

Einsatz ereignisdiskreter Simulation zur simultanen Allokation von Bestands-, Kapazitäts- und Zeitpuffern in variabilitätsbeeinflussten Produktionssystemen

***Discrete-event simulation for simultaneous allocation of inventory,
capacity and time buffers in variability-influenced production systems***

David Lenze, TU Dortmund, Dortmund (Germany),
david.lenze@ips.tu-dortmund.de

Julian Schallow, Institut für Forschung und Transfer (RIF) e. V., Dortmund
(Germany), julian.schallow@rif-ev.de

Jochen Deuse, TU Dortmund, Dortmund (Germany) und University of Technology,
Sydney (Australia), jochen.deuse@ips.tu-dortmund.de

Abstract: In today's production systems, one of the main requirements is to manage the prevailing variability effects. The targeted use of buffers is a suitable approach for this purpose, whereby the combination of inventory, capacity and time buffers is most effective. This paper therefore describes an integrated approach to the simultaneous allocation of inventory, capacity and time buffers in order to achieve an optimised control of the variability-related influences in production systems. This framework combines the simulation-based evaluation of buffer allocations with statistical experimental design approaches. For a higher degree of practicability of the approach, the evaluative method module of the discrete-event simulation contains a (semi-) automatic simulation model generation. The description of a prototypical industrial application of the methodology underlines the suitability of the proposed approach.

1 Motivation

Die zunehmende Individualisierung der Märkte und eine stetig wachsende Erwartungshaltung der Kunden hinsichtlich Lieferfähigkeit und verkürzter Lieferzyklen stellen produzierende Unternehmen vor große Herausforderungen. Die aus diesen Anforderungen entstehenden Variabilitätseinflüsse sind eine Hauptursache für das Auftreten von Verschwendung innerhalb der Produktion, die in dieser Sichtweise als Symptom auftritt und nur über eine Reduzierung der Ursachen beeinflusst werden kann (Hopp und Spearman 2004). Da sich ein erhöhtes

Maß an Variabilität immer nachteilig auf die Leistungsfähigkeit eines Produktionssystems auswirkt, stellt Variabilitätsmanagement einen wesentlichen Aspekt der Produktionsforschung dar (Hopp und Spearman 2009). Für einen zielgerichteten Umgang mit der in der Produktion auftretenden Variabilität ist eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Variabilitätsklassen erforderlich (Lorentzen et al. 2011). Während Leistungs-, Verfügbarkeits- und Qualitätsverluste gemeinhin als nicht-wertschöpfend gelten und eliminiert werden sollten, sind bspw. Wettereinflüsse oder Krankenstand zwar nicht-wertschöpfend, können jedoch in weiten Teilen nicht eliminiert werden, weshalb sie in ihren Auswirkungen beherrscht werden müssen (Wiegand et al. 2014). Darüber hinaus besitzt wertschöpfende Variabilität in Form individueller Kundenwünsche oder Liefertermine eine gesteigerte Bedeutung. Diese sollte nicht eliminiert werden, da ihre Existenz eine unmittelbare Steigerung des Kundennutzens bewirkt und daher mittelbar eine unternehmerische Wertschöpfung generiert (Maschek et al. 2014). Bedingt durch diese nicht zu eliminierenden Variabilitätseinflüsse besteht ein Bedarf an Ansätzen zur Beherrschung ihrer Auswirkungen, wobei der Einsatz von Puffern hinsichtlich dieser Zielstellung als besonders effizient zu bewerten ist (Palominos et al. 2009; Deuse et al. 2018).

2 Bestehende Ansätze zum Einsatz von Puffern

Grundsätzlich ist innerhalb von Produktionssystemen jede Form von Asynchronität zwischen der Nachfrage und dem internen Transformationsprozess ein Auslöser für die Entstehung von Puffern (Hopp und Spearman 2009). Diese verfolgen das Ziel, die negativen Auswirkungen der systemimmanenten Variabilität auf die Produktionsleistung abzufangen (Pound et al. 2014). In dieser allgemeinen Definition wird der Nutzen von Puffern stark betont, die Pufferausprägung hinsichtlich Art, Größe und Position bleibt jedoch offen. In der Produktion und Logistik ist eine nahezu ausschließliche Betrachtung von Bestandspuffern wahrzunehmen. Demgegenüber definieren Hopp und Spearman (2009) neben Bestands- ebenfalls Kapazitäts- sowie Zeitpuffer und weisen auf ihre Schutzwirkung für Produktionssysteme hin. Diese Sichtweise basiert auf der einfachen Annahme, dass in variabilitätsbehafteten Systemen immer Wartezeiten für Produkte (Bestandspuffer), Kunden (Zeitpuffer) oder Ressourcen (Kapazitätspuffer) entstehen (Pound et al. 2014). Die drei Pufferarten sind dabei in ihrer Wirkung auf Produktionssysteme untereinander nahezu vollständig substituierbar, weshalb eine integrierte Betrachtung der drei Pufferarten im Hinblick auf ihre Wirkung als zielführend zu bewerten ist. Somit resultiert hinsichtlich der Puffergestaltung die Fragestellung, wo, in welcher Größe und welche Kombination der drei Pufferarten die Leistung eines Produktionssystems besonders positiv beeinflussen.

Die bisherigen Entwicklungen im Bereich der Optimierungsansätze für Puffer sind unter dem Begriff des Pufferallokationsproblems zusammengefasst. Abstrahiert beschrieben ist das Pufferallokationsproblem ein kombinatorisches Optimierungsproblem zur Ermittlung von Pufferkonfigurationen, durch deren Implementierung innerhalb eines Produktionssystems eine vorab definierte Zielfunktion optimiert wird (Almmani 2012; Narasimhamu et al. 2014; Costa et al. 2015). Durch seine Klassifikation als stochastisches, i. d. R. nichtlineares, ganzzahliges, NP-schweres Optimierungsproblem ist das Pufferallokationsproblem

ein komplexes Problem der Produktionssystemgestaltung (Papadopoulos und Vidalis 1998; Chaharsooghi und Nahavandi 2003; Alon et al. 2005). Die Lösung derartiger Probleme erfordert insbesondere für komplexe Produktionssysteme Ansätze, deren Struktur aus zwei ineinandergreifenden Methoden, einer generativen und einer evaluativen Methode besteht. (Spinellis und Papadopoulos 2000; Demir et al. 2012). Dabei existieren vielzählige Ausprägungen der beiden Methodenbestandteile, die individuelle Vor- und Nachteile aufweisen. Auf Seiten der evaluativen Methoden besitzen exakte und analytische Lösungsverfahren deutliche Einschränkungen bei der Abbildung komplexer Lösungsszenarien, da diese in vielen Fällen nicht mit vertretbarem Aufwand modelliert werden können (Colledani et al. 2010). Zwar ermöglichen Näherungsverfahren die Abbildung eben dieser Szenarien, jedoch weisen sie deutliche Einschränkungen hinsichtlich der Abbildung dynamischer Effekte innerhalb der Produktion ab. Da diese aus den im Vorkapitel dargestellten Gründen eine wesentliche Rolle für eine praxistaugliche Anwendung spielen, sind die analytischen Evaluationsmethoden in der Praxis deutlich weniger verbreitet als die präferiert eingesetzten und in der Anwendung aufgrund ihrer guten Abbildungsfähigkeiten für tauglich befundenen Simulationsansätze. Unter den generativen Methoden weisen Suchverfahren entsprechend der analytischen Evaluationsverfahren nachteilige Eigenschaften hinsichtlich der Abbildbarkeit der Realität auf. Zwar beheben Metaheuristiken diese Nachteile speziell in hybriden Ansätzen, jedoch sind sie aufgrund der erforderlichen Parametrisierung zur Anpassung auf das jeweilige Pufferproblem schwieriger zu handhaben und erfordern somit Kompetenzen, die nicht jedem Anwender in der Praxis zur Verfügung stehen (MacGregor Smith und Cruz 2005). Standardisierter einsetzbar und aufgrund der zahlreichen Strategien zur Versuchsplanentwicklung verbessert auf das Problem anpassbar sind Ansätze der statistischen Versuchsplanung. Die gute Kombinierbarkeit mit Simulationsansätzen in der Evaluation macht eine Kombination der ereignisdiskreten Simulation und der statistischen Versuchsplanung zielführend. Bei einer Detailbetrachtung der in allen Klassen verfügbaren Ansätze ist deutlich festzustellen, dass der Betrachtungsfokus zur Lösung des Pufferallokationsproblems nahezu ausschließlich auf der Allokation von Bestandspuffern liegt. Eine simultane Betrachtung und Allokation von Bestands-, Kapazitäts- und Zeitpuffern bleibt hingegen bisher aus (Demir et al. 2014). Die drei Pufferkomponenten Kapazität, Bestand und Zeit wirken jedoch wie bereits beschrieben wechselseitig aufeinander ein, weshalb für eine optimierte Beherrschung der in industriellen Produktionssystemen vorherrschenden Variabilitätseinflüsse eine geeignete Kombination dieser einzusetzen ist. Die Bestimmung des optimalen, pufferbezogenen Betriebspunkts eines Produktionssystems erfordert somit eine simultane Berücksichtigung aller drei Pufferarten. Auf Basis einer Betrachtung der Gewichtung verfahrensspezifischer Vor- und Nachteile im Anwendungsumfeld (geringere Bedeutung der Lösungsgeschwindigkeit, mittlere Bedeutung der Lösungsgenauigkeit, hohe Bedeutung der Abbildungstreue, hohe Bedeutung der Einfachheit des Verfahrens) ist die Simulation als Evaluationsverfahren als gut geeignet zu bewerten. Aufgrund ihrer Fähigkeit auch *komplexe Produktionssysteme realitätsgetreu abbilden* zu können, ist sie in vielfältigen Praxisanwendungen einsetzbar (Can et al. 2008). Darüber hinaus erzeugt sie eine hohe Transparenz, was zu guter Akzeptanz in der praktischen Anwendung und einer einfachen Interpretierbarkeit der Ergebnisse führt. Die Schwachstelle einer geringen Lösungsgeschwindigkeit besitzt im Hinblick auf

die Problemstellung der Pufferallokation eine geringere Bedeutung. Die Pufferallokation ist zwar in regelmäßigen Zeitabständen zu wiederholen, bspw. um auf signifikante Verschiebungen im Produktionsprogramm zu reagieren, eine betriebsbegleitende Entscheidungsunterstützung nahe Echtzeit ist jedoch nicht erforderlich. Ansätze unter Verwendung der statistischen Versuchsplanung im generativen Teil weisen die geringsten Anwendungsvoraussetzungen auf und sind daher zur Puffergestaltung in der industriellen Praxis am besten geeignet. Darüber hinaus sind die experimentell ermittelten Ergebnisse einfach interpretierbar und ihre Anwendungskomplexität ist, verglichen mit Metaheuristiken oder Suchverfahren, deutlich geringer. Schwachstellen hinsichtlich des gering gewichteten Kriteriums der Lösungsgeschwindigkeit in der häufigen Kombination mit dem evaluativen Verfahren der Simulation und deren Laufzeiten können durch die Vermeidung einer vollständigen Lösungsraumuntersuchung hinreichend reduziert werden (Siebertz et al. 2017). Aufgrund ihrer spezifischen Vorteile ist die Anwendung von Ansätzen der statistischen Versuchsplanung zur Puffergestaltung in komplexen, industriellen Produktionssystemen somit zusammenfassend als zielführend zu bewerten.

3 Methodik zur simultanen Allokation von Bestands-, Kapazitäts- und Zeitpuffern

Vor dem Hintergrund des aufgezeigten Bedarfs einer simultanen Bestands-, Kapazitäts- und Zeitpufferallokation wurde die in Abbildung 1 dargestellte Methodik entwickelt. Diese folgt dem im Stand der Technik verbreiteten integrierten Ansatz zur Lösung des Pufferallokationsproblems. Sie setzt sich aufgrund der aufgezeigten Vorteile aus einem simulationsbasierten evaluativen Methodenbaustein (EMB) und einem generativen Methodenbaustein (GMB) zur statistischen Versuchsplanung zusammen.

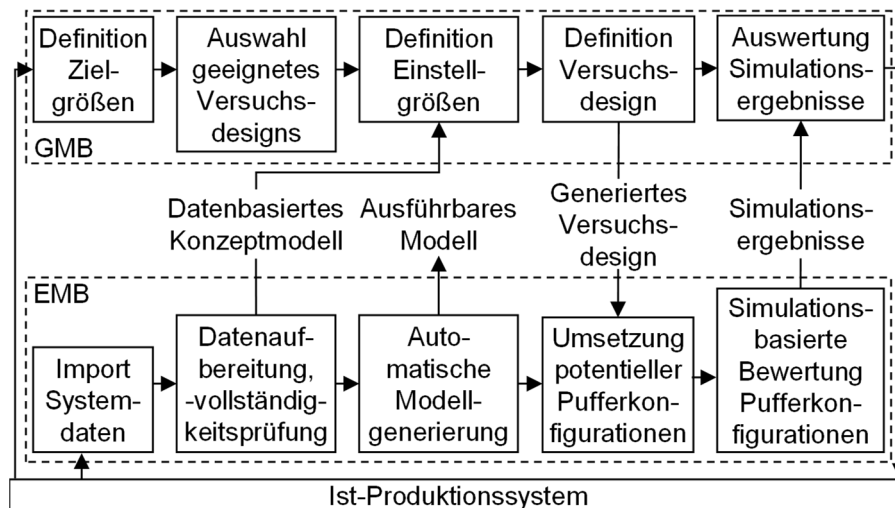


Abbildung 1: Konzept zur simultanen Allokation von Bestands-, Kapazitäts-, und Zeitpuffern

3.1 Evaluativer Methodenbaustein

Der evaluative Methodenbaustein umfasst sowohl die Generierung als auch den Einsatz des Materialflusssimulationsmodells des zu betrachtenden Produktionssystems, um potentielle Pufferkonfigurationen zu bewerten (Abb. 1). Die Generierung des Materialflusssimulationsmodells erfolgt dabei entsprechend dem Ansatz der automatischen, datengetriebenen Modellgenerierung. Spezifischer ist die zur Anwendung kommende Vorgehensweise der Klassifizierung nach Eckhardt (2002) folgend als parametrischer Ansatz zu definieren. In diesem Rahmen erfolgt zunächst der Aufbau einer datenbezogenen Repräsentation des zu betrachtenden Produktionssystems und die Spezifikation definierter Parameter. Für den Datenimport herrscht dabei eine enge Nutzerführung vor, indem der Anwender über Dialoge explizite Informationen erhält, welche Daten in welchem Format zu importieren sind. Dadurch ist die Methodik in der Lage die Qualität und Validität der zu importierenden Daten positiv zu beeinflussen. Im Anschluss erfolgt die Aufbereitung der importierten Daten, d. h. Datenformatierung und -anreicherung sowie eine Vollständigkeitsprüfung. Im Falle fehlender Datensätze erfolgt die standardisierte Information des Anwenders, dass Daten zu ergänzen und mit welchen Verfahren diese zu erheben sind. Die so erfassten Systemlast-, Organisations- und technischen Daten werden in einem datenbasierten Konzeptmodell zusammengefasst. Dieses besitzt eine standardisierte Datenstruktur und stellt eine geeignete Basis zur Automatisierung der Modellgenerierung sicher. Dazu werden basierend auf aus dem Konzeptmodell zu extrahierenden Parametern, in Bibliotheken gespeicherte Simulationsbausteine durch den Modellgenerator selektiert und konfiguriert. Dabei wird nicht ausschließlich auf bereits in der zur Anwendung kommenden Software Siemens Plant Simulation (v16) vorhandene Simulationsbausteine zurückgegriffen. Vielmehr werden weiterführende Bausteine, die eine parameterbasierte, automatische Generierung von dynamischen Steuerungseinflüssen (bspw. Auftragserzeugung und -freigabe) ermöglichen, entwickelt und bereitgestellt.

3.2 Generativer Methodenbaustein

Der generative Methodenbestandteil nutzt anschließend das effizient generierte Simulationsmodell zur Identifikation optimierter Pufferkonfigurationen, bestehend aus Bestands-, Kapazitäts- sowie Zeitpuffern, und übernimmt somit die generative Funktion innerhalb der Gesamtmethodik (Abb. 1). Dieser Baustein integriert Ansätze der statistischen Versuchsplanung und stellt somit eine effiziente Planung und Auswertung der durchzuführenden Simulationsexperimente bzw. -ergebnisse sicher. In einem ersten Schritt erfolgt zunächst die Definition der zu betrachtenden Zielgrößen. Der Stand der Technik zum Pufferallokationsproblem stellt verschiedene Zielsetzungen, wie die Maximierung der Systemausbringung oder die Minimierung des mittleren Bestandsniveaus bzw. der im Produktionssystem existierenden Bestandspufferplätze, vor (Demir et al. 2014). Jedoch weist bereits Park (1993) darauf hin, dass in praktischen Anwendungen, die den Fokus der vorliegenden Methodik darstellen, i. d. R. monetäre Zielgrößen wie Kosten, Gewinn oder Umsatz heranzuziehen sind. Zudem eignen sich monetäre Zielgrößen als einheitliche Bewertungsgrundlage für die drei Pufferfaktoren Bestand, Kapazität und Zeit. Daher wird in der vorliegenden Methodik die Zielgröße der Gesamtpufferkosten genutzt, um die Wirtschaftlichkeit potentieller

Pufferkonfigurationen zu bewerten. Diese repräsentieren die Summe der Kosten der eingesetzten Bestands-, Kapazitäts- und Zeitpuffer. Die Ermittlung dieser Kostengrößen hängt dabei stark von der Ausprägung der einzelnen Pufferarten, der Granularität der Kostenermittlung sowie der vom Anwender zu importierenden Kostengrößen ab. Die Bestandspufferkosten können sich aus Flächen- bzw. Mietkosten, Abschreibungskosten für Lagereinrichtungen sowie dem gebundenen Kapital für das in diesen enthaltenen Material ergeben. Zur Bewertung des Kapazitätspuffers lassen sich hingegen die anfallenden Personalaufwände sowie die eingesetzten Betriebsmittel durch entsprechende Stundensätze monetär bewerten. Zur Ermittlung der Zeitpufferkosten ist es erforderlich, die Abweichung des bestätigten Liefertermins vom Kundenwunschtermin monetär zu bewerten. Monetäre Auswirkungen einer derartigen Abweichung kann ein Umsatzverlust, bspw. durch Kundenauftragsverlust oder Verzugsstrafen sein. Neben Betrachtung des Kosteneinflusses potentieller Pufferkonfigurationen ist es zudem erforderlich, Anforderungen hinsichtlich der logistischen Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu definieren. Dabei sind in Abhängigkeit des zugrundeliegenden Anwendungsfalls verschiedene logistische Zielgrößen, wie Liefertermintreue, Durchlaufzeit oder Durchsatz, zu nutzen. Auf Basis dieser Größen sind anschließend Rahmenbedingungen der Puffergestaltung zu definieren.

Im Anschluss an die Zielgrößendefinition ist ein geeignetes Versuchsdesign auszuwählen, wobei im Rahmen der Puffergestaltung die Nutzung eines Latin Hypercube Designs (LHD) als geeignet zu bewerten ist. LHD besitzen bei der Planung und Analyse von Simulations- bzw. Computerexperimenten einen hohen Verbreitungsgrad und weisen ein geeignetes Aufwand-Nutzen-Verhältnis auf, weshalb sie sich daher sehr gut zur Untersuchung großer Lösungsräume eignen (Viana 2013; Kleijnen 2015). Im Rahmen praxisrelevanter Aufgabenstellungen, die im Anwendungsfokus der Methodik stehen, ist der entsprechende Lösungsraum selten stark begrenzt, weshalb der Einsatz von LHD in diesen daher sehr geeignet ist. Darüber hinaus stellen LHD geringste Anforderungen hinsichtlich erforderlichen Vorwissens über bestehende funktionale Zusammenhänge zwischen den einzelnen Einflussgrößen (Viana 2013). Aufgrund der Tatsache, dass bei konzeptionellen bzw. gestalterischen Aufgabenstellungen wie der Puffergestaltung i. d. R. die funktionalen Zusammenhänge der einzelnen Puffergrößen nicht bekannt sind, ist dies ein zusätzliches Argument für den Einsatz eines LHD. Nach Auswahl eines geeigneten Versuchsdesigns sind die zu betrachtenden, variablen Einflussgrößen, d. h. die durch den Anwender definierten Bestands-, Kapazitäts- und Zeitpuffergrößen, zu übergeben. Die erforderlichen Daten bzw. Informationen sind dazu dem datenbasierten Konzeptmodell zu entnehmen. Darüber hinaus liefert das Konzeptmodell Informationen über zu berücksichtigende Extremwerte sowie nicht zulässige Wertebereiche der jeweiligen Puffergrößen, welche die im realen Anwendungsfall vorliegenden Rahmenbedingungen abbilden. Die gemäß grundlegender Vorgehensweise sich anschließende Festlegung der Einstellstufen der Einflussfaktoren entfällt, da entsprechend der Definition des LHD die Stufenanzahl je Einstellfaktor der Versuchsanzahl entspricht. Die Einstellstufen der Einflussfaktoren sind dabei zwischen dem oberen und dem unteren Grenzwert gleichverteilt. Die im so definierten LHD enthaltenen Pufferkonfigurationen werden anschließend an den evaluativen Methodenbaustein übergeben und in diesem simulationsbasiert bewertet.

Die Auswertung der Analyseergebnisse erfolgt zur Sicherstellung einer hohen Praxistauglichkeit innerhalb der vorgestellten Methodik mehrstufig. Zuerst erfolgt basierend auf den Simulationsergebnissen die Ermittlung einer Pareto-Front, welche diejenigen Punkte des Lösungsraums identifiziert, in denen eine Pufferkostenreduktion lediglich bei gleichzeitiger Verschlechterung der zu betrachtenden logistischen Zielerreichung möglich ist. Dadurch ist der Anwender bereits sehr schnell in der Lage für verschiedene Vorgaben der Logistikleistung kostenoptimierte Pufferkonfigurationen zu identifizieren. Darauf aufbauend erfolgt im Rahmen der Methodik die Anpassung eines Modells auf die erzeugten Simulationsdaten. Hierbei werden die Effekteinflüsse der verschiedenen Pufferfaktoren analysiert, um zunächst diejenigen mit signifikantem Einfluss zu identifizieren und Informationen im Hinblick auf die Effekte der Anpassung einzelner Pufferfaktoren zu erhalten. Als letzter Schritt der simultanen Puffergestaltung ist abschließend eine Optimierung des angepassten Modells vorzunehmen, um eine optimale Einstellung der Pufferfaktoren zu identifizieren, die abschließend im Ist-Produktionssystem zu implementieren ist.

4 Anwendung der Methodik in der Elektronikfertigung

Um die Praxistauglichkeit der Methode zu demonstrieren und weitere Impulse für eine anwendungsnahe Weiterentwicklung zu erhalten, wurde die Methodik anhand eines Fallbeispiels aus der variantenreichen Elektronikfertigung angewendet und auf ihre Eignung im Evaluationsprozess für Pufferdesigns getestet. Das Fallbeispiel bildet eine klassische Prozesskette der Elektronikfertigung ab, die sich aus einer Flachbaugruppenfertigung (kurz: Vorfertigung) und einer daran anschließenden Gerätemontage (kurz: Montage) zusammensetzt (Abb. 2).

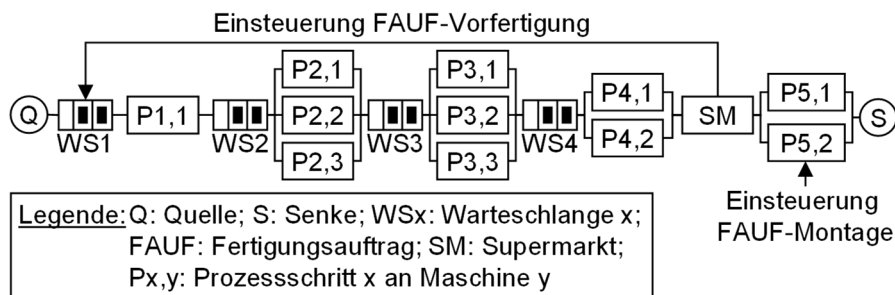


Abbildung 2: Prozesskette der variantenreichen Elektronikfertigung

An der Schnittstelle der Fertigungsstufen erfolgt die Entkopplung der Materialflüsse durch einen Flachbaugruppensupermarkt. Bei Einsteuerung eines Fertigungsauftrags in die Montage werden die erforderlichen Flachbaugruppen aus dem Supermarkt entnommen. Zur Wiederauffüllung des Supermarkts werden in Abhängigkeit dessen Füllstandes Fertigungsaufträge in die Vorfertigung eingesteuert. Innerhalb der Vorfertigung durchlaufen die Flachbaugruppen die Prozessschritte Surface-Mount Technology (Prozessschritt 1), In-Circuit-Test (Prozessschritt 2), Röntgeninspektion (Prozessschritt 3) und Through-Hole Technology (Prozessschritt 4), bevor sie in den

Supermarkt eingelagert werden. Die Verkettung der verschiedenen Prozessschritte erfolgt durch Warteschlangen. Die anschließende Gerätemontage (Prozessschritt 5) erfolgt auf zwei parallelen Montagelinien.

Die Variabilität im System wird durch stochastisch verteilte Bearbeitungszeiten sowie den zeitlich und mengenmäßig schwankenden Auftragseingang induziert. Innerhalb des Systems erfolgt die Pufferung vorherrschender Variabilitätseinflüsse durch eine Kombination aus Zeit-, Kapazitäts- und Bestandspuffern, die in Form der folgenden Pufferfaktoren ausgeprägt sind:

- Bestandspuffer: Supermarktkapazität (variantenspezifisch) (X1 bis X20) [Stück]
- Bestandspuffer: Warteschlangenkapazität Vorfertigung (X23 bis X26) [Stück]
- Kapazitätspuffer: Schichtanzahl Vorfertigung (X21) und Montage (X22) [Stück]
- Zeitpuffer: Differenz zwischen bestätigtem Liefertermin und Kundenwunschtermin (X27) [Tage]

Die zu optimierende logistische Zielgröße des Systems ist die Liefertermintreue. Diese ist als prozentualer Anteil der Aufträge definiert, deren tatsächlicher Liefertermin vor dem zugehörigen bestätigten Liefertermin liegt. Anhand dieser Zielgröße ist eine akzeptable logistische Leistung durch eine Liefertermintreue über 90 % definiert, bei dessen Erreichen die Pufferkosten zu minimieren sind. Basierend auf den oben genannten Pufferfaktoren wurde ein LHD (Versuchszahl:1000) in der Statistiksoftware JMP erzeugt und in die Simulationssoftware Plant Simulation integriert. Die Rückführung der Simulationsergebnisse und deren Analyse in JMP ermöglichen die nachfolgenden Ergebnisdiskussionen.

In der Analyse der Simulationsergebnisse zeigt sich als kostenoptimaler pufferbezogener Betriebspunkt die Faktorzusammenstellung [662; 566; 151; 240; 443; 946; 832; 595; 474; 247; 829; 875; 359; 679; 78; 474; 269; 66; 286; 518; 15; 21; 2091; 105; 734; 1105; 1] bei einer Liefertermintreue von 100 %. Die Generierung einer Pareto-Front bestätigt die starke Dominanz des gefundenen Punktes und zeigt auf, dass eine Pufferkostenreduktion lediglich unter teils erheblichen Leistungseinbußen (Liefertermintreue < 90 %) möglich ist. Eine Analyse der Effekteinflüsse zeigt, dass die Ergebnisse am stärksten positiv mit einer Erhöhung der Schichtanzahl in der Vorfertigung sowie insbesondere in der Endmontage korrelieren. Zudem hat eine Erhöhung der variantenspezifischen Supermarktkapazitäten, insbesondere für unregelmäßig und in großen Losen nachgefragte Varianten des Auftragsprogramms, einen starken Einfluss. Die Nutzung des Zeitpuffers besitzt zwar einen hohen Einfluss hinsichtlich der Liefertermintreue, ist jedoch aus Kostengründen in den präferierten Lösungen nur schwach vertreten. Ein geringer Einfluss auf die Liefertermintreue und hohe Pufferkosten führten zu einer niedrigen Auslegung der Bestandspuffer in Form der Warteschlangen in der Vorfertigung. Hinsichtlich der Bewertung des gefundenen Ergebnisses ist darauf hinzuweisen, dass die gefundene Lösung keine universell einsetzbare Pufferkonfiguration ist. Vielmehr stellt diese eine spezifische, optimierte Pufferkonfiguration für das zu Grunde gelegte Produktionsprogramm dar. Bei einer deutlichen Abweichung von diesem Produktionsprogramm sieht die Methodik ein erneutes Durchlaufen des Pufferauslegungszyklus vor.

5 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wurde ein neuartiger Ansatz zur simultanen Allokation von Bestands-, Kapazitäts- und Zeitpuffern beschrieben. Dieser integriert die Methodik der ereignisdiskreten Simulation zur Evaluation potentieller Pufferkonfigurationen mit der statistischen Versuchsplanung zur Generierung optimierter Pufferkonfigurationen. Der evaluative Methodenbaustein umfasst dabei erste Ansätze der datengetriebenen Modellgenerierung, um den anwenderseitigen Bedarf an Expertenwissen und den Zeitaufwand der Modellgenerierung zu reduzieren. Die vorgestellte Methodik wurde prototypisch anhand eines Fallbeispiels angewendet, wobei die grundlegende Funktion der Methodik demonstriert werden konnte.

Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich einer ganzheitlichen Validierung der Gesamtmethodik. Diesbezüglich ist die Anwendung in unterschiedlichen Fertigungsszenarien geplant, wodurch die Sensitivität der Ergebnisse hinsichtlich verschiedener Systemtypologien, Produktionsprogramme und Kostenfunktionen untersucht werden kann. Zudem ist die Ergebnisauswertung sowie die Optimierung des angepassten mathematischen Modells zur Identifikation einer optimalen Pufferkonfiguration im Rahmen weiterer Anwendungsfälle zu validieren. Im Rahmen der Modellgenerierung besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich einer automatischen Initialisierung und Validierung des Simulationsmodells.

Literatur

- Almomani, M. H.: A selection approach for solving buffer allocation problem. In: *International Journal of the Physical Sciences* 7 (2012) 3, S. 413-422
- Alon, G.; Kroese, D. P.; Raviv, T.; Rubinstein, R. Y.: Application of the cross-entropy method to the buffer allocation problem in a simulation-based environment. In: *Annals of Operations Research* 134 (2005) 1, S. 137-151
- Can, B.; Beham, A.; Heavey, C.: A comparative study of genetic algorithm components in simulation-based optimisation. In: Mason, S.; Hill, R.; Mönch, L.; Rose, O.; Jefferson, T.; Fowler, J. W. (Hrsg.): *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference (WSC), Miami (USA), 7.-10. December 2008*, S. 1829-1837.
- Chaharsooghi, S. K.; Nahavandi, N.: Buffer allocation problem, a heuristic approach. In: *Scientia Iranica* 10 (2003) 4, S. 401-409
- Colledani, M.; Ekvall, M.; Lundholm, T.; Moriggi, P.; Polato, A.; Tolio, T.: Analytical methods to support continuous improvements at Scania. In: *International Journal of Production Research* 48 (2010) 7, S. 1913-1945.
- Costa, A.; Alfieri, A.; Matta, A.; Fichera, S.: A parallel tabu search for solving the primal buffer allocation problem in serial production systems. In: *Computers & Operations Research* 64 (2015), S. 97-112.
- Demir, L.; Tunali, S.; Eliiyi, D. T.: An adaptive tabu search approach for buffer allocation problem in unreliable non-homogenous production lines. In: *Computers & Operations Research* 39 (2012) 7, S. 1477-1486.
- Demir, L.; Tunali, S.; Eliiyi, D. T.: The state of the art on buffer allocation problem. A comprehensive survey. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 25 (2014) 3, S. 371-392.

- Deuse, J.; Heuser, C.; Konrad, B.; Lenze, D.; Maschek, T.; Wiegand, M.; Willats, P.: Pushing the limits of lean thinking—Design and management of complex production systems. In: Viles, E.; Ormazábal, M.; Lleó, A. (Hrsg.): Closing the gap between practice and research in industrial engineering, Cham: Springer International Publishing 2018, S. 335-342.
- Eckardt F.: Ein Beitrag zu Theorie und Praxis datengetriebener Modellgeneratoren zur Simulation von Produktionssystemen. Aachen: Shaker 2002.
- Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: To pull or not to pull: What is the question? In: Manufacturing & Service Operations Management 6 (2004) 2, S. 133-148.
- Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: Factory physics, 3. Edition. Boston: McGraw-Hill 2009.
- Kleijnen, J. P. C.: Design and Analysis of Simulation Experiments, 2. Edition. Cham: Springer 2015.
- Lorentzen, K.; Maschek, T.; Richter, R.; Deuse, J.: Entwicklung einer Variabilitätstypologie. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011) 4, S. 214-218.
- MacGregor Smith, J.; Cruz, F.R.B.: The buffer allocation problem for general finite buffer queueing networks. In: IIE Transactions 37 (2005) 4, S. 343-365.
- Maschek, T.; Heuser, C.; Hasselmann, Veit-Robert; Deuse, Jochen; Willats, Peter: Variabilitätsbasierte Klassifizierung von Produktionssystemen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 9, S. 591-594.
- Narasimhamu, K. L.; Reddy, V. Venugopal; Rao, C.S.P.: Optimal buffer allocation in tandem closed queueing network with single server using PSO. In: Procedia Materials Science 5 (2014), S. 2084-2089.
- Palominos, P.; Quezada, L.; Moncada, G.: Modeling the response capability of a production system. In: International Journal of Production Economics 122 (2009) 1, S. 458-468.
- Papadopoulos, H.; Vidalis, M.: Optimal buffer storage allocation in balanced reliable production lines. In: International Transactions in Operational Research 5 (1998) 4, S. 325-339.
- Park, T.: A two-phase heuristic algorithm for determining buffer sizes of production lines. In: International Journal of Production Research 31 (1993) 3, S. 613-631.
- Pound, E. S.; Spearman, M. L.; Bell, J. H.: Factory physics for managers. How leaders improve performance in a post-lean six sigma world. Europe: McGraw-Hill Education Ltd 2014.
- Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments, 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2017.
- Spinellis, D.; Papadopoulos, C. T.: A simulated annealing approach for buffer allocation in reliable production lines. In: Annals of Operations Research 93 (2000) 1, S. 373-384.
- Viana F. A.: Things you wanted to know about the latin hypercube design and were afraid to ask. In: 10th World congress on structural and multidisciplinary optimization, Orlando (USA) 19.-24. May 2013, S. 1-9.
- Wiegand, M.; Konrad, B.; Jalali Sousanabady, R.; Willats, P.; Deuse, J.: Quantifizierung von Variabilität durch Big Data Technologien. In: PRODUCTIVITY Management 19 (2014) 5, S. 35-38.