

Fabrikmodelle für Job-Shop-Scheduling- Algorithmen in Changing-Steady-State-Systemen

Factory Models for Job Shop Scheduling Algorithms in Changing- Steady-State Systems

Markus Rabe, Maik Deininger, TU Dortmund, Dortmund (Germany),
markus.rabe@tu-dortmund.de, maik.deininger@tu-dortmund.de

Abstract: Manufacturing systems that are affected by regular changes like e.g., mid-series production, show a complex and multi-layered behaviour over time. Simulation is known as a well-suited technology for such problems, but modelling techniques to cover this type of changing-steady-state systems are still rare. This paper introduces an approach of “Modular Factory Models” (MFM) describing a small portion of such a system over its complete lifecycle from the acquisition decision to disappearance and the interrelationships of this portion with the resources required from the system as a whole. Integrating these MFM into one (potential) scenario enables simulation. However, this simulation will require combining simulation with optimization techniques in order to search for feasible configurations in the huge solution space. Therefore, scheduling algorithms have to be applied together with heuristic optimization and simulation.

1 Einführung

Die mittelfristige Produktionsplanung ist eine komplexe Aufgabe für produzierende Unternehmen. Die Frage, ob ein zusätzlicher Auftrag fristgerecht erfüllbar ist und welche Auswirkungen dies auf die laufende Produktion haben könnte, wird oft ohne wirkliche Grundlage – und zwar meist positiv – beantwortet, woraus erhebliche Turbulenzen in der Auftragsbearbeitung entstehen können. Dem Produktionsplaner ist häufig nicht klar, dass ein neu gewonnener Auftrag insgesamt einen negativen Einfluss auf das Betriebsergebnis haben kann. Dieser Fall tritt insbesondere in der Zulieferindustrie auf, wo der einzelne Auftrag für eine wiederkehrende Kleinserie – über Monate oder Jahre aktiv – erhebliches Gewicht hat und dennoch Anfragen zu neuen Aufträgen fast täglich anfallen können. Daher sind Methoden erforderlich, mit denen Aufträge schnell eingeplant und deren Auswirkungen bewertet werden können, um eine fundierte Entscheidung über die Annahme eines neuen Auftrages treffen zu können. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass im zeitlichen Betrachtungshorizont Modifikationen der Ressourcen nicht nur möglich, sondern sogar üblich sind. Derartige Veränderungen erfordern jedoch nicht nur Zeit für die

Durchführung, sondern auch den Zugriff auf Ressourcen aus dem „restlichen“ System, wie etwa Einrichter, Instandhalter, Vorrichtungen, Werkzeuge, Flächen oder auch Teile für Testläufe.

Die VDI Richtlinie 3633 Blatt 1 (VDI 2010) unterscheidet Anwendungsfälle der Simulation danach, ob das System oder die Systemlast unbekannt ist. Diese Unterscheidung ist für unsere Betrachtung weiter zu differenzieren. Die Systemlast kann in der ersten Näherung als bekannt angenommen werden, da sowohl die bereits akzeptierten Aufträge als auch der neu betrachtete Auftrag eindeutig gegeben sind (die Betrachtung weiterer bereits angebotener Aufträge mit entsprechenden Risikobewertungen sei hier nicht diskutiert). Ist auch das System bekannt, so bestehen die Freiheitsgrade noch darin, welche Aufträge wann auf welchen Anlagen eingeplant werden. Für diesen Fall wurden Job-Shop-Scheduling-Algorithmen und -Modelle entwickelt (vgl. Aytug et al. 1994), mit denen Konflikte in der Planung schnell erkennbar und auch behebbar sind. In Kombination mit Simulationsverfahren (vgl. März und Krug 2011; Nedeß et al. 2008) lässt sich zusätzlich effizient prüfen, ob es bei der geplanten Zuordnung während der laufenden Produktion zu ungewollten Wartezeiten oder Lieferverzügen kommt. Jedoch ist das damit erforderliche fortwährende Anpassen der Planung in Anbetracht der enormen Menge an Möglichkeiten sehr aufwendig. In der Konsequenz wurden für das Job-Shop-Scheduling Optimierungsverfahren entwickelt (vgl. Arnaut et al. 2010; Chiu et al. 2007; Lestan et al. 2009; Tamilarasi und Anantha kumar 2010). Die Verfahren haben zum Ziel, die Produktion so zu gestalten, dass unter Berücksichtigung der vorliegenden Randbedingungen beliebige Kriterien möglichst gut erfüllt werden, wobei aber eine im mathematischen Sinne optimale Lösung oft nicht gefunden werden kann.

Lässt sich der Auftrag mit dem existierenden System nicht einplanen, so erweitert sich die Fragestellung zur Untersuchung von sogenannten Changing-Steady-State-Systemen (vgl. Robinson 2004), da zu unterschiedlichen (zukünftigen) Zeitpunkten geplante Änderungen am System auftreten. Das System ist dabei im strengen Sinne immer noch bekannt; Simulations- und Optimierungsverfahren müssen jedoch die Veränderung des Systems über der Zeit mit betrachten. Die Komplexität besteht dabei insbesondere aus der starken Vernetzung der erforderlichen Ressourcen. Hierzu seien als Beispiele genannt:

- Der Einsatz von Einrichtern an einer neu zu installierenden Anlage reduziert deren Verfügbarkeit an laufenden Anlagen
- Zum Test einer neuen Anlage müssen – möglicherweise ebenfalls eigengefertigte – Halbfertigteile bereits in ausreichender Stückzahl verfügbar sein
- Das Verschieben von Aufträgen auf andere – alte oder neue – Anlagen erfordert die Qualifizierung sowohl der Anlage als auch der Bediener auf das Produkt und entnimmt damit dem System temporär Anlagen- und Personalkapazität

Die Möglichkeiten zur Veränderung des Systems reichen von der Qualifizierung bestehender Anlagen oder Werker auf andere Produkte über das Einstellen zusätzlichen Personals bis hin zur Beschaffung und Inbetriebnahme neuer Anlagen sowie letztlich auch zum Ersatz von existierenden, nicht hinreichend leistungsfähigen oder flexiblen Anlagen. Damit wird eine Anpassung des dem Job-Shop-Scheduling zu Grunde liegenden Modelles auf die Frage: „Was muss an der Produktionsanlage geändert werden, damit alle Aufträge zu erfüllen sind?“

erforderlich. Abbildung 1 zeigt eine mögliche Vorgehensweise, die eine Einplanung zusätzlicher Aufträge unter Veränderung des Fabrikmodells ermöglicht. Ist die direkte Einplanung nicht möglich, so kommt eine Heuristik zum Tragen, die das vorhandene Fabrikmodell gezielt verändert und ein Modell an die Simulation zur Prüfung liefert. Als Kern der Heuristik werden „modulare Fabrikmodelle“ vorgeschlagen, die geeignet in das existierende Fabrikmodell einzugliedern sind. Der Beitrag zeigt in einem ersten Schritt auf, wie durch modulare Fabrikmodelle Veränderungen an einem existierenden Fabrikmodell über der Zeit beschrieben werden können.

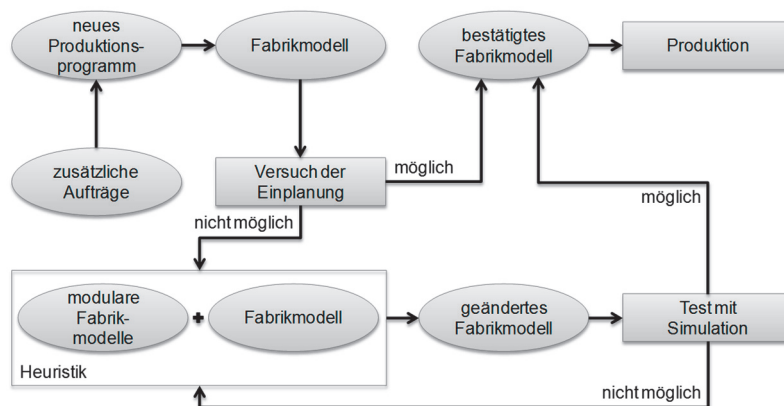


Abbildung 1: Ablaufplan für die Einplanung zusätzlicher Aufträge unter Veränderung des Fabrikmodells

In diesem Zusammenhang soll das Fabrikmodell das Produktionssystem mit seinen Maschinen, dem Personal- und Materialbedarf beschreiben. Die Maschine als solches wird hier als „Blackbox“ betrachtet, lediglich der Ressourcenbedarf und das hergestellte Produkt sind von Interesse.

Der Beitrag ist wie folgt gegliedert: Nach dieser Einführung in die Problemstellung und der Betrachtung der relevanten Literatur wird zunächst der Modellierungsansatz dargestellt, mit dem die Changing-Steady-State-Formulierung für Produktionssystem und Produktionsplan erfolgt. Hieraus werden die Anforderungen an das Simulationsmodell und die erforderliche Heuristik abgeleitet, um darauf aufbauend die Möglichkeiten des neuen Ansatzes aufzuzeigen und abzugrenzen. Im Anschluss wird anhand der Beschaffung einer neuen Maschine gezeigt, wie sich die modularen Fabrikmodelle zusammensetzen und wie diese miteinander interagieren. Abschließend werden in einem Ausblick die nächsten Schritte aufgezeigt.

2 Stand der Technik

Dieses Kapitel legt den aktuellen Stand der Technik dar. Beginnend mit dem Job-Shop-Scheduling wird gezeigt, welche Techniken zur Verfügung stehen um die aktuellen Aufträge auf einer vorhandenen Produktionsanlage einzuplanen. Anschließend erfolgt die Betrachtung von Optimierungs- und Simulationsverfahren, wobei der Anwendungsbereich des Job-Shop-Scheduling im Fokus steht. Das

Kapitel schließt mit der Betrachtung von Modellierungstechniken, welche einerseits die Grundlage der beschriebenen Techniken darstellen und andererseits als Basis für den hier entwickelten Ansatz dienen können.

2.1 Job-Shop-Scheduling

Die Techniken des Job-Shop-Schedulings (JSS) dienen der Ablaufplanung in verschiedenen Fachgebieten. In der Produktion werden durch das JSS die Aufträge und Ressourcen auf die vorhandenen Maschinen verteilt, wodurch sich die Produktionspläne ableiten lassen. Die neusten Entwicklungen zeigen, dass dem JSS zunehmend eine Kombination neuer und etablierter Techniken zu Grunde gelegt wird, um die Qualität zu steigern und den Anwendungsbereich zu erweitern. (vgl. Arnaut et al. 2008; Guo et al. 2009; Lestan et al. 2009; Udomsakdigool und Kachitvichyanukul 2008).

2.2 Optimierungsmethoden

Dieser Abschnitt soll aktuelle Optimierungsmethoden betrachten, die ein möglichst breites Anwendungsgebiet erschließen. Da analytische Verfahren starke Einschränkungen oder sehr hohe Rechenzeiten erfordern (vgl. Wang et al. 2010, Solyali und Özpeynirci 2009), werden diese hier nicht weiter betrachtet.

2.2.1 Genetische Algorithmen

Der Genetische Algorithmus (GA) zählt zu den am weitesten verbreiteten Optimierungsverfahren, womit ein großes Anwendungsgebiet erschlossen wird und eine große Vielfalt von GA existiert. Für das hier betrachtete Feld sind insbesondere die Arbeiten von Gao et al. (2005) und Lestan et al. (2009) von Bedeutung, die die Eignung des GA für das Scheduling aufzeigen. Neben der Vereinfachung der Algorithmen, wie in der Arbeit von Lestan et al. (2009) gezeigt, tendieren aktuelle Forschungen dazu den GA mit anderen Techniken zu verbinden, um Qualität und Effizienz zu steigern. In erster Linie erfolgt eine Kombination mit anderen Heuristiken, wie Tabu-Search (Chiu et al. 2007), Ant-Colony-Algorithmen (Girish und Jawahar 2009) oder Simulated Annealing (Tamilarasi und Anantha kumar 2010). Aber auch die Kombination mit exakten Lösungsverfahren wie Branch and Bound (Morita und Shio 2005) ist zu finden. Da analytische Verfahren zumeist sehr aufwendig sind oder das Anwendungsgebiet stark einschränken, ist deren Einsatzgebiet deutlich geringer als der von Heuristiken.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der GA in allen Anwendungsgebieten zielführend einsetzbar ist. Wie die Beispiele zeigen, muss man jedoch viel Energie in die Kodierung der Daten und die Implementierung geeigneter genetischer Operatoren, wie Mutation und Kreuzung, stecken, damit die Optimierung effizient abläuft.

2.2.2 Partikel-Schwärme

Eine vielversprechende Gruppe von Algorithmen stellen die Partikel-Schwarm-Algorithmen dar (Kennedy und Eberhart 1995). Wie die genetischen Algorithmen orientiert sich die Partikel-Schwarm-Optimierung (PSO) an der Natur. Im speziellen wird das Verhalten von Fischeschwärmen bei der Nahrungssuche nachgebildet. Der Vorteil liegt hier bei der Einfachheit der verwendeten Operationen. Man beschränkt

sich auf das gewichtete Mittel verschiedener Suchrichtungen, statt aufwendige Operatoren anzuwenden.

Trotz des wesentlich geringeren Alters der Partikel-Schwarm-Algorithmen, im Vergleich zum GA, wurde bereits ein weites Anwendungsgebiet erschlossen. Die Arbeit von Eberhart und Shi (1998) zeigt, dass PSO und GA sowohl Ähnlichkeiten in den Lösungsstrategien als auch in der Lösungsqualität aufweisen. Subbaraj et al. (2010) nutzen PSO zur Lösung von Dispatching-Problemen und zeigen sowohl die Anwendbarkeit als auch die Modifizierbarkeit der PSO, indem sie die Gewichtung der Suchrichtungen durch stochastische Funktionen ersetzen. Ein weiteres Anwendungsfeld wurde von Logenthiran und Srinivasan (2010) erschlossen, indem sie mittels verschiedener PSO-Varianten die optimale Auslastung von Generatoren zur effizienten Energiegewinnung bestimmten und damit Anwendbarkeit und Anpassungsfähigkeit der PSO zeigten.

2.3 Simulation und Optimierung

In produktionslogistischen Systemen werden durch Unstetigkeiten in den Systemen (Changing Steady States) hohe Anforderungen an die Simulation gestellt. Die Abbildung der Anforderung ist meist sehr komplex und lässt die Diskrete-Event-Simulation (DES) als beste Wahl erscheinen. Gestärkt wird dies durch das breite Anwendungsfeld der DES und führt dazu, dass im folgenden die DES betrachtet wird.

Der Ansatz, wie er im Folgenden vorgestellt wird, ist in die simulationsbasierte Optimierung einzuordnen. März und Krug (2011) zeigen vier Möglichkeiten der Verknüpfung von Simulation und die Optimierung auf. Von diesen erscheint es am sinnvollsten, die Simulation als Bewertungsfunktion der Optimierung für das betrachtete Problem zu nutzen.

3 Modulare Fabrikmodelle zur Beschreibung von Produktionssystemen in Changing Steady States

Bei der Betrachtung der hier beschriebenen Produktionssysteme gibt es auf der einen Seite die Produktionsanlagen im aktuellen Zustand und auf der anderen Seite Möglichkeiten, diese zu verändern. Hierzu zählt beispielsweise die Beschaffung neuer Anlagen, die Veränderung des Personals in Menge und Qualifikation oder die Umstellung des Schichtsystems.

Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, basiert die Erzeugung eines geänderten Fabrikmodells auf zwei Säulen: Zum einen wird ein Modell des vorhandenen (bzw. aktuell geplanten) Systems benötigt; zum anderen bedarf es eines Pools an möglichen Modifikationen. Die Elemente in diesem Pool werden durch modulare Fabrikmodelle (MFMs) repräsentiert, die sich in die vorhandene Produktionsanlage integrieren lassen. Jedes dieser MFMs beschreibt für eine spezifische Veränderung alle Phasen von der Bedarfsfeststellung bis zur Produktionsbereitschaft. Jede einzelne dieser Phasen besitzt Anfangs- und Nebenbedingungen, die den Ressourcenbedarf charakterisieren. Grundsätzlich kann es erforderlich sein, mehrere MFMs einzufügen, um die Anfangs- und Randbedingungen erfüllen zu können. Somit entsteht ein gerichteter Graph, der alle Veränderungsprozesse und deren zeitliche Abfolge darstellt. Bei komplexen Graphen besteht die Möglichkeit, dass

zwei Prozesse gleiche Nebenbedingungen stellen, wie beispielsweise den Bedarf vom gleichen Ausgangsmaterial. Hier gilt es zu prüfen, ob durch die Erfüllung der Bedingung der anderen Phase bereits die eigene Nebenbedingung erfüllt ist. Aufbauend auf diesem Modellierungsansatz lassen sich Heuristiken entwerfen, um automatisch und gezielt neue Fabrikmodelle zu erstellen, die das aktuelle Modell im Verlauf der Zeit ablösen. Da das aktuelle Fabrikmodell ebenfalls aus MFMs aufgebaut ist, lassen sich die vorgeschlagenen Lösungen leicht integrieren, womit die Möglichkeit eröffnet wird, in einer nachgelagerten Simulation die von der Heuristik vorgeschlagenen Anpassungen zu validieren. Je nach Ergebnis kann das vorgeschlagene Fabrikmodell in die reale Fabrik übertragen oder ein neuer Lauf der Heuristik gestartet werden. Die Herausforderung besteht in dieser Phase in der geschickten Wahl des Simulationsmodells.

3.1 Detaillierungsgrad und Betrachtungshorizont

Bereits das einfache MFM in Abbildung 2 lässt erahnen, dass der Personalbedarf bei der Modellierung einen großen Teil zur Komplexität beiträgt, womit die Verfügbarkeit des Personals weit in den Vordergrund rückt. Nicht nur der hohe Bedarf an Arbeitsstunden, sondern auch die sich ergebenden Auswirkungen auf die laufende Produktion erfordern eine intensive Betrachtung. Ein leicht zu erkennender Fall ist, dass ein Werker, der soeben auf der neuen Maschine qualifiziert wird, nicht für die laufende Produktion zur Verfügung steht, womit ein Ausgleich geschaffen werden muss. Dies kann durch einen anderen Werker geschehen oder durch eine erhöhte Produktion des betroffenen Produktes im Vorfeld. Durch die Modellierung wird verdeutlicht, dass ebenso Angestellte der Verwaltung beansprucht werden. Hier lassen sich jedoch Unterschiede ausmachen. Der Werker wird für längere Zeit voll beansprucht, wohingegen der Angestellte in der Regel nur kurze Zeit benötigt, um die zusätzlich anfallenden Aufgaben zu erfüllen und sich somit schnell wieder anderen Aufgaben widmen kann.

Dies führt zu einer Unterscheidung des Personals, in deren Konsequenz die Angestellten für den hier beschriebenen Ansatz als immer verfügbare Ressource angesehen werden. Damit lässt sich wiederum die Modellierung vereinfachen, indem die Angestellten nicht mit einbezogen werden. In einem nächsten Schritt können auch Routineaufgaben mit geringem Zeitaufwand und vernachlässigbaren Randbedingungen ebenfalls weggelassen werden.

Beim Materialbedarf lässt sich eine vergleichbare Unterscheidung nach Zukauf- und Eigenfertigungsteilen treffen. Da die eigengefertigten Teile von den Abläufen in der Fabrik abhängen, müssen diese in der Modellierung betrachtet werden. Dies gilt insbesondere, wenn diese für die Qualifizierung einer Maschine erforderlich sind und somit nicht mehr zum Verkauf oder für nachgelagerte Produktionsschritte bereitstehen. Einkaufsteile, die bei Bedarf zu bestellen sind, lassen sich zwei Kategorien unterscheiden: Kommt es bei Einkaufsteilen mit kurzer Lieferzeit und hoher Verfügbarkeit zu einem Engpass, können Teile schnell nachbestellt werden, so dass eine Beeinflussung der Produktion nicht wahrscheinlich ist. Daher lassen sich diese als immer verfügbare Ressource ansehen und bei der Modellierung vernachlässigen. Einkaufsteile, die diese Annahmen nicht erfüllen, sind hingegen zu berücksichtigen. So sind beispielsweise Sonderstähle oft mit Lieferzeiten versehen, die im Vergleich zur Vorlaufzeit für die Einplanung neuer Aufträge relevant sind.

3.2 Modellierungsansatz

Zur Darstellung von Abläufen, wie die Beschaffung einer Maschine oder die Einstellung neuen Personals, finden MFMs, die untereinander in Beziehung gesetzt werden können, Verwendung. Jedes einzelne MFM beschreibt die Prozesse von der Bedarfsfeststellung bis zur Einsatzbereitschaft der Maschine. Abbildung 2 (links) zeigt ein einfaches Beispiel. Jeder Prozess besitzt sowohl Randbedingungen (RB) als auch Anfangsbedingungen (AB), die beschreiben, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit der Prozess beginnen kann. Die Prozesse eines MFMs lassen sich entlang der Zeitachse verschieben, damit diese an die Verfügbarkeit von Ressourcen angepasst werden können. Abbildung 2 (rechts) zeigt ein MFM, wie es nach einem Schedulingdurchlauf aussehen könnte. Hier ist neben den Prozessen exemplarisch die Verfügbarkeit des Personals angedeutet, um zu verdeutlichen, warum die Möglichkeit der zeitlichen Verschiebungen von Prozessen gegeben sein muss.

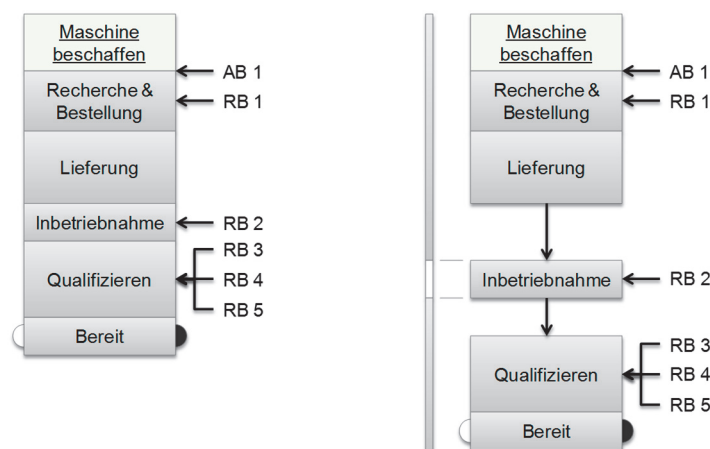


Abbildung 2: Modulares Fabrikmodell für die Beschaffung einer Maschine (links nicht eingeplantes Modell, rechts eingeplantes Modell unter Berücksichtigung von Ressourcen)

Weiterhin lässt sich jeder Prozess parametrisieren, um für nachgelagerte Verfahren, wie JSS, Simulation oder Optimierung, alle benötigten Daten bereitzustellen. So werden beispielsweise für das JSS unter anderem Informationen über Ressourcenbedarf und Prozessdauer benötigt, wohingegen die Dauer von Prozessen für die Optimierung beim Zusammenfügen von MFMs zweitrangig ist.

Der letzte Abschnitt („Bereit“) eines MFMs ist der Bereitstellungsprozess, bei dem alle Informationen bereitzustellen sind, um die Maschine oder Ressource in die Produktion einzugliedern. Hierfür sind Kombinationen von Eingängen (weiße Halbkreise) und Ausgängen (schwarze Halbkreise) vorgesehen, die beschreiben, aus welchen Ressourcen welches Produkt herstellbar ist.

3.3 Zusammenführen der modularen Fabrikmodelle

Nachdem alle erforderlichen MFMs erzeugt wurden, lassen sich diese zu einem Gesamtmodell vereinen, welches nicht nur die aus der Beschaffung einer Maschine

direkt ersichtlichen Prozesse enthält, sondern auch jene, die die Voraussetzungen dafür schaffen.

Durch die Modellierung der MFMs und deren Prozesse ergeben sich Anfangs- und Randbedingungen, die es zu erfüllen gilt. Dies erfolgt durch die Verknüpfung mit anderen MFMs. Damit dies möglich ist, muss der Bereitstellungsprozess eines MFMs einen Ausgang (schwarzer Halbkreis) besitzen, welcher die Bedingung erfüllt. Folglich muss für jede Bedingung ein passendes MFM erzeugt werden. Demzufolge muss es auch MFMs geben, die den Zugriff auf Ressourcen erlauben, die bereits von der Fabrik bereitgestellt werden. Diese Zugriffe auf die Fabrik werden durch spezielle MFMs dargestellt, die lediglich aus einem Bereitstellungsprozess mit passendem Ausgang bestehen.

Abbildung 3 zeigt ein einfaches zusammengesetztes Modell, das die Beschaffung einer Maschine darstellt. Nach der Umsetzung der Vereinfachungen aus Abschnitt 3.2 verbleiben zwei zusätzliche MFMs, welche die Randbedingungen für das mittlere MFM erfüllen und selbst keine weiteren Bedingungen stellen. Durch das Teilmodell rechts wird das für die Qualifizierung nötige Personal aus der Fabrik beansprucht. Das Teilmodell links sorgt für die Einstellung eines neuen Werkers, den es zu qualifizieren gilt. Bei der jeweiligen Qualifizierungsphase gibt es eine Kopplung, da sowohl das Personal als auch die Maschine sich gegenseitig benötigen, um den Prozess zu durchlaufen. Als Ergebnis steht am Ende neben der Maschine auch ein qualifizierter Werker zur Verfügung.

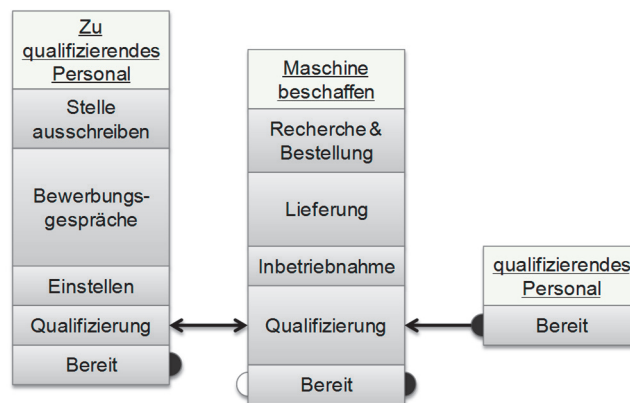


Abbildung 3: Zusammengesetzte modulare Fabrikmodelle

Das manuelle Zusammenfügen der Modelle stellt eine aufwendige Aufgabe dar, insbesondere wenn viele Möglichkeiten durchzutesten sind. Deshalb sollte dieser Arbeitsschritt durch geeignete Optimierungstechniken unterstützt werden. Die Partikel-Schwarm-Optimierung scheint besonders geeignet, da der Aufwand der Kodierung gering ist und die Optimierung ausschließlich auf einfachen mathematischen Berechnungen beruht, welche nur wenige Parameter erfordern. Die damit einhergehende Effizienz erlaubt es, vergleichsweise komplexe Fitness-Funktionen zu verwenden. In diesem Fall enthält die Fitness-Funktion Scheduling- und Simulations-Algorithmen zur Bewertung der Lösung. Damit der Lösungsraum

effizient durchsucht werden kann, muss ein Vorverarbeitungsschritt erfolgen. Man könnte sich vorstellen, alle möglichen Kombinationen von MFMs zu berechnen, um anschließend die PSO für die Auswahl zu verwenden. Allerdings werden so sehr viele Modelle erzeugt, die von vornherein nicht in Frage kommen. Effizienter ist es, jene Modelle zu kennzeichnen, die zur Erfüllung der neuen Auftragsituation in Frage kommen und anschließend, während der Optimierung, die sich ergebenden Varianten auszutesten. Damit wird zum einen der Lösungsraum deutlich reduziert und es werden nur jene Modelle erzeugt, die auch durch die Simulation bewertet werden. Die Anzahl der erzeugten und bewerteten Modellvarianten lässt sich somit über Abbruchkriterien steuern. Bedenkt man, dass in der Praxis oft eine hinreichend gute Lösung ausreichend ist und ein heuristisches Verfahren nicht nachweisen kann, dass eine optimale Lösung gefunden wurde, erscheint dieses Vorgehen sinnvoll, um die benötigte Rechenzeit zu reduzieren.

3.4 Job-Shop-Scheduling und Simulation

Jeder vom Optimierer gewählte Lösungsvorschlag wird in das Fabrikmodell integriert und das resultierende Modell dem Job-Shop-Scheduling vorgelegt. Hier sind die vorhandenen Ressourcen und Aufträge bestmöglich zu verteilen. Wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, existieren hier bereits viele Verfahren, die erfolgreich angewendet werden. Ebenso wurde gezeigt, dass Ausfallzeiten von Maschinen, wie sie hier benötigt werden, kaum Betrachtung fanden.

Im vorgestellten Ansatz ist die explizite Betrachtung der Zeit, in der eine Maschine nicht verfügbar ist, unumgänglich. Vereinfachend für die Simulation ist, dass die Zeiträume bereits in der Modellierung angegeben werden, so dass es sich hier um planbare Ereignisse und nicht um zufällige Störungen handelt. Daher lassen sich Prozesse, wie der Aufbau oder die Qualifikation, als Aufträge interpretieren, die an eine Maschine gebunden sind und zeitlich als nicht variabel zu betrachten sind.

Anschließend wird das so ermittelte Produktionssystem durch eine Simulation analysiert. Je nach Komplexität und verfügbarer Zeit für die Analysen ließen sich bei der Simulation verschiedene Detailierungsgrade betrachten. Da jedoch mitunter sehr viele Möglichkeiten untersucht werden müssen und die Komplexität im Allgemeinen als eher hoch anzusehen ist, können nicht die Zustandsänderungen an den Produkten betrachtet werden. Vielmehr muss man bei der Simulation Änderungen am Produktionssystem oder bei der Auftragszuordnung als Ereignisse betrachten, da andernfalls die Laufzeiten der Simulation ein heuristisches Vorgehen unmöglich machen würden. Somit gilt es, die Ereignisse an der Fertigung einzelner Batches festzumachen, das heißt an die Belegung der Maschine durch einen Produkttyp. Je nach Länge der Bearbeitungszeit ist es sinnvoll, eine komplette Serie zu betrachten oder in Sonderfällen auch die Fertigung von nur wenigen Produkten. Demzufolge gilt es, den Detailierungsgrad je nach gefertigtem Produkt individuell anzupassen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Ansatz vorgestellt, der es ermöglicht, einen durch Wandlung geprägten Produktionsprozess abzubilden. Dazu kommen modulare Fabrikmodelle zum Einsatz, mit denen mögliche Änderungen an einem

Fabrikmodell beschrieben werden. Die Auswahl und Eingliederung in das Modell der aktuellen Fabrik erfolgt durch einen Partikel-Schwarm-Algorithmus, der jeden Lösungsvorschlag durch Job-Shop-Scheduling und Discrete Event Simulation auswerten lässt, um so eine möglichst gute Lösung zu ermitteln.

Damit wird an der Umsetzung des vorgestellten Modellierungsansatzes in einer geeigneten Modellierungstechnik gearbeitet. Am vielversprechendsten scheinen objektorientierte Ansätze, wie die Integrierte Unternehmensmodellierung oder objektorientierte Petrinetze, da diese sehr flexibel und auf Grund der Objektorientierung leicht modifizierbar und erweiterbar sind.

Vorerst wurde lediglich die *Beschaffung* einer Maschine betrachtet. Als weiterführender Schritt ist ebenfalls der Umgang mit dem Abbau einer Maschine zu untersuchen, um Überkapazitäten in einer Fabrik abbauen zu können. Prinzipiell ist dies sehr ähnlich zur Beschaffung, da sich der Abbau in mehrere Prozesse zerlegen lässt, die ihrerseits Ressourcen der Fabrik beanspruchen. Diese Betrachtung scheint, wenn man die Erfüllung von Aufträgen betrachtet, auf den ersten Blick nicht sehr bedeutend zu sein. Der Fall kann jedoch wichtig sein, wenn es darum geht, Platz für eine andere Maschine zu gewinnen oder die Kosten zu optimieren.

Literatur

- Arnaout, J.-P.; Musa, R.; Rabadi, G.: Ant colony optimization algorithm to parallel machine scheduling problem with setups. In: 2008 IEEE Conference on Automation Science and Engineering, Arlington, Va, 23-26 August 2008. Piscataway, USA, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008, S. 578–582.
- Arnaout, J.-P.; Rabadi, G.; Musa, R.: A two-stage Ant Colony Optimization algorithm to minimize the makespan on unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times. In: Journal of Intelligent Manufacturing 21 (2010) 6, S. 693–701.
- Aytug, H.; Bhattacharyya, S.; Koehler, G. J.; Snowdon, J. L.: A review of machine learning in scheduling. In: IEEE Trans. Eng. Manage. 41 (1994) 2, S. 165–171.
- Chiu, H.-P.; Hsieh, K.-L.; Tang, Y.-T.; Wang, C.-Y.: A Tabu Genetic algorithm with Search Area Adaptation for the Job-Shop Scheduling Problem. In: Charles A. Long, Valeri M. Mladenov und Zoran S. Bojkovic (Hrsg.): Proceedings of the WSEAS International Conferences, Corfu Island, Greece, February 16-19, 2007, S. 76–80.
- Eberhart, R. C.; Shi, Y.: Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization. In: V. William Porto, N. Saravanan, D. Waagen und A. E. Eiben (Hrsg.): Proceedings 7th International Conference on Evolutionary programming, EP98 San Diego, California, USA, March 25–27, 1998. Berlin/Heidelberg, D: Springer Verlag 1998, S. 611–616.
- Gao, H.; Feng, B.; Zhu, L.: An Improved Genetic Algorithm for Flow Shop Sequencing. In: Mingsheng Zhao und Zhongzhi Shi (Hrsg.): Proceedings of 2005 International Conference on Neural Networks and Brain, Beijing, China, October 13-15, 2005, S. 521–524.
- Girish, B. S.; Jawahar, N.: Scheduling job shop associated with multiple routings with genetic and ant colony heuristics. In: International Journal of Production Research 47 (2009) 14, S. 3891–3917.

- Guo, Y. W.; Li, W. D.; Mileham, A. R.; Owen, G. W. (2009): Optimisation of integrated process planning and scheduling using a particle swarm optimisation approach. In: *International Journal of Production Research* 47 (2009) 14, S. 3775–3796.
- Kennedy, J.; Eberhart, R. C.: Particle swarm optimization. In: *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Western Australia, November 27- December 1 1995. Piscataway, USA, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers 1995, S. 1942–1948.
- Lestan, Z.; Brezocnik, M.; Buchmeister, B.; Brezovnik, S.; Balic, J.: Solving the job-shop scheduling problem with a simple genetic algorithm. In: *International Journal of Simulation Modelling* 8 (2009) 4, S. 197–205.
- Logenthiran, T.; Srinivasan, D.: Particle Swarm Optimization for unit commitment problem. In: *IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, 2010, Singapore. Piscataway, June 14 - 17 2010, NJ: IEEE 2010, S. 642–647.
- März, L.; Krug, W.: Kopplung von Simulation und Optimierung. In: Lothar März, Wilfried Krug, Oliver Rose, Gerald Weigert und Lotha März (Hrsg.): *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Berlin/Heidelberg, D: Springer Verlag 2011, S. 41–45.
- Morita, H.; Shio, N. (2005): Hybrid Branch and Bound Method with Genetic Algorithm for Flexible Flowshop Scheduling Problem. In: *JSME Int. J., Ser. C* 48 (2005) 1, S. 46–52.
- Nedeß, C.; Friedewald, A.; Wagner, L.: Simulationsgestützte Optimierung zur Ablauf- und Strukturverbesserung in Produktionsbetrieben. In: Rabe, M. (Hrsg.): *Advances in simulation for production and logistics applications*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag 2008, S. 469–478.
- Robinson, S.: *Simulation. The practice of model development and use*. Chichester, Eng: Wiley 2004.
- Solyali, O.; Özpeynirci, Ö.: Operational fixed job scheduling problem under spread time constraints: a branch-and-price algorithm. In: *International Journal of Production Research* 47 (2009) 7, S. 1877–1893.
- Subbaraj, P.; Rengaraj, R.; Salivahanan, S.; Senthilkumar, T. R.: Parallel particle swarm optimization with modified stochastic acceleration factors for solving large scale economic dispatch problem. In: *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 32 (2010) 9, S. 1014–1023.
- Tamilarasi, A.; Anantha kumar, T. (2010): An enhanced genetic algorithm with simulated annealing for job-shop scheduling. In: *International Journal of Engineering, Science and Technology* 2 (2010) 1, S. 144–151.
- Udomsakdigool, A.; Kachitvichyanukul, V. (2008): Multiple colony ant algorithm for job-shop scheduling problem. In: *International Journal of Production Research* 46 (2008) 15, S. 4155–4175.
- VDI 2010 Richtlinie 3633 Blatt 1: *Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen - Grundlagen*. Berlin: Beuth.
- Wang, E. J.; Chen, Y. C.; Wang, W. S.; Su, T. S.: Analysis of outsourcing cost-effectiveness using a linear programming model with fuzzy multiple goals. In: *International Journal of Production Research* 48 (2010) 2, S. 501–523.