

# Integrierte Auftragsplanung variantenreicher Produkte

Ein Softwareprototyp zur Generierung und Einplanung von Planaufträgen sowie deren Zuordnung zu Kundenaufträgen

Jens Bürgin, Han Hao, Gisela Lanza, Karlsruher Institut für Technologie und Hansjörg Tutsch, flexis AG, Stuttgart

Eine robuste und optimierte Planung der Serienproduktion variantenreicher Produkte wie Automobile kann durch eine Integration der unternehmerischen Funktionsbereiche Einkauf, Produktion und Vertrieb realisiert werden. Hierzu ist es erforderlich, bereits mittelfristig vor Eingang der Kundenaufträge einen Auftragsbestand als Basis für eine integrierte, durchgängige und transparente Planung zwischen mittelfristigem und kurzfristigem Planungshorizont zu generieren. Entsprechend wird in diesem Beitrag ein Softwareprototyp zur Anwendung einer innovativen Planungsmethodik zur Generierung von Planaufträgen, zur Einplanung der Planaufträge in ein Produktionsnetzwerk und zur Zuordnung von eingehenden Kundenaufträgen zu Planaufträgen des Auftragsbestands vorgestellt.

Unternehmen agieren vermehrt in Produktionsnetzwerken, um kundenindividuelle Produkte kurzfristig für nahegelegene Märkte produzieren zu können. Die steigende Variantenzahl von Produkten, insbesondere von Automobilen, stellt dabei für die Planung der variantenreichen Endmontage in Serie eine Herausforderung dar. Einerseits sind Produktionskapazitäten mit Kapazitätsangeboten an den einzelnen Standorten abzugleichen und andererseits müssen Teile bei den Lieferanten der Standorte abgerufen werden. Dabei stellt sich die Frage, auf welcher Basis die Planung mittelfristig durchgeführt wird, wenn Kundenaufträge erst kurzfristig eingehen.

Klassische Ansätze nehmen mittelfristig eine Produktionsprogrammplanung zur Festlegung von Produktionsvolumen je Periode gegebenenfalls standortübergreifend vor (siehe z. B. [1]). So wird aufgrund noch nicht eingegangener Kundenaufträge in der Regel prognosebasiert ohne Auftragsbezug geplant [2]. Dennoch erhalten die Lieferanten der deutschen Automobilhersteller mittelfristig, und zwar beispielsweise neun Monate vor Produktionsstart, eine Vorschau auf die benötigten Teile im Rahmen des Lieferabrufs (LAB) nach VDA4905, die dann kurzfristig durch den Feinabruf (FAB) nach VDA4915 weiter spezifiziert werden [3]. Dazu können Planaufträge generiert werden

oder coderegelbasierte oder zeitreihenbasierte Verfahren eingesetzt werden [4].

Werden Planaufträge auf Basis von Vertriebsprognosen für Modellvolumen und Einbauraten hinsichtlich kundenwählbarer Produktoptionen erzeugt [4], so können nach Zusteuerung weiterer Optionen Teilebedarfe durch eine Stücklistenauflösung ermittelt werden, indem zunächst Zusteuerregeln und dann Einbauregeln je Planauftrag ausgewertet werden [3]. Einbauregeln geben an, welche Optionen in Kombination welche Teile erfordern [3]. Zur softwaretechnischen Verarbeitung werden Optionen als Buchstaben-Zahlen-Kombinationen codiert und daher auch als Codes bezeichnet [3]. Entsprechend werden Einbauregeln als Coderegeln dargestellt [3].

Coderegelbasierte Verfahren berücksichtigen ebenso wie Planaufträge Vertriebsprognosen für Modellvolumen und Einbauraten, vernachlässigen jedoch die vollständige Produktstrukturkomplexität einzelner Aufträge [4]. Zeitreihenbasierte Verfahren betrachten ausschließlich die Teileebene und somit keine Optionen, weshalb sie lediglich dann gute Prognoseergebnisse liefern, wenn der Teilebedarf gleichmäßig und vorhersehbar ist, was bei vor-

## Integrated Order Planning for Multi-Variant Products – An Approach for Generation of Planned Orders, their Allocation in a Production Network and their Matching with Customer Orders

Medium-term order planning for the serial production of multi-variant products such as automobiles enables an integrated planning of procurement, production and sales as well as robust and optimized plans. In addition, continuity between medium-term and short-term planning can be achieved through a medium-term order basis. This article presents a planning methodology for the generation of planned orders to create a medium-term order basis, the assignment of planned orders to plants in a production network, and the assignment of incoming customer orders to planned orders.

**Keywords:**  
order planning, production networks, order generation

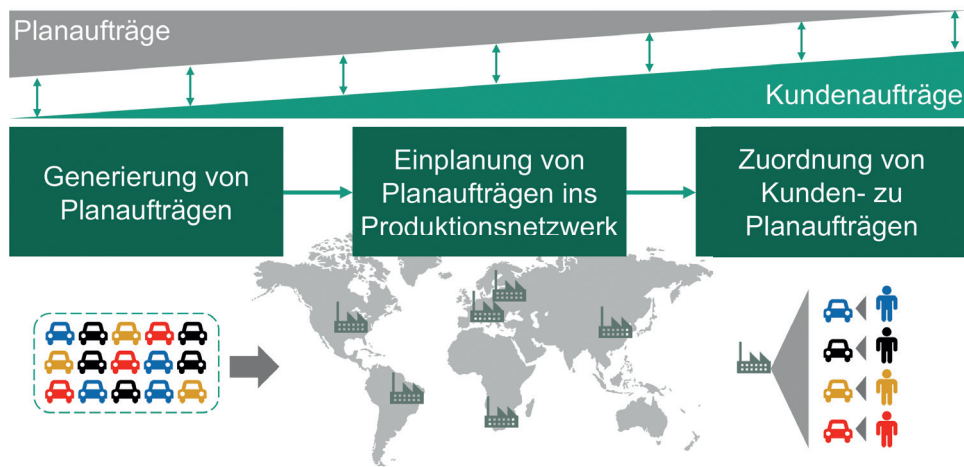
Jens Bürgin ist akademischer Mitarbeiter in der Gruppe Globale Produktionsstrategien im Bereich Produktionssysteme am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Han Hao ist Masterstudent am KIT und Masterand bei der flexis AG.

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza ist Institutslleiterin Produktionssysteme am wbk Institut für Produktionstechnik des KIT.

Hansjörg Tutsch ist Bereichsleiter Forschung der flexis AG.

Jens.Buergin@kit.edu  
www.wbk.kit.edu



**Bild 1: Methodik zur integrierten Auftragsplanung variantenreicher Produkte.**

herrschenden Marktschwankungen, beispielsweise in der automobilen Serienproduktion, nicht gewährleistet werden kann [4]. Sowohl coderegeln- als auch zeitreihenbasierte Verfahren ermöglichen durch den Verzicht auf die komplexe und rechenzeitintensive Generierung und somit Darstellung von Aufträgen auch keinen direkten Abgleich mit den Produktionskapazitäten im Rahmen der mittelfristigen Programmplanung [4]. Zudem kann nicht garantiert werden, dass die prognostizierten Einbauraten und Teile auch in baubaren Aufträgen kombiniert werden können. Dazu ist es erforderlich, dass Aufträge erstellt werden und somit sichergestellt wird, dass die Optionen auch in Aufträgen miteinander kombinierbar sind. Je Auftrag sind hierzu Baubarkeitsregeln auszuwerten, die angeben, welche Optionen kombinierbar sind [3].

Werden also klassischerweise mittelfristig keine Planaufträge erzeugt, so kann weder die Baubarkeit der Optionen in Aufträgen sichergestellt werden, noch können Teile direkt abgeleitet werden. Zudem kann die Produktionsprogrammplanung mittelfristig nicht auftragsbasiert erfolgen, wodurch auch keine Restriktionen der Produktionsstandorte hinsichtlich der Optionen berücksichtigt werden können. Dies führt dazu, dass sich die Vertriebsprognosen hinsichtlich Modellvolumen und vor allem Einbauraten nur bedingt in den Planungen der Bereiche Produktion und Beschaffung widerspiegeln. Planaufträge bieten dagegen das Potenzial, eine integrierte und transparente Informationsbasis für die verschiedenen Unternehmensfunktionen zu schaffen und zudem eine Durchgängigkeit zwischen mittel- und kurzfristigem Planungshorizont zu ermöglichen, wenn bereits mittelfristig auftragsbasiert geplant wird. Auf diese Weise kann die Einplanung der Aufträge ins Produktionsnetzwerk optimiert werden. Zudem kann eine Robustheit gegenüber Turbulenzen zwischen den Bereichen als auch in der ge-

samten Lieferkette erreicht werden. Gehen kurzfristig Kundenaufträge ein, so können die eingeplanten Planaufträge mit möglichst geringen Auswirkungen auf die Lieferkette so angepasst werden, dass diese den konfigurierten Kundenaufträgen entsprechen und eine Zuordnung von Kunden- zu Planaufträgen erfolgen kann. Durch diesen Ansatz wird der Scheingenaugigkeit begegnet, welche der Planauftragsgenerierung inne liegt, da diese auf Prognosen beruht und nicht alle möglichen Produktvarianten in Form von Aufträgen abbilden kann. Die entsprechende

Gesamtmethodik zur integrierten Auftragsplanung variantenreicher Produkte in Produktionsnetzwerken ist in Bild 1 dargestellt.

Im Folgenden wird die erforschte Methodik in Form der implementierten, prototypischen Softwarelösung zur Planauftragsgenerierung, zur Auftragseinplanung ins Produktionsnetzwerk und zur Zuordnung von Kunden- zu Planaufträgen näher vorgestellt.

### Implementierung der Planauftragsgenerierung

Im ersten Schritt der integrierten Auftragsplanung werden Planaufträge je Absatzmarkt unter der Berücksichtigung von Baubarkeitsregeln generiert. Hierzu ist die grafische Oberfläche in Bild 2 dargestellt. Zunächst sind im Drop-down-Menü im Eingabebereich der grafischen Oberfläche des Softwareprototyps ein Absatzmarkt und ein Produktmodell in Form der entsprechenden Codes für die Auftragsgenerierung auszuwählen und die entsprechenden Baubarkeits-, Zusteuer- und Einbauregeln zu importieren. Als nächstes können Soll-Einbauraten für kundenwählbare Optionen des ausgewählten Produktmodells für den gewählten Absatzmarkt entweder aus historischen Auftragsdaten berechnet oder direkt eingelesen werden. Diese werden in der grafischen Oberfläche angezeigt und können vom Benutzer manuell angepasst werden. Dabei wird zwischen Muss- und Kann-Optionen unterschieden, wobei Muss-Optionen Optionsgruppen bilden, aus denen mindestens eine Option gewählt werden muss [5].

Nachdem neben den genannten Daten die Anzahl zu generierender Planaufträge für den Planungsmonat eingegeben wird, kann der Generierungsprozess durch Betätigung der „Generieren“-Taste gestartet werden. Der Algorithmus zur Planauftragsgenerierung baut zunächst einen Variantenbaum für die Muss-Optionen

unter Berücksichtigung der Baubarkeitsregeln auf und generiert für die Muss-Optionen Planaufträge, denen daraufhin Kann-Optionen entsprechend der Baubarkeit hinzugefügt werden, sodass Planaufträge mit kundenwählbaren Optionen vorliegen [6]. Durch die Unterscheidung von Muss- und Kann-Optionen und deren unterschiedliche Behandlung im Rahmen der Planauftragsgenerierung kann sowohl die Komplexität als auch die Rechenzeit erheblich reduziert werden. So können durch die neuartige Methode beispielsweise 100.000 Planaufträge mit 100 kundenwählbaren Optionen in weniger als fünf Minuten generiert werden. Diesen werden durch die Auswertung von Zusteuerregeln zusätzliche Optionen hinzugefügt und schließlich werden über Einbauregeln Teilebedarfe ermittelt.

Nach erfolgreichem Durchlauf des Algorithmus werden die generierten Planaufträge mit ihren Spezifikationen hinsichtlich der Optionen und Teile für den Benutzer in Tabellenform dargestellt. Zum Vergleichszweck werden die Plan-Einbauraten sowie die Abweichungen zwischen den Soll- und Plan-Einbauraten je Option bzw. Code angegeben und letztere zusätzlich als Diagramm dargestellt, sodass der Benutzer schnell einen Überblick über die Güte der generierten Ergebnisse erhält. Abweichungen können einerseits durch die Ganzzahligkeit der Aufträge und somit Optionen sowie durch Baubarkeitsbeschränkungen zustande kommen. Der Benutzer kann entweder mit geänderten Einbauraten eine erneute Generierung durchführen oder die zuletzt generierten Planaufträge in der Datenbank abspeichern. Die Planaufträge können anschließend in das Produktionsprogramm der Standorte im Produktionsnetzwerk eingeplant werden, worauf im Folgenden eingegangen wird. Erst dann können die Teilebedarfe standortspezifisch den Lieferanten mitgeteilt werden.

### Implementierung der Auftragseinplanung

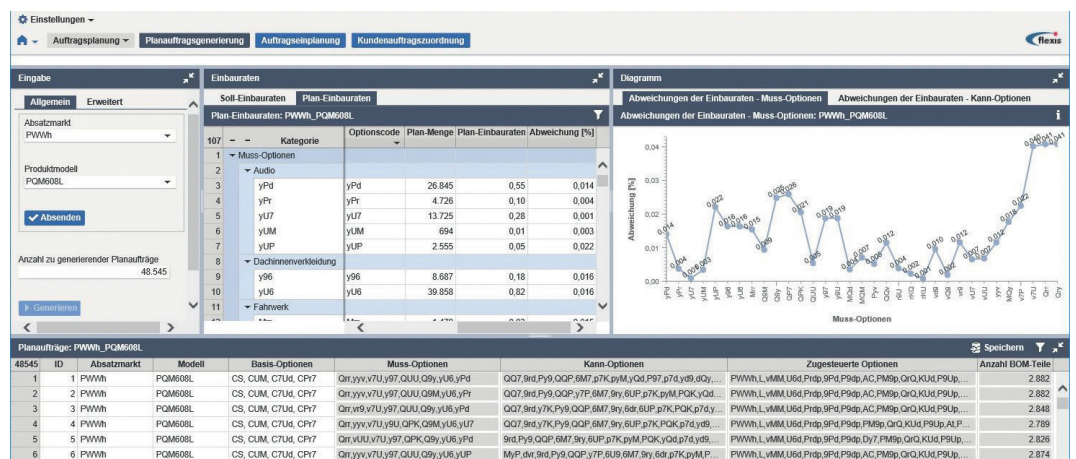
Nach erfolgter Generierung von Planaufträgen auf Monatsbasis für verschiedene Märkte und gegebenenfalls Produktmodelle, die durch die Standorte eines Produktionsnetzwerks produziert werden sollen, ist jeder einzelne Auftrag des globalen Auftragsbestands einem der Standorte zuzuordnen. Hierzu sind im Menü des Softwareprototyps die Absatzmärkte und Produkt-

modelle der einzuplanenden Planaufträge festzulegen. Die zutreffenden Planaufträge werden aus dem Auftragsbestand aus der Datenbank gefiltert und in der grafischen Oberfläche in Tabellenform für den Benutzer angezeigt. Weiterhin sind durch den Benutzer die Produktionsstandorte zu definieren, denen die Planaufträge zugeordnet werden sollen.

Anschließend importiert die Software die entsprechenden Teile- und Distributionskostensätze sowie Produktions- und Lieferantenrestriktionen aus der Datenbank. Produktionsrestriktionen können dabei in Form von aggregierten Car-Sequencing-Regeln (siehe u. a. [7]) und Lieferantenrestriktionen hinsichtlich deren gleichmäßiger Auslastung analog zu aggregierten Level-Scheduling-Regeln (siehe u. a. [7]) jedoch nicht zwischen Perioden, sondern zwischen Standorten berücksichtigt werden. Bezüglich der Daten wird überprüft, ob die Produktionskapazitäten der Produktionsstandorte in Form von Fertigungstakten der Anzahl einzuplanender Planaufträge entsprechen. Da die Einplanung von Aufträgen mehrerer Märkte zu mehreren Standorten erfolgt, berücksichtigt die neuartige Methodik zur Einplanung von Aufträgen ins Produktionsnetzwerk sowohl die Kosten für die Teile inklusive derer Belieferung zum entsprechenden Produktionsstandort je Auftrag als auch die Kosten für die Distribution zum entsprechenden Absatzmarkt je Auftrag und minimiert die Gesamtkosten [8]. Hierzu wird durch einen Klick auf die „Einplanen“-Taste im Programm mittels IBM ILOG CPLEX ein ganzzahliges Optimierungsmodell aufgestellt und gelöst.

Die Ergebnisse bzw. die eingeplanten Aufträge werden in einer Tabelle je Produktionsstandort zusammengefasst und in der grafischen Oberfläche angezeigt. Die entsprechend optimalen Kosten werden dargestellt und können

Bild 2: Grafische Oberfläche zur Planauftragsgenerierung.





weiter analysiert werden, ebenso die Güte der Gleichverteilung von Optionen zwischen den Standorten. Mit der Bestätigung des Benutzers können die Planaufträge endgültig in die Produktionsprogramme der Standorte eingeplant und in der Datenbank gespeichert werden. Darauf basierend können an den Standorten unabhängig voneinander und entsprechend der zeitlichen Fristigkeiten die weitere Terminplanung zu Wochen- und Tagesprogrammen sowie die Zuordnung zu und die Sequenzierung auf den Montagelinien erfolgen.

### Implementierung der Kundenauftragszuordnung

Kurzfristig gehen Kundenaufträge ein, die den eingeplanten Planaufträgen des Produktionsprogramms zugeordnet werden können. Hierzu wird für den Benutzer das gesamte mit Plan- und Kundenaufträgen geplante Produktionsprogramm in einer grafischen Oberfläche dargestellt. Dazu wird je Produktionsstandort der Auftragsbestand jedes Monats-, Wochen- und Tagesprogramms sowie die bereits sequenzierten Aufträge bis zur aktuell laufenden Produktion abgebildet. Die Auftragsbestände bestehen sowohl aus Planaufträgen als auch aus bereits eingegangenen und den Planaufträgen zugeordneten Kundenaufträgen. Entsprechende Belegungsgrade werden angezeigt, wobei diejenigen Aufträge, die den Produktionsstart erreicht haben, produziert werden, auch wenn es sich dabei um Planaufträge handelt. Dies entspricht der üblichen Vorgehensweise in der Automobilindustrie, nach der beispielsweise für den europäischen Markt ca. 50 Prozent der Aufträge ohne Kundenbezug produziert werden [9].

Potenzielle Kunden können über eine webbasierte Nutzeroberfläche zur Auftragskonfiguration mit direkter Auftragseinplanung und Lieferterminbestätigung Bestellungen vornehmen. Hierzu wird ein innovativer Algorithmus aufgerufen, der zunächst über ein ganzzahliges Optimierungsmodell mittels IBM ILOG CPLEX einen möglichst hinsichtlich der gewählten Optionen passenden und hinsichtlich der Lieferterminabweichung minimalen Planauftrag auswählt [6]. Auf Basis einer erfolgten Auswahl überprüft der Algorithmus, ob vom Kundenauftrag abweichende Optionen des ausgewählten Planauftrags mit anderen Planaufträgen ohne Verletzungen von Baubarkeitsregeln und Produktionsrestriktionen sowie ohne Bedarfsänderungen kritischer Teile getauscht werden können. Ist dies für einzelne Optionen nicht möglich, so kann auch bis zum Zeitpunkt des kurzfristigen Lieferabrufs

eine transparente Abrufänderung gegenüber Lieferanten erfolgen und daher bei der Optimierung berücksichtigt werden. Entsprechend der Lösung des Optimierungsmodells wird dem Kunden der Liefertermin des ausgewählten Planauftrags unter Berücksichtigung der Transportzeit vorgeschlagen, der entsprechend der abweichenden Optionen und deren Anpassungsmöglichkeiten auch später als der gewünschte Liefertermin liegen kann. Sollte je nach Restriktionen dennoch im gesamten Auftragsbestand kein geeigneter Planauftrag gefunden werden, so kann der Kundenauftrag im Rahmen der nächsten Planauftragsgenerierung berücksichtigt werden. Je nach Einstellungen des Systems können dem Kunden jedoch zusätzlich hinsichtlich der Optionen ähnliche Produktvarianten mit geringerer Lieferterminabweichung vorgeschlagen werden. So kann der Kunde womöglich zwischen dem gewählten Produkt mit einem späteren Liefertermin als dem gewünschten und einem ähnlichen Produkt näher am gewünschten Liefertermin wählen. Durch die Bestätigung eines Produkt- und Lieferterminvorschlags durch den Kunden wird der Kundenauftrag dem ausgewählten Planauftrag im Auftragsbestand zugeordnet und entsprechend in der Benutzeroberfläche dargestellt.

### Fazit

Der Softwareprototyp ermöglicht eine integrierte, optimierte und robuste Auftragsplanung variantenreicher Produkte entsprechend der Anforderungen der unternehmerischen Funktionsbereiche Einkauf, Produktion und Vertrieb. Eine anwenderfreundliche grafische Oberfläche ermöglicht es dem Planer, anwendungsspezifische Einstellungen zu treffen und Auswertungen durchzuführen. Durch die erfolgte Validierung mit Echtdateien und die Implementierung des Softwareprototypen, kann dessen Einsatz bei Unternehmen, die variantenreiche Produkte in Serie produzieren, in einem nächsten Schritt erprobt werden.

### Schlüsselwörter:

Auftragsplanung, Produktionsnetzwerke, Planauftragsgenerierung

*Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts „FlexAEM – Multikriteriell optimierte Auftragseinplanung für die variantenreiche Serienproduktion in globalen Netzwerken bei volatilem Kundenkaufverhalten“, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 01IS15015 gefördert wird.*

### Literatur

- [1] Wittek, K.: Standortübergreifende Programmplanung in flexiblen Produktionsnetzwerken der Automobilindustrie. Wiesbaden 2013.
- [2] Meyr, H.: Supply chain planning in the German automotive industry. In: OR Spectrum 26 (2004) 4, S. 447-470.
- [3] Stäblein, T.: Integrierte Planung des Materialbedarfs bei kundenauftragsorientierter Fertigung von komplexen und variantenreichen Serienprodukten. Aachen 2008.
- [4] Liebler, K. M.: Eine prozess- und IT-gestützte Methode für die Produktionsplanung in der Automobilindustrie. Dissertation, Technische Universität Dortmund 2013.
- [5] Ohl, S.: Prognose und Planung variantenreicher Produkte am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation, Universität Karlsruhe 2000.
- [6] Bürgin, J.; Beisecker, J.; Fischer, S.; Geier, B.; Tutsch, H.; Mercamp, S.; Lanza, G.: Generation of Planned Orders and their Matching with Customer Orders in Multi-variant Series Production. In: Procedia CIRP 61 (2017), S. 499-504.
- [7] Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A.: Produktionsplanung bei Variantenfließfertigung. Planungshierarchie und Elemente einer Hierarchischen Planung. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft 77 (2007) 7-8, S. 759-793.
- [8] Bürgin, J.; Blättchen, P.; Qu, C.; Lanza, G.: Assignment of Customer-Specific Orders to Plants with Mixed-Model Assembly Lines in Global Production Networks. In: Creative Design of Products and Production Systems (Hrsg): Procedia CIRP 50, Stockholm 2016. S. 330-335.
- [9] Holweg, M.; Pil, F.K.: The second century: Reconnecting customer and value chain through build-to-order - moving beyond mass and lean production in the auto industry. Cambridge 2004.