

Simulationsbasierte Ermittlung von Kapazitätsbelastungsfaktoren zur Produktionsprogrammplanung

Simulation-based determination of capacity load factors for master production scheduling

Julian Englberger, Frank Herrmann, HS Regensburg, Regensburg (Germany),
julian.englberger@hs-regensburg.de, frank.herrmann@hs-regensburg.de

Thorsten Claus, TU Dresden (IHI Zittau), Zittau (Germany), thorsten.claus@tu-
dresden.de

Abstract: This paper deals with the problem of varying capacity load factors in master production scheduling. A simulation system of a production planning and control system and of a production system is described and an approach to compute the capacity loads from the simulation results is developed. This approach is used to measure period-specific capacity load factors for master production scheduling. The measured capacity load factors vary over time and show that the common assumption of the capacity load factors being period-independent is inappropriate. A stochastic programming model to cope with this variation is described. This model is compared to a common linear programming model for master production scheduling in a simulation experiment. The results show that the use of the measured capacity load factor scenarios improves the quality of the estimation of the capacity load factors significantly.

1 Problemstellung und Stand der Technik

Dieser Beitrag bezieht sich auf ein hierarchisches Planungskonzept, welches in kommerziell verfügbaren Systemen zur operativen Produktionsplanung und -steuerung üblicherweise umgesetzt ist. Dieses Konzept beinhaltet die Hierarchieebenen Produktionsprogrammplanung, Materialbedarfsplanung und Fertigungssteuerung (siehe Herrmann 2011, Kurbel 2011). In der Produktionsprogrammplanung werden Produktionsmengen für Endprodukte geplant, mit denen Kundenbedarfe befriedigt werden. Kapazitätsgrenzen der Produktionssegmente führen in Phasen mit hohen Kundenbedarfen häufig dazu, dass Endprodukte vorproduziert werden müssen. Die Abschätzung der Kapazitätsbelastung durch die geplanten Produktionsmengen erfolgt in der Regel über sogenannte Kapazitätsbelastungsfaktoren. Diese Kapazitätsbelastungsfaktoren

geben an, wann vor der Fertigstellung eines Endprodukts welche Produktionssegmente wie stark belastet werden.

Die Höhen der durch ein Produktionsprogramm verursachten Kapazitätsbelastungen hängen von mehreren Faktoren ab; ein wesentlicher ist der Zusammenhang zwischen Auslastung des Produktionssystems und Durchlaufzeit von Produktionsaufträgen. Er ist bei niedrigen Auslastungen linear, wird jedoch mit steigender Auslastung aufgrund der zunehmenden Ressourcenkonkurrenz stark nichtlinear (siehe u.a. Kacar et al. 2012, Ravindran et al. 2011). Dieser Zusammenhang wird häufig in Form von nichtlinearen Clearing Functions simulationsbasiert oder analytisch unter Verwendung der Warteschlangentheorie ermittelt und in verschiedenen Planungsverfahren eingesetzt. Ein Überblick über Ansätze zur Clearing Function findet sich in Pahl et al. (2007), ein Optimierungsmodell unter Verwendung der Clearing Function wurde in Asmundsson et al. (2009) entwickelt. Einen weiteren Ansatz zur Berücksichtigung des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Auslastung und Durchlaufzeit beschreiben Byrne und Bakir (1999). Dort wird abwechselnd ein Simulationssystem durch Ergebnisse der Lösung eines Optimierungsmodells gesteuert und ein Optimierungsmodell aus Simulationsergebnissen parametrisiert, bis eine Lösung gefunden wird, die sowohl optimal (im Optimierungsmodell) als auch kapazitiv zulässig (im Simulationssystem) ist. Kim und Kim (2001) kombinieren einen auf die Halbleiterproduktion bezogenen Ansatz von Hung und Leachman (1996) zur Ermittlung der Belastung des Produktionssystems durch Einzelprodukte mit dem Ansatz von Byrne und Bakir (1999). Die Ermittlung der zeitlichen Verteilung der Kapazitätsbelastung erfolgt dabei simulationsbasiert; die Höhe der Belastung wird durch die Bearbeitungszeiten der Produkte vorgegeben. Byrne und Hossain (2005) erweitern diesen Ansatz für den Einsatz in Just-In-Time-Produktionssystemen. Noch gravierender wird dieses Problem durch die Aggregation in der Produktionsprogrammplanung. Aufgrund dieser müssen bei der Ermittlung der Kapazitätsbelastung durch ein Endprodukt sämtliche Vorprodukte mitberücksichtigt werden. Üblicherweise wird angenommen, dass die Kapazitätsbelastungen linear mit den Produktionsmengen steigen. In eigenen Simulationsuntersuchungen treten jedoch insbesondere bei großen Loszusammenfassungen große Schwankungen der Kapazitätsbelastungsfaktoren auf; deswegen ist diese Annahme unzutreffend. Tatsächlich schwanken die Kapazitätsbelastungsfaktoren im Zeitablauf. In diesem Beitrag soll ein Verfahren zur simulationsbasierten Ermittlung der Kapazitätsbelastungsfaktoren entwickelt werden. Durch die Angabe genauerer Kapazitätsbelastungsfaktoren soll die Kapazitätsabschätzung in der Produktionsprogrammplanung und damit die kapazitätsmäßige Umsetzbarkeit des Produktionsprogramms verbessert werden.

2 Testproblem

Anhand des folgenden Testproblems werden die Kapazitätsbelastungsfaktoren untersucht. Betrachtet wird ein Teil der Produktion eines Herstellers von Hochspannungs-Energietechnik aus Regensburg. Es werden zwei Endprodukte gefertigt, die jeweils sieben Komponenten besitzen. Insgesamt werden 13 Produkte in einer generellen Stücklistenstruktur (siehe Abbildung 1) betrachtet.

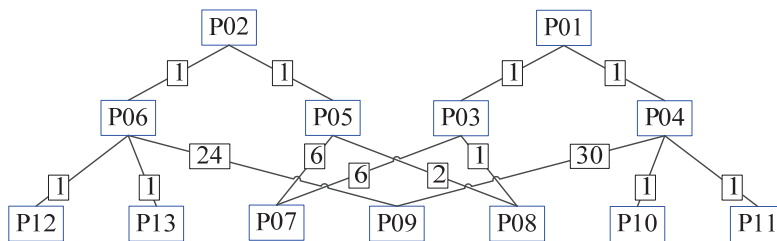


Abbildung 1: Gozintograph zur Fallstudie

Jedes Produkt hat einen linearen Arbeitsplan mit zwischen einer und vier Operationen. Die Produktion erfolgt auf den Produktionssegmenten Fräsen, Feinbearbeitung und Montage. Das Produktionssegment Fräsen besteht aus drei gleichartigen Fräsmaschinen, das Produktionssegment Feinbearbeitung besteht aus einer Schleifmaschine, einer Waschmaschine sowie einem Arbeitsplatz zum Entgraten der Werkstücke. Die Montage verfügt über zwei Arbeitsplätze. Jede Operation ist einer oder mehreren (parallelen) Produktionsmaschinen bzw. Arbeitsplätzen zugeordnet. Das Testproblem wird als repräsentativ für Problemstellungen mit Rüstzeiten der einzelnen Operationen zwischen 10 und 30 Minuten und Stückbearbeitungszeiten zwischen 1 und 75 Minuten erachtet; deswegen wird darauf verzichtet, die einzelnen Arbeitspläne im Detail anzugeben.

Die Durchführung und Planung dieser Produktion wird simuliert in einem Simulationssystem, welches am Innovationszentrum für Produktionslogistik und Fabrikplanung der Hochschule Regensburg entwickelt wurde. In diesem Simulationssystem ist die eingangs beschriebene in der Industrie üblicherweise eingesetzte Planungshierarchie zur Produktionsplanung und -steuerung sowie das Produktionssystem modelliert. Dieses Simulationssystem wurde um die im Folgenden beschriebene Hauptproduktionsprogrammplanung und Messung der Kapazitätsbelastungsfaktoren erweitert. Als Simulationsumgebung dient die Software Siemens Tecnomatix Plant Simulation. Im Simulationssystem wird – entsprechend der betrieblichen Realität – auf verschiedenen zeitlichen Aggregationsebenen gearbeitet. Während das Scheduling mit quasi-kontinuierlicher Zeit arbeitet, bezieht sich die Auslieferung der Kundenaufträge sowie die Mengenplanung auf Tagesperioden. Die Hauptproduktionsprogrammplanung erfolgt auf Wochenebene. Jede Simulationsuntersuchung erfolgt über einen Zeitraum von $T^{\text{MRP},\text{sim}}$ Mengenplanungs- bzw. Auslieferungsperioden (Tagen). Dieser Zeitraum entspricht $T^{\text{HPP},\text{sim}}$ Hauptproduktionsprogrammplanungsperioden (Wochen).

Die hierarchisch höchste Planungsebene im Simulationssystem ist die Produktionsprogrammplanung. Diese erfolgt in der Simulation – stellvertretend für andere Verfahren zur Produktionsprogrammplanung – durch die Lösung des Optimierungsmodells HPPLAN aus Günther und Tempelmeier (2012). Aufgrund der Optimalität der Planungsergebnisse kann in den im weiteren Verlauf des Beitrags beschriebenen Untersuchungen die Verbesserung der Planungsergebnisse eindeutig der Verbesserung der Kapazitätsabschätzung zugeordnet werden; Einflüsse durch Unzulänglichkeiten von Planungsverfahren können so ausgeschlossen werden. Das Optimierungsmodell ist in der Entwicklungsumgebung IBM ILOG Optimization Studio Version 12.5 umgesetzt und wird durch den

CPLEX-Solver gelöst. Jede Hauptproduktionsprogrammplanungsperiode wird ein Planungsproblem gelöst. Dazu werden zunächst die Problemparameter auf der Basis des aktuellen Zustands des simulierten Produktionssystems ermittelt. Anschließend wird aus dem Simulationssystem die Lösung des Optimierungsproblems durch den CPLEX-Solver angestoßen. Die Lösung des Optimierungsproblems wird dann zurück an das Simulationssystem übergeben und umgesetzt. Die Produktionsprogrammplanung erfolgt auf der Basis von Kundenaufträgen. Jeder Kundenauftrag umfasst die Bestellung einer Menge eines Endprodukts, die zu Beginn einer bestimmten Bedarfsperiode ausgeliefert werden soll. Die Planungsergebnisse der Produktionsprogrammplanung sind die Produktionsmengen je Woche und je Endprodukt sowie die zu verwendenden Zusatzkapazitäten je Woche und je Produktionssegment.

Die Planungsergebnisse der Produktionsprogrammplanung werden im Simulationssystem zeitlich von Wochen- auf Tagesperioden disaggregiert. Die zu verwendenden Zusatzkapazitäten werden durch die einzelnen Produktionssegmente durch die Verwendung von Schichtkalendern realisiert. Die Produktionsmengen sind Eingangsgrößen für die Materialbedarfsplanung. Die Hauptproduktionsprogrammplanung berücksichtigt bei der Ermittlung der Produktionsmengen bereits vorhandene Bestände. Deswegen wird für die Endprodukte keine Nettobedarfsrechnung durchgeführt.

Die Materialbedarfsplanung erfolgt im Simulationssystem wie in der industriellen Anwendung üblich durch die Anwendung des Dispositionsstufenverfahrens in Verbindung mit Losgrößenheuristiken (siehe Herrmann 2011). Die Materialbedarfsplanung wird täglich rollend über ein Planungsintervall von 20 Tagen durchgeführt. Als Losgrößenheuristik wird die Groff-Heuristik (vgl. Herrmann 2011) angewandt. Das Ergebnis der Materialbedarfsplanung sind Planaufträge. Diese Planaufträge werden in Produktionsaufträge umgewandelt, sobald ihr Freigabezeitpunkt erreicht ist und sämtliche Komponenten, die zur Produktion benötigt werden, im Lager in ausreichender Anzahl vorhanden sind. Jeder Produktionsauftrag i (mit $1 \leq i \leq N$) über eine Menge q_i eines Produkts k_i besitzt einen Freigabezeitpunkt in Periode a_i^{MRP} und einen anzustrebenden Fertigstellungszeitpunkt in Periode f_i^{MRP} . Zur Fertigstellung des Produktionsauftrags i ist die Abarbeitung von einer oder mehreren Operationen notwendig. Jede Operation ist einer oder mehreren Produktionsmaschinen in einem Produktionssegment zugeordnet und besitzt eine Rüstzeit sowie eine Stückbearbeitungszeit.

Wird eine Produktionsmaschine zu einem Zeitpunkt verfügbar, so werden sämtliche startbereite Operationen für diese Maschine gemäß einer Prioritätsregel wie First-In-First-Out priorisiert. Startbereit ist eine Operation dann, wenn sämtliche Vorgängeroperationen abgeschlossen sind. Diejenige Operation mit der höchsten zugewiesenen Priorität wird anschließend bearbeitet. Sind alle Operationen eines Produktionsauftrags abgearbeitet, führt der Produktionsauftrag zu einem Lagerzugang. Der realisierte Fertigstellungszeitpunkt des Produktionsauftrags liegt in Periode F_i^{MRP} .

Im Zuge eines Simulationslaufes über $T^{\text{MRP,Sim}}$ bzw. $T^{\text{HPP,Sim}}$ Perioden wird die Hauptproduktionsprogrammplanung wöchentlich, also $T^{\text{HPP,Sim}}$ mal und die Materialbedarfsplanung täglich, also $T^{\text{MRP,Sim}}$ mal durchgeführt. Jede Operation jedes ermittelten Produktionsauftrags wurde durch das Scheduling auf einer Maschine eingeplant und umgesetzt. Anschließend liegen N Produktionsaufträge vor.

3 Ermittlung der Kapazitätsbelastungsfaktoren

Die Produktionsprogrammplanung legt für T Perioden die Produktionsmengen $x_{k,t}$ für K Endprodukte fest. Die Produktion der Endprodukte und aller zugehörigen Vorprodukte erfolgt auf J miteinander vernetzten Produktionssegmenten, die jeweils eine oder mehrere Produktionsmaschinen oder Arbeitsplätze besitzen.

Um die Einhaltung der Kapazitätsgrenzen durch das Produktionsprogramm zu überprüfen, wird die Kapazitätsbelastung durch ein Produktionsprogramm üblicherweise durch sogenannte Kapazitätsbelastungsfaktoren $f_{j,k,z}$ abgeschätzt (siehe Günther und Tempelmeier 2012). Die Kapazitätsbelastungsfaktoren schätzen ab, welche Kapazitätsbelastung aufgrund der Produktion einer Mengeneinheit von $x_{k,t}$ eines Endprodukts k auf einem Produktionssegment j in Periode $t-z$ entsteht. Zur Ermittlung der Kapazitätsbelastungsfaktoren schlagen Günther und Tempelmeier (2012) vor, den Kapazitätsbedarf des Endprodukts und der Vorprodukte je Mengeneinheit den Vorperioden z zuzuordnen. Dabei bleibt offen, wie die Rüstzeiten berücksichtigt werden müssen, die von den gebildeten Losgrößen in der Materialbedarfsplanung abhängen; außerdem wird die zeitliche Verschiebung von Produktionsmengen aufgrund der Ressourcenauslastung sowie der Losbildung vernachlässigt.

In dieser Arbeit wird die Höhe der Kapazitätsbelastungsfaktoren ermittelt, indem die in Simulationsexperimenten tatsächlich auftretenden Kapazitätsbelastungsfaktoren gemessen werden. Da in jeder Periode unterschiedliche Kapazitätsbelastungsfaktoren gemessen werden können, werden periodenspezifische Kapazitätsbelastungsfaktoren $f_{t,j,k,z}$ gemessen. Dazu werden den Endprodukt-Produktionsmengen die durch sie verursachten Produktionsaufträge zugeordnet. Die Kapazitätsbelastung durch die Produktionsaufträge wird dann – auf eine Mengeneinheit des Endprodukts bezogen – den Endprodukt-Produktionsmengen zugeordnet. Diese Vorgehensweise wird nachfolgend im Detail beschrieben.

Jedem Produktionsauftrag lässt sich aufgrund der Loszusammenfassung mindestens eine zeitlich disaggregierte Endprodukt-Produktionsmenge $x_{k,t}^{\text{MRP}}$ zuordnen. $\theta_i^{x_{k,t}^{\text{MRP}}}$ bezeichnet die Menge von Produktionsauftrag i , die durch die Produktionsmenge $x_{k,t}^{\text{MRP}}$ verursacht ist.

Die Kapazitätsbelastung $tg_{j,i}$, die aufgrund der Produktion von Produktionsauftrag i im Produktionssegment j entsteht, ist die Summe aller Rüst- und Bearbeitungszeiten, die durch Operationen dieses Produktionsauftrags auf diesem Produktionssegment entstehen. Die Produktion einer Mengeneinheit von

Produktionsauftrag i verursacht damit eine Kapazitätsbelastung von $tg_{j,i}^1 = \frac{tg_{j,i}}{q_i}$.

Die geplante Kapazitätsbelastung fällt zwischen Freigabetermin a_i und Soll-Fertigstellungstermin f_i an; tatsächlich realisiert wird die Kapazitätsbelastung im Zeitraum zwischen a_i und F_i . Durch die kapazitätsorientierte Planung soll verhindert werden, dass Verspätungen auftreten ($F_i > f_i$). Deswegen muss ein Produktionsprogramm zu erfüllbaren Produktionsaufträgen führen, die geplanten Kapazitätsbelastungen dürfen also nicht zu Kapazitätsüberlastungen führen. Deswegen werden die geplanten Kapazitätsbelastungen zwischen a_i und f_i betrachtet. Der Soll-Endtermin eines Produktionsauftrags kann identisch sein mit dem Freigabetermin seines Nachfolgers. Da dieser Produktionsauftrag deswegen zum Zeitpunkt f_i bereits abgeschlossen sein muss, wird die Kapazitätsbelastung gleichmäßig auf den Zeitraum $[a_i, f_i)$ verteilt. Aufgrund der Terminierung der Produktionsaufträge mit festen, ganzzahligen Vorlaufzeiten D_i und der Modellannahme, dass Bedarfstermine stets zu Periodenbeginn liegen, liegen auch die Freigabe- und Soll-Endtermine stets am Periodenbeginn. Der Zeitraum $[a_i, f_i)$ entspricht deswegen genau $f_i^{MRP} - a_i^{MRP}$ Perioden. Die Kapazitätsbelastung $tg_{j,t,i}^1$ aufgrund der Produktion einer Mengeneinheit von Produktionsauftrag i in einer Periode t mit $a_i^{MRP} \leq t \leq f_i^{MRP} - 1$ ist deswegen die Gesamtbelastung $tg_{j,i}^1$ dividiert durch die Anzahl der Perioden $f_i^{MRP} - a_i^{MRP}$.

Die Kapazitätsbelastung $l_{t^{MRP},j,k,z^{MRP}}$, die aufgrund einer Produktionsmenge $x_{k,t^{MRP}}$ und der Kapazitätsbelastung $tg_{j,t,i^{PO}}^1$ in Periode $t^{MRP} - z^{MRP}$ in Produktionssegment j entsteht, ist die Summe aller durch die $x_{k,t^{MRP}}$ zugeordneten Produktionsaufträge verursachten Kapazitätsbelastungen in dieser Periode. Die Kapazitätsbelastungsfaktoren beschreiben die Belastung durch eine Produktionsmenge $x_{k,t^{MRP}}$ je Mengeneinheit, deswegen ist $f_{t^{MRP},j,k,z^{MRP}} = \frac{l_{t^{MRP},j,k,z^{MRP}}}{x_{k,t^{MRP}}}$ der Kapazitätsbelastungsfaktor für Produktionssegment j in Vorlaufperiode z^{MRP} zu $x_{k,t^{MRP}}$.

Zur Produktionsprogrammplanung werden die Kapazitätsbelastungsfaktoren $f_{t^{HPP},j,k,z^{HPP}}$ für Wochenperioden benötigt; ermittelt wurden die Kapazitätsbelastungsfaktoren $f_{t^{MRP},j,k,z^{MRP}}$ für Tagesperioden. Dazu werden die Kapazitätsbelastungsfaktoren $f_{t^{MRP},j,k,z^{MRP}}$ aggregiert. Zunächst werden die Vorlaufperioden dadurch aggregiert, dass die Kapazitätsbelastungen, die in den zu einer Wochenperiode gehörenden Tagen auftreten, aufsummiert werden. Anschließend wird für jede Wochenperiode das mit den Bedarfsmengen $x_{k,t^{MRP}}$ gewichtete Mittel der Tageskapazitätsbelastungsfaktoren gebildet. Für das

beschriebene Testproblem wird die Umsetzung von fünf Produktionsprogrammen über je 20 Wochen simuliert. Aus den Simulationsergebnissen werden die in Abbildung 2 dargestellten, periodenspezifischen Kapazitätsbelastungsfaktoren ermittelt; z ist die oben beschriebene Vorlaufperiode, in der die Kapazitätsbelastung anfällt. Die in Tabelle 1 dargestellten Mittelwerte $\mu(f)$ und Standardabweichungen $\sigma(f)$ zu den gemessenen Kapazitätsbelastungsfaktoren zeigen eine signifikante Streuung.

Tabelle 1: Kennzahlen zu den gemessenen Kapazitätsbelastungsfaktoren in [h]

		Fräsen		Montage		Feinbearbeitung	
		$\mu(f)$	$\sigma(f)$	$\mu(f)$	$\sigma(f)$	$\mu(f)$	$\sigma(f)$
Endprodukt 1	$z = 0$	0,42	0,08	2,13	0,03	0,54	0,11
	$z = 1$	2,61	0,07	0,03	0,05	3,30	0,09
	$z = 2$	0,02	0,03	0,00	0,00	0,03	0,04
Endprodukt 2	$z = 0$	0,30	0,06	2,77	0,20	0,39	0,08
	$z = 1$	2,49	0,04	0,37	0,22	3,24	0,06
	$z = 2$	0,12	0,07	0,00	0,00	0,15	0,10

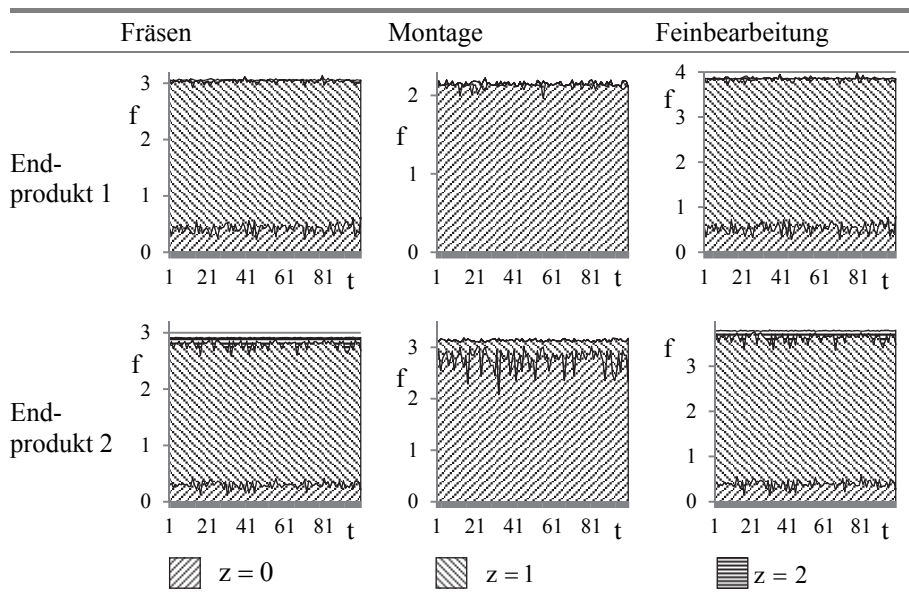


Abbildung 2: Gemessene periodenspezifische Kapazitätsbelastungsfaktoren f in [h]

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sowohl die aus einer Mengeneinheit einer Endprodukt-Produktionsmenge resultierende Gesamtbelastung als auch deren Verteilung über die Vorlaufperioden erheblich schwankt.

4 Verbesserung der Kapazitätsabschätzung

Die gemessenen, periodenspezifischen Kapazitätsbelastungsfaktoren zeigen, dass die üblicherweise im Rahmen der Produktionsprogrammplanung getroffene Annahme periodenunabhängiger Kapazitätsbelastungsfaktoren nicht zutrifft. Aus diesem Grund ist es plausibel, periodenspezifische Kapazitätsbelastungsfaktoren anzugeben. Eigene Untersuchungen zeigen, dass die Angabe periodenspezifischer Kapazitätsbelastungsfaktoren in der Produktionsprogrammplanung, die bei der Umsetzung des Produktionsprogramms tatsächlich wie geplant auftreten, nur in Ausnahmefällen möglich ist. Deswegen wird die Schwankung der Kapazitätsbelastungsfaktoren als Unsicherheit aufgefasst. Somit liegt ein Optimierungsproblem unter Unsicherheit vor; die Unsicherheit kann durch eine Menge Ω von Kapazitätsbelastungsfaktor-Szenarien abgebildet werden. Prinzipiell ist es möglich, Szenarien mit zufällig generierten Kapazitätsbelastungsfaktoren zu verwenden. Diese würden jedoch in der (simulierten) Umsetzung niemals auftreten, da wahrscheinlich kein Produktionsprogramm existiert, das zu dieser zufälligen Folge von Kapazitätsbelastungsfaktoren führt. Deswegen werden die Kapazitätsbelastungsfaktoren simulativ bestimmt. Eine gemessene Folge von periodenspezifischen Kapazitätsbelastungsfaktoren ist ein Szenario. Im Sinne der stochastischen Optimierung (siehe u. a. Kall und Mayer, 2011) ist zu fordern, dass die Kapazitätsrestriktion im Modell HPPLAN für alle Kapazitätsbelastungsfaktor-Szenarien der Menge Ω einzuhalten ist. Die dazu notwendige Erweiterung des Modells HPPLAN wird nachfolgend als SK-HPPLAN bezeichnet. Je höher die Anzahl verwendeter Szenarien ist, desto vollständig werden die Schwankungen der Kapazitätsbelastungsfaktoren abgebildet; deswegen führt eine hohe Anzahl verwendeter Szenarien dazu, dass eine Lösung, die die Kapazitätsrestriktion von SK-HPPLAN für alle Szenarien erfüllt, mit großer Wahrscheinlichkeit auch eine tatsächlich zulässige Lösung ist. Gleichzeitig erhöht die Anzahl der Szenarien die Laufzeit zur Lösung des Optimierungsmodells, sodass diese nicht beliebig hoch gewählt werden kann. Eigene Untersuchungen zeigen, dass die Verwendung von 10 Szenarien sowohl zu einer befriedigenden Abbildung der Schwankung der Kapazitätsbelastungsfaktoren als auch zu akzeptablen Laufzeiten führt.

Zur Ermittlung der Szenarien-Menge Ω wird vorab die Durchführung $|\Omega|$ unterschiedlicher Produktionsprogramme simuliert und deren Kapazitätsbelastungsfaktoren gemessen. Für die nachfolgend beschriebene Untersuchung wurden im Vorfeld $|\Omega| = 10$ Kapazitätsbelastungsfaktor-Szenarien ermittelt. Anschließend werden zwei Simulationsuntersuchungen durchgeführt. In der ersten Untersuchung, die als Vergleichsmaßstab dienen soll, wird die Produktionsprogrammplanung durch HPPLAN durchgeführt – für die dort verwendeten, periodenunabhängigen Kapazitätsbelastungsfaktoren wurden aus den gemessenen, periodenspezifischen Kapazitätsbelastungsfaktoren durchschnittliche Kapazitätsbelastungsfaktoren ermittelt. In der zweiten Untersuchung wird die Produktionsprogrammplanung durch das Modell SK-HPPLAN durchgeführt. In beiden Untersuchungen werden fünf Produktionsprogramme zu jeweils identischen Kundenaufträgen über jeweils 20 Wochen ermittelt und simuliert.

Die Güte der Kapazitätsabschätzung in der Produktionsprogrammplanung zeigt sich insbesondere in der Verspätung von Produktionsaufträgen. Ist die Kapazitätsabschätzung gut, so treten nur selten Fälle auf, in denen

Kapazitätsengpässe zu verspätet fertiggestellten Produktionsaufträgen führen. Deswegen wird nachfolgend die Güte der Kapazitätsabschätzung in der Produktionsprogrammplanung an der Verspätung von Produktionsaufträgen gemessen. In Tabelle 2 sind die Anzahlen N der Produktionsaufträge je Produktionsprogramm dargestellt. $V_i^\#$ ist die Anzahl der verspätet fertiggestellten Produktionsaufträge von N ($|\{i: 1 \leq i \leq N, V_i > 0\}|$). Der Anteil der verspätet fertiggestellten Produktionsaufträge ist $\frac{V_i^\#}{N}$. Weiterhin wird der Mittelwert $\mu(V_i)$ und die Streuung $\sigma(V_i)$ der Verspätungen aller Produktionsaufträge angegeben.

Tabelle 2: Verspätung der Produktionsaufträge

	HPPLAN					SK-HPPLAN				
Produktionsprogramm	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
N	836	835	844	859	841	824	840	843	851	824
$V_i^\#$	93	129	76	91	85	52	42	41	52	63
$\frac{V_i^\#}{N}$	0,11	0,15	0,09	0,11	0,10	0,06	0,05	0,05	0,06	0,08
$\mu(V_i)$	0,04	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
$\sigma(V_i)$	0,12	0,13	0,10	0,12	0,10	0,05	0,07	0,06	0,08	0,05

Der Anteil verspäteter Produktionsaufträge sinkt durch den Einsatz von SK-HPPLAN anstelle von HPPLAN um 20 bis 67 %. Der Mittelwert der Verspätung sinkt um 33 bis 67 %. Dieses Ergebnis wird im Folgenden analysiert. Die statischen Kapazitätsbelastungsfaktoren bilden lediglich die mittlere Kapazitätsbelastung ab, die durch die Produktion eines Endprodukts entsteht. Somit ist zu erwarten, dass bei der Realisierung eines durch HPPLAN ermittelten Produktionsprogramms sehr häufig größere Kapazitätsbelastungen verursacht werden, als bei der Planung berücksichtigt. Wenn in einer Periode eine Kapazitätsrestriktion in HPPLAN aktiv ist, und gleichzeitig der zugehörige, gemessene Kapazitätsbelastungsfaktor $f_{t, j, k, z}^{HP}$ größer ist als der in der Planung angenommene ($f_{t, j, k, z}^{HP} > f_{j, k, z}^{HP}$), dann wurde bei der Realisierung des Produktionsprogramms die Kapazitätsrestriktion verletzt. In der Folge steht in dieser Periode zu wenig Kapazität zur Befriedigung des Produktionsprogramms zur Verfügung; es entstehen verspätete Produktionsaufträge. Die Reduktion der verspäteten Produktionsaufträge bei der Verwendung von SK-HPPLAN anstelle von HPPLAN zeigt, dass die Berücksichtigung der Streuung der Kapazitätsbelastungsfaktoren durch die Verwendung von simulativ ermittelten Kapazitätsbelastungsfaktor-Szenarien ein in der Realisierung besser zulässiges Produktionsprogramm erzeugt.

5 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz simulativ ermittelter Kapazitätsbelastungsfaktor-Szenarien in der Produktionsprogrammplanung zur verspätungsfreien Abarbeitung der Produktionsaufträge beiträgt und damit die Güte der Kapazitätsabschätzung in der Produktionsprogrammplanung verbessert. Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Berücksichtigung von Warteschlangeneffekten auf die Kapazitätsabschätzung in der Produktionsprogrammplanung sowie in der Kombination des vorgestellten Ansatzes zur Berücksichtigung unsicherer Kapazitätsbelastungen mit Ansätzen zur Berücksichtigung von Bedarfsunsicherheit.

Literatur

- Asmundsson J.; Rardin R. L.; Turkseven C. H.; Uzsoy R.: Production planning with resources subject to congestion. *Naval Research Logistics* 56 (2009), S.142-157.
- Byrne M.; Bakir M. A.: Production planning using a hybrid simulation-analytical approach. *International Journal of Production Economics* 59 (1999), S. 305-311.
- Byrne M.; Hossain M.: Production planning: An improved hybrid approach. *International Journal of Production Economics* 93-94 (2005), S. 225-229.
- Drexl, A.; Fleischmann, B.; Günther, H.-O.; Stadler, H.; Tempelmeier, H.: Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme. *Zeitschrift für Betriebswirtschaftliche Forschung* 46 (1994).
- Günther H.; Tempelmeier H.: *Produktion und Logistik*. Berlin u.a.: Springer, 2012.
- Herrmann F.: *Operative Planung in IT-Systemen für die Produktionsplanung und -steuerung*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2011.
- Hung Y.; Leachman R. C.: A Production Planning Methodology for Semiconductor Manufacturing Based on Iterative Simulation and Linear Programming Calculations. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 9 (1996), S. 257-269.
- Kacar N. B.; Irdem D. F.; Uzsoy R.: An Experimental Comparison of Production Planning Using Clearing Functions and Iterative Linear Programming-Simulation Algorithms. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 25 (2012), S. 104-117.
- Kall, P.; Mayer, J.: *Stochastic linear programming*. New York: Springer, 2011.
- Kim B.; Kim S.: Extended model for a hybrid production planning approach. *International Journal of Production Economics* 73 (2001), S. 165-173.
- Kurbel, K.: *Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie*. München: Oldenbourg, 2011.
- Pahl J.; Voß S.; Woodruff D. L.: Production planning with load dependent lead times: an update of research. *Annals of Operations Research* 153 (2007), S. 297-345.
- Ravindran A.; Kempf K. G.; Uzsoy R.: Production planning with load-dependent lead times and safety stocks for a single product. *International Journal of Planning and Scheduling* 1 (2011), S. 58-89.