

Flexible Produktionsfeinplanung mithilfe von Planungsschritten: Ein Planungsansatz zum Umgang mit Störungen bei der Produktion

Susanne Patig

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Arbeitsgruppe Wirtschaftsinformatik (FIN-ITI)
E-Mail: patig@iti.cs.uni-magdeburg.de

Die flexible Produktionsfeinplanung mithilfe von Planungsschritten ist ein anwendungsabhängiger Planungsansatz für die Produktionsplanung und -steuerung. Grundlage der Planungsansatzes sind Planungsschritte mit Voraussetzungen und Konsequenzen. Ein Plan besteht aus einer endlichen halbgeordneten Menge partiell initialisierter Planungsschritte zum Erreichen eines Ziels, ausgehend von einer anfänglichen Umweltsituation. Diese Pläne müssen bei Störungen (z. B. Maschinenausfällen) nicht geändert werden. Die Plandurchführung zielt auf die Erhaltung der größtmöglichen Flexibilität.

1 Problemstellung

Gegenstand der Arbeit ist der planerische, rechnergestützte Umgang mit Störungen bei der Produktion in Industrieunternehmen. Unter Störungen werden hier Ereignisse verstanden, die unvorhergesehen und unbeabsichtigt auftreten und deren Auswirkungen in Abweichungen zwischen Ist- und Planwerten bestehen¹. Häufig handelt es sich dabei entweder um Potenzialfaktor- oder um Repetierfaktorstörungen. *Potenzialfaktorstörungen* liegen vor, wenn Betriebsmittel oder Arbeitskräfte [BL91] nicht wie geplant verfügbar sind. Ursachen für Potenzialfaktorstörungen sind z. B. technische Defekte von Maschinen, das Fehlen von Werkzeugen oder die Krankheit von Arbeitskräften. *Repetierfaktorstörungen* bedeuten, dass Bedarfe an Roh- bzw. Hilfsstoffen oder Vorprodukten [BL91] quantitativ, qualitativ oder terminlich nicht plangemäß bereitstehen, z. B. durch Transportprobleme oder Ausschuss.

Das *Störungsmanagement* soll das Auftreten von Störungen verhindern (*Störungsabwehr*) und mit nicht verhinderten Störungen so umgehen, dass deren Auswirkungen minimal sind (*Störungsbewältigung*) [Wil95, 41 ff.]. Zur Störungsbewältigung werden vor allem Zuschläge bei der Festlegung von Planwerten und Planänderungen eingesetzt.

Zuschläge auf die Planwerte sollen die störungsbedingten Schwankungen der Istwerte ab-

¹Ausführlich zu Störungen, zum Störungsmanagement und zum Stand der Forschung vgl. [Pat01, 23 ff.].

sorbieren. Typisch sind z. B. Zuschläge für Komponenten der Durchlaufzeit von Arbeitsgängen oder Sicherheitsbestände [Zäp82, 285 f.]. Allerdings ist die Festlegung von Zuschlagsart, -höhe und -verteilung problematisch [CH88, 327].

Traten Störungen auf und verursachten Abweichungen der Ist- von den Planwerten, die ein bestimmtes Ausmaß überschreiten, führt die Störungsbewältigung Planänderungen durch. Diese Planänderungen betreffen vor allem den *Ursprungsplan der Feinterminierung*, der aus einer Menge von Fertigungsaufträgen besteht. Für jeden dieser *feinterminierten Fertigungsaufträge* sind festgelegt:

- die zu produzierende Menge und die Bedarfsmengen an Repetierfaktoren,
- eine Menge von Arbeitsgängen mit einer eindeutigen Ausführungsreihenfolge,
- die Potenzialfaktoren sowie Start- und Endtermine für jeden Arbeitsgang.

Planänderungen zur Störungsbewältigung können einerseits als *Umplanung* nur einzelne Planwerte des Ursprungsplanes betreffen, um diesen an die gestörte Produktionssituation anzupassen. Dabei soll der als optimal unterstellte Ursprungsplan weit gehend erhalten bleiben. Im Extremfall des *Matchup* [Bea91, 470] oder *Turnpike* [vDP87, 303] *Scheduling* gestatten Änderungen einzelner Planwerte ab einem bestimmten Zeitpunkt wieder die Verwendung des Ursprungsplanes.

Werden andererseits alle Planwerte des Ursprungsplanes der Feinterminierung aufgehoben und ab dem Störungszeitpunkt mit den störungsbedingt veränderten Planungsprämissen neu festgelegt, liegt *Neuplanung* vor. Es kommt das gleiche Lösungsverfahren wie bei der Ursprungsplanung zum Einsatz, die bisherigen Formalziele werden z. T. um die Minimierung der Abweichungen vom Ursprungsplan erweitert [AS97, 2067].

Neben der Neuplanung existiert Rechnerunterstützung gegenwärtig vor allem für die Umplanung innerhalb der Störungsbewältigung. Zur Durchführung der Umplanung werden z. B. binäre Suchbäume [AS97, 2068], heuristische Austauschverfahren [Bea91, 474], Leitstände [Aea92, 353], Simulation [Leh92, 91 ff.], Expertensysteme [Ros89, 82 ff.], Fallbasiertes Schließen [MS95, 390], Constraints [Bro89, 202] und Verteilte Künstliche Intelligenz [vDP87, 202] eingesetzt.

Sofern Störungen nicht verhindert wurden und Planänderungen nötig sind, ist eine Umplanung nicht generell einfacher als eine Neuplanung [NK95, 432]. Neuplanungen bei jeder Störung führen jedoch zur Erhöhung von Rüst- und Lagerhaltungskosten [KS95, 205]. Da zudem alle Formen der Planänderung jeweils zusätzliche Planungskapazität erfordern, war es Ziel dieser Arbeit, einen Planungsansatz zu entwickeln, dessen Pläne beim Auftreten von Potenzial- und Repetierfaktorstörungen nicht geändert werden müssen.

Dieser Forderung genügt z. T. die *opportunistische Terminierung* ([Fox87, 488], [Gös00, 107 ff.]). Dabei werden, ausgehend vom Bearbeitungszustand eines Fertigungsauftrags und der aktuellen Verfügbarkeit von Potenzialfaktoren, jeweils der nächste durchzuführende Arbeitsgang des Fertigungsauftrags und die dafür einzusetzenden Potenzialfaktoren bestimmt. Der Ansatz der opportunistischen Terminierung wird hier erweitert.

2 Konzeption der flexiblen Produktionsfeinplanung mithilfe von Planungsschritten

Damit ein feintermierter Fertigungsauftrag durchgeführt werden kann, müssen sowohl die benötigten Bedarfsmengen an Repetierfaktoren als auch die Potenzialfaktoren für seine Arbeitsgänge bereitstehen. War die Durchführung eines Fertigungsauftrags erfolgreich, gehen die produzierte Menge dem Lager, die Repetierfaktoren sind verbraucht zu und die Potenzialfaktoren wieder verfügbar. Repetierfaktor- und Potenzialfaktorstörungen können die Durchführung eines Fertigungsauftrags verhindern oder deren Erfolg beeinträchtigen. Diese Überlegungen werden für die Konzeption des Planungsansatzes genutzt.

Ein *Planungsproblem* PP_{FPPS} der flexiblen Produktionsfeinplanung mithilfe von Planungsschritten kann als Tripel $PP_{FPPS} = \langle AU, PS, Z \rangle$ beschrieben werden, das aus einer anfänglichen Umweltsituation AU , einer Menge von Planungsschritten PS und einem Ziel Z besteht. Das Erreichen des Ziels erfordert eine bestimmte Umweltsituation. Eine *Umweltsituation* bezeichnet dabei die Gesamtheit der Zustände von Objekten der Umwelt zu einem Zeitpunkt. Unter einem *Planungsschritt* wird hier eine Einheit der Planung verstanden, die durch Eigenschaften, Voraussetzung und Konsequenz gekennzeichnet ist. Voraussetzung und Konsequenz eines Planungsschrittes werden für das Ziel des Planungsproblems aus den Eigenschaften des Planungsschrittes ermittelt (*Initialisierung*).

Die *Voraussetzung* eines Planungsschrittes besteht in einer bestimmten Umweltsituation, die für seine Ausführung erforderlich ist. Die *Konsequenz* eines Planungsschrittes verändert die Umweltsituation. Grundsätzlich sind diese Veränderungen deterministisch, d. h., für jeden Planungsschritt und jede Umweltsituation, in der seine Voraussetzung erfüllt ist, existiert genau eine exakt bestimmte Umweltsituation, die sich aus der Konsequenz des Planungsschrittes ergibt [Ped87, 50]. Im betrachteten Anwendungsgebiet kann jedoch durch das Auftreten von Störungen die *tatsächliche Konsequenz* der Durchführung eines Planungsschrittes, also die tatsächliche Veränderung der Umweltsituation, von seiner aus Eigenschaften und Ziel abgeleiteten Konsequenz abweichen. Auch kann sich aufgrund von Störungen eine Umweltsituation ohne die Durchführung von Planungsschritten ändern. Die jeweils vorliegende tatsächliche Umweltsituation ist aber während der Plandurchführung vollständig bekannt.

Ausgehend von den zwei zu berücksichtigenden Störungsklassen, Repetierfaktor- und Potenzialfaktorstörungen, sind Teile- und Arbeitsplanungsschritte zu unterscheiden. Ein *Teileplanungsschritt* plant die Ausbringungsmenge eines Teils für genau einen Auftrag und die dafür benötigten Einsatzmengen an Repetierfaktoren. *Aufträge* umfassen jeweils eine Menge eines Teils. Der Begriff *Teil* dient als Oberbegriff für im Unternehmen produzierte Zwischen- und Endprodukte. Mithilfe von *Arbeitsplanungsschritten* werden die *Verrichtungen* (z. B. montieren, stanzen, beschichten) geplant, die zur Produktion von Teilen für Aufträge erforderlich sind. Jedem Teileplanungsschritt ist mindestens ein Arbeitsplanungsschritt zugeordnet.

Zu den *Eigenschaften eines Teileplanungsschrittes* gehören neben den zugeordneten Arbeitsplanungsschritten die Mengen (*Produktionskoeffizienten*) der Repetierfaktoren, die unmittelbar benötigt werden, um eine Einheit des Teils zu produzieren, das der Teile-

planungsschritt plant. Dieser Ausschnitt der Eigenschaften eines Teileplanungsschrittes entspricht den Informationen einer Baukastenstückliste.

Die *Konsequenz eines Teileplanungsschrittes* besteht darin, dass die geplante und für den Auftrag produzierte Ausbringungsmenge eines Teils dem Lager zugeht und die dafür verbrauchten Repetierfaktoreinsatzmengen abgehen. Zur Bestimmung der Repetierfaktoreinsatzmengen wird die geplante Ausbringungsmenge jeweils mit den Produktionskoeffizienten der eingehenden Repetierfaktoren multipliziert. Sind alle so ermittelten Repetierfaktoreinsatzmengen eines Teileplanungsschrittes für einen Auftrag durch frei verfügbare Lagerbestände gedeckt, ist die *Voraussetzung des Teileplanungsschrittes* erfüllt.

Repetierfaktorstörungen führen dazu, dass die Voraussetzungen der betroffenen Teileplanungsschritte nicht erfüllt sind. Zudem ist bei *Ausschuss* die tatsächlich dem Lager als Gutmenge zugehende Ausbringungsmenge eines Teils geringer als geplant, d. h., die tatsächliche Konsequenz eines Teileplanungsschrittes weicht von seiner geplanten Konsequenz ab.

Ein Bestandteil der *Eigenschaften eines Arbeitsplanungsschrittes* sind die Verrichtungsarten, die er erfordert. Eine *Verrichtungsart* beschreibt jeweils eine Verrichtung und die Abmessungen des Arbeitsfeldes oder andere technische Kenndaten für deren Durchführung. Jede Verrichtungsart wird von mindestens einem Potenzialfaktor erbracht, wobei ein Potenzialfaktor auch mehrere Verrichtungsarten anbieten kann. Da Verrichtungsarten nur die qualitative, nicht jedoch die quantitative Nachfrage nach Potenzialfaktorkapazität angeben, wird nicht von Arbeitsgängen, sondern von Arbeitsplanungsschritten gesprochen.

Sind aus technologischen Gründen andere Arbeitsplanungsschritte vor einem Arbeitsplanungsschritt durchzuführen (*technologische Präzedenzbeziehungen*), so finden sich diese direkten Vorgänger ebenfalls in den Eigenschaften des Arbeitsplanungsschrittes. Ihre Zugehörigkeit zu genau einem Teileplanungsschritt ist eine weitere Eigenschaft von Arbeitsplanungsschritten.

Die *Voraussetzung eines Arbeitsplanungsschrittes* ist erfüllt, wenn für jede Verrichtungsart, die er erfordert, mindestens ein Potenzialfaktor frei ist und die Arbeitsplanungsschritte, zu denen technologische Präzedenzbeziehungen bestehen, bereits durchgeführt wurden. Während der Durchführung des Arbeitsplanungsschrittes sind die verwendeten Potenzialfaktoren belegt, durch die *Konsequenz des Arbeitsplanungsschrittes* werden sie freigegeben und der Arbeitsplanungsschritt wird als durchgeführt gekennzeichnet.

Potenzialfaktorstörungen können einerseits verhindern, dass die Voraussetzungen von Arbeitsplanungsschritten erfüllt sind. Treten andererseits Potenzialfaktorstörungen während der Durchführung eines Arbeitsplanungsschrittes auf, weicht seine tatsächliche von seiner geplanten Konsequenz dahingehend ab, dass die betroffenen Potenzialfaktoren nicht freigegeben, sondern als ausgefallen markiert werden. Weiterhin gilt dieser Arbeitsplanungsschritt nicht als durchgeführt.

Zur *Umwelt* gehören Lager für Teile und Materialien sowie eine gegebene Ausstattung mit Potenzialfaktoren. *Materialien* bezeichnen hier unternehmensextern bezogene Repetierfaktoren. Für jedes Teil oder Material werden sein Gesamtlagerbestand sowie die davon reservierten und sich in Bearbeitung befindenden Mengen aufgezeichnet. Nach deren Abzug vom Gesamtlagerbestand ergibt sich der *frei verfügbare Lagerbestand* eines Repetierfaktors.

Die Angaben zu den *Potenzialfaktoren* bestehen jeweils aus den Verrichtungsarten, die ein Potenzialfaktor anbietet ², der Güte, mit der er diese Verrichtungsarten durchführen kann sowie seinem aktuellen Verfügbarkeitszustand (frei, belegt, reserviert, ausgefallen).

Die Lagerbestände von Teilen und Materialien zu einem Zeitpunkt sowie die Verfügbarkeitszustände von Potenzialfaktoren zu diesem Zeitpunkt bilden eine *Umweltsituation*. Repetierfaktorstörungen spiegeln sich in einer Umweltsituation als fehlende Lagerbestände wider, Potenzialfaktorstörungen als ausgefallene Potenzialfaktoren.

Trifft ein *Auftrag* ein und ist dieser in der anfänglichen Umweltsituation *nicht erfüllt*, also die Menge des Teils nicht durch frei verfügbaren Lagerbestand gedeckt, wird durch eine Rückwärts- und Tiefensuche ein Plan erzeugt [Pat01, 100 f.]. Ein *Plan* besteht aus einer endlichen Menge halbgeordneter und mindestens partiell initialisierter Planungsschritte zum Erreichen des Ziels, ausgehend von der anfänglichen Umweltsituation.

Teileplanungsschritte sind in Plänen vollständig initialisiert: Die Auftragsmenge wird einem Teileplanungsschritt als geplante auftragsabhängige Ausbringungsmenge zugewiesen und mit den Produktionskoeffizienten der eingesetzten Repetierfaktoren multipliziert, um die Voraussetzung des Teileplanungsschrittes zu bestimmen. Repetierfaktoreinsatzmengen an Teilen, die für einen Auftrag nicht durch frei verfügbare Lagerbestände gedeckt sind, initialisieren die geplanten auftragsabhängigen Ausbringungsmengen der entsprechenden Teileplanungsschritte; fehlende Repetierfaktoreinsatzmengen an Materialien werden bestellt. Mengen des gleichen Teils oder Materials werden zusammengefasst. Die Initialisierung der Teileplanungsschritte ist der Sekundärbedarfsermittlung bei plangesteuerter Materialdisposition vergleichbar.

Im Gegensatz zu Teileplanungsschritten sind Arbeitsplanungsschritte in Plänen nur partiell initialisiert: Lediglich die technologischen Präzedenzbeziehungen werden in die Voraussetzungen der Arbeitsplanungsschritte übernommen; die Auswahl von Potenzialfaktoren für Verrichtungsarten erfolgt erst während der Plandurchführung, s. Abschnitt 3.

3 Plandurchführung der flexiblen Produktionsfeinplanung mithilfe von Planungsschritten

Die Durchführung aller Planungsschritte eines Plans (*Plandurchführung*) soll die anfängliche Umweltsituation in eine Umweltsituation überführen, in der das Ziel des Planungsproblems, das Erfüllen eines Auftrags, erreicht ist. Geprägt wird die Plandurchführung einerseits durch die Halbordnungen zwischen Planungsschritten der gleichen Art, andererseits durch die Hüllenfunktion der Teileplanungsschritte für ihre Arbeitsplanungsschritte.

In Plänen sind Planungsschritte der gleichen Art nur *halbgeordnet*: Ein Teileplanungsschritt ist für einen bestimmten Auftrag genau dann vor einem anderen Teileplanungsschritt durchzuführen, wenn er die Ausbringungsmenge eines Teils plant, die der andere Teileplanungsschritt (*direkter Nachfolger*) als Repetierfaktoreinsatzmenge benötigt. Ein

²Diese bezogen auf die Verrichtungsarten redundante Angabe wird für die Bestimmung von Flexibilitätskoeffizienten benötigt.

Arbeitsplanungsschritt ist genau dann vor einem anderen Arbeitsplanungsschritt (*direkter Nachfolger*) durchzuführen, wenn er in dessen technologischen Präzedenzbeziehungen ausgewiesen ist. In allen anderen Fällen ist die Ausführungsreihenfolge von Teile- bzw. Arbeitsplanungsschritten frei.

Während der Plandurchführung bildet jeder Teileplanungsschritt eine *Hülle* um seine Arbeitsplanungsschritte, d. h.:

- Ein *Teileplanungsschritt* ist *ausführbar*, wenn seine Voraussetzung erfüllt ist. Ein *Arbeitsplanungsschritt* hingegen ist *ausführbar*, wenn seine Voraussetzung und die des Teileplanungsschrittes, zu dem er gehört, erfüllt sind.
- Die Konsequenz eines Teileplanungsschrittes tritt erst ein, wenn die Konsequenzen aller seiner Arbeitsplanungsschritte eingetreten sind.

Die *Plandurchführung* (s. Abbildung 1) erfolgt für jeden Auftrag einzeln als Vorwärts- und Tiefensuche (für die Algorithmen vgl. [Pat01, 102 ff.]). Jede Veränderung der Umweltsituation stößt die Plandurchführung neu an, solange der Auftrag nicht erfüllt ist. Zunächst wird dabei die *Menge ausführbarer Teileplanungsschritte* bestimmt, also der Teileplanungsschritte (TP), deren Repetierfaktoreinsatzmengen (u. U. nach einem Lagerzugang) in der aktuellen Umweltsituation durch frei verfügbare Lagerbestände gedeckt sind. Sind mehrere *Teileplanungsschritte* für einen Auftrag ausführbar, wird der mit der größten Anzahl direkter Nachfolger *ausgewählt*. Bei Mehrdeutigkeit von Auswahlregeln erfolgt hier und in allen anderen Fällen eine Zufallsauswahl.

Der Hüllenfunktion der Teileplanungsschritte entsprechend, besteht die Durchführung des ausgewählten Teileplanungsschrittes in der Durchführung aller seiner Arbeitsplanungsschritte (AP). Auch hier wird zuerst die *Menge ausführbarer Arbeitsplanungsschritte* ermittelt, d. h. der Arbeitsplanungsschritte, die dem Teileplanungsschritt zugeordnet sind, noch nicht durchgeführt wurden und deren technologische Präzedenzbeziehungen eingehalten werden (*Menge zu prüfender Arbeitsplanungsschritte*) und für deren Verrichtungsarten jeweils mindestens ein Potenzialfaktor (PF) frei ist. Aus mehreren freien *Potenzialfaktoren* für eine Verrichtungsart wird der *ausgewählt*, der die geringste Anzahl an Verrichtungsarten anbietet. Erfordert ein Arbeitsplanungsschritt mehrere *Verrichtungsarten*, dann beginnt die *Auswahl* von Potenzialfaktoren bei der Verrichtungsart, die durch die wenigsten Potenzialfaktoren erbracht werden kann.

Aus einer Menge ausführbarer *Arbeitsplanungsschritte* wird der Arbeitsplanungsschritt mit der größten Anzahl direkter Nachfolger *ausgewählt*. Während der Durchführung dieses Arbeitsplanungsschrittes sind die ausgewählten Potenzialfaktoren belegt, die Konsequenz des Arbeitsplanungsschrittes gibt sie frei. Existieren weitere noch nicht durchgeführte Arbeitsplanungsschritte des Teileplanungsschrittes, werden erneut die Mengen zu prüfender und ausführbarer Arbeitsplanungsschritte bestimmt. Andernfalls endet die Durchführung des Teileplanungsschrittes; die durch ihn geplante auftragsabhängige Ausbringungsmenge eines Teils ist nun produziert und geht dem Lager zu, die verbrauchten Repetierfaktoreinsatzmengen gehen aus dem Lager ab. Ist der Auftrag in der neuen Umweltsituation noch nicht erfüllt, wird die Plandurchführung fortgesetzt.

Störungen zeigen sich während der Plandurchführung und betreffen die Voraussetzungen

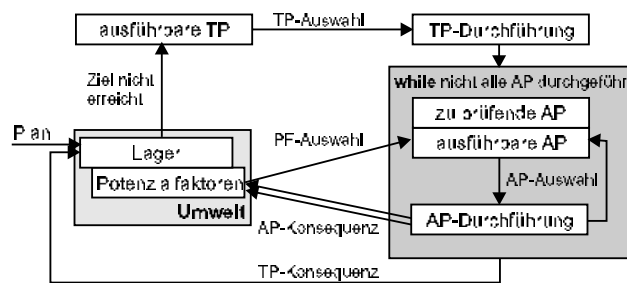


Abbildung 1: Plandurchführung

von Planungsschritten oder deren Konsequenzen. Planungsschritte, deren Voraussetzungen durch Repetierfaktor- bzw. Potenzialfaktorstörungen nicht erfüllt sind, gehören in der betroffenen Umweltsituation nicht zur Menge ausführbarer Teile- bzw. Arbeitsplanungsschritte. Ausschuss bei der Durchführung von Teileplanungsschritten löst Sekundäraufträge zur Produktion der fehlenden Teilmengen aus. Sekundäraufträge werden wie alle anderen Aufträge geplant und durchgeführt. Fallen Potenzialfaktoren während der Durchführung von Arbeitsplanungsschritten aus, dann werden die betroffenen Arbeitsplanungsschritte wieder zur Menge zu prüfender Arbeitsplanungsschritte hinzugefügt.

4 Einschätzung des entwickelten Planungsansatzes

Wie Abschnitt 3 zeigt, greift die Plandurchführung automatisch auf die Planungsschritte zu, die trotz der Nichtverfügbarkeit von Repetier- oder Potenzialfaktoren ausführbar sind; weder Nutzerinteraktionen noch explizite Umplanungsregeln sind dafür erforderlich. Damit benötigt die flexible Produktionsfeinplanung mithilfe von Planungsschritten weniger Planungskapazität als die bekannten, auf Planänderungen beruhenden Ansätze für das Störungsmanagement.

Die Vermeidbarkeit von Planänderungen ist auf die Konzeption des Planungsansatzes zurückzuführen. So berücksichtigen die Voraussetzungen von Planungsschritten Störungen unmittelbar und in gleicher Form wie störungsfreie Umweltsituationen. Weiterhin sind die Halbordnungen der Planungsschritte eine notwendige Bedingung dafür, dass in einer Umweltsituation mehrere ausführbare Planungsschritte existieren. Gibt es trotz der Halbordnungen von Planungsschritten in einer gestörten Umweltsituation keine anderen ausführbaren Planungsschritte, dann sind Wartezustände der Plandurchführung nicht zu vermeiden. Auch kann bei Ausschuss eine Neuplanung für Sekundäraufträge nicht umgangen werden.

Die flexible Produktionsfeinplanung mithilfe von Planungsschritten ist ein anwendungsabhängiger Planungsansatz. Anwendungsunabhängigen Planungsansätzen entstammen:

- die Beschreibung von Planungsproblemen [FN71, Ped87, Cha87, Wel94],
- das Verständnis von Plänen als halbgeordneten Mengen von Planungseinheiten und deren partielle Initialisierung (*Least Commitment Planning* [Wel94, Ped87, Cha87]),
- die Auffassung von Planung als Suche durch Umweltsituationen [FN71, Ped87],
- die Verbindung von Planung und Plandurchführung als *Reactive Planning* [Sch87].

Die flexible Produktionsfeinplanung mithilfe von Planungsschritten unterscheidet sich von diesen anwendungsunabhängigen Planungsansätzen zum einen dadurch, dass die Voraussetzungen und Konsequenzen der Planungseinheiten erst während der Planung und der Plandurchführung ermittelt werden, zum anderen durch die entwickelten anwendungsabhängigen Algorithmen.

Das *Anwendungsgebiet*, die Produktionsplanung und -steuerung, ist dadurch *charakterisiert*, dass technisch realisierbare Stücklisten, Arbeitspläne und technische Zeichnungen, alle Potenzialfaktoren und die jeweils vorliegenden Umweltsituationen bekannt sind. Wird eine korrekte Überführung dieser Charakteristika des Anwendungsgebietes in Elemente des entwickelten Planungsansatzes unterstellt, sind alle Lagerbestände, Potenzialfaktoren mit ihren Verrichtungsarten, Arbeits- und Teileplanungsschritte in jeweils endlichen Anzahlen gegeben. Damit sind die Suchräume für Planung und Plandurchführung sehr stark eingeschränkt. Zudem werden diese Suchräume von den entwickelten Algorithmen nicht vollständig durchsucht. Die Laufzeit der Planung ist im ungünstigsten Fall nicht schlechter als quadratisch in der Anzahl der Knoten des Gozinto-Graphen für das Teil, auf das sich ein Auftrag bezieht.

Wegen der partiellen Initialisierung der Arbeitsplanungsschritte ist jeder gefundene Plan unvollständig. Je eine Planvervollständigung, deren Existenz und Korrektheit durch die Charakteristika des Anwendungsgebietes gesichert ist, ermittelt die Plandurchführung mittels einer planungsschrittweisen Suche in den kleinen Suchräumen und sofortiger Planungsschrittdurchführung.

Der in der flexiblen Produktionsfeinplanung mithilfe von Planungsschritten modellierte Ausschnitt der Realwelt weicht von dem anderer Ansätze zur Rechnerunterstützung für das Störungsmanagement ab. Im Gegensatz zu diesen anderen Ansätzen betrachtet der entwickelte Planungsansatz nicht nur die Feinterminierung, sondern auch die Materialdisposition. Planungsschritte stellen die dafür benötigten Stammdaten in einheitlicher Form bereit. Durch die Konzeption von Arbeitsplanungsschritten und Potenzialfaktoren (detailliert [Pat01, 149 ff.]) übersteigt die Ausdrucksfähigkeit des entwickelten Planungsansatzes die möglichen Ausstattungen (*machine environment* [Gra79, 288]) deterministischer Ablaufplanungsprobleme für die Feinterminierung. Anders als die deterministischen Ablaufplanungsprobleme vernachlässigt der entwickelte Planungsansatz jedoch Formalziele, z. B. Zeit- und Kostenziele.

Statt an Zeit- und Kostenzielen ist die flexible Produktionsfeinplanung mithilfe von Planungsschritten an der größtmöglichen Flexibilität der Plandurchführung orientiert. *Flexibilität* ist hier eine Eigenschaft von Handlungsalternativen, die den Handlungsspielraum für künftige Entscheidungen beschreibt, der nach Umsetzung dieser Handlungsalternati-

ven verbleibt [Bea95, 444]. Je größer der verbleibende Handlungsspielraum ist, um so besser können Planänderungen im Falle zukünftiger Störungen vermieden werden.

Handlungsalternativen bestehen im entwickelten Planungsansatz bei Auswahlen aus mehreren ausführbaren Planungsschritten, aus mehreren freien Potenzialfaktoren und aus mehreren zu betrachtenden Verrichtungsarten eines Arbeitsplanungsschrittes. Gemessen wird die *Flexibilität* dieser Handlungsalternativen, also die Größe der verbleibenden Handlungsspielräume nach der Auswahl, durch Flexibilitätskoeffizienten [Pat01, 99 ff.], die in den Auswahlregeln in Abschnitt 3 nur verbal erläutert wurden. Diese flexibilitätsershaltenden Auswahlregeln konkretisieren die vagen Formulierungen der opportunistischen Terminierung [Fox87, 234] in einheitlicher Form (spezialisiert [Gös00, 68 ff.]). Zudem konnte gezeigt werden, dass unter bestimmten Umständen die absolute ökonomische Vorteilhaftigkeit einer Handlungsalternative steigt, wenn ihre Flexibilität erhöht wird [Pat01, 42 ff.].

Derzeit werden mit Firmen Gespräche zum praktischen Einsatz der flexiblen Produktionsfeinplanung mithilfe von Planungsschritten geführt. Es wird sich zeigen, inwieweit die Praxis Weiterentwicklungen des Planungsansatzes erfordert.

Literaturverzeichnis

- [Aea92] H. Adelsberger and S. Gnadenberger et al. The Concept of a Knowledge-based Leitstand. In C. O'Brien, editor, *Computer Integrated Manufacturing*, pages 346–356. London et al.: Springer, 1992.
- [AS97] R. J. Abumaizar and J. A. Svestka. Rescheduling job shops under random disruptions. *International Journal of Production Research*, 35(7):2065–2082, 1997.
- [Bea91] J. C. Bean and J. R. Birge et al. Matchup scheduling with multiple resources, release dates and disruptions. *Operations Research*, 39(3):470–483, 1991.
- [Bea95] S. Benjaafar and T. L. Morin et al. The strategic value of flexibility in sequential decision making. *European Journal of Operational Research*, 82:438–457, 1995.
- [BL91] W. Busse von Colbe and G. Laßmann. *Betriebswirtschaftstheorie, Band I: Produktions- und Kostentheorie*. Berlin et al.: Springer, 5 edition, 1991.
- [Bro89] M. C. Brown. The dynamic rescheduler: Conquering the changing production environment. In L. F. Pau, editor, *Expert systems in economics, banking and management*, pages 197–206. Amsterdam: North-Holland, 1989.
- [CH88] C.-H. Chu and J.-C. Hayya. Buffering Decisions under MRP Environment: A Review. *OMEGA: The International Journal of Management Science*, 16(4):325–331, 1988.
- [Cha87] D. Chapman. Planning for Conjunctive Goals. *Artificial Intelligence*, 32:333–377, 1987.
- [FN71] R. E. Fikes and N. J. Nilsson. STRIPS: A New Approach to the Application of Theorem Proving to Problem Solving. *Artificial Intelligence*, 2:189–208, 1971.
- [Fox87] B. R. Fox. The implementation of opportunistic scheduling. In L. O. Hertzberger and F. C. A. Groen, editors, *Intelligent autonomous systems*, pages 231–240. Amsterdam et al.: North-Holland, 1987.

- [Gös00] R. Gössinger. *Opportunistische Koordinierung bei Werkstattfertigung: Ein Ansatz auf der Basis von Multiagentensystemen*. Wiesbaden: Gabler, 2000.
- [Gra79] R. L. Graham. Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: A Survey. *Annals of Discrete Mathematics*, 5:287–326, 1979.
- [KS95] S. N. Kadipasaoglu and V. Sridharan. Alternative approaches for reducing schedule instability in multistage manufacturing under demand uncertainty. *Journal of Operations Management*, 13:193–211, 1995.
- [Leh92] F. Lehmann. *Störungsmanagement in der Einzel- und Kleinserienmontage: Ein Beitrag zur EDV-gestützten Montagesteuerung*. Aachen: Shaker, 1992.
- [MS95] K. Miyashita and K. Sycara. CABINS: a framework of knowledge acquisition and iterative revision for schedule improvement and reactive repair. *Artificial Intelligence*, 76:377–426, 1995.
- [NK95] B. Nebel and J. Köhler. Plan reuse versus plan generation: a theoretical and empirical analysis. *Artificial Intelligence*, 76:427–454, 1995.
- [Pat01] S. Patig. *Flexible Produktionsfeinplanung mit Hilfe von Planungsschritten – Ein Planungsansatz zum Umgang mit Störungen bei der Produktion*. Frankfurt/Main et al.: Peter Lang, 2001.
- [Ped87] E. P. D. Pednault. Formulating multiagent, dynamic-world problems in the classical planning framework. In M. P. Georgeff and A. L. Lansky, editors, *Reasoning about Actions and Plans*, pages 47–82. Los Altos: Morgan Kaufmann, 1987.
- [Ros89] H. Rose. Computergestützte Störungsbewältigung beim Durchlauf von Produktionsaufträgen unter besonderer Berücksichtigung wissensbasierter Elemente. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen – Nürnberg, 1989.
- [Sch87] M. J. Schoppers. Universal Plans for Reactive Robots in Unpredictable Environments. In J. McDermott, editor, *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence: IJCAI-87*, pages 1039–1046, Los Altos, 1987. Morgan Kaufmann.
- [vDP87] H. van Dyke Parunak. Manufacturing Experience with the contract net. In M. N. Huhns, editor, *Distributed artificial intelligence*, pages 285–310. London: Pitman, 1987.
- [Wel94] D. S. Weld. An Introduction to Least Commitment Planning. *AI Magazine*, o. Jg.:27–61, 1994.
- [Wil95] H. Wildemann. *Entstörmanagement als PPS-Funktion*. München: Transfer-Centrum-Verlag, 2 edition, 1995.
- [Zäp82] G. Zäpfel. *Produktionswirtschaft: Operatives Produktionsmanagement*. Berlin et al.: de Gruyter, 1982.

Susanne Patig wurde 1973 in Grimma geboren. Sie studierte von 1992 bis 1997 Betriebswirtschaftslehre mit den Schwerpunkten Wirtschaftsinformatik, Produktionswirtschaft und Statistik an der Universität Leipzig. Seit 1997 ist sie in der Arbeitsgruppe Wirtschaftsinformatik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg tätig, wo sie 2001 promovierte.