

Konzeption und Umsetzung eines DSS zur robusten Ressourcenbelegungsplanung im Spezialmaschinenbau

Christian Gahm

Universität Augsburg
86159 Augsburg
+49 821 598-4359

christian.gahm@wiwi.uni-augsburg.de

Jens Kruse

Universität Augsburg
86159 Augsburg
+49 821 598-4420

jens.kruse@wiwi.uni-augsburg.de

ABSTRACT

Die operative Produktionsplanung im Spezialmaschinenbau ist durch eine erhöhte Unsicherheit (Informationsdynamik und Störungen) gekennzeichnet, die von APS- und PPS-Systemen bisher zumeist nur unzureichend berücksichtigt wird. Vor diesem Hintergrund wird in diesem Beitrag ein Planungsansatz zur Bestimmung robuster Ressourcenbelegungspläne konzipiert. Die simulationsbasierte Dimensionierung von Korrekturfaktoren und die Umsetzung als DSS geben dem Entscheidungsträger die Möglichkeit, gemäß seiner Risikopräferenz in die Planung einzugreifen. Die bei der Konzeption des Ansatzes fokussierte praktische Anwendbarkeit zeigt sich in den Ergebnissen, die auf den realen Daten eines Unternehmens der Luftfahrtindustrie basieren.

Keywords (Schlüsselwörter)

Operative Produktionsplanung, Unsicherheit, Robustheit, Simulation, Decision Support System

1. Einleitung

Die Verschärfung der Wettbewerbssituation für produzierende Unternehmen im Zuge der Globalisierung, dem Wandel der Marktbeziehungen und dem technologischen Fortschritt hat nicht nur zu einem erhöhten Druck zur Kostenreduktion, sondern auch zur Erweiterung der primären Zielsetzungen um das Ziel der Kundenzufriedenheit geführt. Diese Kundenzufriedenheit soll durch eine umfassende Kundenorientierung erreicht werden, indem die zunehmend heterogenen Kundenbedürfnisse nach individualisierten Produkten, geringen Preisen, hoher Qualität, kurzer Lieferzeit, hoher Liefertreue und individuellem Service befriedigt werden. Insbesondere der deutsche Maschinen-, Anlagen- und Großfahrzeugbau hat auf die neue Wettbewerbssituation mit einer Individualisierung und Segmentierung des Leistungsangebots reagiert und bietet hochkomplexe, kundenspezifische Spitzenprodukte – Spezialmaschinen – für bestimmte Marktsegmente an.

Neben den spezifischen Eigenschaften von Produktionssystem und -prozess ([3]) muss bei der Planung der Produktion von Spezialmaschinen insbesondere die erhöhte *Unsicherheit* der pla-

nungsrelevanten Informationen berücksichtigt werden. Diese Unsicherheit resultiert zum einen aus dem dynamischen Umfeld, in dem operative Planung grundsätzlich stattfindet (*Informationsdynamik*), zum anderen aus stochastischen Einflüssen auf den Produktionsprozess (*Störungen*). Die erhöhte Unsicherheit bei der operativen Produktionsplanung im Spezialmaschinenbau liegt in den besonderen Eigenschaften des Produkts begründet. Der *aktuellste Stand der Technik*, die *hohe Produktkomplexität* und der *hohe manuelle Aufwand in der Montage* können beispielsweise zu stark variierenden Bearbeitungszeiten führen. Auch die *lange Montagedauer* von mehreren Monaten und die *Kundenspezifität* der Produkte verstärken, bspw. auf Grund von Änderungen der Produktspezifikation, die Unsicherheit. Ein weiterer bei der Planung zu berücksichtigender Aspekt ist die *hohe Wertigkeit* (mehrere Millionen Euro) des Produkts.

Zur Berücksichtigung von Unsicherheit bei der Planung wurden von Seiten der Wissenschaft in den letzten Jahren verschiedene Planungskonzepte und -methoden entwickelt (Übersichten sind bspw. bei [1], [2], [7], [25] oder [28] zu finden), deren Anwendung jedoch stets problemspezifisch erfolgen muss ([25] S. 205). Aktuelle Advanced Planning and Scheduling Systeme (APS) sowie Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme (PPS) beziehen jedoch das grundlegende Problem der Unsicherheit oft nur unzureichend in die Planung mit ein ([7] S. 14).

Der vorliegende Beitrag kombiniert und integriert bestehende, problemspezifisch weiterentwickelte Konzepte und Methoden zu einem umfassenden Planungsansatz für eine robuste Ressourcenbelegungsplanung im Spezialmaschinenbau. Um dessen Anwendbarkeit und Akzeptanz in der betrieblichen Praxis zu gewährleisten, wird bereits bei dessen Konzeption die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der eingesetzten Konzepte und Methoden sowie die informationstechnische Umsetzbarkeit fokussiert. Das resultierende *Decision-Support-System* (DSS) berücksichtigt dabei die vorliegende Informationsdynamik und das erhöhte Störungsrisiko und stellt dem Entscheidungsträger die notwendigen Werkzeuge und Informationen bereit, um situationspezifisch Pläne entwickeln zu können.

2. Problemstellung

Grundlage für die Entwicklung eines Planungsansatzes bzw. einer Planungssoftware ist die Spezifikation eines Anforderungsprofils bestehend aus Aufgaben und Zielen. Hierzu bedarf es einer detaillierten Analyse des Produktionssystems und -prozesses sowie der Zielsetzungen des Unternehmens. Da insbesondere Unsicherheit bei der Planung berücksichtigt werden soll, muss auch eine Analyse von deren Ursachen und Auswirkungen erfolgen.

2.1 Anforderungsprofil

Zur Umsetzung einer kundenspezifischen Produktion (kundenindividuelle Einzelfertigung) existieren grundsätzlich verschiedene Strategien, die unterschiedliche Zeitpunkte (Entkopplungspunkte) vorsehen, an denen die Kundenspezifität Einfluss auf den Prozess der Leistungserstellung nimmt. Zur Steigerung der Effizienz des gesamten Leistungserstellungsprozesses wird im Spezialmaschinenbau, ähnlich zur Automobilindustrie, die Kundenspezifität durch eine kundenauftragsspezifische Montage des Endprodukts aus Komponenten und Teilen gewährleistet (*Assemble-to-Order* oder *Configure-to-Order*). Die Montage der Spezialmaschinen ist dabei durch eine Anordnung der Arbeitssysteme nach dem Objektprinzip und einen einheitlichen Materialfluss gekennzeichnet. Da eine Montage mit zeitlicher Bindung (Taktfertigung) auf Grund der heterogenen Aufträge (kundenauftragsspezifische Arbeitspläne) und des geringen Automatisierungsgrads der Montage nicht zielführend ist, wird eine *Reihenmontage* präferiert, um durch die zeitliche Entkopplung der einzelnen Montagestationen die notwendige Flexibilität für die Montage unterschiedlichster Kundenaufträge gewährleisten zu können.

Die Montage eines Auftrags j gliedert sich somit in einzelne Montageschritte $o_{j,s}$ (Operationen), die auf sequentiell angeordneten Montagestationen s durchgeführt werden. Jede Operation definiert dabei einen bestimmten Ressourcenbedarf, ein Arbeitspaket $wp_{j,s}$ (Anzahl an Stunden), dessen Bearbeitung beliebig unterbrochen werden kann. Durch die Mitarbeiter jeder Montagestation wird je Schicht t ein (variierendes) Ressourcenangebot $r_{s,t}$ definiert. Aufgabe der Ressourcenbelegungsplanung (engl. „resource allocation planning“) ist die schichtgenaue Zuordnung der Operationen zu den Montageressourcen und die Festlegung der Intensität, mit der in einer Schicht eine Operation bearbeitet wird. Dabei müssen zum einen die vorhandenen Kapazitäten der Montageressourcen berücksichtigt werden, zum anderen müssen die durch die Produktionsprogramm- bzw. Kundenauftragsplanung vorgegebenen Rahmenterminale in Form von frühesten Startterminen (Materialverfügbarkeitsterminen) $esd_{j,s}$ je Operation sowie Fertigstellungstermine (dl_j) je Montageauftrag eingehalten werden. Eine technische Restriktion stellt die maximale Anzahl an Mitarbeitern (w_s^{MAX}) dar, die je Station gleichzeitig einen Auftrag bearbeiten können. Im Operations Research wird dieses Planungsproblem als ein *Hybrid-Flow-Shop-Problem mit variablen Bearbeitungsintensitäten und unterbrechbaren Operationen* bezeichnet.

Bei der Ressourcenbelegungsplanung im Spezialmaschinenbau ist die Einhaltung der Fertigstellungstermine sowohl für die Erreichung der Zielsetzung Kundenzufriedenheit (insb. der „Loss of goodwill“ im Falle verspäteter Lieferungen) als auch für die Kostenreduktion (Reduzierung der Lieferverzugskosten) von zentraler Bedeutung. Aus diesem Grund wird als primäres Ziel eine „absolute Termintreue“ verfolgt. Da bei der Herstellung von Spezialmaschinen die Kapitalbindungskosten auf Grund der hohen Wertigkeit des Produkts bzw. dessen Komponenten und Teilen einen wesentlichen Anteil der Produktionskosten ausmachen, wird als zweites Ziel deren Minimierung durch eine Minimierung der „Work-in-Process“-Bestände (WIP-Bestände) verfolgt. Auf Grund der oftmals problematischen wertorientierten Erfassung von Beständen, wird als operatives Ersatzziel eine Minimierung der Durchlaufzeit angestrebt (aus diesem Grund

wird auch keine beide Ziele umfassende kostenorientierte Zielfunktion herangezogen). Eine Verkürzung der Durchlaufzeit würde jedoch bei gleichen Startterminen lediglich zu einer Verlagerung von WIP-Beständen zu Fertigerzeugnisbeständen führen und die Kapitalbindungskosten nicht reduzieren, sondern sogar erhöhen. Aus diesem Grund werden stattdessen möglichst späte Starttermine angestrebt, also eine *Maximierung der Montagestarttermine*. Mit diesen späteren Startterminen gehen spätere Materialdispositions- und -bereitstellungstermine einher, wodurch die angestrebten Bestandsreduzierungen realisiert werden können. Zusammenfassend ergeben sich damit die beiden Ziele „absolute Termintreue“ und „Maximierung der Starttermine“, wobei ersteres als Satisfizierungsziel und letzteres als Extremierungsziel definiert wird.

Durch die Maximierung der Starttermine auf den Montagestationen werden nicht nur die Durchlaufzeit und damit die Bestände reduziert, sondern auch ein maximal dichter Plan zur Bearbeitung der Operationen erzeugt. Hieraus verstärkt sich das bereits eingangs angeführte Problem der erhöhten Unsicherheit, da sich jede Verzögerung während der Durchführung negativ auf den Fertigstellungstermin eines Auftrags und damit auf das primäre Ziel „Termintreue“ auswirken kann. Aus diesen und den vorangegangenen Überlegungen zur Unsicherheit lässt sich unmittelbar die Forderung nach einer ausreichenden *Robustheit* der Ressourcenbelegungspläne ableiten, um so die erfolgsmindernden Auswirkungen der Unsicherheit zu neutralisieren oder zumindest zu reduzieren. Nach Scholl ([25] S. 93) liegt Robustheit eines Plans dann vor, wenn "die Realisierung des Plans – ggf. in modifizierter Form – für (nahezu) jede denkbare zukünftig eintretende Umweltlage zu guten bzw. akzeptablen Ergebnissen im Hinblick auf die bei der Planung verfolgten Ziele führt“. Grundsätzlich lassen sich sechs verschiedene Kriterien für die Beurteilung der Robustheit eines Plans heranziehen ([25] S. 98 ff.), wobei für die operative Produktionsplanung im Spezialmaschinenbau folgende Kriterien von hervorgehobener Bedeutung sind:

- *Ergebnisrobustheit* bezieht sich auf die durch einen Plan für alle denkbaren Umweltentwicklungen erzielbare Höhe der Ergebnisse.
- *Zulässigkeitsrobustheit* bezeichnet die Eigenschaft eines Plans, für jede potentielle Umweltentwicklung zulässig zu sein bzw. nur wenig von der Zulässigkeit abzuweichen. D.h. der Plan ist wie geplant oder mit geringen Modifikationen durchführbar.
- *Planungsrobustheit* bezieht sich auf die erwünschte Eigenschaft der Planungsstabilität bzw. die nicht erwünschte Planungsnerosität. Ein Plan ist dann als planungsrobust zu bezeichnen, wenn vollständig oder teilweise realisierte sowie vorläufige Entscheidungen bei Eintritt einer bestimmten Umweltentwicklung nicht bzw. nur in geringem Umfang revidiert werden müssen.

Die Kriterien Optimalitäts-, Bewertungs- und Informationsrobustheit sind bzgl. der vorliegenden Problemstellung zu vernachlässigen, da die Berechnung eines optimalen Plans nicht effizient möglich ist (vgl. 3.3), keine unscharfen Bewertungsansätze herangezogen werden und der vorliegende Informationsstand nicht bzw. nur mit sehr hohem Aufwand oder Einschränkungen für den Kunden verbessert werden könnte.

Aufgabe einer robusten Ressourcenbelegungsplanung ist demnach die Zuordnung von Operationen zu Montageressourcen mit dem

Ziel einer absoluten Termintreue und möglichst späten Startterminen sowie einer möglichst hohen Ergebnis-, Zulässigkeits- und Planungsrobustheit.

2.2 Problemspezifische Ursachen und Auswirkungen der Unsicherheit

Die Unsicherheit bzgl. der planungsrelevanten Informationen kann unter anderem auf zwei grundlegende Ursachen zurückgeführt werden. Erstens auf die im Zeitablauf stattfindenden Informationsänderungen in einem dynamischen Umfeld – *Informationsdynamik* – und zweitens auf stochastische Einflüsse auf den Produktionsprozess – Störungen (vgl. [7], [15] und [23] bzw. [26], [28] und [29]).

Informationsdynamik und Störungen wirken sich bzgl. der Ressourcenbelegungsplanung auf den Ressourcenbedarf bzw. das Ressourcenangebot aus. Zu unterscheiden ist dabei zwischen zwei unterschiedlichen Auswirkungen. Zum einen kann ein *zusätzlicher Ressourcenbedarf*, bspw. durch eine Änderung der Kundenspezifikation oder Nacharbeit, zum anderen ein *verzögerter Ressourcenbedarf* (Ressourcenbedarf, der zu einem späteren Zeitpunkt als ursprünglich geplant zu decken ist), bspw. durch die Verschiebung von Materialverfügbarkeitsterminen oder Lieferverzögerungen, entstehen.

Informationsdynamik kann im Allgemeinen nach dem „Ort“ ihrer Entstehung klassifiziert werden, wobei zwischen exogenen Ursachen (außerhalb des Einflussbereichs des Unternehmens) und endogenen Ursachen (innerhalb des Einflussbereichs des Unternehmens) unterschieden wird.

Exogene Ursachen der Informationsdynamik:

- Grundsätzlich herrscht Unsicherheit darüber, ob externe Zulieferer die mittelfristig in der Materialbedarfs- und Produktionsprogrammplanung festgelegten Liefertermine und Liefermengen einhalten oder nicht, wodurch es zu Verschiebungen der frühesten Starttermine kommen kann.
- Im Allgemeinen spielt die Nachfrageunsicherheit bei der nicht-auftragsorientierten Produktion eine große Rolle. Im auftragsorientierten Spezialmaschinenbau ist die Anzahl der Aufträge für einen bestimmten Zeitraum als weitgehend bekannt und deterministisch einzuschätzen.
- Eine sehr problemspezifische Ursache der Informationsdynamik ist der langen Montagedurchlaufzeit und der Kundenspezifität geschuldet. Um einen möglichst hohen Grad an Kundenzufriedenheit zu erlangen, werden dem Kunden Änderungen der Produktspezifikation häufig bis zum Beginn der Montage und darüber hinaus ermöglicht, wodurch sich die Materialbedarfe und Arbeitspläne ändern können.

Endogene Ursachen der Informationsdynamik:

- Neben den externen Zulieferern sind auch die internen Zulieferer Ursache der Informationsdynamik.
- Eine wiederum problemspezifische Ursache ist der hohen Produktkomplexität in Verbindung mit der technologischen Weiterentwicklung des Produkts geschuldet. Konstruktionsänderungen resultieren in Materialbedarfs- und Arbeitsplanänderungen.

Die Informationsdynamik verursacht demzufolge eine fortwährende Änderung der Planungsvorgaben und wird deswegen häufig

auch als Planstörung bezeichnet. Im Gegensatz dazu wirken sich Störungen unmittelbar auf den Montageprozess aus und werden als Prozessstörungen bezeichnet. Diese lassen sich nach der Ursache klassifizieren [29]:

- *Dispositionsbedingte Störungen* werden durch fehlende oder fehlerhafte Informationen, wie z.B. Montageunterlagen verursacht.
- *Personalbedingte Störungen* sind insbesondere bei der Montage von Spezialmaschinen zu erwarten, da hier ein hoher manueller Aufwand und eine komplexe, jeweils individuelle Produktstruktur vorliegt, die zudem noch häufigen Änderungen unterworfen ist. Hierbei sind durch Arbeitsfehler (die zu Nacharbeit führen) und Abweichungen vom geplanten Leistungsgrad (Überschreitungen der Vorgabezeiten) induzierte, zusätzliche Ressourcenbedarfe wahrscheinlicher als in anderen Montagesystemen. Zudem unterliegt das durch die Mitarbeiter der Montagestationen bereitgestellte Ressourcenangebot kurzfristigen Schwankungen (z.B. Krankheit, kurzfristige Urlaubsinanspruchnahmen, unentschuldigtes Fernbleiben von der Arbeit etc.).
- *Betriebsmittelbedingte Störungen* sind durch Abweichungen von der geplanten Aufgabendurchführung durch unerwartet auftretende Ereignisse (Maschinenausfälle, verzögerte Wartungsarbeiten oder Leistungsminderungen) an Betriebsmitteln gekennzeichnet.
- *Materialbedingte Störungen* treten im Moment des Materialabrufs auf, wenn das erforderliche Material (Roh-, Hilfs- oder Betriebsstoffe) nicht in der benötigten Menge (Fehlteile) und/oder Qualität verfügbar ist.

Diese Analyse der Ursachen und Auswirkungen von Informationsdynamik und Störungen verdeutlicht, dass ein Erreichen der festgelegten Ziele ohne Berücksichtigung der Unsicherheit bei der Planung kaum möglich ist.

2.3 Literaturüberblick

In der Literatur werden zur operativen Produktionsplanung und -steuerung bei kundenindividueller Einzelfertigung unterschiedliche Planungsansätze vorgeschlagen, die grundsätzlich eine hierarchische Struktur aufweisen. In ihrer Veröffentlichung „Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme“ haben Drexl et al. [3] einen allgemeingültigen Ansatz zur Produktionsplanung und -steuerung formuliert, der die Grundlage heutiger PPS-Systeme bildet. Bezüglich der vorliegenden Problemstellung der Einzelfertigung schlagen Drexl et al. die Zusammenfassung der Planungsebenen „Detaillierte Losgrößen- und Ressourceneinsatzplanung“ und „Segmentspezifische Feinplanung“ zur „detaillierten Belegungsplanung von Montageressourcen“ – Ressourcenbelegungsplanung – vor. Dieser Ansatz wird auch in diesem Beitrag herangezogen. Neben diesem konzeptionellen Ansatz existieren weitere, im Wesentlichen auf einer ähnlichen Struktur basierende, Ansätze (vgl. [4], [10] und [14]). Keiner dieser Planungsansätze adressiert jedoch die spezifischen Gegebenheiten der vorliegenden Problemstellung oder berücksichtigt Unsicherheit bei der Planung.

Der Berücksichtigung von Unsicherheit bei der Planung wurde in den letzten Jahren vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt. Grundlagen zur Berücksichtigung von Unsicherheit bei der Planung sind bei [15] und [25], Übersichten zu Methoden robuster Planung sind unter anderem in [1], [2], [7], [11], [16], [17] und [26] zu finden.

Die verschiedenen Methoden und Konzepte für eine robuste Planung lassen sich dabei grundsätzlich in die Kategorien reaktiv und proaktiv unterteilen.

Die reaktiven Methoden zeichnen sich dadurch aus, dass Entscheidungen dynamisch während der Produktionsdurchführung bei Eintritt bestimmter Ereignisse getroffen werden. Innerhalb der reaktiven Methoden kann zwischen Methoden unterschieden werden, die zu keinem Zeitpunkt einen Plan bestimmen (engl. „[full] dynamic scheduling“), und solchen, die a priori einen Basisplan berechnen, der bei Eintritt bestimmter Ereignisse entweder angepasst oder vollständig Neuberechnet wird (engl. „[partial] rescheduling“ oder „predictive-reactive scheduling“) – vgl. [2], [11] und [28]. Insbesondere die notwendige Festlegung der späteren Starttermine zur Realisierung der Kostenreduktion erfordert die Berechnung eines Basisplans (vgl. hierzu auch [1]) und verhindert somit den zielführenden Einsatz reaktiver Methoden ohne Basisplan. Entscheidend für die Anwendung reaktiver Methoden mit Basisplan ist die Häufigkeit von Planrevisionen bzw. deren Auslöser (zeitorientiert, ereignisorientiert, hybrid – vgl. [1] und [28]), da sich häufiges Planen in einer hohen Planungsnervosität und damit negativ auf die Planungsrobustheit niederschlägt ([2]). Diese Vorgehensweise entspricht im Wesentlichen den Prinzipien der rollierenden Planung und findet innerhalb des entwickelten Planungsansatzes im Planungskonzept Anwendung.

Im Gegensatz zu den reaktiven Methoden zielen die proaktiven Methoden darauf ab, Informationsdynamik und Störungen antizipativ durch die Bestimmung eines vorausschauenden Plans (engl. „predelective schedule“) zu berücksichtigen. Zur Bestimmung eines solchen vorausschauenden Plans existieren in der Literatur vielfältige Methoden, die sich grundsätzlich nach der Art und Weise, wie Unsicherheit berücksichtigt wird, unterscheiden: einwertig bzw. indirekt oder mehrwertig bzw. direkt (vgl. [25]). Bei ersteren Methoden wird die Unsicherheit aus dem Modell verbannt, indem unsichere Informationen ersetzt und so bspw. Erwartungswert-, Korrektur- oder Worst-Case-Modelle aufgestellt werden ([25]). Bei letzteren Methoden werden für unsichere Informationen (unter Berücksichtigung von deren Abhängigkeiten) mehrere mögliche Ausprägungen berücksichtigt. Zur Lösung dieser stochastischen Modelle werden Methoden der stochastischen und robusten Optimierung (vgl. [1] und [15]) herangezogen. Eine Analyse letzterer Methoden bzgl. der vorliegenden Problemstellung zeigt, dass bei der Anwendung dieser Methoden mit mehrwertiger bzw. direkter Berücksichtigung der Unsicherheit verschiedene Probleme auftreten. Diese besitzen zum einen sehr hohen Aufwand bei der Modellierung, insbesondere gestaltet sich hier die Bestimmung der Ersatzzielfunktion bzw. der Ersatzrestriktionen als sehr komplex. Zum anderen sind auf Grund der hohen Komplexität dieser Methoden Transparenz und Nachvollziehbarkeit für den Entscheidungsträger als gering einzuschätzen. Als negativ muss in diesem Zusammenhang auch der höhere Planungsaufwand, verursacht durch die erhöhte Komplexität, durch den ggfs. auftretenden Aufwand zur Aufstellung der planungsrelevanten Szenarien oder zur Bestimmung von Eintrittswahrscheinlichkeiten und stochastischen Verteilungen angeführt werden ([25] S. 206 ff.). Auf Grund der vorangegangenen Überlegungen werden für die robuste Ressourcenbelegungsplanung Methoden präferiert, welche Unsicherheit einwertig bzw. indirekt berücksichtigen. In Folge der Untersuchungen von Scholl, nach denen sich Korrekturmodelle den anderen Modellen dieser Kategorie als überlegen erwiesen haben (vgl. [25] Kapitel 6 bzw. 7),

wird als Planungsmethode ein deterministisches Korrekturmodell herangezogen.

Die Analyse der angeführten Veröffentlichungen bzw. der dort angeführten Literatur zeigt auch, dass kein die Problemstellung adressierender, umfassender und robuster Planungsansatz existiert. Daher wird im Folgenden ein Planungsansatz zur robusten Ressourcenbelegungsplanung vorgestellt, der bestehende Konzepte und Methoden problemspezifisch adaptiert bzw. weiterentwickelt, um so Informationsdynamik und Störungen zielführend zu berücksichtigen.

3. Planungsansatz

Zur Bestimmung eines robusten Ressourcenbelegungsplans AP , welcher die erhöhte Unsicherheit explizit bei der Planung berücksichtigt, wird ein Planungsansatz entwickelt, der

- ein Planungskonzept mit rollierenden auftragsorientierten Planungsbereichen,
- eine proaktive Methode mit indirekter Berücksichtigung der Unsicherheit durch operationsbezogene Kapazitätspuffer und
- ein problemspezifisches Lösungsverfahren zur Berechnung des Ressourcenbelegungsplans

vorsieht.

3.1 Planungskonzept

Aufgabe des Planungskonzepts ist zum einen die Einbettung der Ressourcenbelegungsplanung in den gesamten Planungsprozess des Unternehmens. Damit verbunden ist die Integration neuer und veränderter Planungsvorgaben der übergeordneten Produktionsprogramm- und Kapazitätsplanung sowie der Kundenauftragsplanung in die Planung. Zum anderen wird der problemspezifische Ablauf zur Durchführung der Planung festgelegt. Grundlegende Planungskonzepte (vgl. [25]) wie zum Beispiel „hierarchische Planung“, „rollierende Planung“ oder „Flexibilitätsplanung“ können zwar grundsätzlich zur Verminderung der Auswirkungen der Informationsdynamik auf die dargestellte Problemstellung angewendet werden, müssen jedoch problemspezifisch erweitert und adaptiert werden.

Auf Grundlage des Prinzips der rollierenden Planung wird der Ressourcenbelegungsplan in zwei *Planungsbereiche* AREA-F und AREA-O unterteilt (vgl. Abbildung 1), die sich hinsichtlich der zugeordneten Montageaufträge und der Planungsparameter Planabstand und Planreichweite unterscheiden.

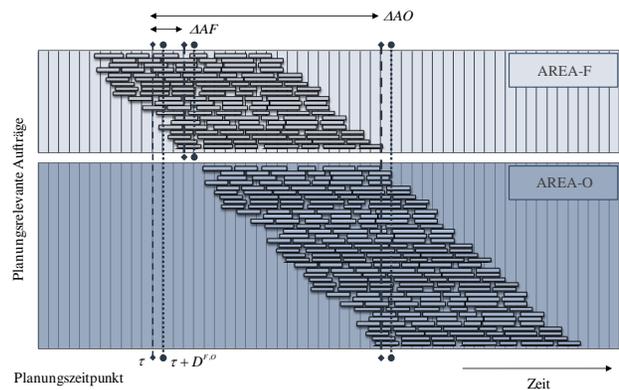


Abbildung 1: Auftragsorientierte Planungsbereiche

Die Planreichweite definiert sich dabei grundsätzlich auf Basis der zugeordneten Aufträge bzw. deren Fertigstellungstermine. Anzumerken ist, dass nicht nur einzelne Teile der Aufträge (Operationen) zugeordnet werden, sondern jeweils der gesamte Auftrag, da nur so die Interdependenzen zwischen den Operationen eines Auftrags bzw. zwischen allen planungsrelevanten Operationen einer Station berücksichtigt werden können. Der erste, so genannte „fixierte Bereich“ (engl. „frozen area“ – AREA-F), beinhaltet dabei zum Planungszeitpunkt τ diejenigen Aufträge, deren frühester Starttermin in der Vergangenheit liegt ($esd_{j,i} \leq \tau$) und diejenigen, deren frühester Starttermin der ersten Operation ($esd_{j,i}$) innerhalb eines durch τ und den Parameter ΔAF definierten Intervalls liegt ($esd_{j,i} \leq \tau + \Delta AF$). Der Parameter ΔAF definiert dabei eine bestimmte Anzahl an Tagen, die die minimale Vorlaufzeit (ΔFOR) für die Materialbereitstellung bzw. Arbeitsvorbereitung der jeweils ersten Operationen eines Auftrages gewährleisten muss. Der zweite, so genannte „offene Bereich“ (engl. „open area“ – AREA-O), beinhaltet alle Aufträge, deren frühester Starttermin außerhalb des durch ΔAF definierten Intervalls liegt ($esd_{j,i} > \tau + \Delta AF$). In diesen Bereich könnten prinzipiell alle Aufträge aufgenommen werden, über die Daten vorliegen. Da die Unsicherheit mit zunehmender Reichweite der Planung steigt, wird ein weiteres Intervall durch den Parameter ΔAO definiert, welcher diesen Bereich einschränkt.

Durch die Aufteilung der planungsrelevanten Aufträge in zwei Bereiche mit unterschiedlichen Planabständen ist es möglich, neue Informationen, die AREA-O betreffen, mit einem kurzen (zeitorientierten) Planabstand D^O in die Planung aufzunehmen, ohne die Planungsrobustheit von AREA-F negativ zu beeinflussen. Änderungen, die Aufträge bzw. Operationen aus AREA-F betreffen, sind grundsätzlich seltener und können durch einen ereignisorientierten Planabstand in die Planung aufgenommen werden. Um die Planungsnervosität so gering wie möglich zu halten und dennoch die neuen Informationen zu berücksichtigen, wird ein gemeinsamer Planabstand $D^{F,O} = \Delta FOR/2$ und die Abgrenzung der Planungsbereiche durch $\Delta AF = (\Delta FOR/2) * 3$ festgelegt.

Die (Neu-) Zuordnung der Aufträge zu den Bereichen wird ebenfalls im Abstand von $D^{F,O}$ vorgenommen. Dieser als Bereichsübergang (engl. „area transition“) bezeichnete Vorgang stellt eine zentrale Komponente des Konzepts der rollierenden auftragsorientierten Planungsbereiche dar. Bei der Neuordnung von Aufträgen zu AREA-F werden die aktuell berechneten Starttermine der Operationen fixiert und damit neue Materialbereitstellungstermine festgelegt, die an interne und externe Zulieferer weitergegeben werden können.

3.2 Planungsmethode

In Folge der in Abschnitt 2.3 angestellten Analyse wird als Planungsmethode eine *proaktive Methode mit indirekter Berücksichtigung der Unsicherheit durch operationsbezogene Kapazitätspuffer* herangezogen. Diese auch als Redundanzstrategie (engl. „redundancy-based techniques“ – vgl. [24] bzw. [2] und [11]) bezeichnete Methode sieht Sicherheitszuschläge definiert über Korrekturfaktoren ([25]) auf die Ressourcennachfrage, die Arbeitspakete der Operationen, in Form von operationsbezogenen *Kapazitätspuffern* $cb_{j,s}$ (engl. „capacity buffer“ – [7]) vor. Durch

diese Kapazitätspuffer sollen sowohl (durch die Informationsdynamik und Störungen verursachten) zusätzliche als auch verzögerte Ressourcenbedarfe antizipiert und neutralisiert werden, indem die Kapazitätspuffer äquivalent den Arbeitspaketen bei der Berechnung des Ressourcenbelegungsplans berücksichtigt werden und entsprechende Montageressourcen reservieren. Ähnliche Ansätze werden in [5], [6], [16], [18] und [19] vorgeschlagen.

Die Kapazitätspuffer können insbesondere auch zur Kompensation von Änderungen des Arbeitspakets (Informationsdynamik) von Operationen (bspw. resultierend aus Änderungen der Produktspezifikation durch den Kunden) aus AREA-F herangezogen werden, so dass Neuplanungen dieses Planungsbereichs verhindert und so die Planungsrobustheit erhöht werden kann. Im Fall einer Reduzierung des Arbeitspakets wird die entsprechende Anzahl an Stunden auf den Kapazitätspuffer aufgeschlagen. Im Falle einer Erhöhung des Arbeitspakets einer Operation könnte dieses grundsätzlich entsprechend der Größe des Kapazitätspuffers der Operation kompensiert werden und somit erst bei Überschreitung des Kapazitätspuffers eine Neuplanung notwendig werden. Bei dieser Vorgehensweise würden jedoch kleinste weitere Änderungen oder Störungen zu Neuplanungen bzw. Überschreitungen von Fertigstellungsterminen führen. Aus diesem Grund wird für die Verrechnung des zusätzlichen Kapazitätsbedarfs ein Grenzwert th_s^{cb} (engl. „threshold“) definiert, so dass der Kapazitätspuffer nur bis zu einem bestimmten Wert verringert werden kann. Grundsätzlich ist die Verrechnung nur für Aufträge zulässig, die AREA-F zugeordnet sind.

Die zentrale Schwierigkeit dieser Planungsmethode stellt die konkrete Dimensionierung der Kapazitätspuffer dar. Ziel ist es einerseits, die Puffer so zu dimensionieren, dass möglichst wenige Neuplanungen von AREA-F notwendig sind, Störungen und Informationsdynamik also möglichst vollständig kompensiert werden, und so die geforderte Ergebnis-, Planungs- sowie Zulässigkeitsrobustheit erreicht wird. In besonderem Maße gilt es hier, den Fertigstellungstermin vor Überschreitungen zu schützen. Andererseits ist das Ziel der möglichst späten Starttermine bei großen Kapazitätspuffern nur bedingt zu erreichen, wodurch die Ergebnisrobustheit negativ beeinflusst wird. Das Ziel der Bestandsreduzierung bzw. der Reduzierung der Kapitalbindungskosten würde dann nicht erreicht werden. Als zusätzlich erfolgsmindernd sind die Kosten für die Bereitstellung der Reservekapazitäten zu berücksichtigen, die auch anfallen, wenn diese nicht benötigt werden. Bei der konkreten Festlegung der Kapazitätspuffer gilt es zudem zu berücksichtigen, dass die Unsicherheit mit zunehmender zeitlicher Entfernung zum Planungszeitpunkt ansteigt.

In Anlehnung an klassische Sensitivitätsanalysen („what-if“-Analysen) können zur Dimensionierung der Kapazitätspuffer mehrere *Planungsszenarien* mit jeweils unterschiedlichen *Pufferkonfigurationen* erstellt und die Robustheit des resultierenden Ressourcenbelegungsplans durch eine postoptimale *Simulationsanalyse* bewertet werden (zu Sensitivitätsanalysen vgl. [8]). Auch alle anderen Planungsparameter (z.B. th_s^{cb} oder ΔAO) können variiert und so optimiert werden. Durch diese Ex-Ante-Evaluation können verschiedene Fragen bezüglich der Robustheit eines Ressourcenbelegungsplans beantwortet werden:

- Wie robust ist eine Lösung gegenüber bestimmten Umweltentwicklungen?

- Welche Pufferkonfiguration ist „optimal“ bezüglich des Trade-Offs zwischen Zulässigkeits- und Planungsrobustheit sowie der Ergebnisrobustheit?

Die endgültige Beurteilung der Robustheit eines Planungsszenarios bzw. einer Pufferkonfiguration und die Auswahl des zu realisierenden Ressourcenbelegungsplans werden dem Entscheidungsträger überlassen, der anhand von Kennzahlen aus der Simulationsanalyse und seiner persönlichen Risikoeinstellung über den „optimalen“ Plan entscheidet.

Die Besonderheit bei der Simulation der Planungsszenarien besteht darin, dass nicht nur die Montagedurchführung mit ihren Störungen simuliert wird, sondern der gesamte Planungsprozess, wie er im vorab beschriebenen Planungskonzept festgelegt wurde. Es wird also gemäß den definierten Planungsparametern zu jedem Planungszeitpunkt ein vollständiger Planungsschritt mit Bereichsübergang, simulierter Informationsdynamik und entsprechenden Neuberechnungen des Ressourcenbelegungsplans durchgeführt. Durch diese vollständige Abbildung aller Ursachen der Unsicherheit können die verschiedenen Planungsszenarien hinsichtlich der drei Robustheitskriterien (Ergebnis-, Zulässigkeits- und Planungsrobustheit) anhand folgender Kennzahlen bewertet werden.

Tabelle 1: Kennzahl der Ergebnisrobustheit

Ø-Differenz zur Plandurchlaufzeit	$aveDiffFLT^{PLAN}(AP)$
-----------------------------------	-------------------------

Tabelle 2: Kennzahlen der Zulässigkeitsrobustheit

Anzahl verspäteter Aufträge	$LATE(SiSC)$
Anzahl zu früher Starttermine	$EARL(AP)$
Anzahl Überauslastungen	$OVER(AP)$

Tabelle 3: Kennzahlen der Planungsrobustheit

Ø-Anzahl Neuplanungen von AREA-F	$RES^{AREA-F}(SiSC)$
Anzahl kompensierbarer Ressourcenbedarfsänderungen	$COMP(SiSC)$

Die Simulationsanalyse basiert auf drei grundlegenden *Simulationsszenarien* (*SiSC*): Average-Case (AC), Worst-Case (WC) und Best-Case (BC). Zur Bewertung der Robustheit bzw. zur Berechnung der Kennzahlen werden die jeweiligen Durchschnittswerte aller Simulationsläufe eines Simulationsszenarios herangezogen.

3.3 Lösungsverfahren

Die vorgestellte, proaktive Planungsmethode berücksichtigt Unsicherheit indirekt durch operationsbezogene Kapazitätspuffer und definiert in Folge dessen ein deterministisches Korrekturmodell als Entscheidungsmodell der Ressourcenbelegungsplanung. Zu lösen ist damit das bereits beschriebene Hybrid-Flow-Shop-Problem (HFS-Problem) mit variablen Bearbeitungsintensitäten und unterbrechbaren Operationen.

Zur Lösung des HFS-Problems mit und ohne unterbrechbare Operationen wurden in der Literatur zahlreiche Ansätze entwickelt, wobei auf Grund der NP-Schwere ([12]) des Problems nur kleine Probleminstanzen mit exakten Verfahren lösbar sind. Ein

umfangreicher und aktueller Überblick zu HFS-Problemen ist in [21] zu finden. Bezüglich HFS-Problemen wurden bisher jedoch keine variablen Bearbeitungsintensitäten betrachtet. Derartige Problemstellungen wurden bisher nur im Bereich der Projektplanung gelöst. Die in diesem Bereich entwickelten Lösungsverfahren ([9], [13] und [27]) sind jedoch nur für kleine, wenig praxisnahe Probleminstanzen (max. 60 Operationen) geeignet. Da die Berechnung eines Ressourcenbelegungsplans auch während der Simulation (bei jedem Planungsschritt) notwendig ist, muss hier ein möglichst effizientes Lösungsverfahren eingesetzt werden, welches auch bei größeren Probleminstanzen nur geringe Rechenzeit benötigt. Im Hinblick auf den praktischen Einsatz muss das Verfahren zudem in der Lage sein, unter allen Umständen einen Ressourcenbelegungsplan berechnen zu können, d.h. auch bei „schwierigen“ Planungsvorgaben (z.B. bei knappem Ressourcenangebot).

Grundsätzlich sind bei der Berechnung eines Ressourcenbelegungsplans zwei Entscheidungen zu treffen: in welcher Schicht soll eine Operation bearbeitet werden und mit welcher Intensität. Da die Entscheidung über die Intensität die Problemkomplexität extrem erhöht, wird diese Entscheidung vorweggenommen. Hierzu wird die Annahme getroffen, dass minimale Durchlaufzeiten (und damit späte Starttermine) immer dann erzielt werden können, wenn mit möglichst hoher Intensität an wenigen Aufträgen gearbeitet wird. Basierend auf dieser Annahme wird grundsätzlich versucht, eine Operation mit möglichst hoher Intensität einzuplanen. Zur Berechnung dieser Intensität $alloc_{j,s,t}^{MAX}$ (einzuplanende Stunden des Arbeitspakets) wird folgende Berechnungsformel, basierend auf der Anzahl in einer Schicht zur Verfügung stehenden Mitarbeiter ($w_{s,t}^{total}$) und der maximalen Anzahl an Mitarbeitern (w_s^{MAX}), die gleichzeitig einen Auftrag bearbeiten können, herangezogen:

$$alloc_{j,s,t}^{MAX} = \frac{w_{s,t}^{total}}{\left\lfloor \frac{w_{s,t}^{total}}{w_s^{MAX}} \right\rfloor} \quad (3.1)$$

Zur Bestimmung der Schichten, in denen eine Operation bearbeitet werden soll, wird ein problemspezifisches Verfahren eingesetzt, welches ausgehend vom Fertigstellungstermin rückwärts die Arbeitspakete der Operationen mit der vorab festgelegten Intensität auf Basis einer Einlastregel einplant. Dieser („Iterative Backward Resource Allocation and Dispatching“) genannte Algorithmus basiert grundsätzlich auf dem Prinzip „Teile und Herrsche“ und belegt sequentiell die Ressourcen der Montagestationen von der letzten zur ersten Station ($s^{active} = S$, $s^{active} = S - 1$, $s^{active} = S - 2$, ..., $s^{active} = 1$), wobei s^{active} die aktuell zu planende, aktive Montagestation darstellt. Durch den Beginn der Ressourcenbelegung auf der letzten Montagestation ausgehend vom Fertigstellungstermin eines Auftrags kann dessen Einhaltung gewährleistet werden. Zur Belegung des Ressourcenangebots $r_{s,t}$ der Montageressourcen in einer Schicht t auf der aktiven Station s^{active} durch einen bestimmten Teil des Ressourcenbedarfs, bestehend aus Arbeitspaket und Kapazitätspuffer ($wp_{j,s}^{cb} = wp_{j,s} + cb_{j,s}$) einer Operation, wird sequentiell von „rechts“ nach „links“ (bezogen auf einen Zeitstrahl) vorgegangen. Demzufolge wird als erstes die Schicht betrachtet, die unmittelbar vor der maximalen „rechten“ Grenze des Einlastzeitfensters aller Operationen der

aktiven Station liegt, dann iterativ die vorhergehenden Schichten. Das Einlastzeitfenster jeder Operation wird dabei durch eine „linke“ und „rechte“ Grenze festgelegt. Die linke Grenze $lB_{j,s}$ errechnet sich auf Basis des frühesten Starttermins $esd_{j,s}$, der linken Grenze der vorhergehenden Operation $lB_{j,s-1}$ und deren minimaler Durchlaufzeit $fl_{j,s-1}^{MIN}$ bzw. dem aktuellen Planungszeitpunkt τ :

$$lB_{j,s} = \begin{cases} \max\{esd_{j,1}, \tau\}, & \text{wenn } s=1 \\ \max\{lB_{j,s-1} + fl_{j,s-1}^{MIN}, esd_{j,s}, \tau\}, & \text{wenn } s > 1 \end{cases} \quad (3.2)$$

Die rechte Grenze $rB_{j,s}$ entspricht entweder dem Fertigstellungstermin dl_j , dem geplanten Starttermin der nachfolgenden Operation $st_{j,s+1}^{AP}$ oder errechnet sich aus der rechten Grenze der nachfolgenden Operation $rB_{j,s+1}$ und der minimalen Durchlaufzeit dieser Operation $fl_{j,s+1}^{MIN}$.

$$rB_{j,s} = \begin{cases} dl_j, & \text{wenn } s = S \\ \min\{st_{j,s+1}^{AP}, rB_{j,s+1} - fl_{j,s+1}^{MIN}\}, & \text{wenn } s < S \end{cases} \quad (3.3)$$

Damit errechnet sich die erste zu betrachtende Schicht – die jeweils zu betrachtende Schicht wird als aktive Schicht (t^{active}) bezeichnet – aus den rechten Grenzen der aktiven Montagestation ($t^{active} = \max\{rB_{j,s} | s=s^{active}\}, \forall j$). Nach der Bestimmung der aktiven Schicht müssen diejenigen Operationen bestimmt werden, die in dieser Schicht potentiell einzuplanen sind, die Menge der so genannten aktiven Operationen $O_{s,t}^{active}$. Zu den aktiven Operationen gehören diejenigen, deren Einlastzeitfenster die aktive Schicht beinhaltet ($lB_{j,s} \leq t^{active} \leq rB_{j,s}$). Nach Bestimmung der aktiven Operationen werden diese gemäß einer Prioritätsregel eingelastet. Oberste Priorität haben dabei Operationen, die auf Grund ihres Einlastzeitfensters eingeplant werden müssen, um die linke Grenze nicht zu überschreiten (Einlastverpflichtung). Diese werden eingeplant, auch wenn das zur Verfügung stehende Ressourcenangebot überschritten wird. Alle anderen aktiven Operationen werden gemäß dem Verhältnis des „slacks“ zum aktuellen Ressourcenbedarf ($wp_{j,s}^{cb}$ abzüglich des abgearbeiteten Anteils $rt_{j,s}$) aufsteigend geordnet und damit priorisiert. Dieser errechnet sich dabei aus der Differenz zwischen der aktiven Schicht und der linken Grenze der Operation: $slack_{j,s} = t^{active} - lB_{j,s}$.

$$priority_{j,s} = \frac{slack_{j,s}}{wp_{j,s}^{cb} - rt_{j,s}} \quad (3.4)$$

Vorteil dieses relativ einfachen und dennoch ausreichend guten Verfahrens ist insbesondere seine Effizienz, die es erlaubt, auch große Probleminstanzen (80 Aufträge mit je zehn Operationen) in kurzer Zeit (ca. fünf Sekunden) zu lösen.

3.4 Hierarchische Integration

Die hierarchische Integration und die Koordination der verschiedenen Planungselemente des Planungsansatzes ist in Abbildung 2 zusammenfassend dargestellt (vgl. hierzu [24] S. 76 ff.).

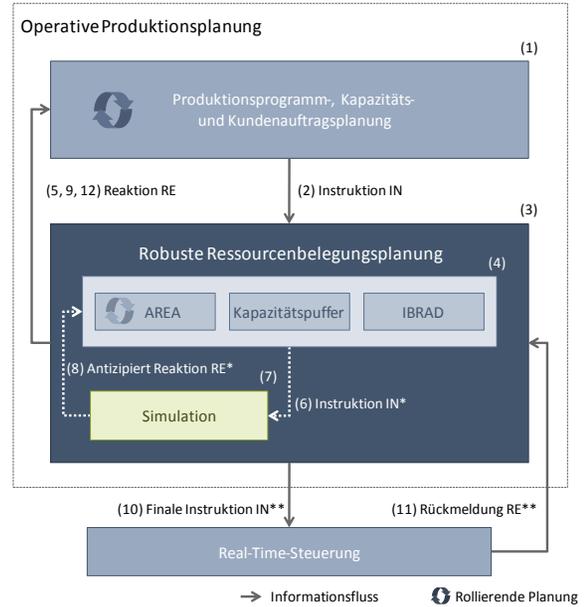


Abbildung 2: Hierarchische Integration des Planungsansatzes

Die operative Produktionsplanung für die Montage von Spezialmaschinen erfolgt auf der mittelfristigen Ebene durch die Produktionsprogramm-, Kapazitäts- und Kundenauftragsplanung. Diese übergeordneten Planungsaufgaben (1) definieren die Planungsvorgaben, die Instruktionen IN (2) für die Ressourcenbelegungsplanung (3). Neue Instruktionen werden gemäß den Planungsbereichen (AREA-F und AREA-O) ereignis- bzw. zeitorientiert bei der Planung berücksichtigt. Die durch Kapazitätspuffer ergänzten Arbeitspakete werden unter Berücksichtigung der Planungsbereiche durch den IBRAD-Algorithmus den Montageressourcen zugeordnet (4). Dieser Ressourcenbelegungsplan wird dann zunächst als Instruktion IN* (6) an die Simulation (7) übergeben, welche als antizipierte Reaktion RE* (8) die Ergebnisse der Simulationsanalyse für den Worst-, Average- und Best-Case zurückmeldet. Als finale Instruktion IN** (10) wird der Montagesteuerung (Real-Time-Steuerung) ein Ressourcenbelegungsplan zu dessen Durchführung freigegeben. Die Rückmeldungen RE** (11) aus der Montage (bspw. der Arbeitsfortschritt) werden in zukünftigen Planungsschritten berücksichtigt. Reaktionen RE (5, 9, 12) der Ressourcenbelegungsplanung auf die Instruktionen IN können nach der Berechnung des Plans, nach dessen Simulation oder auf Grund von Rückmeldungen der Montagesteuerung erfolgen. Von besonderem Interesse sind hier Informationen über die Über- und Unterschreitungen der Montagezeitfenster, da durch deren Anpassung seitens der Produktionsprogrammplanung die Durchlaufzeit bzw. die Kapitalbindungskosten maßgeblich beeinflusst werden können.

4. Aspekte der Implementierung

Die Anwendung des entwickelten Planungsansatzes in der betrieblichen Praxis setzt seine informationstechnische Umsetzung, in diesem Fall als Decision-Support-System, voraus. Die Software „RoRAP“ („Robust Resource Allocation Planning“) ist deswegen als Entscheidungsunterstützungssystem konzipiert, damit der Entscheidungsträger wesentlichen Einfluss auf die Planung nehmen kann und dazu auch die notwendigen Informationen (Planungsdaten und -ergebnisse) und Instrumente (bspw. zur effizienten Datenänderung) bereitgestellt werden müssen. Im Allgemei-

nen werden Systeme zur Entscheidungsunterstützung auf höheren Planungsebenen (strategische oder taktische Ebene) eingesetzt, wohingegen hier ein DSS für operative Entscheidungen entwickelt wurde. Grundsätzliche Aufgabe und Anforderung an diese Art von Software-Systemen ist es ([20], [22]),

- den (gesamten) Entscheidungsprozess zu unterstützen,
- den Entscheidungsträger bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen und die Entscheidung nicht automatisiert zu treffen sowie
- die Fähigkeit, schnell auf neue Situationen und Bedürfnisse des Entscheidungsträgers reagieren zu können.

Weitere, allgemeine Anforderungen an das System sind eine hohe Benutzerfreundlichkeit und eine übersichtliche Darstellung aller planungsrelevanten Informationen (bspw. des Ressourcenbelegungsplans als Gantt-Diagramm mit Zusatzinformationen zu den Operationen oder die Visualisierung der Ressourcenauslastung).

Die Software ist in Java® von Sun Microsystems programmiert, modular (komponentenorientiert) aufgebaut und basiert auf einer 3-Schichten-Architektur, die in Verbindung mit den verschiedenen Schnittstellen (zur Datenintegration und Anbindung der Simulationssoftware) einen flexiblen Einsatz in verschiedenen Unternehmen ermöglicht (vgl. Abbildung 3). Das Design ermöglicht zudem eine einfache Skalier- und Wartbarkeit der Software durch einen Austausch einzelner Komponenten innerhalb einer Schicht oder kompletter Schichten.

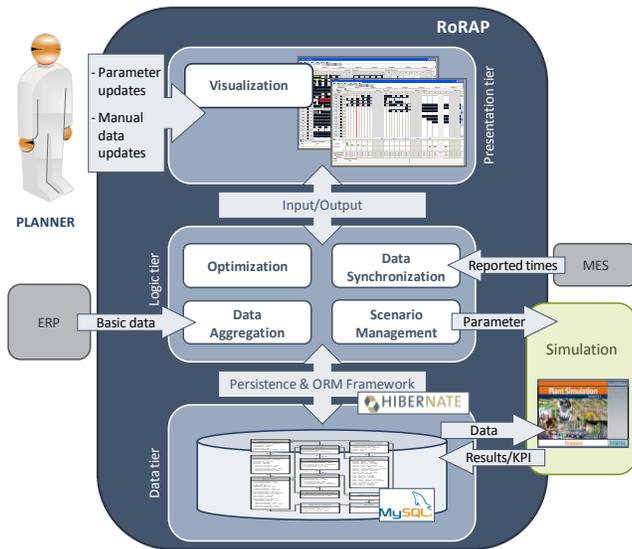


Abbildung 3 RoRAP – Software-Architektur und Schnittstellen

Die Präsentationsschicht (engl. „presentation tier“), welche für die Präsentation des Ressourcenbelegungsplans und aller anderen planungsrelevanten Informationen sowie die Entgegennahme der Benutzereingaben verantwortlich ist, wird durch die Komponente „Visualization“ repräsentiert und stellt die Schnittstelle zwischen Entscheidungsträger (Planer) und System dar.

Die (Business-) Logikschicht (engl. „logic tier“) steuert sämtliche Funktionen der Software und ist mit der Präsentationsschicht durch eine entsprechende Input-/Output-Schnittstelle gekoppelt. Die Komponenten „Optimization“ (Berechnung des Ressourcenbelegungsplans), „Data Synchronization“ (Abgleich von Pla-

nungsszenarien zur Identifikation von Informationsänderungen), „Scenario Management“ (Verwaltung der Planungs- und Simulationsszenarien) und „Data Aggregation“ (Import und Aufbereitung der ERP-Daten, wie z.B. Materialverfügbarkeits- und Fertigstellungstermine, Ressourcenbedarf und -angebot) sowie die Schnittstellen zur Simulationssoftware bzw. zu den ERP- und MES-Systemen des Unternehmens bilden den Kern des Systems. Zur Simulation ist die Software „Tecnomatix Plant Simulation™“ aus dem Software-Portfolio für Product Lifecycle Management Software der Siemens Industry Software GmbH & Co. KG angebunden. Durch den Einsatz von Standardsoftware können hier der Aufwand und die Kosten für die Simulation reduziert werden.

Die Datenhaltungsschicht (engl. „data tier“) ist für eine konsistente und persistente Speicherung der planungsrelevanten Daten verantwortlich. Zur persistenten Speicherung wird für die objektrelationale Abbildung der Objekte in eine relationale Datenbank die Open-Source-Software Hibernate® als Persistenz- und ORM-Framework eingesetzt. Zur Speicherung der Daten wird auf MySQL®-Datenbanken zurückgegriffen, die sich durch eine einfache Anwendbarkeit, hohe Betriebssicherheit, gute Performance und geringe Kosten auszeichnen.

5. Ergebnisse

Die Evaluation des Planungsansatzes erfolgt anhand der Daten einer Montagelinie eines Unternehmens der Luftfahrtindustrie. Das Unternehmen produziert durchschnittlich 82 Maschinen pro Jahr, wobei sich diese je nach Einsatz- und Aufgabengebiet in der Ausstattung bezüglich Kommunikations-, Navigations-, Radar- und Missionssystemen signifikant unterscheiden. Auf neun Montagestationen werden je nach Kundenspezifikation unterschiedlich große Arbeitspakete abgearbeitet. Die durchschnittliche Plandurchlaufzeit beträgt dabei 104,79 Tage. Aus der minimalen Vorlaufzeit von zehn Werktagen ($\Delta FOR = 10$) leiten sich die Planungsparameter $D^{F,O} = 5$ und $\Delta AF = 15$ Werktage ab.

Grundlage der Evaluation bilden die Auftragsdaten von 140 Aufträgen und das während des Montagezeitraums dieser Aufträge zur Verfügung stehende Ressourcenangebot. Weiterhin stehen die notwendigen Informationen zur Abbildung der Informationsdynamik und Störungen durch die Simulationsszenarien Average-, Worst- und Best-Case zur Verfügung. Untersuchungen zur Festlegung der Planreichweite haben für die Parameter $\Delta AO = 120$ Werktage und $th_s^{cb} = 75\%$ die besten Ergebnisse ergeben. Die Evaluation des Planungsansatzes erfolgt ausgehend von einem zufällig ausgewählten Planungszeitpunkt und dem entsprechenden Planungsszenario. Ausgehend von diesem ersten Planungszeitpunkt werden dann mit Hilfe des Simulationsmodells die nächsten 24 Planungsschritte simuliert und ausgewertet. Vorweggenommene Auswertungen haben gezeigt, dass zehn Simulationsläufe zur Generierung valider Ergebnisse ausreichen. Untersucht werden sechs unterschiedliche Pufferkonfigurationen (PK-0, PK-5, PK-AUF-1, PK-10, PK-AUF-2 und PK-15), welche die jeweiligen prozentualen Sicherheitszuschläge auf den Ressourcenbedarf (Arbeitspakete) der Aufträge je Montagestation (ST-1, ..., ST-9) definieren (vgl. Tabelle 4). Die aufsteigenden Puffer tragen der ansteigenden Unsicherheit bei größerer zeitlicher Entfernung vom Planungszeitpunkt Rechnung.

Tabelle 4: Untersuchte Pufferkonfigurationen

	PK-0	PK-5	PK-AUF-1	PK-10	PK-AUF-2	PK-15
ST-1	0 %	5 %	5 %	10 %	7 %	15 %

ST-2	0 %	5 %	5 %	10 %	8 %	15 %
ST-3	0 %	5 %	6 %	10 %	9 %	15 %
ST-4	0 %	5 %	6 %	10 %	10 %	15 %
ST-5	0 %	5 %	7 %	10 %	11 %	15 %
ST-6	0 %	5 %	7 %	10 %	12 %	15 %
ST-7	0 %	5 %	8 %	10 %	13 %	15 %
ST-8	0 %	5 %	8 %	10 %	14 %	15 %
ST-9	0 %	5 %	10 %	10 %	15 %	15 %

Zur Beurteilung des Planungsansatzes werden die verschiedenen Pufferkonfigurationen anhand der Kennzahlen zur Beurteilung der Ergebnisrobustheit (vgl. Tabelle 1), der Zulässigkeitsrobustheit (vgl. Tabelle 2) und der Planungsrobustheit (vgl. Tabelle 3) gegenübergestellt. Die Pufferkonfiguration PK-0 soll Aufschluss darüber geben, wie sich die durch das Lösungsverfahren errechneten, späteren Starttermine auf die Termintreue auswirken, falls keine Kapazitätspuffer eingesetzt werden.

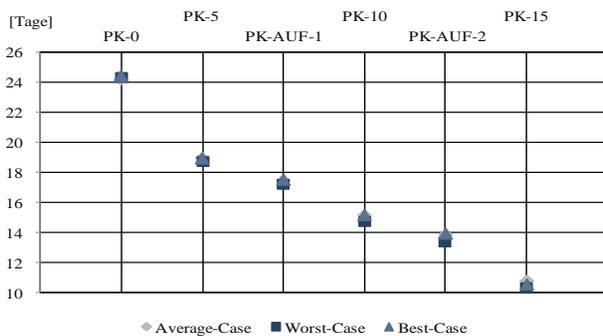


Abbildung 4: Durchlaufzeitreduktion im Vergleich zur Plandurchlaufzeit (Ergebnisrobustheit)

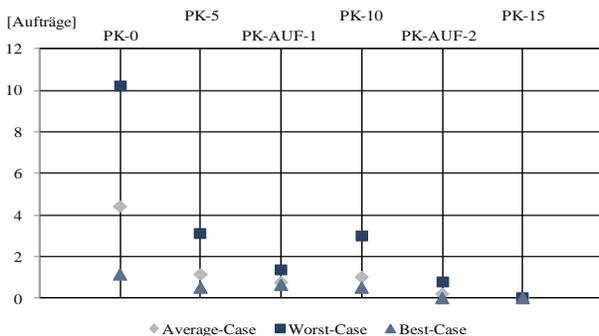


Abbildung 5: Verspätete Aufträge – Termintreue (Zulässigkeitsrobustheit)

Die Ergebnisse bezüglich der Zulässigkeits- bzw. Ergebnisrobustheit zeigen, dass die Pufferkonfiguration PK-15 zwar eine absolute Termintreue, jedoch auf Grund der Festlegung der Kapazitätspuffer nur eine Reduzierung der Durchlaufzeit (im Vergleich zur Plandurchlaufzeit) von durchschnittlich 10,54 Tagen bzw. 10,06 % erreicht. Pufferkonfiguration PK-AUF-2 erzielt bei vergleichbarer Termintreue jedoch eine Reduzierung der Durchlaufzeit um 13,71 Tage bzw. 13,09 %. Die höchste Reduzierung der Durchlaufzeit wird erwartungsgemäß von der Konfiguration PK-0 erreicht (24,32 Tage bzw. 23,21 %), welche aber auch die mit Abstand schlechteste Termintreue aufweist. Eine Reduzierung der Durchlaufzeit ohne die Berücksichtigung der Unsicherheit durch Kapazitätspuffer ist demnach nicht zielführend. Die Ergebnisro-

bustheit zeigt sich in den geringen Unterschieden zwischen den Szenarien. Die Anzahl der Überauslastungen (weniger als 0,32 %) bzw. der zu frühen Starttermine (0,44 %) sind so gering, dass hier keine detaillierte Darstellung erfolgt, da auch deren Einfluss auf die Zulässigkeitsrobustheit damit vernachlässigbar ist.

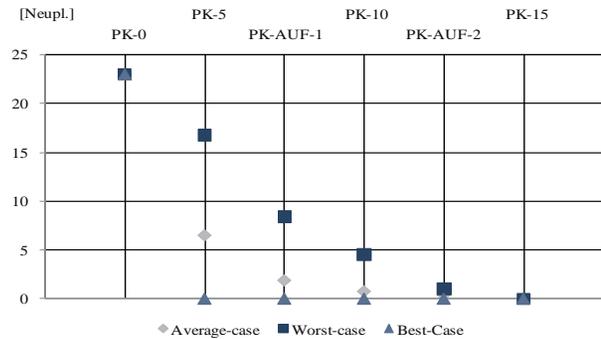


Abbildung 6: Anzahl der Neuplanungen von AREA-F (Planungsrobustheit)

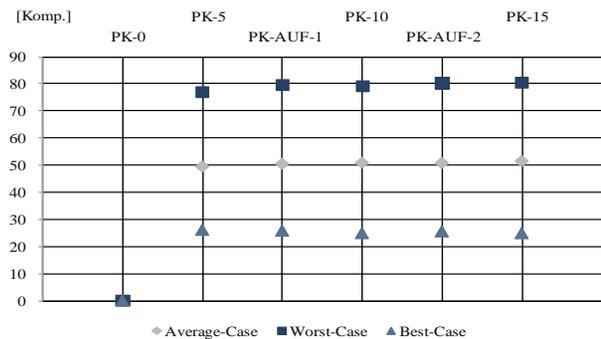


Abbildung 7: Erfolgreiche Kompensationen (Planungsrobustheit)

Die Ergebnisse zur Planungsrobustheit zeigen, dass bei einer Planung ohne Kapazitätspuffer die Informationsdynamik dazu führt, dass bei jedem Planungsschritt beide Planungsbereiche neu geplant werden müssen. Die notwendige Planungsrobustheit kann demnach nur durch die Kompensation der Änderungen durch die Kapazitätspuffer erreicht werden. Nur die Pufferkonfiguration PK-15 besitzt hierbei ein ausreichendes Volumen, um sämtliche Informationsänderungen in allen Szenarien zu kompensieren. Auch die Konfiguration PK-AUF-2 weist im Vergleich zu den anderen Pufferkonfigurationen eine hohe Planungsrobustheit auf.

Im Vergleich der Pufferkonfigurationen haben sich PK-AUF-2 und PK-15 bezüglich der Ergebnis- und Planungsrobustheit als dominant erwiesen. Die Ergebnisse dieser Pufferkonfigurationen zeigen jedoch auch, dass die endgültige Entscheidung über die Wahl einer geeigneten Pufferkonfiguration dem Entscheidungsträger übertragen werden muss, da nur dieser gemäß seiner Risikoeinstellung zwischen diesen Konfigurationen entscheiden kann. Beispielsweise erreicht die Konfiguration PK-AUF-2 zwar eine geringere Planungsrobustheit und beinhaltet auch ein gewisses Risiko für verspätete Aufträge im Vergleich zu PK-15, erzielt jedoch auch eine um 3,03 % kürzere Durchlaufzeit und erreicht damit eine größere Reduzierung der Kapitalbindungskosten.

6. Zusammenfassung

Gegenstand dieses Beitrags ist die Konzeption eines Planungsansatzes zur robusten Ressourcenbelegungsplanung im Spezialmaschinenbau und dessen Umsetzung als DSS. Zur Erreichung der

Ziele Kundenzufriedenheit und Kostenreduktion muss bei der operativen Produktionsplanung die aus den spezifischen Eigenschaften von Spezialmaschinen resultierende erhöhte Unsicherheit explizit berücksichtigt werden. Zur Berücksichtigung von Informationsdynamik und Störungen müssen robuste Pläne erstellt werden, die für möglichst viele Umweltentwicklungen eine ausreichende Ergebnis-, Zulässigkeits- und Planungsrobustheit aufweisen. Hierzu wird ein Planungsansatz bestehend aus dem Konzept der auftragsorientierten Planungsbereiche, einer proaktiven Planungsmethode mit indirekter Berücksichtigung der Unsicherheit durch operationsbezogene Kapazitätspuffer und einem problemspezifischen Lösungsverfahren eingesetzt. Die Umsetzung des Planungsansatzes als DSS basiert auf einer flexiblen, komponentenorientierten Architektur und stellt dem Entscheidungsträger die notwendigen Informationen und Werkzeuge zur situativen Entscheidungsfindung zur Verfügung.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer geeigneten Dimensionierung der Kapazitätspuffer das Anforderungsprofil der robusten Ressourcenbelegungsplanung im Spezialmaschinenbau erfüllt werden kann. Durch eine Wahl der Puffer gemäß seiner Risikoeinstellung hat der Entscheidungsträger die Möglichkeit, zwischen einer höheren Reduzierung der Kapitalbindungskosten (durch PK-AUF-2) und einer höheren Sicherheit für eine terminergerechte Fertigstellung (durch PK-15) zu entscheiden. Auch der Einsatz des DSS im Unternehmen bestätigt diese Ergebnisse.

Weiteres Potential und damit Gegenstand weiterer Forschungen ist in der Auswahl anderer robuster Planungsmethoden (bspw. Chance-Constrained-Kompensations-Modelle – analog zu [25] Kapitel 6 und 7) und/oder ausgereifterer Lösungsverfahren zu sehen. Dabei gilt es jedoch die Komplexität des Planungsproblems und die betriebliche Anwendbarkeit der Methoden und Verfahren zu berücksichtigen.

7. Literatur

- [1] Aytug, H., Lawley, M. A., McKay, K. N., Mohan, S., and Uzsoy, R. M. 2005. Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions. *European Journal of Operational Research* 161, 1, 86–110.
- [2] Davenport, A. J. and Beck, C. J. 2000. *A Survey of Techniques for Scheduling with Uncertainty*. Unveröffentlichtes Manuskript. <http://tidel.mie.utoronto.ca/pubs/uncertainty-survey.ps.zip>. Letzter Abruf: 26.08.2010.
- [3] Drexel, A., Fleischmann, B., Günther, H.-O., Stadler, H., and Tempelmeier, H. 1994. Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme. *ZfbF* 46, 12, 1022–1045.
- [4] Franck, B., Neumann, K., and Schwindt, C. 1997. A capacity-oriented hierarchical approach to single-item and small-batch production planning using project-scheduling methods. *OR Spectrum* 19, 2, 77–85.
- [5] Gao, H. 1996. *Building Robust Schedules using Temporal Protection – An Empirical Study of Constraint Based Scheduling Under Machine Failure Uncertainty*. <http://www.eil.utoronto.ca/scheduling/papers/gao-masc95.pdf>. Letzter Abruf: 26.08.2010.
- [6] Ghosh, S. 1996. *Guaranteeing Fault Tolerance Through Scheduling in Real-Time Systems*. Dissertation, University of Pittsburgh.
- [7] Graves, S. C. 2006. *Uncertainty and Production Planning*. Working Paper. <http://web.mit.edu/sgraves/www/papers/Uncertainty%20and%20Production%20Planning%20Dec%202008.pdf>. Letzter Abruf: 26.08.2010.
- [8] Hall, N. and Posner, M. E. 2004. Sensitivity Analysis for Scheduling Problems. *Journal of Scheduling* 7, 1, 49–83.
- [9] Hans, E. W. 2001. *Resource Loading by Branch-and-Price Techniques*. Dissertation, University of Twente.
- [10] Hans, E. W., Herroelen, W., Leus, R., and Wullink, G. 2007. A hierarchical approach to multi-project planning under uncertainty. *Omega* 35, 5, 563–577.
- [11] Herroelen, W. and Leus, R. 2005. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. *European Journal of Operational Research* 165, 2, 289–306.
- [12] Hoogeveen, J. A., Lenstra, J. K., and Veltman, B. 1996. Preemptive scheduling in a two-stage multiprocessor flow shop is NP-hard. *European Journal of Operational Research* 89, 1, 172–175.
- [13] Kis, T. 2005. A branch-and-cut algorithm for scheduling of projects with variable-intensity activities. *Mathematical Programming* 103, 3, 515–539.
- [14] Kolisch, R. 2001. *Make-to-Order Assembly Management*. With 49 Figures and 44 Tables. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [15] Kouvelis, P. and Yu, G. 1997. *Robust Discrete Optimization and Its Applications*. Nonconvex Optimization and Its Applications 14. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- [16] Lambrechts, O., Demeulemeester, E., and Herroelen, W. 2008. Proactive and reactive strategies for resource-constrained project scheduling with uncertain resource availabilities. *Journal of Scheduling* 11, 2, 121–136.
- [17] Leus, R. 2003. *The generation of stable project plans: Complexity and exact algorithms*. Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven.
- [18] Mehta, S. V. and Uzsoy, R. M. 1998. Predictable scheduling of a job shop subject to breakdowns. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 14, 3, 365–378.
- [19] Mehta, S. V. and Uzsoy, R. M. 1999. Predictable scheduling of a single machine subject to breakdowns. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 12, 1, 15–38.
- [20] Power, D. J. 2002. *Decision Support Systems. Concepts and Resources for Managers*. Quorum Books, Westport, CT.
- [21] Ruiz, R. and Vázquez-Rodríguez, J. A. 2010. The hybrid flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 205, 1, 1–18.
- [22] Sage, A. P. 2001. Decision Support Systems. In *Handbook of Industrial Engineering. Technology and Operations Management*, G. Salvendy, Ed. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Weinheim, 110–154.
- [23] Schlüchtermann, J. 1996. *Planung in zeitlich offenen Entscheidungsfeldern*. Neue Betriebswirtschaftliche Forschung 184. Gabler Verlag, Wiesbaden.
- [24] Schneeweiß, C. 1992. *Planung 2. Konzepte der Prozeß- und Modellgestaltung*. Springer-Lehrbuch. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [25] Scholl, A. 2001. *Robuste Planung und Optimierung. Grundlagen – Konzepte und Methoden – Experimentelle Untersuchungen*. Mit 21 Abbildungen und 105 Tabellen. Physica-Verlag, Heidelberg.
- [26] Schwartz, F. and Voß, S. 2005. Management of disruptions in production systems using simulation. *Pacific Journal of Optimization* 1, 3, 579–597.
- [27] Vanhoucke, M. and Debels, D. 2008. The impact of various activity assumptions on the lead time and resource utilization of resource-constrained projects. *Computers & Industrial Engineering* 54, 1, 140–154.
- [28] Vieira, G. E., Herrmann, J. W., and Lin, E. 2003. Rescheduling manufacturing systems: A framework of strategies, policies and methods. *Journal of Scheduling* 6, 1, 39–62.
- [29] Zäpfel, G. 1982. *Produktionswirtschaft. Operatives Produktions-Management*. De-Gruyter-Lehrbuch. De Gruyter, Berlin, New York.