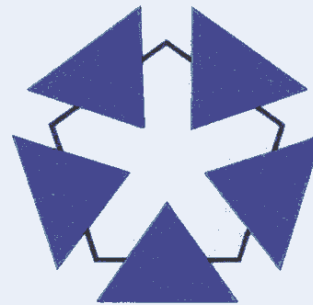




**TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ**

zu **PROJEKT V**



**FORSCHUNGSBERICHT**

Innovationskolleg  
INK 17 / B1 - 1

Bildung eines vernetzten  
Logistik- und Simulationszentrums

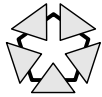
**SiDiS<sup>GA</sup> - Simultane  
Dimensionierung und  
Strukturierung mit Genetischen  
Algorithmen: Neue Wege zur  
Projektierung von  
Teileflusssystemen in KMU**

Dipl.-Inf. J. Arnold  
Dipl.-Ing. A. Fröhner

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

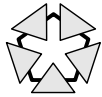
mit Sondermitteln des Bundesministeriums für  
Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie  
gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft

Zweite Förderungsperiode 1999 - 2000



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Problemstellung .....	2
3	Einige grundlegende Aussagen zur Komplexität des Optimierungsproblems .....	4
3.1	Zuordnungsvarianten von $n$ Fertigungsplätzen zu $k$ nicht leeren Fertigungssegmenten .....	4
3.2	Anordnungsvarianten von $n$ Fertigungsplätzen in $k$ nicht leeren Fertigungssegmenten .....	5
4	Methodische Grundlagen der Genetischen Algorithmen .....	6
5	Der Genetische Algorithmus .....	6
5.1	Codierung der Problemstellung .....	6
5.1.1	Gruppierungschromosom .....	7
5.1.2	Strukturchromosom (Reihenfolgechromosom) .....	8
5.1.3	Fertigungsvorgangsfolgechromosom .....	8
5.1.4	Weitere Parameter eines Individuums .....	8
5.1.5	Die Generation .....	9
5.2	Die Ablaufschrittfolge des Genetischen Algorithmus .....	9
5.3	Die genetischen Operatoren .....	11
5.3.1	Reproduktion .....	11
5.3.2	Rekombination .....	11
5.3.3	Mutation .....	12
5.4	Die Lösungsbewertung .....	13
6	Anwendungsbeispiele .....	15
6.1	Überplanung einer Produktionsfläche .....	15
6.2	Neuplanung einer Fahrradfabrik .....	18
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	20
	Literaturverzeichnis .....	21
	Anhang: Beispiel einer Parameterdatei von SiDiS <sup>GA</sup> .....	23



# 1 Einleitung

Das Problem der Planung von Produktionssystemen besteht im Wesentlichen aus der Ermittlung des Ressourcenbedarfs (Dimensionierung: Art und Anzahl der benötigten Maschinen, Anlagen, Puffer, Werker, ...), der logischen Zusammenfassung dieser Ressourcen (Segmentierung, *engl.* cell grouping) sowie deren topologisch optimaler Anordnung innerhalb der Segmente (*engl.* facility layout design) unter Beachtung einer Vielzahl von Nebenbedingungen. Bisher wurden die Phasen „Dimensionierung“ und „Strukturierung“ separat in einem sequenziellen oder iterativen Optimierungsprozess betrachtet. Diese Teilung scheint in Anbetracht der Komplexität des zu Grunde liegenden Optimierungsproblems notwendig (siehe Kapitel 3), ermöglicht allerdings nur das Auffinden suboptimaler Fertigungsstrukturen. Dieser Forschungsbericht 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.

Es wird untersucht, ob und in wie weit eine simultane Dimensionierung, hierarchische und räumliche Strukturierung von Werkstückflusssystemen mittels genetischer Algorithmen möglich ist und welche qualitativen und quantitativen Verbesserungen in der Durchführung des Planungsprozesses und des zu planenden Werkstückflusssystemes zu erzielen sind. Es wird diskutiert, welche Parameter in welcher Art und Weise zur Bewertung der Planungslösungen herangezogen werden. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit besteht in der Entwicklung eines praktikablen Verfahrens auf Basis einer geeigneten Strategie für die simultane Dimensionierung, hierarchische und räumliche Strukturierung von Werkstückflusssystemen.

Entscheidend für die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Produktionsstrukturen ist die Quantifizierung ihres logistischen Aufwandes als Fitness-Wert. Deshalb wurde ein neuer Ansatz zur Nutzung logistischer Kenngrößen bei der Bewertung von Produktionsstrukturen untersucht, der weit über die bisher übliche Betrachtung des Transportaufwandes (Los/Meter) hinausgeht. Ziel ist die Schaffung kostengünstigerer Fertigungsstrukturen für gegebene Produktionsprogramme unter Berücksichtigung der für die Planung verfügbaren Zeit. An zwei Beispielen der Strukturierung von Produktionsflächen mittelständischer Unternehmen wird die Leistungsfähigkeit dieses Ansatzes gezeigt und ein Ausblick auf geplante Verbesserungen und Erweiterungen gegeben.



## 2 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 dieser Arbeit 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.

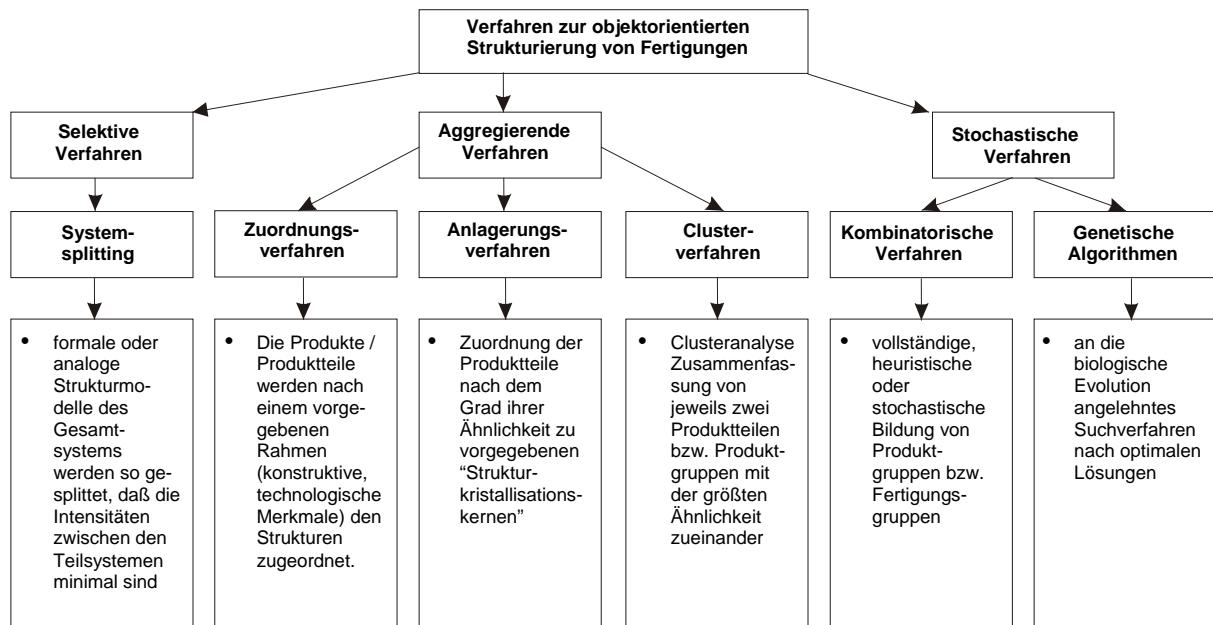
Unter den Bedingungen der Klein- und Mittelserienfertigung mit einer umfangreichen Produktpalette lassen sich die Einsatzchancen für eine objektorientierte Fertigung dadurch erhöhen, dass als Objekte Prozesssteilegruppen gewählt werden, wobei die Gruppenrahmen nicht fest vergeben werden (wie zum Beispiel Zahnräder, Deckel usw.), sondern diese so bestimmt werden, dass eine Minimierung der durch die objektorientierte Strukturierung erforderlichen zusätzlichen Fertigungseinrichtungen sowie der Mehraufwendungen<sup>1</sup> 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 (**Bild-1**). 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 steigt (siehe Kapitel 3).

Einen viel versprechenden Lösungsansatz für eine objektorientierte Strukturierung unter Beachtung der praktischen Restriktionen bezüglich Rechenzeit und hinreichender Optimalität der Lösung stellen Genetische Algorithmen dar, auf deren Basis die Softwaretools CAD-FAIF 4.2 und SiDiS<sup>GA</sup><sup>2</sup> entwickelt wurden.

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

<sup>2</sup> Simultane Dimensionierung und Strukturierung mit Genetischen Algorithmen



**Bild-1:** Verfahren zur Strukturierung von Fertigungssystemen

Für Problemstellungen der Fertigungsstrukturierung finden sich unterschiedlichste Modellierungszugänge /FRAN-92/, /HERA-97/, je nach Detaillierungsgrad, Art der betrachteten Entitäten (z.B. einzelne Maschinen, Fertigungszellen, Fertigungsplatzgruppen, usw.) und dem Optimierungsziel /BOGA-98/. Für das Problem der simultanen Dimensionierung und Strukturierung von Teile- bzw. Werkstückflusssystemen in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) wurde ein auf /SARK-91/ und /KOUV-92/ basierendes Modell erweitert. Dabei erfolgt die Anordnung der Fertigungsplätze innerhalb der Fertigungssegmente linear entlang eines Transportweges. Es gibt einen Einschleuspunkt am Anfang und einen Ausschleuspunkt am Ende des Transportweges. Die Richtung vom Ein- zum Ausschleuspunkt wird als Hauptflussrichtung definiert. Die Jobs bewegen sich entsprechend ihrer Fertigungsvorgangsfolge innerhalb der Fertigungssegmente von Fertigungsplatz zu Fertigungsplatz in oder entgegengesetzt der Hauptflussrichtung. Weiterhin können die Jobs Fertigungssegmente verlassen und in ein anderes Fertigungssegment wechseln. Dieser Vorgang wird als Systemwechsel bezeichnet.

Formal ergibt sich folgendes Optimierungsproblem:

- (a)  $n$  Fertigungsplätze der Menge  $\mathbf{N}$  müssen zu  $k$  Fertigungssegmenten eindeutig zugeordnet werden;
- (b) die dem Fertigungssegment  $j$  ( $j = 1(1)k$ ) zugeordneten  $\mathbf{N}_j$  Fertigungsplätze ( $\mathbf{N}_j = \{i_{j \in \mathbf{N}} : \text{Fertigungsplatz } i \text{ ist dem Fertigungssegment } j \text{ zugeordnet}\}$ ) müssen entlang des Transportweges angeordnet werden;
- (c)  $m$  Jobs der Menge  $\mathbf{M}$  müssen zu  $n$  Fertigungsplätzen eindeutig zugeordnet werden;

Es ergeben sich also zwei Zuordnungsprobleme (a) und (c) sowie ein Reihenfolge- bzw. Rundreiseproblem (b). Darüber hinaus ist die Kardinalität der Menge  $\mathbf{N}$  nach oben nicht festgelegt, da der Zukauf von Fertigungsplätzen zur Verbesserung der Transportstruktur erlaubt ist. Welche Nebenbedingungen bei der Generierung von Lösungspunkten im Suchraum zu beachten sind, wird im Abschnitt 5.4 bei der Lösungsbewertung und im Kapitel 6 anhand von Beispielen erläutert.



### 3 Einige grundlegende Aussagen zur Komplexität des Optimierungsproblems

Die Größe des Suchraumes und damit die Komplexität des im vorstehenden Kapitel 2 formulierten Optimierungsproblems wird im Wesentlichen bestimmt durch die

- Anzahl mindestens benötigter Fertigungsplätze  $n$
- Anzahl zu bildender Fertigungssegmente  $k$  mit  $1 \leq k \leq n$
- Mächtigkeit der einzelnen Mengen typgleicher Fertigungsvorgänge  $|F^t|$ .

#### 3.1 Zuordnungsvarianten von $n$ Fertigungsplätzen zu $k$ nicht leeren Fertigungssegmenten

Die Zuordnung von  $n$  Fertigungsplätzen zu  $k$  Fertigungssegmenten ohne Beachtung der Anordnungsreihenfolge der Fertigungsplätze innerhalb der Fertigungssegmente kann für gegebene  $n$  und  $k$  über die Stirling<sup>3</sup>-Zahlen 2. Ordnung berechnet werden (Gl.-1).

$$\left\{ \begin{matrix} n \\ k \end{matrix} \right\} = k \left\{ \begin{matrix} n-1 \\ k \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} n-1 \\ k-1 \end{matrix} \right\} \quad \text{mit} \quad \left\{ \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} \right\} = 1 \quad \text{und} \quad \left\{ \begin{matrix} n \\ 0 \end{matrix} \right\} = 0, \quad n > 0 \quad (\text{Gl.-1})$$

Für Gl.-1 ist nur eine rekursive Berechnungsvorschrift bekannt. In Tabelle-1 sind die Zuordnungsvarianten für  $1 \leq n \leq 10$  Fertigungsplätze aufgeführt. Für 10 Fertigungsplätze existieren bereits 115 975 mögliche Lösungspunkte im Suchraum.

<b>k</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	$\Sigma_k$	<b>max. k</b>
<b>1</b>	1										1	1
<b>2</b>	1	1									2	1
<b>3</b>	1	3	1								5	2
<b>4</b>	1	7	6	1							15	2
<b>5</b>	1	15	25	10	1						52	3
<b>6</b>	1	31	90	65	15	1					203	3
<b>7</b>	1	63	301	350	140	21	1				877	4
<b>8</b>	1	127	966	1701	1050	266	28	1			4140	4
<b>9</b>	1	255	3025	7770	6951	2646	462	36	1		21147	4
<b>10</b>	1	511	9330	34105	42525	22827	5880	750	45	1	<b>115975</b>	5

Tabelle-1: Stirling's Dreieck für ungeordnete Teilmengen

Die Rekursionsformel nach Gl.-1 wächst bezüglich  $n$  exponentiell. Damit fällt das Zuordnungsproblem von  $n$  Fertigungsplätzen zu  $k$  Fertigungssegmenten bereits ohne Beachtung der Anordnungsreihenfolge der Fertigungsplätze innerhalb der Fertigungssegmente in die Klasse der nicht in polynomialer Zeit lösbaren Probleme.

<sup>3</sup> James Stirling (1692-1770), schottischer Mathematiker.



### 3.2 Anordnungsvarianten von $n$ Fertigungsplätzen in $k$ nicht leeren Fertigungssegmenten

Die Zuordnung von  $n$  Fertigungsplätzen zu  $k$  Fertigungssegmenten erweitert um die Beachtung der Anordnungsreihenfolge der Fertigungsplätze innerhalb der Fertigungssegmente kann für gegebene  $n$  und  $k$  über die Lah<sup>4</sup>-Zahlen berechnet werden (Gl.-2).

$$\binom{n}{k} = (n-1+k) \binom{n-1}{k} + \binom{n-1}{k-1} \quad \text{mit} \quad \binom{0}{0} = 1 \quad \text{und} \quad \binom{n}{0} = 0, \quad n > 0 \quad (\text{Gl.-2})$$

Für Gl.-2 ist ebenfalls nur eine rekursive Berechnungsvorschrift bekannt. In Tabelle-2 sind die Anordnungsvarianten für  $1 \leq n \leq 10$  Fertigungsplätze aufgeführt. Für 10 Fertigungsplätze existieren  $5.89 \cdot 10^{12}$  mögliche Lösungspunkte im Suchraum, dessen vollständige Durchmusterung zum Auffinden der optimalen Lösung damit nicht mehr möglich ist.

<b>k</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	$\Sigma_k$	<b>max. k</b>
<b>1</b>	1										1	1
<b>2</b>	2	1									3	1
<b>3</b>	6	6	1								13	1
<b>4</b>	24	36	12	1							73	2
<b>5</b>	120	240	120	20	1						501	2
<b>6</b>	720	1800	1200	300	30	1					4051	2
<b>7</b>	5040	15120	12600	4200	630	42	1				37633	2
<b>8</b>	40320	141120	141120	58800	11760	1176	56	1			394353	2
<b>9</b>	362880	1.45E+11	1.69E+11	846720	211680	28224	2016	72	1		4.59E+11	3
<b>10</b>	3.62E+10	1.63E+12	2.17E+12	1.27E+12	3.81E+11	635040	60480	3240	90	1	<b>5.89E+12</b>	3

Tabelle-2: Lah's Dreieck für geordnete Teilmengen

Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang die Frage, für welches  $k$  bei einem beliebigen aber festen  $n$  die Funktion  $f(n,k)$  ihr Maximum hat? Aus Gl.-2 folgt  $n-k+1 \geq k(k-1)$  und somit

$$k' = \max f(n,k) = \lfloor \sqrt{n} \rfloor, \quad \forall k, k = 1(1)n \quad \text{und} \quad \forall n, n > 0 \quad (\text{Gl.-3})$$

Wenn  $n+1$  eine Quadratzahl ist, dann gibt es zweites  $k$ , das Gl.-3 erfüllt:

$$k'' = k' = \max f(n,k) = \lfloor \sqrt{n} \rfloor = \lceil \sqrt{n} \rceil, \quad \forall k, k = 1(1)n \quad \text{und} \quad \forall n, n > 0: \exists i, i \in \mathbb{N}, i^2 = n+1 \quad (\text{Gl.-4})$$

Die Berücksichtigung der Zuordnungsmöglichkeiten von Fertigungsaufträgen zu Fertigungsplätzen führt zu einer weiteren Zunahme der Komplexität. Da jede Anordnungsreihenfolge innerhalb der Fertigungssegmente einem Rundreiseproblem (TSP) mit  $k$  Städten entspricht und das TSP ein NP-vollständiges Problem ist, fällt auch die Rekursionsformel in Gl.-2 und somit das gesamte Strukturierungsproblem aus Kapitel 2 in die Klasse der NP-vollständigen Probleme.

<sup>4</sup> Ivo Lah, slowenischer Mathematiker.



## 4 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 zufrieden stellend 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 modifizierende Operatoren, wie z.B. Rekombination und Mutation weiter. Die theoretische Fundierung der Konvergenz eines solchen Iterationsprozesses wurde bereits in den 70er Jahren gezeigt /HOLL-75/ und in zahlreichen Anwendungen als praktikabel anerkannt /SCHA-89/, /FORR-93/, /SCHÖ-94/, /ARNO-95/, /EBLE-96/, /GEN-97/, /RAJA-98/. 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 Kapitel 2 beschriebenen Problemstellung mit Begriffen der biologischen Evolution.

## 5 Der Genetische Algorithmus

### 5.1 Codierung der Problemstellung

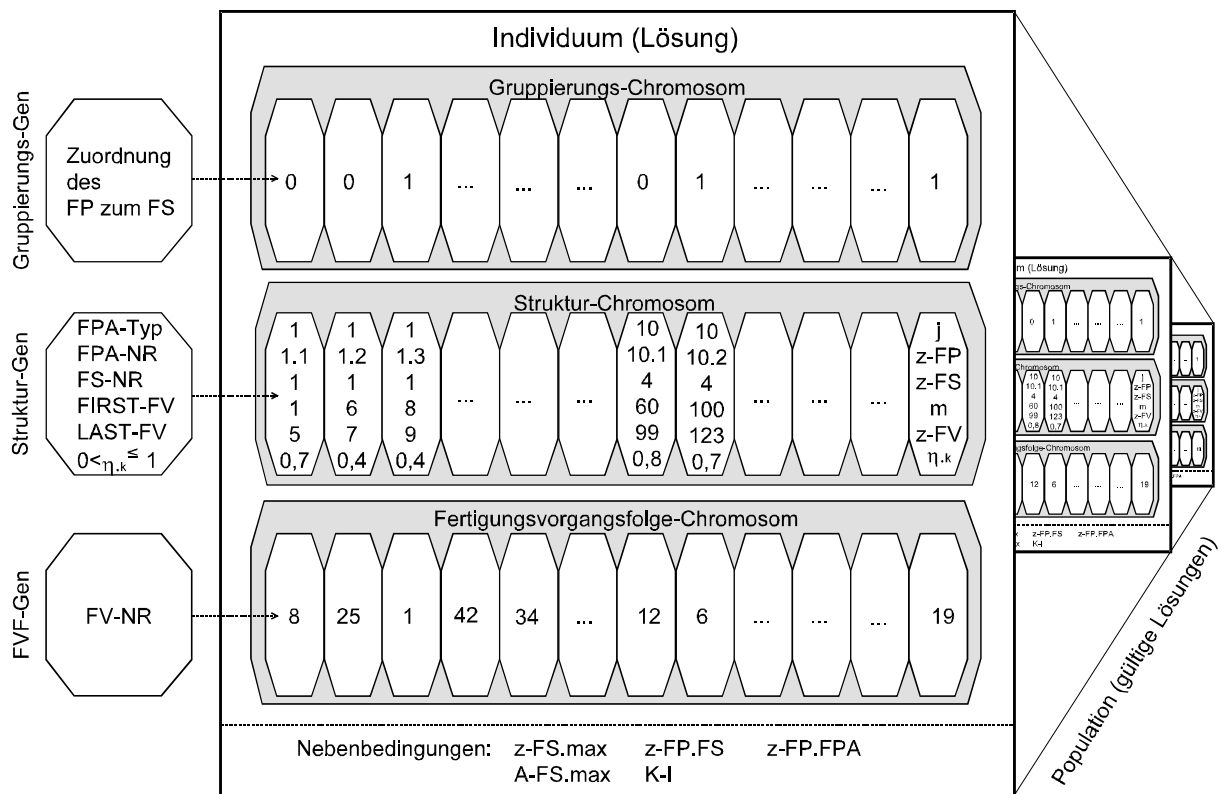
Ein Fertigungssystem (FS) besteht aus Fertigungsplätzen (FP), die bei Typgleichheit logisch zu Fertigungsplatzarten (FPA) zusammengefasst werden. Die Fertigungsaufgaben eines FP werden durch die Fertigungsvorgänge (FV) beschrieben, die in der zeitlichen Aufeinanderfolge der zu realisierenden Fertigungsaufträge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

Eine Fertigungsstruktur wird mit dem Gruppierungs-, Struktur- und 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.

$$P = \{I \in S : I \text{ ist eine gültige Lösung in } S\} \quad (\text{Gl.-5})$$

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





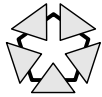
**Legende:**

- 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
- $\eta_k$  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

**5.1.1 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 Fertigungssystem steht.



### 5.1.2 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 Fertigungsvorgangsfolgechromosom. Der kapazitive Nutzungsgrad  $\eta_K$  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 Produktionsprogramms notwendigen Anzahl Fertigungsplätze plus einem definierten Mehrbedarf. Damit kann die Optimierung Fertigungsplätze hinzufügen, falls die damit verbundene Einsparung an Transportaufwand den Gesamtaufwand senkt.

### 5.1.3 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.

### 5.1.4 Weitere Parameter eines Individuums

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) beschrieben<sup>5</sup>.

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 5.4 eingegangen.

<sup>5</sup> Fitness steht für Aufwendung, d.h. kleine Fitnesswerte sind im Sinne einer Minimierungsaufgabe anzustreben.

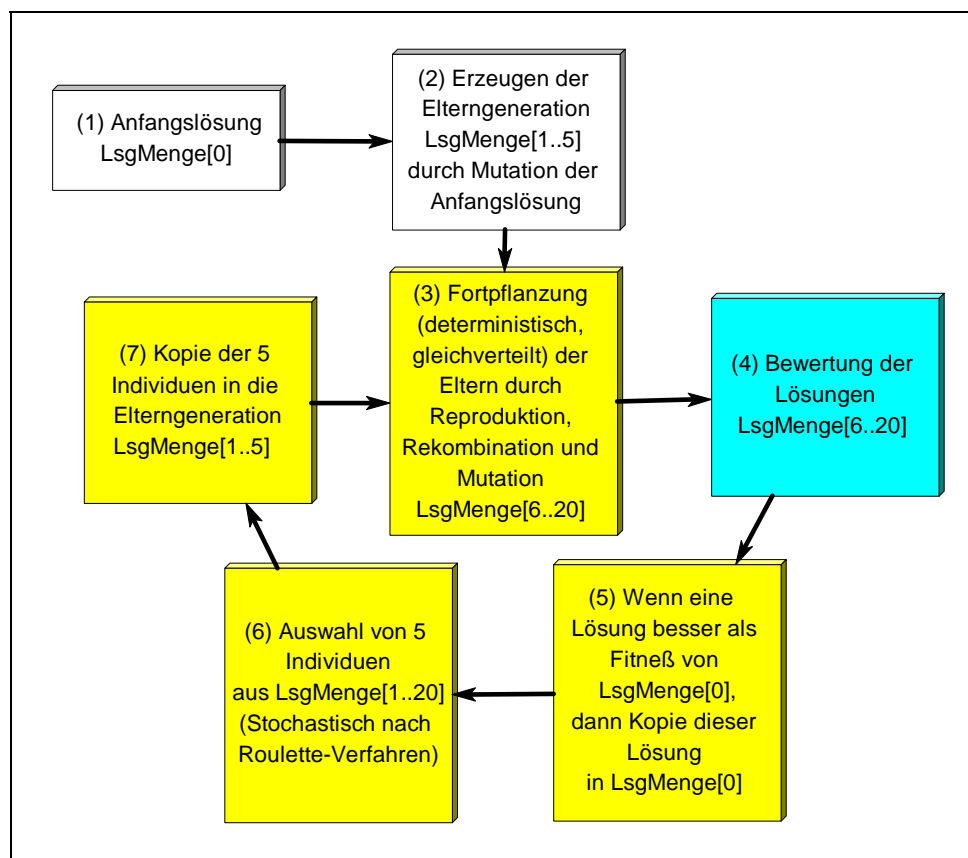
### 5.1.5 Die Generation

Individuen, die gewissermaßen parallel untersucht werden und dabei direkt konkurrieren, bilden jeweils eine Generation. Die in der Literatur als sinnvoll angegebenen Werte für die Wahl der Generationsgröße  $N$  (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/). Für praxisrelevante Probleme der Fertigungsstrukturierung wird aus Gründen des Speicher- und Rechenzeitaufwandes eine Beschränkung der Generationsgröße auf  $N=21$  Individuen als ein guter Kompromiss zwischen Konvergenzgeschwindigkeit der Fitnesswerte gegen das Optimum und Qualität der Lösung erachtet.

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 in empirischen Testreihen als besonders günstig für den Selektionsdruck erwiesen /NEST-96/. 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“.

## 5.2 Die Ablaufschrittfolge des Genetischen Algorithmus

In **Bild-3** sind die einzelnen Schritte des Optimierungsalgorithmus dargestellt.



**Bild-3:** Der evolutionäre Optimierungsalgorithmus



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 auch eine beliebig voroptimierte Anfangslösung (z.B. nach einem Verfahren aus **Bild-1**) dem Genetischen Algorithmus übergeben werden.

Im *Schritt 2* werden die weiteren Individuen der Elterngeneration  $LsgMenge[1..5]$  durch den genetischen Operator *Mutation* (siehe Abschnitt 5.3.3.) 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.

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 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 an Generationen seit der letzten Fitnessverbesserung automatisch die Optimierung.

### 5.3 Die genetischen Operatoren

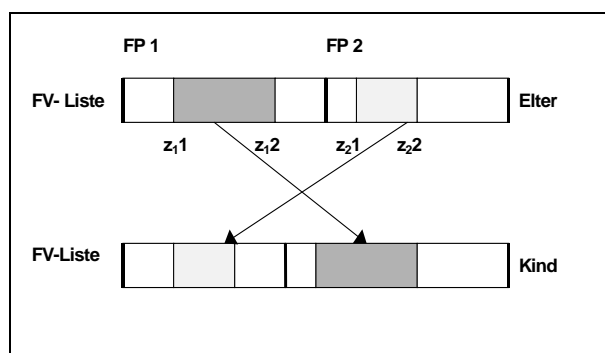
#### 5.3.1 Reproduktion

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“.

#### 5.3.2 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 (asexuelle oder Selbstrekombination) ausgetauscht.

Beispielsweise werden zur Rekombination des Fertigungsvorgangschromosoms (**Bild-4**) zunächst zufällig, gleichverteilt zwei Fertigungsplätze des gleichen Typs



**Bild-4:** Selbstrekombination des Fertigungsvorgangschromosoms

ausgewählt. Aus den beiden Mengen der diesen Fertigungsplätzen zugeordneten Fertigungsvorgänge wird jeweils eine Teilmenge ausgewählt. Die Auswahl der Fertigungsvorgänge und deren Anzahl geschieht ebenfalls zufällig, gleichverteilt. In einem Iterationsprozess wird nun versucht, unter Hinzunahme und Wegnahme von Fertigungsvorgängen zu bzw. von den zufällig bestimmten Teilmengen, diese Teilmengen dem jeweils anderen Fertigungsplatz zuzuordnen.

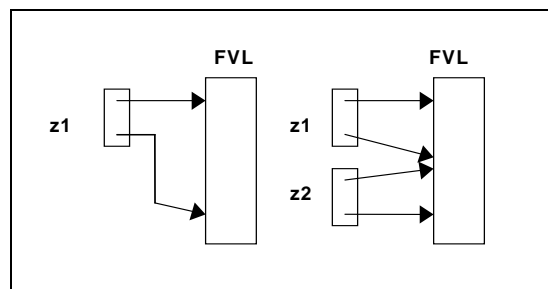
Die Problematik dieses Operators besteht darin, dass nach dem Austausch der Teilmengen die Gesamtkapazität beider Fertigungsplätze nicht überschritten sein darf.

### 5.3.3 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 (partiell angepasste Individuen) wieder verlassen werden können und in andere Bereiche des Suchraumes „gesprungen“ wird.

Am Beispiel des Reihenfolgechromosoms wird eine Mutationsmöglichkeit erläutert. Zunächst wird der Fertigungsplatz z2 zufällig, gleichverteilt ausgewählt.

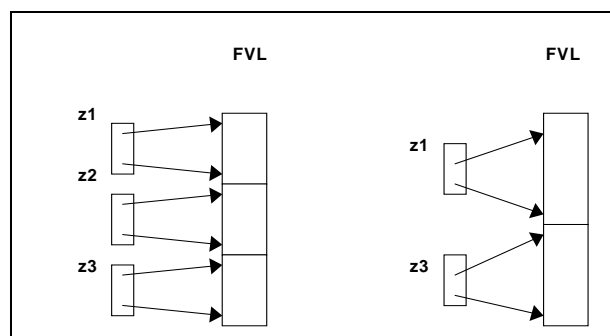
(a) Ist das Gen z2 nicht belegt, wird versucht, einen Fertigungsplatz hinzuzufügen. Dabei wird zufällig gleichverteilt eine Fertigungsplatzart ausgewählt. Zunächst wird geprüft, ob der ausgesuchte Fertigungsplatz noch hinzugefügt werden kann, d.h., die maximal mögliche Anzahl der Fertigungsplätze muss 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 (**Bild-5**).



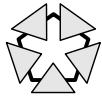
**Bild-5:** Aufteilung der Fertigungsvorgänge beim Einfügen eines Fertigungsplatzes

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.

(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.



**Bild-6:** Aufteilung der Fertigungsvorgänge beim Löschen eines Fertigungsplatzes



Abschließend wird geprüft, ob sich die dem zu löschenden Fertigungsplatz zugeordneten Fertigungsvorgänge auf andere Fertigungsplätze aufteilen lassen (**Bild-6**). Ist eine Aufteilung der Fertigungsvorgänge möglich, kann der Fertigungsplatz gelöscht werden.

## 5.4 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,
- Überschreitung der zulässigen Zahl der Fertigungsplätze je Fertigungsplatzart,
- Verletzung vordefinierter Gruppierung von Fertigungsplätzen,
- 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 maximale Fläche eines Fertigungssystems.

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

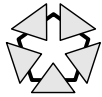
### 3. Beurteilung des Individuums bezüglich

- Aufwendungen in Hauptflussrichtung,
- Aufwendungen entgegen Hauptflussrichtung (backtracking),
- Aufwendungen bei Wechsel zwischen verschiedenen Fertigungssystemen,
- Aufwendungen durch Nichtbelegung von Fertigungsplätzen im Fertigungssystem,
- Aufwendungen durch Nichtbelegung in Reihenfolge der Fertigungsplätzen im Fertigungssystem (bypassing).

Diese Individuen werden vom Bewerber mit einer Fitness belegt, deren Höhe über den Anteil am Roulette-Verfahren (**Bild-3**, 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:

$$F = F_{\text{Struktur}} + F_{\text{Fertigungsplätze}} \quad (\text{Gl.-6})$$

$$F_{\text{Struktur}} = F_{\text{HFR.e}} + F_{\text{FSW}} + F_{\text{NB.FS}} + F_{\text{NB.RF}} \quad (\text{Gl.-7})$$

Formelzeichen	Bedeutung	Inhalt
$F$	Fitness der Lösung	Zielfunktionswert der Lösung
$F_{\text{FSW}}$	Fitness bei Fertigungssystemwechseln	Aufwand, der durch Transport, Steuerung und Organisation je Flussbeziehung bei Wechsel zwischen des Systemen verursacht wird.
$F_{\text{HFR.e}}$	Fitness entgegen Hauptflussrichtung ( <i>backtracking</i> )	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 ( <i>bypassing</i> )	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 zusätzlichen Fertigungsplätze	Aufwand, der durch die zusätzlichen Fertigungsplätze verursacht wird (Investitionskosten usw.)
$F_{\text{Struktur}}$	Fitness für die Struktur	Aufwand, der durch die Struktur der Fertigungssysteme verursacht wird

**Tabelle-3:** Fitnessarten



## 6 Anwendungsbeispiele

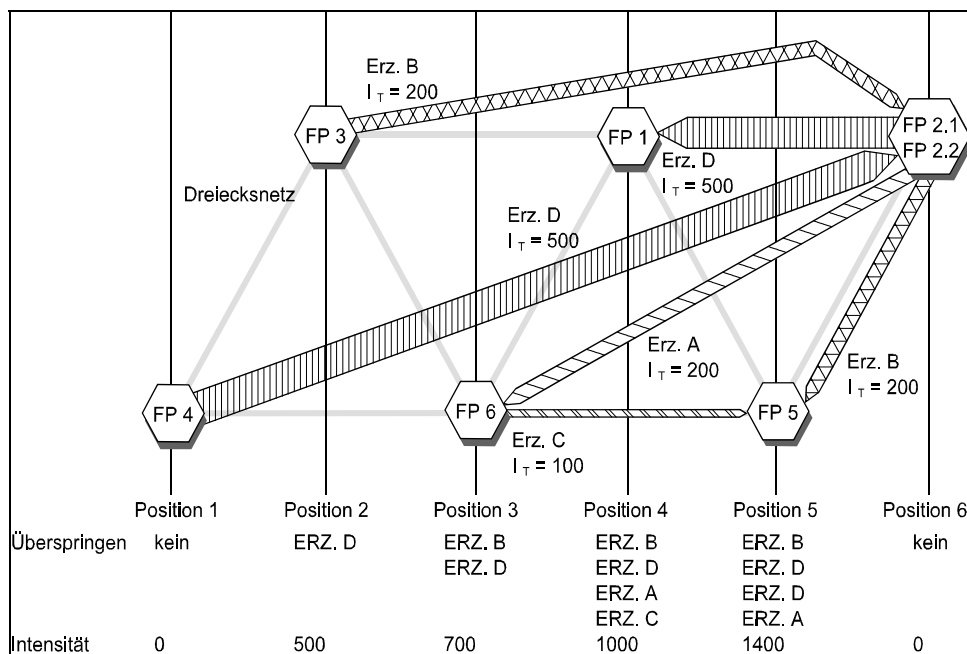
### 6.1 Überplanung einer Produktionsfläche

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-7**) 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

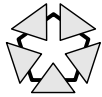
erfolgen.

Die 400 Teilearten wurden entsprechend ihrer Fertigungsvorgangfolgen 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 Fertigungsvorgangfolgen in **Tabelle-4** dargestellt.



**Bild-7:** Strukturgraf ungesplittete Fertigung (Ausgangszustand)

Auf der Grundlage dieser Ausgangswerte erfolgt die statische Dimensionierung für die zu untersuchenden Ressourcen. Wie **Tabelle-5** 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.



NR-TA	TA	n-FM	n_l	NR-FV	NR-FPA	t-FP
		[Stck.]	[Stck.]			[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-4:** Teilearten mit FVF

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

**Tabelle-5:** Fertigungsplatzarten

Abgeleitet aus der Zielsetzung sowie den betrieblichen Bedingungen gelten für die Strukturierung die Restriktionen aus **Tabelle-6**.

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 <sup>2</sup> ]	300
Maximale Investitionskosten	K-I [DM]	0

**Tabelle-6** Restriktionen für die Strukturierung

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-7**).

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

**Tabelle-7:** Basisgrößen der Bewertung

Mit diesen Informationen wurde eine Strukturierung mit dem Programm SiDiS<sup>GA</sup> durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle-8** und **Bild-8** zusammenfassend dargestellt.

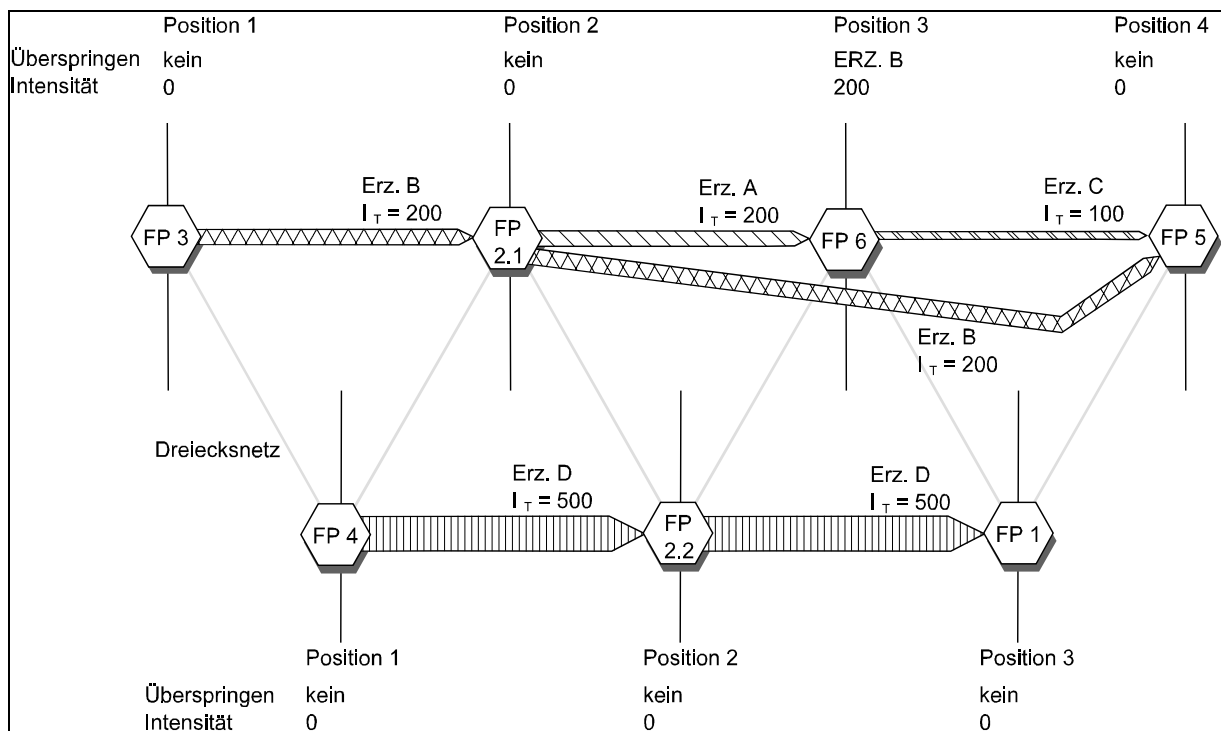
Aus dem Strukturgraf (**Bild-8**) ist deutlich erkennbar, dass zwei völlig autonome Systeme mit gerichteter Linien- bzw. Netzstruktur gebildet werden können. Dieses Ergebnis liegt bereits in der 104. Generation prinzipiell vor. Die nachfolgenden und wesentlich zeitaufwändigeren Berechnungen verbessern nur die transportlosgenaue Zuordnung zu den Ferti-

gungsplätzen 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-9**) ersichtlich, die mit den statischen Ergebnissen (**Tabelle-5**) identisch sind.

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	

**Tabelle-8:** Entwicklung der Fitnesswerte

Ein Vergleich der Basislösung mit dem Ergebnis der Strukturierung (Tabelle-8) 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.

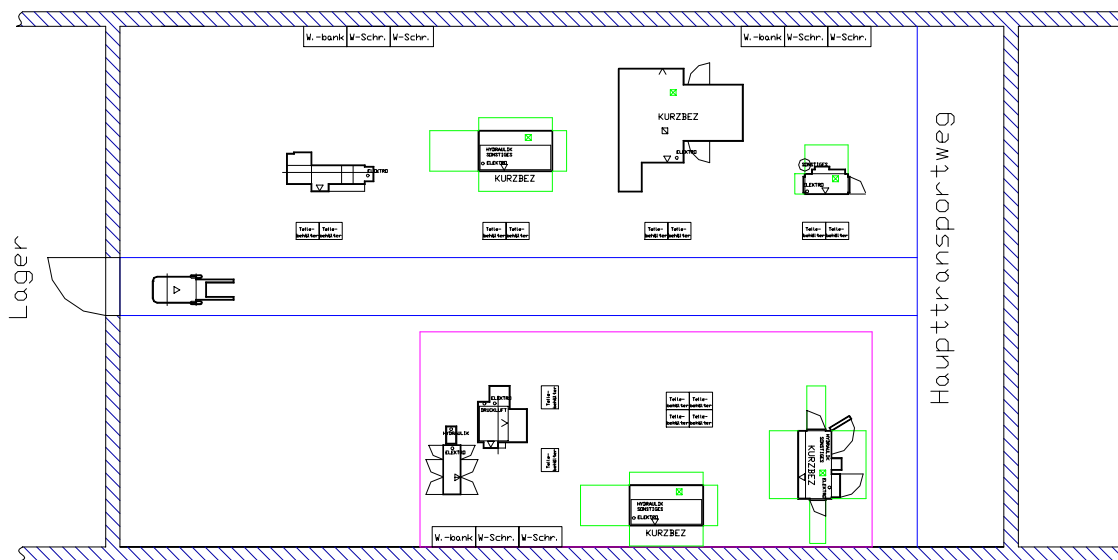


**Bild-8:** Strukturgraph der gebildeten Fertigungssysteme (Strukturierungsergebnis)

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

**Tabelle-9:** Fertigungssysteme nach der Strukturierung

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-9** abschließend.



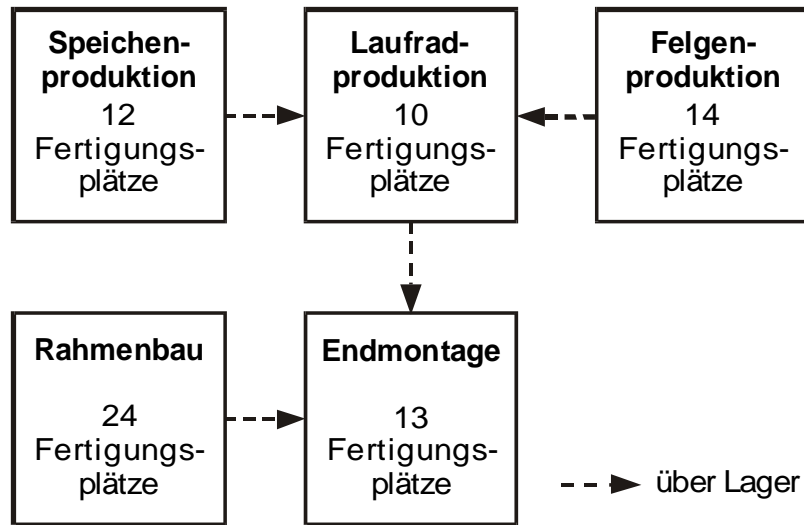
**Bild-9:** Beispiel-Lay-out für das Strukturierungsergebnis

## 6.2 Neuplanung einer Fahrradfabrik

Das Produktionsprogramm einer fiktiven Fahrradfabrik (Daten der TU Linz) besteht aus 3 Modellen (Mountain-, Trekking- und City-Bikes). Dafür müssen 65 Teilearten durch 433 Fertigungsvorgänge herstellbar sein. Bei der statischen Dimensionierung wurden 73 Fertigungsplätze (FP) in 46 unterschiedlichen Fertigungsplatzarten (FPA) ermittelt. Die Nebenbedingungen (Restriktionen) wurden wie folgt festgelegt:

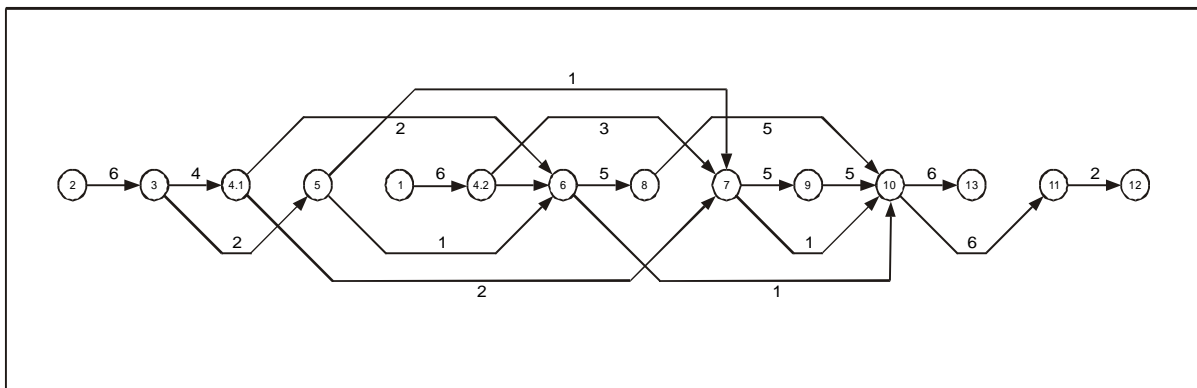
- maximale zusätzliche Investitionskosten 1 Mio. €
- maximal 10 Segmente
- maximal 50 FP / Segment
- maximal 10.000 m<sup>2</sup> Fläche / Segment

Die Optimierung mit SiDiS<sup>GA</sup> führte zur Bildung von 5 Fertigungssegmenten (**Bild-10**).



**Bild-10:** Optimal dimensionierte und strukturierte Fertigung als Ergebnis von SiDiS<sup>GA</sup>

Die Anordnungsreihenfolge der Fertigungsplätze innerhalb der Segmente wird in **Bild-11** exemplarisch am Segment „Felgenproduktion“ gezeigt.



**Bild 11:** Beispiel-Segment „Felgenproduktion“. Keine Rücktransporte.  
Transporte über nicht belegte Fertigungsplätze optimiert auf 50 Lose.

Die Fitness der Ausgangslösung betrug 641,36 RGE<sup>6</sup> (100 %). Die beste von SiDiS<sup>GA</sup> ermittelte Lösung wurde mit 232,85 RGE (36 %) bewertet. Das tatsächliche Optimum beträgt 228,27 RGE (35 %), d.h. es wurde durch den Genetischen Algorithmus bis auf ca. 1% bezogen auf die Ausgangslösung der ungesplitteten Fertigung genähert!

<sup>6</sup> Relative Geld-Einheiten



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die bisher durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass mit den Genetischen Algorithmen bessere Fertigungsstrukturen erzielt werden als mit den herkömmlichen Verfahren. Dabei stellte sich heraus, dass es bezüglich der Rechenzeit günstig ist, die Individuen der ersten Generation (Urgeneration) mit Hilfe einer oder mehrerer „klassischer“ Verfahren (**Bild-1**, Kapitel 2) 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.

Dabei soll untersucht werden, ob durch eine gestufte Vorgehensweise:

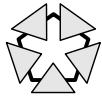
- Hierarchische Strukturierung → räumliche Strukturierung
- Statische Dimensionierung → dynamische Dimensionierung
- Globale Bewertung (Hauptparameter) → detaillierte Bewertung (Haupt- und Nebenparameter) der Planungslösung

und eine stufenweise Reduzierung der Komplexität der Flussgegenstände und Elemente des Werkstückflusssystem:

- Fertigungsplatzarten → Fertigungsplätze
- Produktgruppen → Produkte → Produktaufträge (Lose)

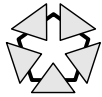
ohne wesentliche Verschlechterungen der Qualität der zu planenden Flusssysteme die Dauer des Planungsprozesses verkürzt werden kann.

Mit einer verbesserten Feineinstellung der Ausführungswahrscheinlichkeiten für die genetischen Operatoren ist eine schnellere Konvergenz des evolutionären Optimierungsprozesses zu erwarten. Diesbezüglich wird derzeit eine Neuportierung der Algorithmen auf Pentium-III-PC unter Microsoft-Windows<sup>®</sup> mit dem Ziel einer Laufzeitbeschleunigung durchgeführt.



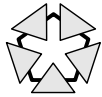
## Literaturverzeichnis

- /ARNO-95/ Arnold, J.: *Die Verwendung von Evolutionären Algorithmen bei der Optimierung von Fertigungssystemen*. Diplomarbeit, TU Chemnitz, Fakultät für Informatik, Professur Modellierung und Simulation, 1995.
- /ARNO-98/ Arnold, J.; Fischer, Th.; Förster, A.; Fröhner, A.: *Optimierung der Kosten für die Produktionslogistik bei der Fertigungssegmentierung mittels genetischer Algorithmen*. In Ziems, D. (Hrsg.): *Logistikplanung: Methoden, Werkzeuge, Potentiale*. 4. Magdeburger Logistik-Tagung, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Förder- und Baumaschinentechnik, November 1998, S. 163-178.
- /ARNO-99/ Arnold, J.; Fischer, Th.; Fröhner, A.: *Ein Genetischer Algorithmus zur simultanen Dimensionierung und Strukturierung von Fertigungssystemen*. In Köchel, P. (Hrsg.): *KI-Methoden in der simulationsbasierten Optimierung*. Chemnitzer Informatik-Berichte CSR-99-03 zum Workshop „Simulation und Künstliche Intelligenz“, TU Chemnitz, Fakultät für Informatik, April 1999, S. 31-47.
- /ARNO-00/ Arnold, J.; Fischer, Th.; Fröhner, A.: *Ein Modell zur simultanen Dimensionierung und Strukturierung von Fertigungssystemen mittels genetischer Algorithmen*. In Biethahn, J. (Hrsg.): *Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe: Neuere Werkzeuge und Anwendungen aus der Praxis - 7. Symposium in Braunlage*. Tagungsband, Georg-August-Universität, Institut für Wirtschaftsinformatik, Göttingen, März 2000, S. 151-167.
- /BANE-95/ Banerjee, P.; Zhou, Y.: *Facilities layout design optimization with single loop material flow path configuration*. *International Journal of Production Research*, Vol. 33., No. 1, 1995, S. 183-203.
- /BOGA-98/ Bogatzki, A.: *Fabrikplanung: Verfahren zur Optimierung der Maschinenaufstellung*. Roderer, Regensburg, 1998.
- /EBLE-96/ Eblenkamp, M.: *Planung von Produktionssystemen mit Evolutionsverfahren*. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 396, Düsseldorf, 1996.
- /FAIF-96/ *CAD-FAIF - Rechnergestütztes Fabrikplanungs- und Projektierungssystem*. Dokumentation zur Einsatzcharakteristik, TU Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Institut für Betriebswissenschaften und Fabrik-systeme, 1996.
- /FORR-93/ Forrest, S. (Hrsg.): *Proceedings of the fifth international conference on Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, 1993.
- /FÖRS-83/ Förster, A.: *Strukturierung von Teileflusssystemen der Fertigung im Maschinenbau*. Dissertation B, TH Karl-Marx-Stadt, 1983.



- /FRAN-92/ Francis, L.F.; McGinnis, Jr.; White, J.A.: *Facility Layout and Location: An Analytical Approach*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.
- /GEN-97/ Gen, M.; Chen, R.: *Genetic Algorithms and engineering design*. Wiley, New York, 1997.
- /HASS-94/ Hassan, M.M.D.: *Machine layout problem in modern manufacturing facilities*. International Journal of Production Research, Vol. 32, No. 11, 1994, S. 2559-2584.
- /HERA-97/ Heragu, S.S.: *Facilities design*. PWS Publishing, Boston, 1997.
- /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*. Oldenbourg, München, 1994.
- /KOUV-92/ Kouvelis, P.; Chiang, W.-C.: A simulated annealing procedure for single row layout problems in flexible manufacturing systems. International Journal of Production Research, Vol. 30., No. 4, 1992, S. 717-732.
- /NEST-96/ Nestler, A.: *Rechnergestützte Strukturierung von Fertigungssystemen auf der Basis ähnlicher Vorgangfolgen mittels Genetischer Algorithmen*. Diplomarbeit, TU Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme, 1996.
- /RAJA-98/ Rajasekharan, M.; Peters, B.A.; Yang, T.: *A genetic algorithm for facility layout design in flexible manufacturing systems*. International Journal of Production Research, Vol. 36, No. 1, 1998, S. 95-110.
- /SARK-91/ Sarker, B.; Wilhelm, W.E.; Hogg, G.L.; Han, M.-H.: *Backtracking of Jobs and Machine Location Problems*. In White, J.A.; Pence, I.W. (Hrsg.): *Progress in Material Handling and Logistics*. Volume 2. Springer, Heidelberg, 1991.
- /SCHA-89/ Schaffer, J.D. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd International Conference of Genetic Algorithms & Applications*. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, 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*. Tagungsband, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1993.





## Anhang: Beispiel einer Parameterdatei von SiDiS<sup>GA</sup>

```
; Parameterdatei für SiDiS/GA
; -----
; Zur Vorgruppierung von FP muss zuerst die Anzahl der Gruppen (Vektoren)
; angegeben werden ... ( >= 0)
;
3
; ... dann ein Vektor mit der Anzahl an FP je Gruppe (>=1)
;
3 2 2
; ... und danach die Vektoren mit den zu gruppierenden FP/FG ("FpNr" oder "FgNr" aus
; PDB-Tabelle Dat_tFP), d.h. Fg und Fp koennen gemischt angegeben werden.
;
'80000' '40020' '40010'
'00830' '00850'
'90000' '85000'
;
; Jetzt muessen die Gruppen klassifiziert werden:
; 0 - normale Gruppe      (FP sollen im gleichen Segment stehen)
; 1 - isolierte Gruppe    (FP sollen allein im gleichen Segment stehen)
; 2 - ausgegliederte Gruppe (FP bilden ein autarkes Segment, z.B. Kooperation)
;
0 2 0
;
; -----
; Nummer des Produktionsprogrammes (bei < 0 werden alle aktiven PP ausgewaehlt)
;
1
;
; -----
; Anfangsloesung: 0 - ohne vorgegebene Fertigungssegmente
;                 1 - mit vorgegebenen aber leeren Fertigungssegmenten
;                 2 - mit Anfangsloesung aus der PDB
;
0
;
; -----
; Die 4 Parameter fuer die Aufwandsbewertung in RGE stehen als Gleitpunktzahlen
; in einem Vektor mit folgender Bedeutung:
; [1] Aufwand (Strafe) bei Nichtbelegung von FP im Segment
; [2] Aufwand beim Überspringen von FP (bypassing)
; [3] Aufwand bei Transport entgegen der Flussrichtung (backtracking)
; [4] Aufwand bei Transport zwischen Fertigungssegmenten
; allg. soll gelten: 0 <= [1]<[2]<[3]<[4]
; ACHTUNG: Diese Werte stehen in unmittelbarer Beziehung zu den Stundenkostaetzen und
;          den Investitionskosten!
;
0.01 0.1 0.2 0.69
;
; -----
; maximale Anzahl an Fertigungssegmenten (0 bedeutet beliebig viele FS)
;
0
;
; -----
; Faktor der indirekten Flaechen fuer die Flaechenvorausbestimmung, z.Bsp.
; 1.85 fuer spanende Teilefertigung mit expl. ausgewiesenen Fp der Qualitaetskontrolle
; 1.98 fuer spanende Teilefertigung ohne expl. ausgewiesenen Fp der Qualitaetskontrolle
;
1.85
;
; -----
; maximale Investitionskosten fuer zusaetzliche Fertigungsplaetze ( >= 0.00)
;
1000000.00
```