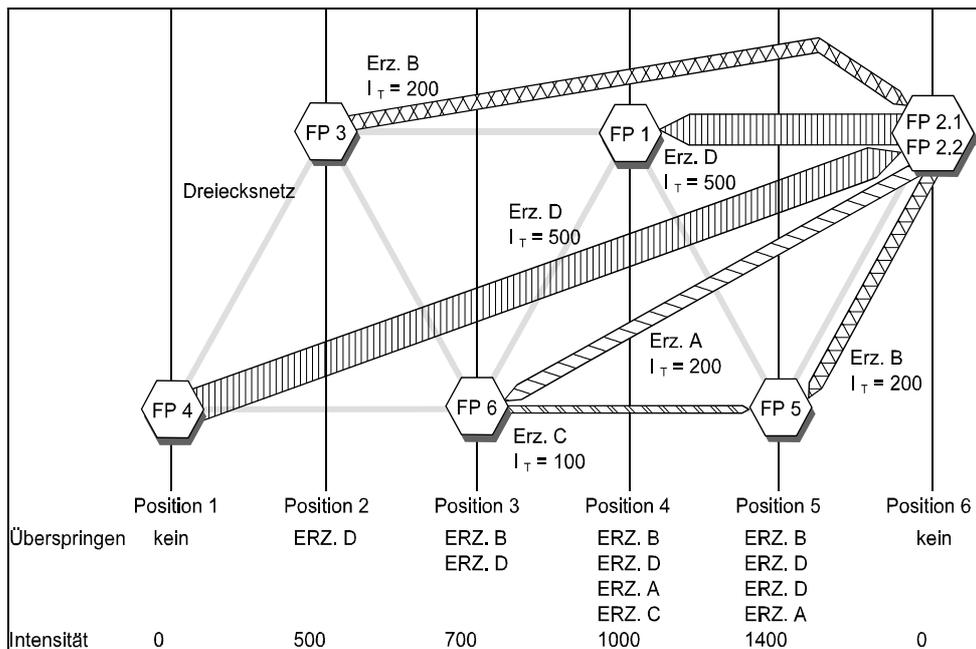


Bild 12: Strukturgraf ungesplittete Fertigung (Ausgangszustand)

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
				30	5	5
2	B	10000	50	10	3	10
				20	2	10
				30	5	5
3	C	10000	100	10	6	5
				20	5	5
				30	1	10
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
Maximale Zahl der Fertigungsplätze je Fertigungssystem	z-FP.FS	7
Maximale 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 13 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	

Aus dem Strukturgraf (Bild 13) 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 zeitaufwändigeren Berechnungen verbessern nur die transportlosgenaue Zuordnung zu den Fertigungsplätzen 2.1 und 2.2. Eine höherwertige Grundstruktur ist aber unter der vorliegenden 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.

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 zu Grunde gelegt werden.

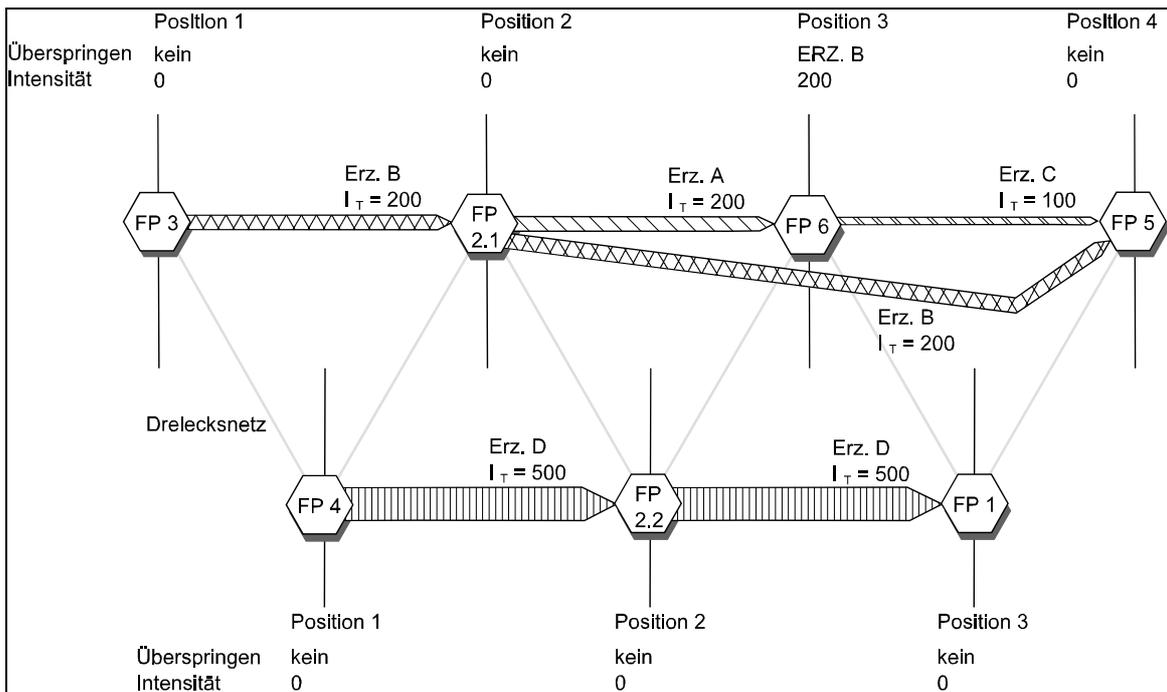


Bild 13: Strukturgraph der gebildeten Fertigungssysteme (Strukturierungsergebnis)

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

Die Ergebnisse der Strukturierung eröffnen für die weitere Gestaltung der Fertigung alle Möglichkeiten, die gerichteten Strukturen eigen sind. Ein Beispiel für ein solches Lay-out mit Gruppenarbeit und teilweise direkter Weitergabe der Teile verdeutlicht Bild 14 abschließend.

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.

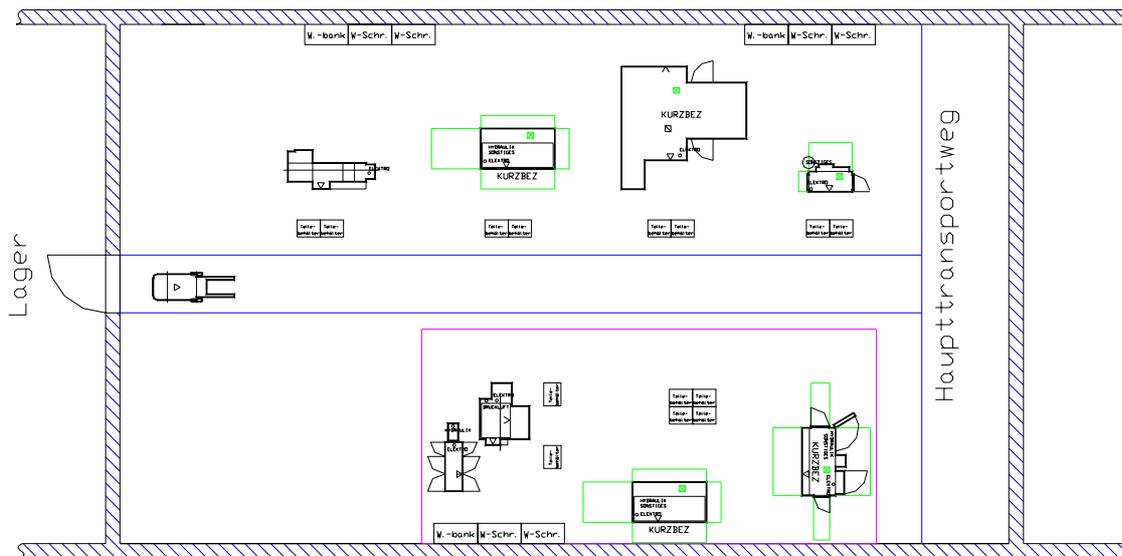


Bild 14: Beispiel-Lay-out für das Strukturierungsergebnis

5 Ergebnisse und Ausblick

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 stellte sich heraus, dass es bezüglich der Rechenzeit günstig ist, die Individuen der ersten Generation (Urgeneration) mit Hilfe einer oder mehrerer „klassischer“ Verfahren (Bild1) 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. Darüber hinaus kann, durch eine parallele Ausführung der Fitnessbestimmung für die einzelnen Individuen einer Generation, das Verfahren nahezu linear zur Anzahl verfügbarer Rechner/Prozessoren beschleunigt werden.

Der vorgestellte Ansatz geht von einer Linien-Anordnung der Fertigungsplätze innerhalb eines Fertigungssystems aus. Mit einer Erweiterung des Strukturchromosoms hin zur Flächen-Anordnung der Fertigungsplätze wird eine allgemeinere und realere Modellsicht erreicht, in deren Konsequenz der Optimierungsprozess ein zweidimensionales Grob-Lay-out der Fabrik liefert.

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
- /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
- /HOLL-75/ Holland, J.H.:Adaptation in natural and artificial 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