

Ablaufplanung mit Softcomputing Methoden

Jürgen Sauer

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, FB Informatik
Escherweg 2, D-26121 Oldenburg
sauer@informatik.uni-oldenburg.de

Abstract

Bei der Ablaufplanung sind sowohl prädiktive und reaktive als auch globale und lokale Sichtweisen auf die Problemstellung des Erstellens und Anpassens von Plänen zu finden. Insbesondere beim Multi-Site Scheduling wird die Ablaufplanung eines Betriebes mit mehreren Produktionsstandorten betrachtet. Hier muß auf zwei Ebenen global und lokal geplant werden. In der globalen Ablaufplanung werden auf Basis von externen Aufträgen Vorgaben für die lokalen Betriebe in Form eines globalen Ablaufplans ermittelt, der dann in den lokalen Ablaufplanungssystemen für die einzelnen Betriebe in konkrete maschinenbezogene Pläne für die einzelnen Zwischenprodukte umgesetzt werden muß. Auf beiden Ebenen sind prädiktive und reaktive Planungsaufgaben zu erfüllen. Die Lösung dieser Planungsaufgaben mit Hilfe von Methoden des Softcomputing wird im vorgestellten Projekt untersucht.

1. Ablaufplanung auf mehreren Ebenen

In der Ablaufplanung (Scheduling) [Sau97] werden Probleme der zeitlichen Zuordnung von Aktivitäten zu limitierten Ressourcen betrachtet, wobei unterschiedliche Nebenbedingungen zu berücksichtigen sind und bestimmte Ziele erreicht bzw. optimiert werden sollen. Unterschiedliche Anwendungsbereiche weisen Ablaufplanungsprobleme auf.

Zur Lösung von Ablaufplanungsproblemen werden drei miteinander verbundene Aufgabenkomplexe unterschieden. Bei der *prädiktiven* Ablaufplanung wird der Plan vorausschauend für einen bestimmten Zeitabschnitt unter Annahme einer statischen Planungsumgebung erstellt. In der *reaktiven* Ablaufplanung steht die Anpassung des Plans an neue Situationen im Mittelpunkt, wobei möglichst viel vom bestehenden Plan erhalten bleiben soll. Schließlich wird in der *interaktiven* Ablaufplanung der Endbenutzer des Planungssystems mit einbezogen. Dieser kann den Planungsprozeß steuern, indem er selbst bestimmte Planungsentscheidungen trifft oder geeignete prädiktive bzw. reaktive Verfahren auswählt.

Probleme der Ablaufplanung werden im allgemeinen nur für einzelne Produktionsstätten oder Aufgabenbereiche betrachtet [Zwe94]. Neue Aufgabenstellungen kommen hinzu, wenn man die heute übliche Verflechtung von Produktionsstätten, die

sich z.B. Zwischenprodukte zuliefern, untersucht [BS95], Bild 1 zeigt das zugrundeliegende Szenario. Dies ist der Ausgangspunkt für das Projekt MUST (Multi Site Scheduling System), in dem ein System zur Ablaufplanung für mehrere Produktionsstandorte entwickelt wird.

Bei der Verteilung der Produktion auf mehrere Betriebe müssen einige spezifische Probleme gelöst werden, die bedingt sind durch

- komplexe Abhängigkeiten zwischen den Produktionsprozessen in verschiedenen Betrieben, u.a. zeitliche Abhängigkeiten, Kostenabhängigkeiten, Transportabhängigkeiten.
- die Art der zur Verteilungsplanung verwendeten Informationen, da man i.allg. nicht mit präzisen sondern verallgemeinerten Daten arbeitet, u.a. Kapazitätsinformationen auf Basis von Maschinengruppen, geschätzte Fertigungsdauern.
- die Integration bestehender (lokaler) Ablaufplanungssysteme für einzelne Betriebe.
- die Notwendigkeit der Koordination der Aktivitäten, da mehrere Planungsebenen mit jeweils unterschiedlichen Planungsaufgaben zusammenarbeiten müssen.

Diese Problemstellungen bedingen zusätzliche Aufgaben, die von den Planungssystemen der verschiedenen Ebenen erledigt werden müssen.

Ein Großteil der Aufgaben wird in der Globalen Ablaufplanung behandelt. Diese Planungsebene wird für den Lösungsansatz zusätzlich eingeführt (ist aber in der Realität zumindest informell auch schon vorhanden). Auf dieser Ebene muß sowohl die Erstellung einer Vorgabe für die lokalen Betriebe (der globale Plan), als auch die reaktive Korrektur dieses globalen Plans erfolgen. Als Teilaufgaben ergeben sich:

- *Global Prädiktive Planung:*
Hier wird eine Vorgabe mit einer Verteilung der internen Aufträge auf die lokalen Betriebe erzeugt. Dabei sind u.a. auch Transporte zwischen den Betrieben zu berücksichtigen.
- *Global Reaktive Planung:*
Können Probleme nicht lokal behoben werden, oder beeinflußt der geänderte lokale Plan andere lokale Planungen, wird die globale Ebene wieder eingeschaltet. Hier wird dann z.B. eine Umverteilung der internen Aufträge als Korrekturmaßnahme für den globalen Plan ausgearbeitet.

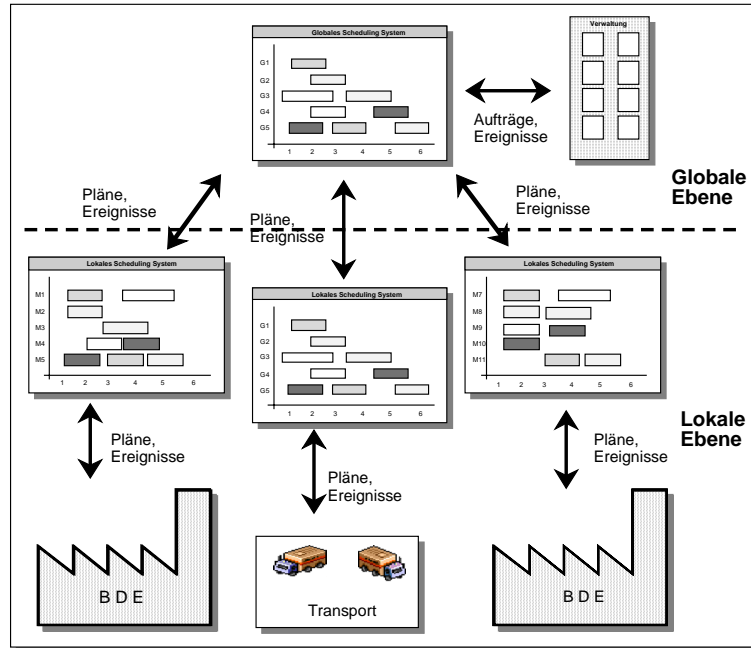


Bild 1: Multi-Site Scheduling

Die lokale Planungsebene existiert in der Regel schon. Hier sind (bereits existierende) Ansätze zur Lokalen/ Reaktiven Planung [Smi92, KS95, ZF94] angesiedelt, die integriert werden können. In der *Lokal Prädiktiven Planung* wird ausgehend von den globalen Vorgaben ein lokaler Plan erstellt. Störungen auf der lokalen Ebene werden zunächst durch die *Lokal Reaktive Planung* behandelt. Haben diese Störungen auch Auswirkungen auf andere lokale Systeme oder die Herstellung des Gesamtprodukts, falls z.B. Zwischenprodukte, die an anderem Ort benötigt werden, nicht rechtzeitig fertig werden, so muß die globale Ebene eingeschaltet und dort entsprechend auf die veränderte Situation reagiert werden. Die lokalen Systeme müssen dementsprechend um die Kommunikationsmöglichkeiten und eine entsprechende Ereignisbehandlung erweitert werden.

Der Kommunikation zwischen den einzelnen Ebenen fällt eine besondere Bedeutung zu, da nur so die Koordination der verschiedenen Planungsaktivitäten möglich ist. Dabei werden von der globalen zur lokalen Ebene mindestens folgende Informationen weitergegeben:

- der globale Plan bestehend aus den internen Aufträgen, den zugehörigen Zwischenprodukten, den zu benutzenden Maschinengruppen, den (möglichst) einzuhaltenden Zeitfenstern und den benötigten Mengen der Zwischenprodukte,
- Ereignisse mit Bedeutung für die lokale Ebene (z.B. Ausfall eines Auftrags).

Von der lokalen zur globalen Ebene sind es mindestens:

- die lokale Realisierung der globalen Vorgaben mit den internen Aufträgen, den zugehörigen Zwischenprodukten, jeweils Anfang und Ende der lokalen Einplanung und verwendete Maschinengruppen,
- aufgetretene Fehler,
- Vorschläge für eine mögliche lokale Umplanung.

Im Rahmen der Koordination muß auch eine Konsistenzsicherung bzgl. des Datenbestandes durchgeführt werden, damit alle beteiligten Planungssysteme auf dem gleichen aktuellen Datenbestand arbeiten können. Dazu muß eine Ereignisverarbeitung realisiert werden, die alle auftretenden Ereignisse auch für die entsprechenden Systeme verfügbar macht und sie in der richtigen Reihenfolge verarbeiten kann.

Entsprechend der beschriebenen Aufgaben wurde die in Bild 2 dargestellte Architektur des MUST-Systems gewählt.

Lokale Systeme bestehen im wesentlichen aus bereits bekannten und realisierten Komponenten, z.B. [SB97]. Zusätzlich muß eine Komponente eingefügt werden, die die Kommunikation zwischen globaler und lokaler Ebene realisiert.

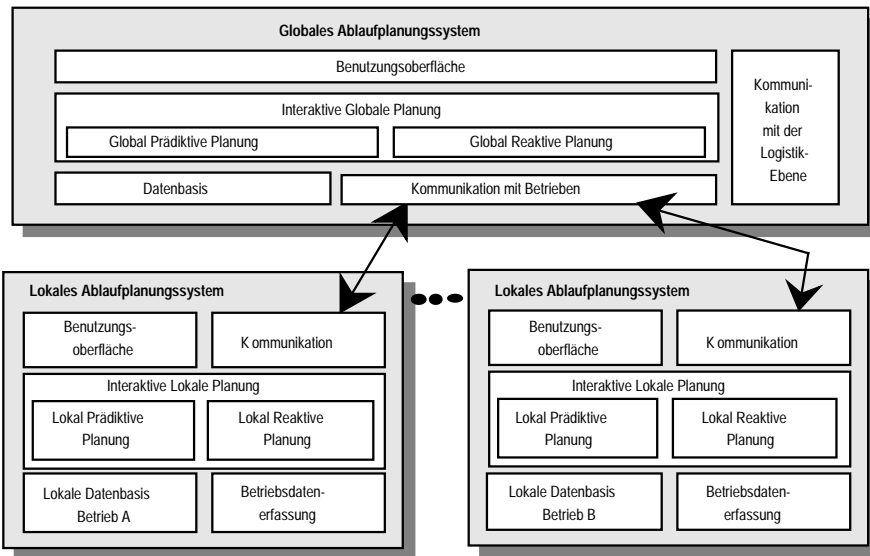


Bild 2: Architektur des MUST-Systems

Auf der globalen Ebene gibt es ein Globales Ablaufplanungssystem, das die Aufgaben der Planung und Koordination übernimmt. Das User-Interface stellt dem Benutzer einen globalen Leitstand zur Verfügung, der den globalen Ablaufplan und die wichtigen Informationen für die Durchführung der globalen Aktivitäten präsentiert. In den Komponenten für die Global Reaktive und Global prädiktive Planung werden unterschiedliche wissensbasierte Verfahren zur Generierung eines Globalen Vorgabepfades, z.B. über Heuristiken, und zur Reaktion auf Ereignisse der lokalen Ebene eingesetzt. Die globale Datenbasis enthält das Wissen über die Objekte der Ablaufplanung, z.B. Endprodukte mit ihren Zwischenprodukten sowie benötigte Maschinengruppen und Zeiten zur Herstellung. Wichtig sind auch hier die Komponenten zur Kommunikation, zum einen mit den Planungssystemen der loka-

len Ebene und zum anderen mit der Logistik-Ebene, um die Entscheidungen berücksichtigen zu können.

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Ebenen kann auf unterschiedliche Art realisiert werden. Implementiert ist ein Blackboard-Ansatz, auf dessen Basis weitere Untersuchungen folgen sollen.

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Ansätze auf ihre Anwendbarkeit in den einzelnen Aufgabenbereichen untersucht. Tabelle 1 zeigt die Zuordnung, die aufgrund der Struktur der Ablaufplanungsprobleme und der prinzipiellen Eigenschaft der Lösungsverfahren getroffen wurde.

Im folgenden sollen besonders die Fuzzy-Logik, Neuronale Netze und Genetische Algorithmen betrachtet werden.

Problembereich der Ablaufplanung	Lösungsverfahren
global prädiktiv	Heuristiken, Constraints, Fuzzy-Logik
global reaktiv	Heuristiken, Constraints, interaktive Planung mit Konsistenzprüfung
lokal prädiktiv	Heuristiken, Constraints, Genetische Algorithmen, OR-Verfahren, Neuronale Netze
lokal reaktiv	Heuristiken, Constraints, interaktive Planung mit Konsistenzprüfung, Multi-Agenten Systeme.

Tabelle 1: Problembereiche und Lösungsverfahren

2. Global Prädiktive Ablaufplanung mit FUZZY-Konzepten

Die globale Planung läßt sich entsprechend obiger Beschreibung konkret charakterisieren durch:

- Maschinengruppen als Ressourcen mit unterschiedlichen kumulierten Kapazitätsangaben sowie Transportzeiten und -kosten und die Menge aller Materialien in der Fertigungsstätte.

- Endprodukte, die jeweils in mehreren Varianten produziert werden können. Jede Variante besteht aus mehreren Zwischenprodukten, die auf verschiedenen Maschinengruppen mit unterschiedlicher Kapazitätsbelastung und Dauer mit bestimmten Materialien gefertigt werden können.
- externe Aufträge zur Herstellung jeweils eines Endprodukts mit einer Mengenangabe, dem Starttermin, dem Endtermin und einer Wichtung des externen Auftrages.
- die globalen Hard Constraints, u.a.:

- Alle externen Aufträge sind auszuführen.
- Genau eine Variante mit allen Zwischenprodukten ist für jeden externen Auftrag zu verwenden.
- Die Reihenfolge entsprechend der Präzedenzrelation der Zwischenprodukte ist einzuhalten.
- die globalen Soft Constraints, u.a.:
 - Der vorgegebene Endtermin eines Endproduktes sollte von keinem seiner Zwischenprodukte überschritten werden.
 - Die Transportzeiten und -kosten sind minimal zu halten.
 - Die Fertigungsstätten sind gleichmäßig zu belasten.
 - Die Lösung des globalen Ablaufplanungsproblems sollte möglichst robust sein, d.h. genügend Planungsspielraum für den lokalen Planer lassen.

Als Lösung des globalen Ablaufplanungsproblems ergibt sich ein globaler Vorgabeplan für die lokale Planung, der die zeitliche Zuordnung von Zwischenprodukten zu Maschinengruppen darstellt.

Das unvollständige Wissen bzw. die kumulierten Angaben der globalen Ablaufplanung, wie z.B. die Zusammenfassung der Maschinen zu Maschinengruppen mit kumulierten Kapazitätsaussagen, lassen sich recht gut mit Fuzzy-Logik modellieren und verarbeiten. Dazu werden die charakteristischen Informationen durch linguistische Variablen beschrieben, die mit Hilfe von Fuzzy-Regeln zu neuen Informationen verknüpft werden.

Im realisierten Ansatz für die globale Ablaufplanung [ASS97] werden die Planungsobjekte durch folgende ausgewählte Merkmale beschrieben:

- Ressourcen: durch Apparategruppenkapazität, Auslastung, unscharfe Transportkosten und -zeiten, Materialverbrauch und Materialverschleiß
- Produkte: durch Produktkapazität und Produktzeitverbrauch
- externe Aufträge: durch Zeitbedarf, Priorität, Termin und Wichtigkeit
- Hard-/ Soft Constraints: jeweils durch den Erfüllungsgrad des Constraints.

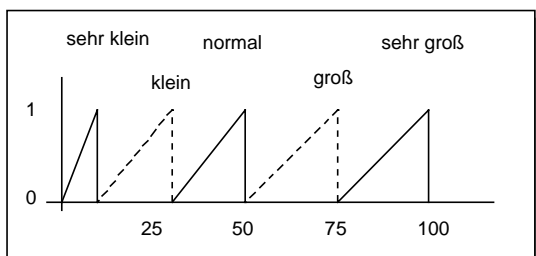


Bild 3: Zugehörigkeitsfunktionen

Alle anderen Merkmale werden durch scharfe Werte beschrieben. Dabei wird z.B. mit den Werten {sehr klein, klein, normal, groß, sehr groß} für die Apparategruppenkapazität zu jeder Zeiteinheit eine freie Kapazität beschrieben, die besagt, inwieweit

die Apparategruppe noch belastet werden kann. Die entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen sind in Bild 3 dargestellt und zeigen die linguistischen Variablen für eine Prozentangabe an freier Kapazität.

Die Fuzzy-Regeln verwenden die aktuellen Werte der angegebenen Variablen und erlauben eine Einplanungsentscheidung. Für die Ermittlung einer Einplanungsreihenfolge werden die Aufträge entsprechend ihrer „Wichtigkeit“ sortiert. Diese Wichtigkeit wird u.a. durch Regeln wie

```
/* Regeln zur Ermittlung der Wichtigkeit von Aufträgen */
IF Zeitbedarf(sehr klein) FUZZY_AND Priorität(normal) FUZZY_AND Termin(bald)
THEN Wichtigkeit(normal)
IF Termin(noch nicht)
THEN Wichtigkeit(unwichtig)
IF Zeitbedarf(sehr klein) FUZZY_AND Priorität(hoch) FUZZY_AND Termin(bereits)
THEN Wichtigkeit(sehr wichtig)
```

ermittelt. Dabei sind die gewünschten Zielsetzungen implizit in den verwendeten Regeln enthalten. Die Regelverarbeitung ist dabei zweistufig angelegt. In der ersten Stufe wird eine Strategie beschrieben, z.B. die Abfolge der Schritte „ermittle Planungsreihenfolge“, „ermittle zugehörige Ressource pro Zeiteinheit“, „weise Material zu“. Zu jedem Strategieschritt ist dann eine Regelmengende vorhanden, die die entsprechenden Entscheidungen ermöglicht. Für das MUST-System wurde zunächst ein allgemeiner Ansatz realisiert, der über einen Editor die Definition der Fuzzy-Mengen, Variablen und der zugehörigen Regelmengen erlaubt [ASS97].

Die so erstellte globale Planvorgabe kann interaktiv weiterverarbeitet werden. Die Ergebnisse der Planung lassen sich durchaus mit denen heuristischer Verfahren vergleichen. Positiv sind vor allem die besseren Modellierungs- und Verarbeitungsmöglichkeiten von ungenauen Angaben zu bewerten, so daß Fuzzy-basierte Komponenten in Planungssystemen ihren Platz finden werden.

3. Lokal Prädiktive Ablaufplanung mit Genetischen Algorithmen und Neuronalen Netzen

Auf der lokalen Ebene werden die Vorgaben des globalen Plans in geeignete lokale Ablaufpläne umgesetzt. Auch hier muß natürlich auf die Ereignisse der lokalen Fertigungsumgebung, die u.a. durch die Betriebsdatenerfassung ermittelt werden, reagiert werden. Der lokale Bereich läßt sich charakterisieren durch

- Maschinen als Ressourcen mit ihren technischen Restriktionen sowie weitere Ressourcen.
- eine Menge von Zwischenprodukten, die jeweils in mehreren Varianten produziert werden können. Jede Variante besteht aus mehreren Schrit-

ten, die auf verschiedenen Maschinen gefertigt werden können.

- Aufträge für Zwischenprodukte mit Angaben zu Menge, Start, Ende und Priorität.
- die lokalen Hard Constraints, u.a.:
 - Genau eine Variante mit allen Schritten ist für jeden Auftrag zu verwenden.
 - Die Reihenfolge entsprechend der Präzedenzrelation ist einzuhalten.
- die lokalen Soft Constraints, u.a.:
 - Die Fertigungstermine sollten eingehalten werden.
 - Die Ressourcen sollten gleichmäßig ausgelastet werden.
 - Die Durchlaufzeiten sollten minimal sein.

Hier wurden neben heuristischen Verfahren auch ein Ansatz auf Basis genetischer Algorithmen sowie auf Basis neuronaler Netze untersucht. Beide betrachten Ablaufplanung als kombinatorisches Optimierungsproblem und versuchen eine Zielfunktion zu optimieren.

3.1 Lokal Prädiktive Ablaufplanung mit Genetischen Algorithmen

Genetische Algorithmen zählen zu den iterativen Verbesserungsverfahren [Dor95], d.h. daß ausgehend von einer (oder einer Menge von) Anfangslösung(en) so lange neue (möglichst bessere) Lösungen gesucht werden, bis ein bestimmtes Abbruchkriterium erfüllt ist. Die Vorgehensweise und die Begriffswelt sind bei genetischen Algorithmen an die biologische Evolution angelehnt. Ausgehend von einer Menge von Individuen (Lösungen, hier Plänen), der Anfangspopulation, werden die Schritte „Selektion“ (Auswahl einer Teilmenge zur Rekombination), „Crossover“ (Erzeugung neuer Lösungen durch Rekombination von Individuen), „Mutation“ (Veränderung einzelner Individuen) so lange durchlaufen, bis ein bestimmtes Kriterium erfüllt ist, z.B. bis ein bekanntes Optimum gefunden oder eine Anzahl von Iterationen durchlaufen ist. Meist wird dabei ein Optimierungsproblem betrachtet, für das eine entsprechende Evaluierungsfunktion angegeben wird.

Der für das System MUST untersuchte genetische Algorithmus zur lokal prädiktiven Ablaufplanung [Bru93, Bru96] enthält spezifische Erweiterungen, die für die Lösung des beschriebenen lokalen Ablaufplanungsproblems entwickelt wurden.

Für die komplexe Problemstellung mit Varianten und Alternativmaschinen reicht eine einfache, indirekte Repräsentation des Plans, z.B. durch einen Bitstring i. allg. nicht aus. Daher wurde eine direkte Repräsentation des Planungsproblems gewählt, d.h. einzelne Individuen repräsentieren eindeutige Pläne, und nicht nur Reihenfolgen von Aufträgen, die erst noch zu gültigen Plänen umgerechnet werden müssen. Ein zulässiger Ablaufplan wird durch eine Liste von Operation/ Variante/ Maschine/ Produktionsintervall-Tupeln repräsentiert und basiert im Unterschied zu anderen GA-Ansätzen auf einer

komplexen Datenstruktur, die sämtliche Information enthält, die für die eindeutige Beschreibung eines Ablaufplanes notwendig ist.

Passend zu dieser Repräsentation wurden spezielle Operatoren für Selektion, Crossover und Mutation entworfen, die die Repräsentation und gleichzeitig bestimmte Constraints der Planungsumgebung berücksichtigen. Die Operatoren machen intensiven Gebrauch von heuristischem Problemwissen und haben die Funktionalität von wissensbasierten Planungsalgorithmen, womit auch die Zulässigkeit der generierten Nachkommenpläne garantiert wird. Ziel des Verfahrens ist dabei die Minimierung der Verzögerungen, was ebenfalls bei der Gestaltung der Operatoren berücksichtigt wurde. Ausgehend von einer proportionalen Selektion werden beim Crossover die Variablen auftragsweise zusammengefaßt und zunächst alle nicht verspäteten Aufträge komplett aus einem Elternteil extrahiert. Für die verspäteten Aufträge werden aus dem zweiten Elternteil die Reihenfolgen und Maschinenbelegungen übernommen und konsistent mit den frühest möglichen Startzeiten versehen. Somit werden jeweils positive Eigenschaften aus mindestens einem Elternteil vererbt. Bei der Mutation entstehen für zufällig gewählte Variablen neue Werte, indem einer Variantenvariablen zufällig eine neue Variante, einer Startvariablen der früheste (kleinste) zulässige Startzeitwert und einer Maschinenvariablen zufällig eine neue Maschine, die zum gewählten Startzeitwert verfügbar ist, zugewiesen werden.

Die Ergebnisse [Bru96] zeigen, daß teilweise erhebliche qualitative Verbesserungen der Pläne erreicht werden können, allerdings führen die hohen Laufzeiten und die Struktur der Algorithmen dazu, daß genetische Algorithmen i.allg. nur für prädiktive Aufgabenstellungen mit klaren Bewertungsfunktionen einsetzbar scheinen.

3.2 Lokal Prädiktive Ablaufplanung mit Neuronalen Netzen

Ziel des hier entwickelten Ansatzes war es, mit Neuronalen Netzen realistische Planungsszenarien hoher Komplexität bearbeiten zu können. Dabei sollen vor allem größere Auftragsmengen, verschiedene Fertigungsvarianten und Alternativmaschinen modelliert und verarbeitet werden können. Der verwendete Ansatz [MS97] löst das lokale Planungsproblem durch Kombination einer Heuristik zur Problemzerlegung mit Neuronalen Netzen. Das Planungsproblem wird dabei in Teilprobleme zerlegt, die dann jeweils durch ein neuronales Netz gelöst werden. Die heuristische Zerlegung der Ablaufplanung führt zu folgendem Planungsvorgehen:

1. Auswahl einer Fertigungsvariante für jeden Auftrag;
2. Auswahl einer Maschine für jede Operation der gewählten Variante;
3. zeitliche Festlegung der Operationen.

Die Heuristik (auftragsbasierte Problemzerlegung) beruht auf Erfahrungen aus der Praxis, daß eine sinnvolle Wahl von Varianten bzw. Maschinen möglich ist, bevor die Bearbeitung der Aufträge bzw. der Operationen zeitlich fixiert wurde. Dies gilt, weil die Auslastung von Maschinen(gruppen) anhand der Produktionsvorschriften in Verbindung mit den frühesten Start- und spätesten Endterminen abgeschätzt werden kann. Zudem ist die Varianten- und Maschinenauswahl weitgehend unabhängig von der Zielfunktion für den zu erstellenden Plan. Für die drei Teilaufgaben werden dann jeweils Netztypen verwendet, die die Lösung von Optimierungsproblemen unterstützen, da auch hierbei die

Minimierung der Verzögerungen als Zielfunktion gewählt wurde. Sie geht vor allem in die dritte Planungsstufe (Zeitplanung) ein.

Im Gegensatz zur sequentiellen Aufgabenzerlegung der Heuristik wenden Neuronale Netze implizit eine parallele Problemzerlegung an, bei der in jeder Planungsstufe alle Aufträge bzw. Operationen, alle Maschinen bzw. Maschinengruppen sowie alle Punkte der Zeitachse gleichzeitig betrachtet werden. Auf diese Weise entfallen einige der Einschränkungen, die sich aus einer sequentiellen Bearbeitung ergeben, z. B. wird damit ein größerer Problemraum betrachtet.

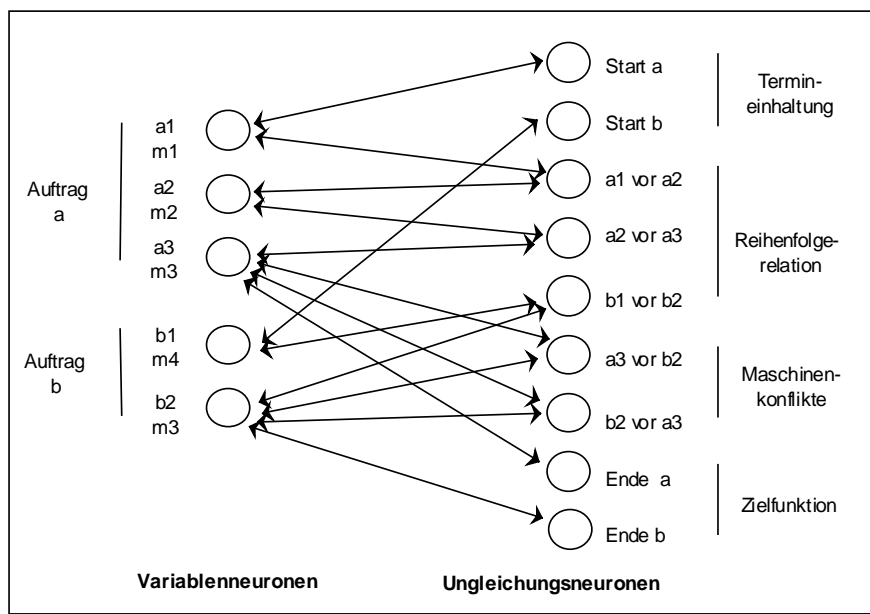


Bild 4: Beispiel für LP-Netz

In der ersten Planungsstufe wird ein modifiziertes Hopfield-Tank-Netz eingesetzt, um Varianten für die betrachtete Menge von Aufträgen auszuwählen. Dabei sollen die zur Verfügung stehenden Maschinen möglichst gleichmäßig ausgelastet werden. Das Netz besteht aus vollständig untereinander vernetzten Neuronen, die jeweils die Zuordnung Auftrag/Herstellungsvariante repräsentieren. Eine Gewichtsfunktion wurde entworfen, die eine zulässige Lösung ermittelt, bei der die Maschinenkonflikte minimal und die Verteilung der Belastung gleichmäßig sind.

Im zweiten Schritt findet die Maschinenauswahl ebenfalls mit Hilfe eines Hopfield-Tank-Netzes statt. Hier repräsentieren die Neuronen die Zuordnung von Operationen zu Alternativmaschinen. Auch hier werden zulässige Lösungen ermittelt, die die Maschinenkonflikte minimal halten.

Die dritte Planungsstufe wird mit einem LP-Netz bearbeitet (Bild 4). Als Variablen für die LP-Aufgabe werden die Startzeitpunkte der einzelnen Operationen gewählt. Die Constraints zur Termin-einhaltung, zur Ausführungsreihenfolge und zur Vermeidung von Doppelbelegungen werden als

Ungleichungen formuliert und jeweils durch ein Ungleichungsneuron repräsentiert. Die Neuronenwerte der Variablen werden dann solange verändert, bis sie alle Bedingungen in den Ungleichungsneuronen erfüllen. Durch die Definition entsprechender Schwellwerte wird erreicht, daß alle Aufträge möglichst früh beendet werden und damit das gewünschte Kriterium optimiert wird.

Wie bei den genetischen Algorithmen zeigt sich auch hier, daß die errechneten Pläne von guter Qualität sind, die Laufzeit und der Modellierungsaufwand aber Gründe gegen die Verwendung von Neuronalen Netzen für solche komplexen Ablaufplanungsprobleme sind.

4. Zusammenfassung

Einige der Probleme des Multi-Site Scheduling, bei dem die Ablaufplanung für Unternehmen mit mehreren Produktionsstandorten auf zwei Ebenen koordiniert durchgeführt werden muß wurden im vorliegenden Papier beschrieben. Dazu wurden drei verschiedene Ansätze aus dem Bereich des Soft-computing zur Lösung von Teilproblemen des

Multi-Site Scheduling vorgestellt. Genetische Algorithmen und Neuronale Netze werden hier für die Lösung kombinatorischer Optimierungsprobleme bei der Erstellung von lokal prädiktiven Ablaufplänen eingesetzt, Fuzzy-Konzepte zur Modellierung und Verarbeitung von unvollständigem Wissen auf der global prädiktiven Ebene zur Erstellung eines globalen Vorgabepplans. Insgesamt bieten alle drei Ansätze qualitativ gute Lösungen, lassen sich aber nicht für alle Planungsaufgaben einsetzen, vor allem nicht für reaktive Szenarien.

Literatur

- [ASS97] H.-J. Appelrath, J. Sauer, and G. Suelmann. Globale Ablaufplanung mit Fuzzy-Konzepten. In: J. Biethahn, A. Höhnerloh, J. Kuhl, and V. Nissen, editors, *FuzzySet-Theorie in betriebswirtschaftlichen Anwendungen*. Verlag Vahlen, München, 1997.
- [Bru93] R. Bruns. Direct Chromosome Representation and Advanced Genetic Operators for Production Scheduling. In: S. Forrest, editor, *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, San Mateo, CA, 1993. Morgan Kaufmann.
- [Bru96] R. Bruns. *Wissensbasierte Genetische Algorithmen*. Infix-Verlag, 1996.
- [BS95] R. Bruns and J. Sauer. Knowledge-Based Multi-Site Coordination and Scheduling. In: R. D. Schraft, editor, *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing 1995*, Stuttgart, 1995. Begell House.
- [Dor95] J. Dorn. Iterative Improvement Methods for Knowledge-Based Scheduling, *AICOM*, Vol. 8, No. 1, March, 1995.
- [KS95] R.M. Kerr, E. Szelke. *Artificial Intelligence in Reactive Scheduling*. Chapman & Hall, 1995.
- [MS98] H. Märtens and J. Sauer. Ein Ablaufplanungssystem auf Basis neuronaler Netze. In: J. Biethahn, et al., editors, *Betriebswirtschaftliche Anwendungen des Softcomputing*. Vieweg, Wiesbaden, 1998.
- [Sau93] J. Sauer. *Wissensbasiertes Lösen von Ablaufplanungsproblemen durch explizite Heuristiken*. DISKI. Infix Verlag, 1993.
- [Sau97] J. Sauer. Ablaufplanung. *KI Künstliche Intelligenz*, 2/97, 1997.
- [SB97] J. Sauer, R. Bruns. Knowledge-Based Scheduling Systems in Industry and Medicine. In *IEEE-Expert*, February 1997.
- [Smi92] S.F. Smith. Knowledge-based production management: approaches, results and prospects. In *Production Planning & Control*, Vol. 3, No. 4, 1992.
- [ZF94] M. Zweben, M.S. Fox (Hrsg.). *Intelligent Scheduling*. Morgan Kaufmann Publishers, 1994.