

SiDiS^{GA} - ein integriertes Planungswerkzeug zur simultanen Dimensionierung und Strukturierung von Teileflusssystemen

Jens Arnold

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Informatik, 09107 Chemnitz

Zusammenfassung: Die Fertigungssegmentierung ist ein wichtiges strategisches Planungsproblem, dessen Lösung einen relativ langfristigen Einfluss auf die Kosten und somit auf die Wettbewerbsfähigkeit eines produzierenden Unternehmens hat. Die Kosten des innerbetrieblichen Warenflusses machen häufig einen Großteil der gesamten Logistikkosten aus, die branchenabhängig im allgemeinen auf einen Prozentsatz zwischen vier und dreißig des Umsatzes geschätzt werden. 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 nach fertigungsorganisatorischen Aspekten zu hierarchischen Ordnungsebenen (*hierarchische Strukturierung*) sowie deren topologisch optimaler Anordnung innerhalb der Ordnungsebenen (*räumliche Strukturierung*) unter Beachtung einer Vielzahl von Nebenbedingungen. Bisher wurden die Phasen Dimensionierung und Strukturierung separat in einem sequenziellen oder iterativen Optimierungsprozess betrachtet. Diese Aufteilung erscheint in Anbetracht der Komplexität des zu Grunde liegenden Optimierungsproblems notwendig zu sein, ermöglicht allerdings nur das Auffinden suboptimaler Produktionssystemstrukturen. Ziel ist die Schaffung kostengünstigerer Fertigungsstrukturen für gegebene Produktionsprogramme auf Basis einer simultanen Dimensionierung und hierarchisch-räumlichen Strukturierung der Teileflusssysteme mittels Genetischer Algorithmen unter Berücksichtigung der für die Planung verfügbaren Zeit. Dieser Beitrag stellt nach einer kurzen Darstellung des Planungsmodells und seiner Einordnung in den Planungsprozess das integrierte Software-Tool SiDiS^{GA} zur Simultanplanung von Teileflusssystemen vor. Die Basis für dieses Planungswerkzeuges bildet das in /ARNO-00a/ diskutierte Modell zur simultanen Dimensionierung und hierarchisch-räumlichen Strukturierung von Fertigungssystemen mittels Genetischer Algorithmen. Darin wurden die bei herkömmlichen Verfahren einzeln optimierten Partialprobleme als ganzheitliches Optimierungsproblem formuliert und rechentechnisch umgesetzt. SiDiS^{GA} ist eine Softwarekomponente (Modul) des integrierten, modularen und projektspezifisch konfigurierbaren Produktionsplanungssystems 2000+, das als Low-Cost-Component-Ware im Rahmen des Innovationskollegs „Bildung eines vernetzten Logistik- und Simulationszentrums“ (INK 17/B1-1) an der Technischen Universität Chemnitz und der Westsächsischen Hochschule Zwickau entwickelt wurde.

1 Einordnung in den Planungsprozess

Die Planung von Produktionssystemen läuft i. Allg. nach den synthetisierenden Projektierungsschritten

- (1) Bestimmung des Produktionsprogramms,
- (2) Funktions- und Prozessbestimmung,
- (3) Dimensionierung,
- (4) Strukturierung,
- (5) Gestaltung

ab. Da die rein sequenzielle Ausführung dieser Projektierungsschritte aufgrund der Komplexität

des gesamten Planungsprozesses keine optimalen Fabrikstrukturen generieren kann, sind zumindest für den Kernprozess der technologischen Planung (Schritte 3 bis 5) eine Menge von Rückkopplungen zwischen den einzelnen Projektierungsschritten und ihre iterative zyklische Abarbeitung kennzeichnend. Dieser Kernprozess kann wie im **Bild 1** dargestellt, in weitere Planungsschritte untergliedert werden. Aus der methodisch sinnvollen Zusammenfassung einzelner Planungsschritte zu Modellen der Simultanplanung folgen die drei Planungsschwerpunkte:

- simultane Dimensionierung und Strukturierung,
- dynamische Dimensionierung für statische und dynamische Ressourcen,
- partizipative, simulationsgestützte Layoutplanung.

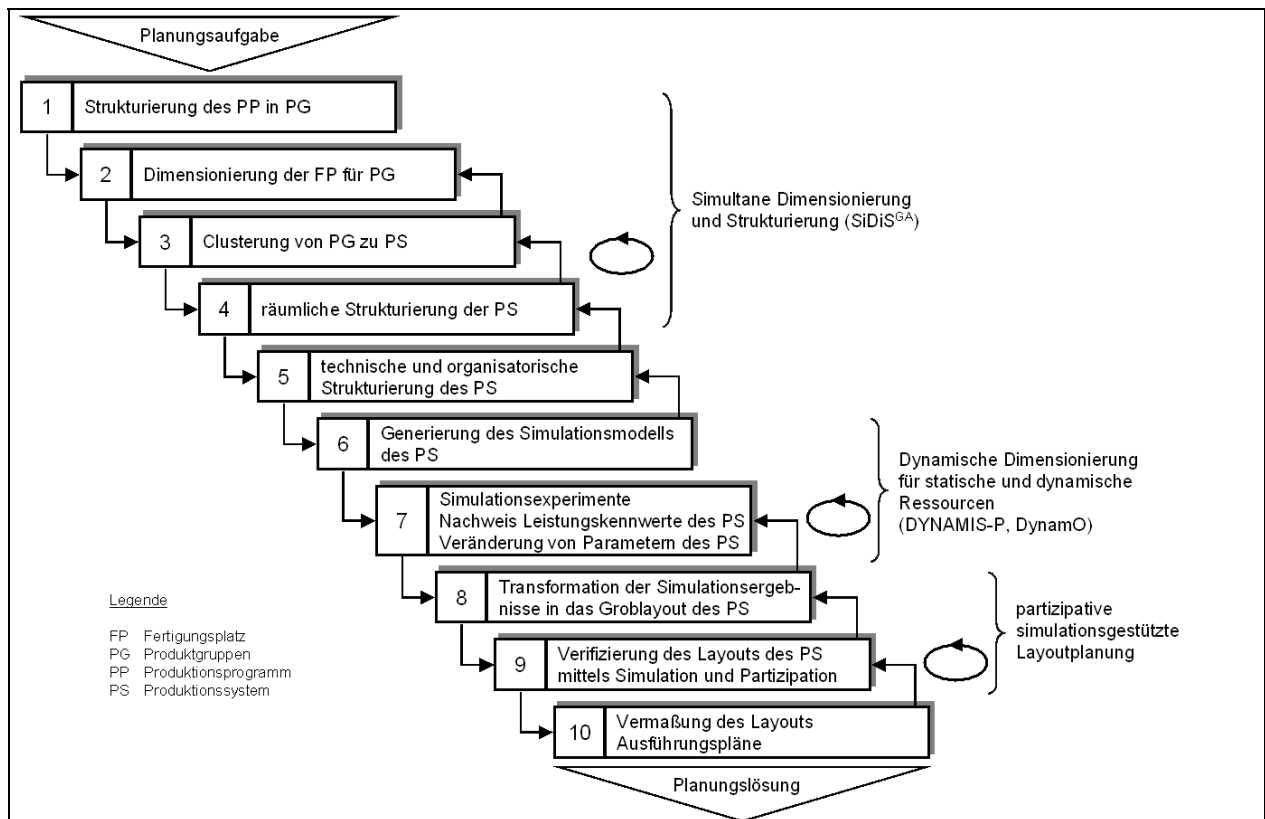


Bild 1: Integration von Planungsschritten, -sequenzen und -zyklen, nach /FÖRS-01/

Die Eingangsvoraussetzung für die simultane Dimensionierung und Strukturierung ist demnach das in seinen Funktionen, Prozessen und Erzeugnismengen bestimmte Produktionsprogramm. Ihr Ergebnis, das Groblayout, liefert nach dem Zwischenschritt der technischen und organisatorischen Strukturierung des Produktionssystems (Schritt 5, in Bild 1) die Eingangsdaten für die dynamische Dimensionierung (siehe /HADE-00/ und /KOBY-00/), deren Resultate wiederum direkt als Eingangsdaten an die partizipative¹, simulationsgestützte Layoutplanung (siehe /WIRT-00b/) weitergereicht werden. Je mehr Planungsschritte methodisch integriert werden können, um so größer ist der Gewinn an Planungsqualität und die mögliche Verkürzung der Planungszeit /FÖRS-01/. Wie aus Bild 1 ersichtlich ist, kann der simultanen Dimensionierung und Strukturierung im Schritt 1 die Bildung von Produktgruppen (Teilefamilien) vorangestellt werden. Zur Reduzierung der Eingangsdaten wird hier die Bildung eines normierten Produktionsprogramms vorgeschlagen. Diese Methode führt zu keinem Informationsverlust durch Aggregation wie bei der Produktgruppenbildung und garantiert damit die vollständige Adäquatheit der

¹ Partizipativ bedeutet: unter Einbeziehung des Menschen, speziell der in den entsprechenden Funktionsbereichen tätigen Arbeitskräfte, in den Planungs- und Optimierungsprozess. Dafür ist der Einsatz moderner Visualisierungs- und Interaktionstechniken, wie z.B. ein rechnergekoppelter Planungstisch, erforderlich.

Planungsergebnisse des normierten Produktionsprogramms für das tatsächliche Produktionsprogramm. Die simultane Dimensionierung und Strukturierung führt nach einer einfachen statischen Dimensionierung und Losbildung die Planungsschritte

- (2) Dimensionierung in Abhängigkeit von der Struktur,
- (3) hierarchische Strukturierung durch Bildung von Fertigungssegmenten und
- (4) räumliche Strukturierung durch topologische Anordnung

aus Bild 1 gleichzeitig aus. Die grundlegende Anwendbarkeit dieses Verfahrens beruht auf der Methode der objekt- und produktorientierten Strukturierung, deren Einsatzmöglichkeiten wiederum vom Produktionssystemtyp (resp. dessen systembedingtem Fertigungsprinzipien) abhängen.

2 Modellbildung und -notation

In diesem Abschnitt wird die Modellnotationen anhand eines mengentheoretischen Ansatzes eingeführt - ohne das inhaltliche Verständnis der Objektmengen zu vertiefen. Das Modell eines Werkstückflusssystemes bestehe aus acht Objektmengen, die wie folgt definiert sind:

Definition 1:

Ein **Fertigungssegment** s ist ein Element der Menge \mathbf{S} ($S = |\mathbf{S}|$).

Attribute:

- s^F Fläche.
- s^π Permutationsvektor der Zahlen $1(1)F_s$: $s^\pi = (\pi(1), \dots, \pi(F_s))$, siehe dazu auch Relation (R4) der Definition 4.

Relationen:

Die Fertigungssegmente sind keinen Elementen anderer Mengen zugeordnet.

Definition 2:

Eine **Gruppe** g ist ein Element der Menge \mathbf{G} ($G = |\mathbf{G}|$).

Attribute: keine.

Relationen:

(R1) G Gruppen müssen S Fertigungssegmenten eindeutig so zugeordnet, dass für alle Teilmengen $\mathbf{G}_s \subseteq \mathbf{G}$ mit $s \in \mathbf{S}$ gilt:

$$\mathbf{G}_{s=x} = \{ g \in \mathbf{G} \mid \text{Gruppe } g \text{ ist dem Fertigungssegment } s_x \text{ zugeordnet.} \}$$

mit $\cup \mathbf{G}_s = \mathbf{G}$ und $\mathbf{G}_{s=x} \cap \mathbf{G}_{s=y} = \emptyset$ für alle $x \neq y$.

Definition 3:

Eine **Fertigungsplatzart** a ist ein Element der Menge \mathbf{A} ($A = |\mathbf{A}|$).

Attribute:

- a^K verfügbare zeitliche Kapazität je Fertigungsplatz,
- a^μ Faktor der Mehrmaschinenbedienung je Fertigungsplatz,
- a^λ Leistungszeitfaktor je Fertigungsplatz.

Relationen:

Die Fertigungsplatzarten sind keinen Elementen anderer Mengen zugeordnet.

Definition 4:

Ein **Fertigungsplatz** f ist ein Element der Menge \mathbf{F} ($F = |\mathbf{F}|$).

Attribute:

- f^F Fläche,

f^C Stundenkostensatz,
 f^A Abschreibungskosten.

Relationen:

- (R2) F Fertigungsplätze sind A Fertigungsplatzarten eindeutig so zugeordnet, dass für alle Teilmengen $\mathbf{F}_a \subseteq \mathbf{F}$ mit $a \in \mathbf{A}$ gilt:
 $\mathbf{F}_{a=x} = \{ f \in \mathbf{F} \mid \text{Fertigungsplatz } f \text{ ist der Fertigungsplatzart } a_x \text{ zugeordnet.} \}$
 mit $\cup \mathbf{F}_a = \mathbf{F}$ und $\mathbf{F}_{a=x} \cap \mathbf{F}_{a=y} = \emptyset$ für alle $x \neq y$.
- (R3) Ein Fertigungsplatz f kann einer Gruppe g eindeutig so zugeordnet sein, dass für alle Teilmengen $\mathbf{F}_g \subseteq \mathbf{F}$ mit $g \in \mathbf{G}$ gilt:
 $\mathbf{F}_{g=x} = \{ f \in \mathbf{F} \mid \text{Fertigungsplatz } f \text{ ist der Gruppe } g_x \text{ zugeordnet.} \}$
 mit $\mathbf{F}_{g=x} \cap \mathbf{F}_{g=y} = \emptyset$ für alle $x \neq y$.
- (R4) F Fertigungsplätze müssen S Fertigungssegmenten eindeutig so zugeordnet werden, dass für alle Teilmengen $\mathbf{F}_s \subseteq \mathbf{F}$ mit $s \in \mathbf{S}$ gilt:
 $\mathbf{F}_{s=x} = \{ f \in \mathbf{F} \mid \text{Fertigungsplatz } f \text{ ist dem Fertigungssegment } s_x \text{ zugeordnet.} \}$
 mit $\cup \mathbf{F}_s = \mathbf{F}$ und $\mathbf{F}_{s=x} \cap \mathbf{F}_{s=y} = \emptyset$ für alle $x \neq y$
 und $\forall f \in \mathbf{F}: f \in \mathbf{F}_{g=x} \wedge g_x \in \mathbf{G}_{s=y} \Rightarrow f \in \mathbf{F}_{s=y}$ gilt.

Definition 5:

Ein **Arbeitsplan** p ist ein Element der Menge \mathbf{P} ($P = |\mathbf{P}|$).

Attribute:

p^M zu fertigende Gesamtstückzahl,
 p^L Vorzugslosgröße (Stückzahl je Los).

Relationen:

Die Arbeitspläne sind keinen Elementen anderer Mengen zugeordnet.

Definition 6:

Ein **Los** l ist ein Element der Menge \mathbf{L} ($L = |\mathbf{L}|$).

Attribute:

l^M Losgröße (Anzahl Teile).

Relationen:

- (R5) L Lose sind P Arbeitsplänen eindeutig so zugeordnet, dass für alle Teilmengen $\mathbf{L}_p \subseteq \mathbf{L}$ mit $p \in \mathbf{P}$ gilt:
 $\mathbf{L}_{p=x} = \{ l \in \mathbf{L} \mid \text{Los } l \text{ ist dem Arbeitsplan } p_x \text{ zugeordnet.} \}$
 mit $\cup \mathbf{L}_p = \mathbf{L}$ und $\mathbf{L}_{p=x} \cap \mathbf{L}_{p=y} = \emptyset$ für alle $x \neq y$.

Definition 7:

Ein **Arbeitsvorgang** v ist ein Element der Menge \mathbf{V} ($V = |\mathbf{V}|$).

Attribute:

v^R Rüstzeit (pro Los),
 v^B Bearbeitungszeit (Stückzeit),
 v^β Bearbeitungszeitfaktor,
 v^V Vorgangsstückzahl (gleichzeitig bearbeitete Stückzahl).

Relationen:

- (R6) V Arbeitsvorgänge sind P Arbeitsplänen eindeutig so zugeordnet, dass für alle Teilmengen $\mathbf{V}_p \subseteq \mathbf{V}$ mit $p \in \mathbf{P}$ gilt:
 $\mathbf{V}_{p=x} = \{ v \in \mathbf{V} \mid \text{Arbeitsvorgang } v \text{ ist dem Arbeitsplan } p_x \text{ zugeordnet.} \}$
 mit $\cup \mathbf{V}_p = \mathbf{V}$ und $\mathbf{V}_{p=x} \cap \mathbf{V}_{p=y} = \emptyset$ für alle $x \neq y$.
 Über allen Elementen einer Teilmenge $\mathbf{V}_{p=x}$ ($x = 1(1) P$) ist eine vollständige Ordnungsrelation definiert: $v_1, v_2 \in \mathbf{V}_{p=x} \Rightarrow v_1 < v_2$, d.h. „ v_1 wird vor v_2 ausgeführt“.

(R7) V Arbeitsvorgänge sind A Fertigungsplatzarten eindeutig so zugeordnet, dass für alle Teilmengen $V_a \subseteq V$ mit $a \in A$ gilt:

$$V_{a=x} = \{ v \in V \mid \text{Arbeitsvorgang } v \text{ ist der Fertigungsplatzart } a_x \text{ zugeordnet.} \}$$

mit $\cup V_a = V$ und $V_{a=x} \cap V_{a=y} = \emptyset$ für alle $x \neq y$.

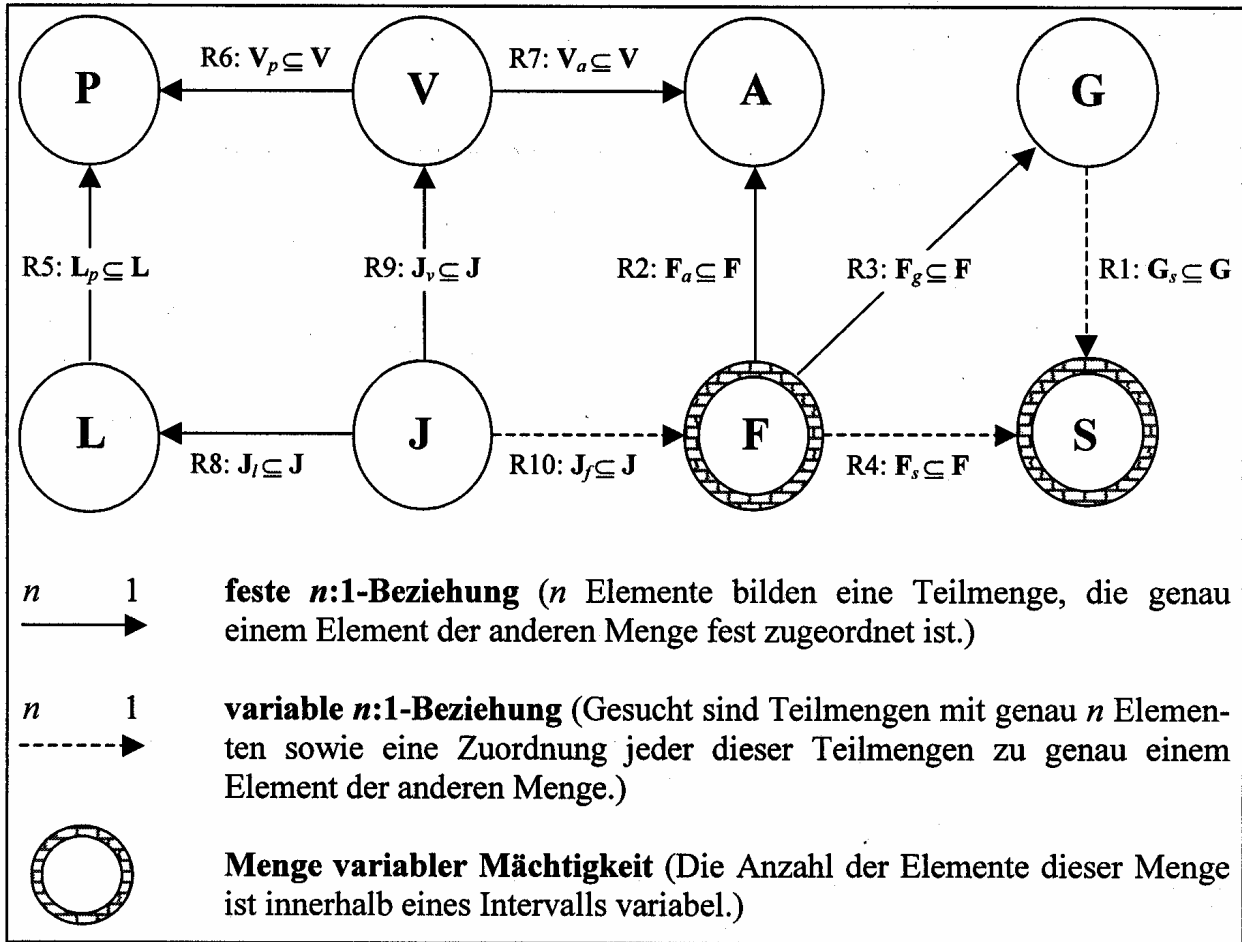


Bild 2: Zuordnungsrelationen zwischen den Objektmengen eines Werkstückflusssystemes

Definition 8:

Ein **Job** j ist ein Element der Menge \mathbf{J} ($J = |\mathbf{J}|$).

Attribute:

j^B Belegungszeit:

$$j^B = \frac{a_x^\mu}{a_x^\lambda} \left(v_y^R + v_y^B v_y^\beta \left[\frac{l_z^M}{v_y^V} \right] \right), \text{ wenn } j \in \mathbf{J}_{v=y} \wedge v_y \in \mathbf{V}_{a=x} \wedge j \in \mathbf{J}_{l=z} \quad (\text{Gl. 1})$$

Relationen:

(R8) J Jobs sind L Losen eindeutig so zugeordnet, dass für alle Teilmengen $\mathbf{J}_l \subseteq \mathbf{J}$ mit $l \in L$ gilt: $\mathbf{J}_{l=x} = \{ j \in \mathbf{J} \mid \text{Job } j \text{ ist dem Los } l_x \text{ zugeordnet.} \}$

mit $\cup \mathbf{J}_l = \mathbf{J}$ und $\mathbf{J}_{l=x} \cap \mathbf{J}_{l=y} = \emptyset$ für alle $x \neq y$.

(R9) J Jobs sind V Arbeitsvorgängen eindeutig so zugeordnet, dass für alle Teilmengen $\mathbf{J}_v \subseteq \mathbf{J}$ mit $v \in V$ gilt:

$\mathbf{J}_{v=x} = \{ j \in \mathbf{J} \mid \text{Job } j \text{ ist dem Arbeitsvorgang } v_x \text{ zugeordnet.} \}$

mit $\cup \mathbf{J}_v = \mathbf{J}$ und $\mathbf{J}_{v=x} \cap \mathbf{J}_{v=y} = \emptyset$ für alle $x \neq y$.

(R10) J Jobs müssen F Fertigungsplätzen eindeutig so zugeordnet werden, dass für alle Teilmengen $\mathbf{J}_f \subseteq \mathbf{J}$ mit $f \in F$ gilt:

$\mathbf{J}_{f=x} = \{ j \in \mathbf{J} \mid \text{Job } j \text{ ist dem Fertigungsplatz } f_x \text{ zugeordnet.} \}$
mit $\cup \mathbf{J}_f = \mathbf{J}$ und $\mathbf{J}_{f=x} \cap \mathbf{J}_{f=y} = \emptyset$ für alle $x \neq y$.

Bild 2 verdeutlicht die Beziehungen zwischen den Objektmengen. Die punktierten Pfeile bezeichnen jene Zuordnungsrelationen, die durch die simultane Dimensionierung und Strukturierung herzustellen bzw. zu optimieren sind.

3 Räumliche Strukturierung durch topologische Anordnung

Für das Problem der Reihenfolgeoptimierung innerhalb der Fertigungssegmente (zweite Hierarchieebene) wurde ein auf /SARK-91/ und /KOUV-92/ basierendes Modell erweitert. Diesem Modell² liegt ein lineares Anordnungsschema zu Grunde (**Bild 3**).

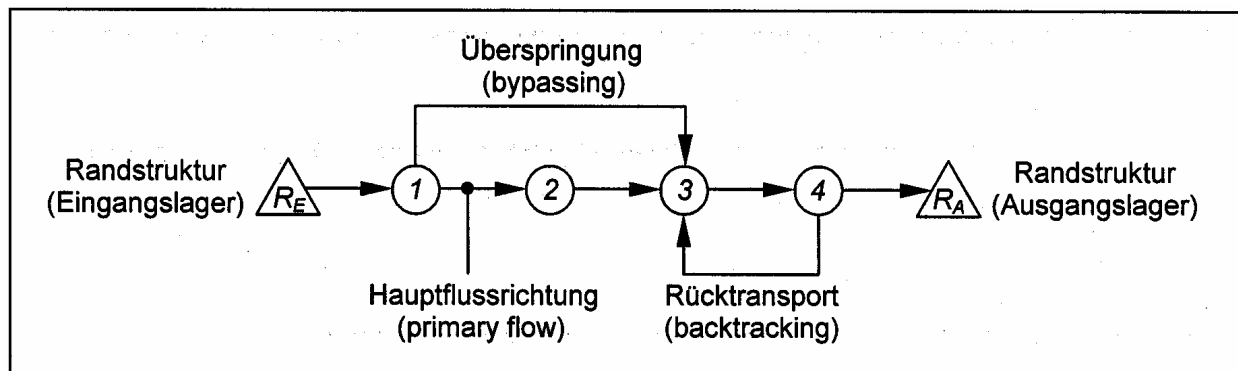


Bild 3: Anordnungsschema der Linienstruktur zur Reihenfolgeoptimierung

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 müssen entsprechend ihrer Arbeitsvorgangsfolge innerhalb der Fertigungssegmente von Fertigungsplatz zu Fertigungsplatz in oder entgegengesetzt der Hauptflussrichtung bewegt werden. Als *Überspringung* (engl. *bypassing*) wird dabei ein Transport in Hauptflussrichtung bezeichnet, bei dem ein Job an einem Fertigungsplatz vorbei bewegt werden muss. Ist die Bewegung eines Jobs entgegen der Hauptflussrichtung nötig, wird der Begriff *Rücktransport* (engl. *backtracking*) verwendet. Weiterhin können die Jobs das Fertigungssegment über die Randstruktur des Ausgangslagers verlassen und in ein anderes Fertigungssegment über die Randstruktur des Eingangslagers eingeschleust werden. Dieser Vorgang wird als *Segmentwechsel* (engl. *switching*) bezeichnet.

Daraus ergeben sich gegenüber den in /SARK-91/ und /KOUV-92/ verwendeten Modellen folgende Modifikationen und Erweiterungen:

- 1.) Die Überspringung von Fertigungsplätzen wird als Mehraufwand gegenüber dem direkten Transport zwischen unmittelbar benachbarten Fertigungsplätzen betrachtet.
- 2.) Daraus folgt, dass die Jobs nur am Einschleuspunkt in das Fertigungssegment eintreten und es auch nur am Ausschleuspunkt wieder verlassen können.

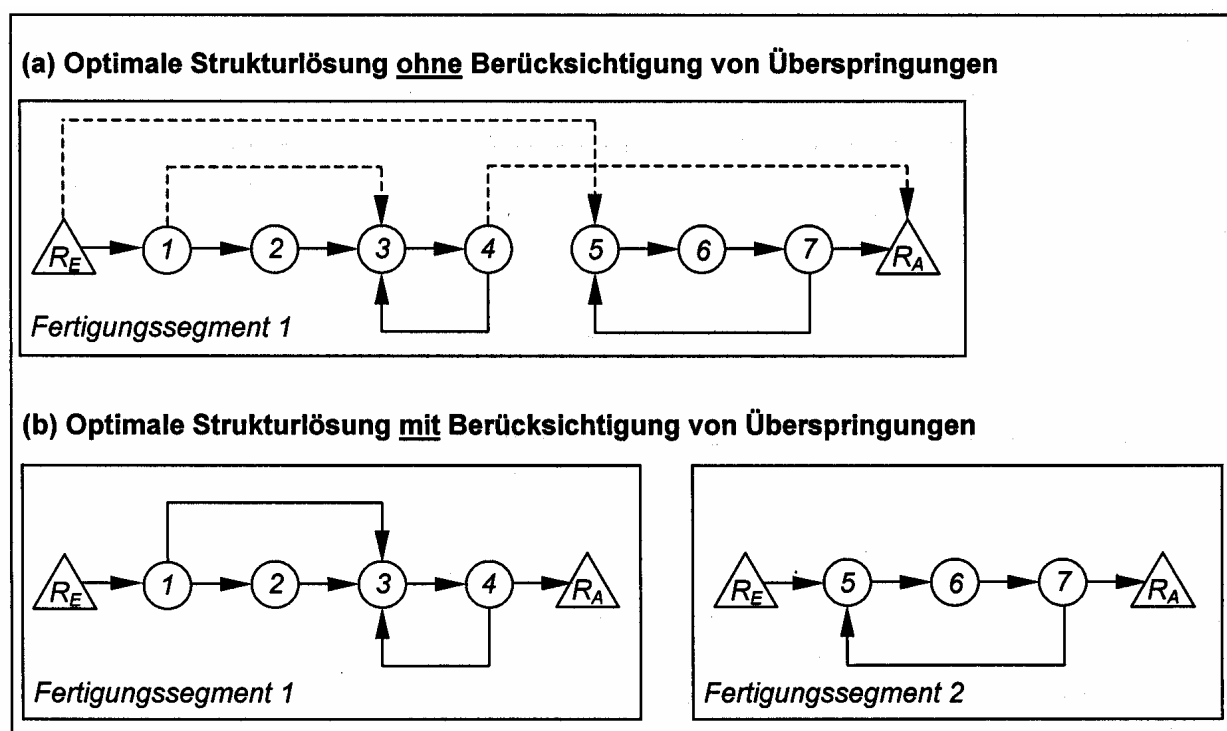
/SARK-91/ und /KOUV-92/ minimieren in ihren Modellen nur die Anzahl der Rücktransporte. Dabei genügt es, den Weg eines Jobs durch das Fertigungssegment nur zwischen dem ersten und letzten Fertigungsplatz seiner Bearbeitung zu betrachten. /SARK-91/ gibt dafür folgende Begründung: „Das explizite Ziel, die Rücktransporte in einer Fertigungslinie zu reduzieren, erfüllt

² SARKER et. al. bezeichnet dieses Modell als *generalized flow line (GFL)*, KOUVELIS und CHIANG benutzen den verbreiteteren Begriff *single row layout problem (SRLP)*, der auch in /HERA-97/ verwendet wird.

verschiedene implizite Ziele. Das implizite Ziel dieser Untersuchung besteht darin, die Entfernung, die ein Transportfahrzeug in rückwärtiger Richtung fahren muss, zu reduzieren. Eine solche Reduzierung der Rückfahrwege ist wünschenswert, weil sie einen höheren Durchsatz an Jobs erwarten lässt. I. Allg. ist eine erhöhte Durchsatzrate ein Maß für die erhöhte Leistungsfähigkeit der Fertigungslinie, welche letztlich als erhöhte Rentabilität angesehen werden kann. [...] Es ist klar, dass selbst in einer idealen Linienstruktur das Transportfahrzeug zurück fahren muss, um einen neuen Transport initiieren zu können (toter Weg). Die Bewegung des Transportfahrzeugs wird in diesem Modell nicht direkt behandelt; es wird erwartet, dass die Verbesserung des Materialflusses (indirekt) den Arbeitsaufwand für das Transportfahrzeug senken wird.“ /KOUV-92/ führt dazu ergänzend aus: „Die Reduzierung der Rückfahrwege kann ebenfalls die Maschinenbelegungsplanung und die Tourenfahrpläne für das Transportfahrzeug vereinfachen.“

Bild 4: Bedeutung von Überspringungen für die objektorientierte Strukturierung

Für ein Modell ohne Berücksichtigung von Überspringungen sind die beiden Strukturösungen (a) und (b) gleich-



wertig. Im Sinne der objektorientierten Strukturierung ist aber nur die Strukturösung (b) optimal.

Für die Zielstellung der simultanen Dimensionierung und Strukturierung sind diese Aussagen ebenfalls zutreffend aber nicht ausreichend. Angenommen, für ein gegebenes Produktionsprogramm existiert eine Linienstruktur mit minimierter Anzahl an Rücktransporten. Dann würde ohne einschränkende Restriktionen (z.B. Flächen der Fertigungssegmente) die optimale Strukturösung aus einem Fertigungssegment bestehen, in dem diese Linienstruktur realisiert ist — unabhängig von der Struktur der zu fertigenden Objektmenge. D.h. eine objektorientierte Strukturierung ist allein auf Basis der Minimierung der Rücktransporte nicht möglich, da eine Aufspaltung des Produktionsprogramms in Objekt- bzw. Produktgruppen und ihre Fertigung in separaten Fertigungssegmenten vom Modell nicht in jedem Fall erfasst wird (**Bild 4**). Daraus erwächst die Forderung, dass Überspringungen im Modell der simultanen Dimensionierung zu berücksichtigen sind. Obwohl Überspringungen für das Werkstückflusssystem weniger kritisch sind als Rücktransporte, stören sie dennoch den Flussprozess, besonders wenn die zeitliche Struktur des Flusssystem durch eine kontinuierliche oder diskontinuierlich-rhythmische Übertragungsintensität gekennzeichnet ist — z.B. beim Einsatz eines Stetigförderers. /HASS-94/ schreibt: „Überspringungen erzeugen unnötige Transportzeiten und -kosten und sollten minimiert werden.“ —

und stellt an gleicher Stelle fest: „Während verschiedene Verfahren zur Berücksichtigung und Minimierung der Rücktransporte publiziert wurden, finden sich in der Literatur keine Verfahren für das Problem der Überspringungen. Ferner wurde noch nicht einmal der Einfluss von Überspringungen auf den Durchsatz und die Produktivität eines Fertigungssystems untersucht.“

4 Grundlegende Aussagen zur Komplexität des Optimierungsproblems

Das Objekt-Platz-Zuordnungsmodell (siehe /SCHM-95/) entspricht einem quadratischen Zuordnungsproblem (QAP) und ist damit NP-vollständig. Dass diese NP-Vollständigkeit auch für den Spezialfall einer Linienstruktur (single row layout problem, SRLP) erhalten bleibt, wird in /KOUV-89/ bewiesen. Im Folgenden werden daher nur einige Überlegungen zur Größe des Suchraumes im Modell der simultanen Dimensionierung und hierarchisch-räumlichen Strukturierung angestellt.

Die Komplexität des Optimierungsproblems wird nach /ARNO-00b/ im Wesentlichen bestimmt durch

- die Anzahl F an Fertigungsplätzen,
- die Anzahl S an möglichen Fertigungssegmenten, mit $1 \leq S \leq S_{max}$ und $S_{max} \leq F$,
- sowie den Anzahlen an Jobs, die den einzelnen Fertigungsplatzarten a zugeordnet sind:

$$\sum_{j \in J_{v=x}} J_v, \forall v_x \in V_a \text{ für jedes beliebige, aber feste } a \in \mathbf{A}.$$

Für die rein hierarchische Strukturierung, d.h. die Zuordnung von F Fertigungsplätzen zu S Fertigungssegmenten ohne Beachtung der Anordnungsreihenfolge der Fertigungsplätze innerhalb der Fertigungssegmente, kann für gegebene F und S die Anzahl an potenziell möglichen Strukturösungen (ohne Beachtung etwaiger Nebenbedingungen) über die STIRLING³-Zahlen 2. Art berechnet werden.

Tabelle 1: Stirling's Dreieck für die Bildung ungeordneter Teilmengen

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

Rekursionsgleichung:

$$\varphi_S(F, S) = S \cdot \varphi_S(F-1, S) + \varphi_S(F-1, S-1)$$

mit $\varphi_L(F, S) = 0$, wenn $S = 0$ oder $S > F$ und $\varphi_L(F, S) = 1$, wenn $S = F$. (Gl. 2)

Iterationsgleichung:

³ James Stirling (1692-1770), schottischer Mathematiker.

$$\varphi_S(F, S) = \frac{1}{S!} \sum_{i=0}^S (-1)^i \binom{S}{i} (S-i)^F, F \geq S. \quad (\text{Gl. 3})$$

In **Tabelle 1** sind die Zuordnungsvarianten für $1 \leq F \leq 10$ Fertigungsplätze aufgeführt. Für 10 Fertigungsplätze existieren bereits 115 975 mögliche Strukturlösungen im Suchraum.

Wird zusätzlich zur Zuordnung von F Fertigungsplätzen zu S Fertigungssegmenten die Anordnungsreihenfolge der Fertigungsplätze innerhalb der Fertigungssegmente betrachtet, dann kann die Anzahl an möglichen Strukturlösungen (wiederum ohne Beachtung von Nebenbedingungen) über die LAH⁴-Zahlen berechnet werden /LAH-55/.

Rekursionsgleichung:

$$\varphi_L(F, S) = (F-1+S) \cdot \varphi_L(F-1, S) + \varphi_L(F-1, S-1) \\ \text{mit } \varphi_L(F, S) = 0, \text{ wenn } S = 0 \text{ oder } S > F \text{ und } \varphi_L(F, S) = 1, \text{ wenn } S = F. \quad (\text{Gl. 4})$$

Funktionsgleichung:

$$\varphi_L(F, S) = \frac{F!}{S!} \binom{F-1}{S-1} = \frac{F!(F-1)!}{S!(S-1)!(F-S)!}, F \geq S. \quad (\text{Gl. 5})$$

Die Funktion φ_L wächst mindestens exponentiell in F . In **Tabelle 2** sind die Zuordnungsvarianten für $1 \leq F \leq 10$ 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.

Tabelle 2: Lah's Dreieck für die Bildung geordneter Teilmengen

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

Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang die Frage, für welche S bei einem beliebigen aber festen F die Funktion $\varphi_L(F, S)$ ihr Maximum hat? Aus Gleichung 5 und Tabelle 2 kann vermutet werden, dass mindestens ein S^* mit $1 \leq S^* \leq F$ existiert, für das $\varphi_L(F, S)$ im Intervall $[1, S^*]$ monoton wächst und im Intervall $[S^*, F]$ monoton fällt. Gesucht sind also alle S^* für die gilt

$$(a) \quad 1 \leq S_l \leq S^* \quad \Rightarrow \quad \varphi_L(F, S_l - 1) \leq \varphi_L(F, S_l) \text{ und}$$

$$(b) \quad S^* \leq S_r \leq F \quad \Rightarrow \quad \varphi_L(F, S_r) \geq \varphi_L(F, S_r + 1).$$

⁴ Ivo Lah, slowenischer Mathematiker.

Es lässt sich zeigen, dass das gesuchte S^* im Intervall $\left[\left\lceil \sqrt{F+1} - 1 \right\rceil, \left\lfloor \sqrt{F+1} \right\rfloor \right]$ liegt.

Wenn $F + 1$ keine Quadratzahl ist, dann besteht das Intervall aus nur einer Zahl und es gilt

$$S^* = \left\lceil \sqrt{F+1} - 1 \right\rceil = \left\lfloor \sqrt{F+1} \right\rfloor = \left\lfloor \sqrt{F} \right\rfloor, \quad \forall F, F > 0: \neg \exists i, i \in \mathbf{N}, i^2 = F+1.$$

Ist $F + 1$ jedoch eine Quadratzahl, dann existiert ein zweites Maximum, das (a) und (b) erfüllt:

$$\hat{S}^* = \left\lfloor \sqrt{F} \right\rfloor, \quad \forall F, F > 0: \exists i, i \in \mathbf{N}, i^2 = F+1.$$

Als Schlussfolgerung zu dieser Aussage kann festgestellt werden, dass das Verhältnis F/S zwischen der Anzahl an Fertigungsplätzen und der Anzahl an Fertigungssegmenten für die meisten typischen, praxisrelevanten Planungsaufgaben gerade im ungünstigen Bereich von S_i mit $F/I \geq F/S_i \geq F/S^*$ liegt. Die Größe des Suchraums und damit die Anzahl möglicher Strukturlösungen erreicht in diesem Intervall $F! \leq \varphi_L(F, S) \leq \varphi_L(F, \left\lfloor \sqrt{F} \right\rfloor)$ die größten Werte. Unter dem Aspekt der Optimierbarkeit wäre ein Verhältnis nahe eins ($F/S \rightarrow 1$) vorteilhaft, da hier der Suchraum seine minimale Ausdehnung hat — was schließlich zu der überraschenden Aussage führt, dass eine Struktur mit vielen kleinen Fertigungssegmenten leichter zu optimieren ist als eine mit wenigen großen.

Die Berücksichtigung der Zuordnungsmöglichkeiten von Jobs zu Fertigungsplätzen führt zu einer weiteren Zunahme der Komplexität des Optimierungsproblems. Da bereits die bisher betrachteten Zusammenhänge eine vollständige Enumeration (Durchmusterung) des Suchraumes für praxisrelevante Problemgrößen ausschließen, wird auf die Untersuchung der Jobzuordnungskomplexität verzichtet. Als Fazit dieser Überlegungen ein Zitat aus /FRAN-92/, das bis heute uneingeschränkte Gültigkeit hat:

„Yet the QAP remains computationally intractable for problems with more than 15 to 20 facilities, and this situation has changed very little since the mid-1970s. One of the great ironies of discrete optimization is that QAP is so simple to state but difficult to solve.“

5 Die Schnittstelle zum Planungssystem 2000+

SiDiS^{GA} ist eine Softwarekomponente (Modul) des integrierten, modularen und projektspezifisch konfigurierbaren Produktionsplanungssystems 2000+. Das im Rahmen des Innovationskollegs INK 17/B1-1 „Bildung eines vernetzten Logistik- und Simulationszentrums“⁵ (siehe /WIRT-00a/) an der Technischen Universität Chemnitz und der Westsächsischen Hochschule Zwickau entwickelte Low-cost-Planungswerkzeug beruht auf dem Prinzip der Component-Ware /MÖHL-96/. An Stelle eines monolithischen, proprietären und kostenintensiven Systems besteht dieser neue Ansatz zur rechnergestützten Produktionssystemplanung aus separat konfigurier- und anwendbaren Softwarekomponenten, die nur indirekt über eine Datenbankschnittstelle miteinander kommunizieren (**Bild 5**).

Die Anbindung des Programms SiDiS^{GA} an das Planungssystem 2000+ ist über eine SQL-Schnittstelle⁶ zu einer relationalen Datenbank, der so genannten Produktionsdatenbank (PDB) realisiert. Deren komplette Datenstruktur wird in /GÄSE-00a/ dargestellt. In der PDB ist die Abbildung eines vollständigen, betrieblichen Produktionsdatenmodells möglich. Dieses Produktionsdatenmodell setzt sich aus acht Partialmodellen⁷ zusammen, wovon für die Arbeit mit SiDiS^{GA} die folgenden fünf relevant sind:

⁵ gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft 1996-2000

⁶ Die SQL-Schnittstelle wurde mit Hilfe der Borland Database Engine™ (BDE), Version 5, des Borland C++ Builders™ 4 implementiert.

⁷ Die Partialmodelle sind: Produkt-, Prozess-, Ressourcen-, Struktur-, Steuerungs-, Logistik-, Partner- und Zeitmodell.

- Produktmodell (Struktur, Funktionsweise und Gestalt des zu fertigenden Objekts),
- Prozessmodell (Arbeitsschritte zur Herstellung des Objekts),
- Ressourcenmodell (Fertigungs- und Fertigungshilfsmittel, Personal, Ausfallverhalten),
- Strukturmodell (hierarchische und räumliche Struktur der Ressourcen),
- Zeitmodell (Zeitregime der Ressourcen, Betriebskalender, Zeitkonten, usw.).

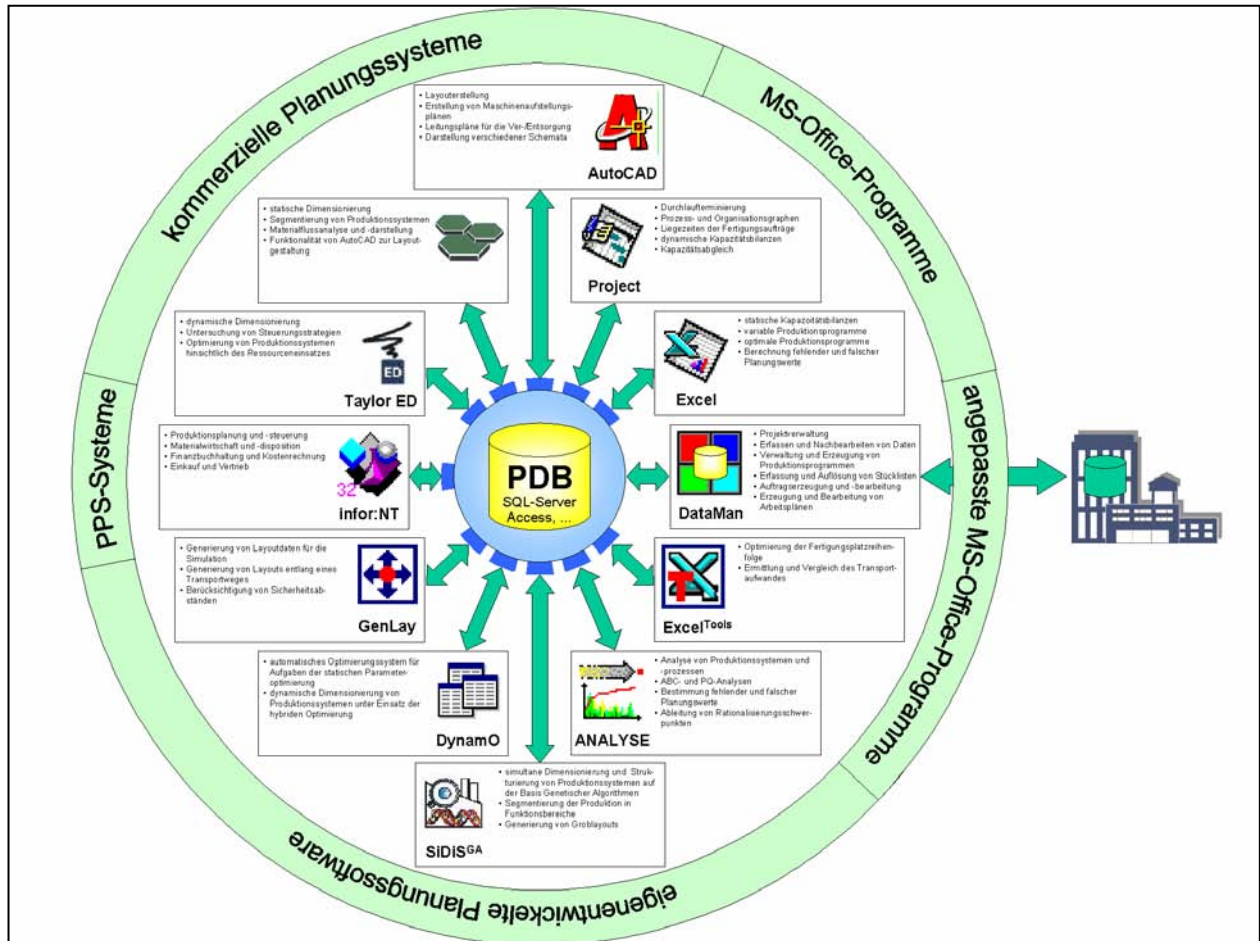


Bild 5: Kopplung und Funktionalität der Softwarekomponenten des Planungssystems 2000+ /FÖRS-01/

Zur Gewinnung, Aufbereitung und Überführung der Projektdaten in die Datenstrukturen der PDB siehe /GÄSE-00b/. Um sicherzustellen, dass die spezifischen Anforderungen an die Tabellen der PDB/PDB+ vor der Ausführung von SiDiS^{GA} erfüllt sind, werden die Module DATAMAN⁸ und ANALYSE⁹ des Planungssystems 2000+ empfohlen.

6 Relationsbeziehungen zwischen den Tabellen der PDB/PDB+

Bild 6 verdeutlicht die Relationen zwischen den 11 Eingangsdatentabellen und ihren Attributen. Sind die kursiv gedruckten Attribute nicht oder mit ungültigen Werten belegt, dann arbeitet SiDiS^{GA} mit fest vorgegeben „Default-Werten“. Das Strukturierungsergebnis ist dann je nach Planungsvariante und Datenabhängigkeiten möglicherweise nur eingeschränkt gültig.

⁸ DATAMAN kann allgemein zur Datenaufbereitung und speziell zur Erstellung der PDB+-Tabelle Dat_tPD eingesetzt werden.

⁹ ANALYSE überprüft die Konsistenz der Daten und ermöglicht u.a. das Erkennen fehlender oder falscher Planungswerte.

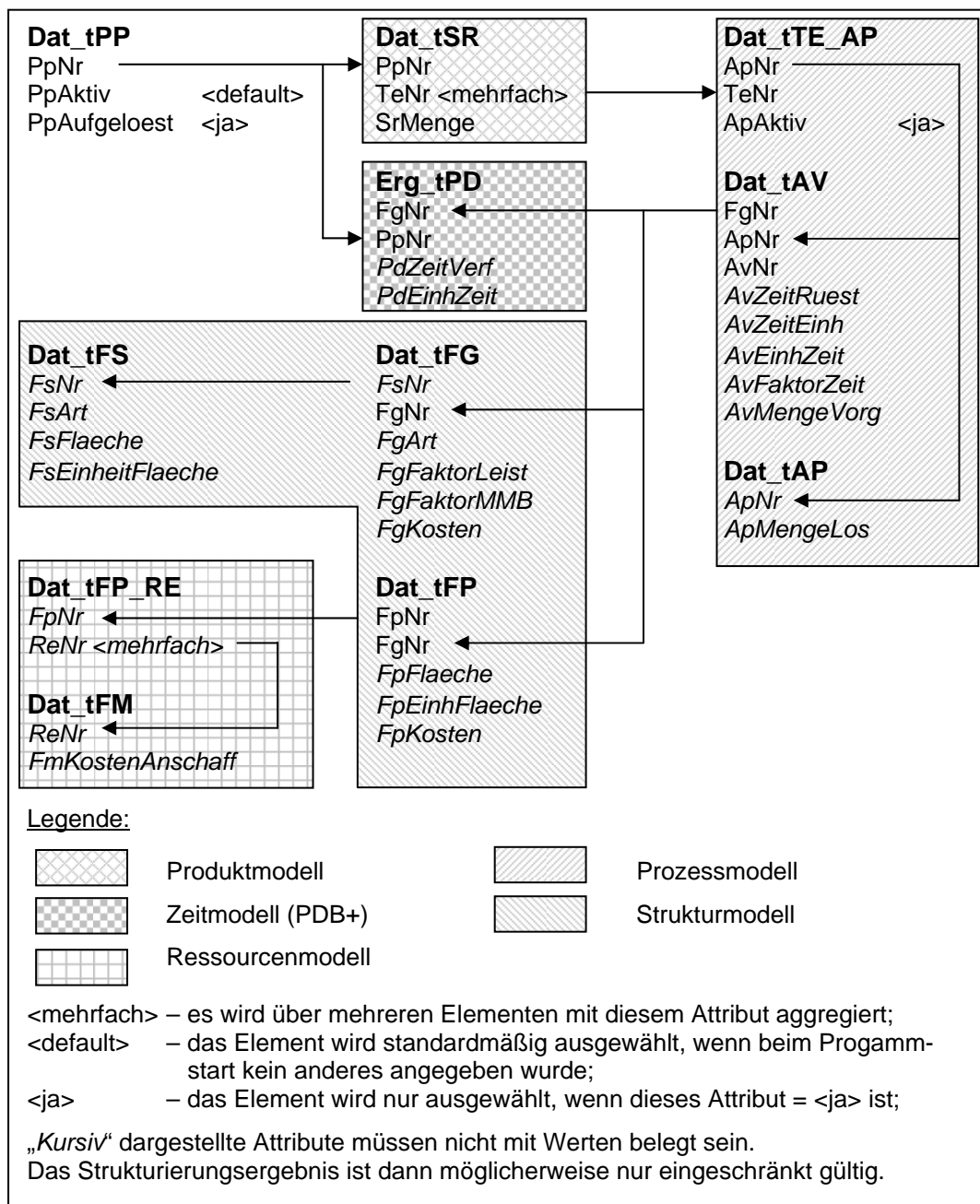


Bild 6: Die Relationen der Eingangsdaten für SiDiS^{GA} in der PDB/PDB+

Für die Datenmodellierung wurde das CASE¹⁰-Tool POWERDESIGNER[®] DATAARCHITECT[™] 6.0 der Firma SYBASE INC. genutzt, mit dessen Hilfe aus dem erstellten konzeptionellen Datenmodell die relationale Datenbank über das dem Datenbanksystem entsprechende physische Modell direkt generiert werden kann.

7 Die Modell- und Parameterbeschreibungsdatei

Die Modell- und Parameterbeschreibungsdatei (**Bild 7**) dient dazu, an SiDiS^{GA} zusätzlich zu den Daten der PDB/PDB+ Informationen zur Steuerung der Optimierung zu übergeben. Diese Datei kann mit einem beliebigen ASCII-Editor erzeugt oder modifiziert werden. Ihr Dateiname ist frei wählbar und muss beim Aufruf von SIDIS^{GA} angegeben werden. Die Datei wird von SiDiS^{GA}

¹⁰ CASE - Computer Aided Software Engineering

zeilenweise eingelesen. Zeilen, die mit einem Semikolon beginnen, sind Kommentare und werden vom Programm komplett ignoriert.

```

; Modell- und Parameterbeschreibungsdatei für SiDiS/GA
; =====
; Vorgruppierung von Fertigungsplätzen (FP):
;
; Anzahl der Gruppen zur Vorgruppierung von FP ( >= 0 )
; ACHTUNG: Wird hier 0 angegeben, müssen die folgenden Datenzeilen
;         dieses Abschnitts auskommentiert werden !
3
;
; Vektor mit den Anzahlen an FP je Gruppe ( >=1 )
3 4 4
;
; Je Gruppe ein Vektor mit den zugehörigen FP. Diese Bezeichner müssen mit
; den Werten der Attribute "FpNr" oder "FgNr" aus der PDB-Tabelle "Dat_tFP"
; bzw. "Dat_tFG" übereinstimmen. FG und FP können gemischt angegeben werden.
'80000' '75100' '60010'
'40010' '30010' '20010' '50010'
'85000' '75000' '76000' '71000'
;
; Vektor mit der Klassifikation der Gruppen:
; 0 - einfache Gruppe      (FP stehen im gleichen FS)
; 1 - isolierte Gruppe     (FP stehen allein im gleichen FS)
; 2 - ausgegliederte Gruppe (FP bilden ein autarkes FS, z.B. Kooperation)
0 0 1
;
; -----
; Nummer des Produktionsprogramms:
;
; Bei Angabe einer negativen Zahl wird mit allen aktiven PP gearbeitet.
2
; -----
; Art der Anfangslösung:
;
; 0 - ohne vorgegebene Fertigungssegmente
; 1 - mit vorgegebenen, aber leeren Fertigungssegmenten
; 2 - mit Anfangslösung aus der PDB
1
; -----
; Parameter für die Aufwandsbewertung:
;
; Vektor mit 3 Gleitpunktzahlen, die als relative Geldeinheiten (RGE)
; folgende Bedeutung haben:
; [1] Aufwand beim Überspringen von Fertigungsplätzen      (bypassing)
; [2] Aufwand bei Transport entgegen der Flussrichtung     (backtracking)
; [3] Aufwand bei Transport zwischen Fertigungssegmenten   (switching)
; Allgemein sollte 0 < [1] < [2] < [3] gelten.
; ACHTUNG: Diese Werte stehen in unmittelbarer Beziehung zu den Stunden-
;         kostensätzen und dem Abschreibungskosten der Fertigungsplätze!
0.1 0.5 4.0
;
; -----
; Maximale Anzahl an Fertigungssegmenten:
;
; ACHTUNG: Wird hier 0 angegeben, können beliebig viele FS gebildet werden !
10
; -----
; Faktor der indirekten Flächen für die Flächenvorausbestimmung ( >= 0.00):
; zum Beispiel
; 1.85 für spanende Fertigung mit expl. ausgewiesenen FP der Qualitätskontrolle
; 1.98 für spanende Fertigung ohne expl. ausgewiesene FP der Qualitätskontrolle
1.85
;
; -----
; Maximale Abschreibungskosten ( >= 0.00):
10000.00

```

Bild 7: Die Modell- und Parameterbeschreibungsdatei

8 Auszüge aus den Ergebnisdateien

8.1 Die Transportmatrix

SiDiS^{GA} schreibt die Strukturierungslösungen sowohl in die Ergebnisdatenbank PDB+, als auch in speziell formatierte ASCII-Dateien zur leichten Visualisierung und Auswertung mit Microsoft-EXCELTM. Beispielsweise wird in die Ergebnisdatei eine zweidimensionale Matrix ausgegeben, deren Elemente die Anzahl an Losen enthalten, die zwischen jeweils zwei FP transportiert werden muss. Ein Eintrag oberhalb der Hauptdiagonale bedeutet, es wird in Hauptflussrichtung, ein Eintrag unterhalb, es wird entgegen der Hauptflussrichtung transportiert. Die Hauptdiagonale selbst ist nicht besetzt. Die Zeilen und Spalten der Matrix entsprechen den FP, die im ersten Kriterium nach dem FS und im zweiten Kriterium nach der Reihenfolge in den FS geordnet sind.

Tabelle 3: Ergebnisdatei - Ausschnitt aus der Transportmatrix

		FS:	4				5						
		FP:	70000	80000	02050	60020	42020	76010	10020	76000	95070	21010	15010
FS:	FP:	Rf:	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7
4	70000	1	#	3	1	1		1					
	80000	2		#	1								
	02050	3			#								
	60020	4	1			#							
5	42020	1					#		1				
	76010	2						#				1	1
	10020	3							#		1		
	76000	4								#			1
	95070	5									#	2	1
	21010	6										#	
	15010	7											#

Das Beispiel in der **Tabelle 3** zeigt zwei FS mit den Bezeichnern „4“ und „5“. Das erste FS besteht aus 4, das zweite aus 7 FP, deren Anordnungsreihenfolge in der 3. Zeile und Spalte angegeben ist. Ein Matrixelement bedeutet, dass vom FP dieser Zeile zum FP dieser Spalte transportiert wird. So werden zum Beispiel 3 Lose vom FP mit der Bezeichnung „70000“ zum FP „80000“ transportiert. Hierbei handelt es sich um einen aufwandslosen Transport in Hauptflussrichtung ohne Übersprung anderer FP. Dagegen muss vom FP „60020“ ein Los entgegen der Hauptflussrichtung zurück zum FP „70000“ transportiert werden. Der einzige Transport zwischen den zwei FS erfolgt vom FP „70000“ im FS „4“ zum FP „76010“ im FS „5“.

8.2 Die Fertigungssegmentmatrix

Bei der Fertigungssegmentmatrix handelt es sich um die verdichtete Transportmatrix aus Abschnitt 8.1. Das Beispiel in der **Tabelle 4** zeigt die Transportbeziehungen zwischen neun FS und dem fiktiven FS „ausgegliedert“. Dabei wurden die FS mit den Bezeichnern „1“ bis „5“ aus der PDB übernommen und die FS mit den Bezeichnern „6 (SiDiS)“ bis „9 (SiDiS)“ vom Programm während der simultanen Dimensionierung und Strukturierung zusätzlich gebildet. Ein Matrixelement bedeutet, dass aus dem FS dieser Zeile in das FS dieser Spalte transportiert wird. Zum Beispiel werden 17 Losen aus dem FS mit dem Bezeichner „1“ in das FS „4“ transportiert, wogegen nur ein Los den umgekehrten Weg nimmt. Von der Hauptdiagonalen sind die Lostransporte innerhalb der FS ablesbar. Vor dem Backslash stehen die Transporte entgegen der Hauptflussrichtung, dahinter die Transporte in Hauptflussrichtung.

Tabelle 4: Ergebnisdatei - Fertigungssegmentmatrix

FS:	2	3	4	5	1	6 (Si-DiS)	7 (Si-DiS)	8 (Si-DiS)	9 (Si-DiS)	ausgegliedert
2	7\65	1	2	5	1	1				5
3	1	\2	1	1						1
4	16	1	1\6	1	1					1
5	7	1		\8		3		1		1
1	19	1	17	4	7\64	3	2	1	2	9
6 (SiDiS)	7				2	1\3				1
7 (SiDiS)	3						\			
8 (SiDiS)					1	1		\		
9 (SiDiS)	2								\	
ausgegliedert	1			2	13	2	1			\1

Literatur

- ARNO-00a 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, Göttingen: Georg-August-Universität, Institut für Wirtschaftsinformatik, März 2000, 151-167.
- ARNO-00b Arnold, J.; Fröhner, A.: *SiDiS^{GA} - Simultane Dimensionierung und Strukturierung mit Genetischen Algorithmen: Neue Wege zur Projektierung von Teileflusssystemen in KMU*. Forschungsbericht, Chemnitz: Technische Universität, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme 2000.
- FÖRS-01 Förster, A.; Wirth, S.; Gäse, Th.: *Integrative modulare Produktionssystemplanung*. wt Werkstattstechnik, Nr. 91, Heft 4, 2001, 221-228.
- FRAN-92 Francis, L.F.; McGinnis, Jr.; White, J.A.: *Facility Layout and Location: An Analytical Approach*. Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall 1992.
- GÄSE-00a Gäse, Th.: *Die Datenstruktur der Produktionsdatenbank*. Forschungsbericht, Chemnitz: Technische Universität, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme 2000.
- GÄSE-00b Gäse, Th.: *Leitfaden zur Aufbereitung von Projektdaten zur Produktionssystemplanung und -steuerung und ihre Überführung in die Datenstrukturen der Produktionsdatenbank*. Forschungsbericht, Chemnitz: Technische Universität, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme 2000.
- HADE-00 Hader, S.; Kobylka, A.; Kreißig, U.: *Praxisrelevante Optimierungsstrategien für die simulationsbasierte dynamische Dimensionierung von Produktionssystemen (DYNAMIS-P)*. In „Vernetzt planen und produzieren“, Vortragsband, Chemnitz: Technische Universität, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme 2000, 89-93.

- HASS-94 Hassan, M.M.D.: *Machine layout problem in modern manufacturing facilities*. International Journal of Production Research, Vol. 32, No. 11, 1994, 2559-2584.
- HERA-97 Heragu, S.S.: *Facilities design*. Boston: PWS Publishing 1997.
- KOBY-00 Kobylka, A.: *Simulationsbasierte Dimensionierung von Produktionssystemen mit definiertem Potential an Leistungsflexibilität*. Dissertation, Chemnitz: Technische Universität, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme 2000.
- 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, 717-732.
- KOUV-89 Kouvelis, P.; Chiang, W.-C.: *Linear single-row machine layout in automated manufacturing systems*. Working Paper, Austin: University of Texas, Management Dept., 1989.
- LAH-55 Lah, I.: *Eine neue Art von Zahlen, ihre Eigenschaften und Anwendung in der mathematischen Statistik*. Mitteilungsblatt für Mathematische Statistik, Vol. 7, 1955, 203-212.
- MÖHL-96 Möhle, S.; Braun, M.; Mertens, P.: *Kann man ein einfaches PPS-System mit Microsoft-Bausteinen entwickeln?* Industrie Management 12, Heft 5, 1996, 47-52
- 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. (eds.): *Progress in Material Handling and Logistics*. Vol. 2. Heidelberg: Springer 1991, 117-141.
- SCHM-95 Schmigalla, H.: *Fabrikplanung: Begriffe und Zusammenhänge*. München, Wien: Hanser 1995.
- WIRT-00a Wirth, S.; Enderlein, H.; Förster, A.; Köchel, P.; Petermann, J.; Neubert, M.; Stanek, W.; u.a.: *Abschlussbericht des Innovationskollegs INK 17/B1-1: Bildung eines vernetzten Logistik- und Simulationszentrums*. Chemnitz: Technische Universität 2000.
- WIRT-00b Wirth, S.; Günther, U.; David, T.: *Durchgängiges Planungskonzept mit ganzheitlicher simulationsbasierter Layoutplanung*. In „Vernetzt planen und produzieren“, Vortragsband, Chemnitz: Technische Universität, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme 2000, 56-61.