

Nachfolgend finden Sie die Übersetzung ins Deutsche des frei verfügbaren Fachartikels:

Original:

„Material flow control in make-to-stock production systems: An assessment of order generation, order release and production authorization by simulation“.

Matthias Thüerer ¹ · Nuno O. Fernandes ^{2,3} · Hermann Lödding ⁴ · Mark Stevenson ⁵: Material flow control in make-to-stock production systems: An assessment of order generation, order release and production authorization by simulation, 2024.

Verfügbar unter (Stand 23.6.2025):

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10696-024-09532-2>
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10696-024-09532-2.pdf>

Dies ist eine nicht offizielle deutsche Übersetzung des Originals durch:

Markus Bans
ATS Prozessoptimierung Markus Bans
Web: <https://simio-simulation.de>

Lizenz:

Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

S. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Zeitschrift für flexible Dienstleistungen und Fertigung
(2025) 37:1–37 <https://doi.org/10.1007/s10696-024-09532-2>



Materialflusssteuerung in Make to stock-Fertigungssystemen: Bewertung von Auftragsgenerierung, Auftragsfreigabe und Produktionsberechtigung durch Simulation

Autoren: Matthias Thürer ¹  · Nuno O. Fernandes ^{2,3} · Hermann Lödding⁴ · Mark Stevenson ⁵

Angenommen: 17. Januar 2024 / Online veröffentlicht:
20. Februar 2024 © Der/die Autor(en) 2024

Zusammenfassung

Die Materialflusssteuerung (MFC) ist ein zentrales Element der Produktionsplanung und -steuerung. In der Literatur werden in der Regel verschiedene MFC-Methoden nach der Art und Weise kategorisiert, wie MFC realisiert wird. Bei dieser Unterscheidung wird übersehen, dass MFC-Entscheidungen in drei unabhängige Aufgaben unterteilt werden können, die ausgeführt werden, wenn Aufträge das System durchlaufen: (i) Auftragsgenerierung, (ii) Auftragsfreigabe und (iii) Produktionsautorisierung. MFC-Methoden sind in der Regel nur für eine dieser drei Aufgaben konzipiert, wodurch ein großer Teil des Auftragsflusses ungesteuert bleibt. Diese Studie liefert daher nicht nur eine neue Kategorisierung von MFC-Methoden, sondern plädiert auch für die gleichzeitige Anwendung (bzw. Kombination) von drei verschiedenen MFC-Methoden zur Auftragsgenerierung, Auftragsfreigabe und Produktionsfreigabe. Um dieses Argument zu unterstützen, werden die Leistungseffekte eines integrierten MFC-Ansatzes ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass sich jede einzelne MFC-Methode auf unterschiedliche Leistungsmetriken auswirkt, was durch das Vorhandensein einer Hierarchie von Workloads erklärt werden kann, bei der jede Workload-Ebene die nachfolgende hierarchische Ebene einschränkt. Jede MFC-Methode hat eine Hauptauswirkung auf eine andere Workload. Dies hat wichtige Auswirkungen auf das Design von MFC-Methoden und erweitert die neuere Literatur zu hierarchischen Produktionsplanungs- und Steuerungssystemen.

Schlüsselwörter Produktionsplanung und -steuerung · Kontrolle der Arbeitsbelastung · Bestellpunkt · Freigabe der Bestellung · Produktionsgenehmigung

1 Einleitung

In dieser Studie wird eine neue Struktur für Methoden der Materialflusssteuerung (MFC) in Make to stock-Fertigungskontexten vorgeschlagen, bei denen Kundenaufträge aus einem Fertigwarenbestand erfüllt werden, der durch ein kapazitives Produktionssystem aufgefüllt wird. Diese Shop-Struktur ist in der Praxis allgegenwärtig und damit von hoher industrieller Relevanz. In unserer Studie wird ein Produktionsplanungs- und -steuerungsansatz als MFC-Methode betrachtet, wenn

Erweiterte Autoreninformationen auf der letzten Seite des Artikels



Es beantwortet eine Frage nach dem "Ob" zum Materialfluss, z.B. ob Aufträge freigegeben werden sollen oder nicht. Es ist die Funktion der Methode und nicht ihre Merkmale (z. B. Planung oder Steuerung) oder ihre Position im gesamten (hierarchischen) Planungs- und Steuerungssystem, die bestimmt, ob sie als MFC-Methode klassifiziert wird. Auf diese Weise können MFC-Methoden von anderen Ansätzen unterschieden werden, die eine Frage nach dem "Welchen" beantworten und unter das breitere Thema der Planung und Sequenzierung fallen. Obwohl diese Definition subjektiv oder willkürlich ist, bietet sie eine klare Linie, die zwischen den verschiedenen Produktionsplanungs- und Steuerungsmethoden in der Literatur unterscheidet. Die Erstellung dieser Teilmenge ist erforderlich, um das Rückgrat für unsere Studie zu bilden. Er erweitert klassischere Unterscheidungen und ergänzt diese.

Die Hauptkategorisierung der verschiedenen MFC-Methoden in der Literatur bezieht sich darauf, wie die Materialflusssteuerung realisiert wird, z.B. als Pull-System, wenn eine Work-in-Process-Kappe (WIP) durchgesetzt wird, oder als Push-System, wenn eine WIP-Kappe nicht durchgesetzt wird (Hopp & Spearman 2004). Dabei wird übersehen, dass MFC in drei unabhängige Aufgaben unterteilt werden kann, wenn Aufträge durch das System fließen: (i) die Generierung von Aufträgen; (ii) die Freigabe von Aufträgen an die Fertigung; und (iii) die Produktionsgenehmigung von Aufträgen auf dem Shopfloor. Am wichtigsten ist, dass MFC-Methoden in der Regel nur für eine dieser drei Aufgaben konzipiert sind. Die Verwendung einer einzelnen MFC-Methode, die nur für eine dieser Aufgaben zur Steuerung des gesamten Lebenszyklus des Produktionsauftrags konzipiert ist, kann dazu führen, dass ein erheblicher Teil des Auftragsflusses entweder nicht gesteuert oder unzureichend unterstützt wird. Wir argumentieren daher, dass die Anwendung von MFC-Methoden von der Phase des Bestellfortschritts abhängen sollte, von der Auftragsgenerierung bis zur Lieferung an den Kunden, was bedeutet, dass unterschiedliche Methoden in verschiedenen Phasen des Lebenszyklus einer Bestellung oder auf dem Weg durch den Shop verwendet werden sollten. Um diese Vermutung zu beweisen, bewerten wir den kombinierten Leistungseffekt der Verwendung verschiedener MFC-Methoden für die Auftragsgenerierung, Auftragsfreigabe und Produktionsautorisierung mittels diskreter Ereignissimulation.

Dies erweitert die bisherige Literatur, in der in der Regel davon ausgegangen wurde, dass nur ein System für MFC verwendet wird. In dieser Literatur wurden viele MFC-Methoden und -Konzepte vorgestellt und verglichen, wie z.B. Kanban (z.B. Ohno 1988; Shingo 1989; Lage Junior & Godinho Filho 2010), Materialbedarfsplanung (MRP; Orlicky 1975; Vollmann et al. 1997), Drum-BufferRope (DBR; z.B. Goldratt & Cox 1984; Watson et al. 2007), Constant Work-in-Process (ConWIP; z.B. Spearman et al. 1990; 2021), Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization (POLCA; z.B. Suri 1998; Vandaele et al., 2008; Riezebos 2010), WorkLoad Control (WLC; z.B. Land & Gaalman 1996; Thüerer et al. 2012), Kontrolle des Gleichgewichts durch kartenbasierte Navigation (COBACABANA; z.B. Land 2009; Thüerer et al. 2014a; Braglia et al. 2021) und Demand Driven MRP (DDMRP; Ptak & Smith 2011, 2016; Miclo et al. 2019; Acosta et al. 2020). Die meisten dieser Methoden sind in der Praxis weit verbreitet, und jedes Unternehmen führt eine Form von MFC aus. Unseres Wissens nach wurde jedoch in keiner früheren Studie die kombinierten Auswirkungen der Verwendung von drei verschiedenen MFC-Methoden – jede für eine andere MFC-Entscheidung – bewertet.

Graves et al. (1995) erkannten, dass MFC-Methoden zwei wichtige Probleme lösen: (i) ob ein Auftrag an die Produktionsfläche freigegeben werden sollte und (ii) ob eine Station zur Produktion autorisiert werden sollte. Diese Unterteilung bot eine Möglichkeit zur Kategorisierung von MFC-Methoden, schlug aber auch vor, dass MFC-Methoden für die Auftragsfreigabe und die Produktionsgenehmigung kombiniert werden können, oder dass eine MFC-Methode erstellt werden kann, die sich auf beide Aufgaben konzentriert – eine Möglichkeit, die von Graves et al. (1995) nicht untersucht wurde. Erst kürzlich haben Thüerer et al. (2020) gezeigt, dass MFC-Methoden zur Auftragsfreigabe, wie z.B. Workload Control und ConWIP, mit MFC-Methoden zur Produktionsfreigabe, wie z.B. POLCA, kombiniert werden können und sollten. Aber weder Graves et al. (1995) noch Thüerer et al. (2020) haben MFC-Methoden zur Ordergenerierung in Betracht gezogen, die sich mit dem Problem befassen, ob eine Order überhaupt generiert werden sollte. Diese Unterscheidung zwischen MFC-Methoden, die Produktionsaufträge generieren, und MFC-Methoden, die den Fluss von Produktionsaufträgen steuern, nachdem sie generiert wurden, wurde von Lödding (2012) erkannt. Der Autor definierte die Auftragsgenerierung, die Auftragsfreigabe (die zentral, dezentral oder hybrid erfolgen kann), die Sequenzierung und die Kapazitätssteuerung als zentrale Aufgaben der Fertigungssteuerung. Unseres Wissens nach hat jedoch bisher keine Studie den kombinierten Leistungseffekt eines integrierten Systems bewertet, das den Ablauf des gesamten Auftragslebenszyklus von der Generierung bis zur Fertigstellung steuert. Es gibt zwar mehrere Studien zu Hybridsystemen, aber diese Studien konzentrieren sich in der Regel auf eine MFC-Aufgabe oder eine Teilmenge. So ist beispielsweise die Literatur zu Kanban/ConWIP-Systemen (Bagni et al. 2021), die sich auf die Auftragsfreigabe bzw. Kombinationen von Auftragsfreigabe und Produktionsberechtigung konzentriert (z.B. Bonvik et al. 1997; Dallery & Liberopoulos 2000; Baynat et al. 2002; Geraghty & Heavy 2004; Olaitan & Geraghty. 2013; Onyechoa et al. 2015). In der Zwischenzeit wurde eine gute Zusammenfassung und eine Bewertung verschiedener kundenspezifischer tokenbasierter

Produktionssteuerungssysteme von González-R und Framinan (2009) bereitgestellt. Darüber hinaus wurde von González-R und Framinan (2009) und González-R et al. (2012) ein allgemeines tokenbasiertes Kontrollsystem für die Auftragsfreigabe und Produktionsautorisierung eingeführt. Beachten Sie, dass bei der Fokussierung auf eine Teilmenge von MFC-Aufgaben davon ausgegangen wird, dass andere Aufgaben durch sofortige Generierung, sofortige Freigabe und/oder sofortige Produktionsautorisierung realisiert werden. Wenn ein Auftrag nicht generiert wird, kann er nicht freigegeben werden, und wenn er nicht freigegeben wird, kann er nicht produziert werden, und wenn er nicht produziert wird, wird er nicht abgeschlossen. Alle Manager müssen alle drei Aufgaben ausführen, aber nur eine Teilmenge wird in der Regel bewusst übernommen.

Als Reaktion auf das oben Gesagte trägt diese Studie in zweierlei Hinsicht zur Literatur bei:

- Es bietet eine einfache, logische und kohärente Möglichkeit zur Klassifizierung von MFC-Methoden, die das klassische Push/Pull (z.B. Hopp & Spearman 2004), Make-to-Stock/Make-to-Order (z.B. Stevenson et al. 2005) oder Planung versus Kontrolle Kategorisierungen; und
- Es verwendet die diskrete Ereignissimulation, um zum ersten Mal die Leistungseffekte eines integrierten Systems zu bewerten, das gleichzeitig drei verschiedene MFC-Methoden für die Auftragsgenerierung, Auftragsfreigabe und Produktionsautorisierung verwendet, was Managern und Forscherkollegen eine Orientierungshilfe bietet, welche Kombination von MFC-Methoden in ihrer Werkstatt verwendet werden sollte oder welche Aufgaben in den Entwurf einer einzelnen MFC-Methode einbezogen werden sollten.

Der Rest dieses Papiers ist wie folgt strukturiert. In Abschnitt 2 werden MFC-Methoden vorgestellt und nach ihrem Schwerpunkt auf Auftragsgenerierung, Auftragsfreigabe und Produktionsautorisierung kategorisiert. Abschnitt 3 skizziert dann das integrierte System von MFC-Methoden, das in dieser Studie betrachtet wird, bevor das Simulationsmodell, das zur Bewertung der Leistung dieses Systems verwendet wird, in Abschnitt 4. Anmelden Die Ergebnisse werden dann in Abschn. 5 und erörtert in Abschn. 6. Urheberrecht Schließlich hat Abschn. 7 enthält Schlussfolgerungen, Auswirkungen auf das Management und zukünftige Forschungsrichtungen.

2 Hintergrund

Der Auftragslebenszyklus, der für die MFC-Entscheidungsfindung von Interesse ist, kann in drei Phasen unterteilt werden: Auftragsgenerierung, Auftragsfreigabe und Produktionsautorisierung. Dies ist in Abb. 1. Urheberrecht Wir argumentieren, dass die in der Literatur vorgestellten MFC-Methoden nach ihrer Eignung für jede Phase des Fortschritts einer Bestellung durch den Shop und die damit verbundene Steuerungsaufgabe kategorisiert werden können. Die wichtigsten MFC-Methoden

werden kategorisiert und in den Abschn. 2.1, 2.2 bzw. 2.3. Eine Diskussion der Literatur wird dann in Abschn. 2.4. Urheberrecht Beachten Sie, dass MFC-Methoden im Wesentlichen Systeme blockieren. Es besteht daher eine starke Verbindung zwischen unserer Studie und der Literatur über Blockierungsmechanismen und Produktionssysteme mit endlichen Zwischenpuffern (z.B. Dallery & Gershwin 1992; Weiss et al. 2019). In dieser Studie konzentrieren wir uns nur auf Planungs- und Steuerungssysteme, die speziell entwickelt wurden, um eine bestimmte Art von Blockierung zu induzieren, um die Leistung zu verbessern. Das Blockieren ist eher eine Entscheidung des Managements als eine physische Einschränkung.

2.1 MFC-Methoden für die Auftragsgenerierung

Die in diesem Abschnitt zusammengefassten MFC-Methoden bestimmen, ob Produktionsaufträge generiert werden sollen. MRP ist wohl die bekannteste planbasierte Methode zur Generierung von Aufträgen. Ursprünglich für komplexe Produkte und Montagekontexte entwickelt, leitet es die Aufträge auf der Grundlage der Planung unter Verwendung der Stückliste, der Lagerbestände und eines sogenannten Vorlaufzeitversatzes ab, um die Produktionsanforderungen für jede Komponente rückwärts zu planen (oder zu "explodieren") (Orlicky 1975; Vollmann et al. 1997). MRP ist eine klassische Push-Methode, bei der aus einem Plan Aufträge generiert werden, was zu überhöhten WIP-Werten führen kann, wenn der tatsächliche Produktionsfortschritt hinter dem geplanten Fortschritt zurückbleibt.

Die Bestellpunktmethode und die Kanban-Methode (Ohno 1988; Shingo 1989; Lage Junior & Godinho Filho 2010) sind wohl die prominentesten MFC-Methoden zur Auftragsgenerierung, die nicht auf einem Produktionsplan basieren. Die Bestellpunktmethode wurde bereits vor MRP und dem Aufkommen von Computern in der Industrie verwendet. Es handelt sich um ein kontinuierliches Überprüfungssystem, das Bestellungen von festen (oder variablen) Mengen generiert (die

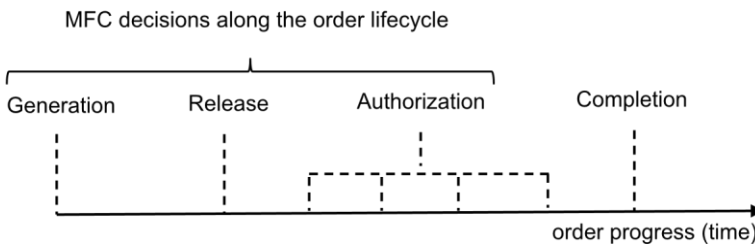


Abb. 1 MFC-Entscheidungen entlang des Order-Lifecycles: Fokussierung auf eine Teilmenge bietet unzureichende Kontrolle

(die Nachbestellmenge), wenn der Bestellpunkt erreicht ist. Eine Abbildung, die die Berechnungen veranschaulicht, die einem Bestellpunktsystem zugrunde liegen, ist in einem Anhang enthalten (siehe Abb. 5). Ein kritischer Punkt ist die Bestimmung des Sicherheitsinventars I_{min} , für das in der Literatur unterschiedliche Ansätze vorgestellt wurden (vgl. z.B. Schmidt et al. 2012 für einen Rückblick). Berühmt wurde Kanban durch den Erfolg des Toyota-Produktionssystems bei der Schaffung

eines sogenannten Pull-Systems, bei dem die tatsächliche Nachfrage Aufträge generiert. Die Kanban-Methode ist von Natur aus mit der Bestellpunktmethode (Shingo 1989) verknüpft, wobei die Kanban-Karten den maximalen Bestand im System darstellen.

Zu den alternativen Methoden zur Auftragsgenerierung gehören Synchro MRP, das ein Kanban-System und einen täglichen Produktionsplan verwendet, der von einem übergeordneten Produktionsplanungs- und -steuerungssystem generiert wird, sowie Demand-Driven MRP (DDMRP). Bei der Synchro-MRP kann ein Auftrag nur dann nach der Kanban-Methode generiert werden, wenn ein geplanter Ausbringungsgrad noch nicht erreicht wurde (Hall 1986; Lödding 2012; Bertolini et al. 2013). In der Zwischenzeit kombiniert DDMRP die Bestellpunktmethode und MRP (Ptak & Smith 2011, 2016; Miclo et al. 2019; Acosta et al. 2020). Es entkoppelt Teilmengen abhängiger Teile (sogenannte "Pathways") in der Produktstruktur, indem kritische Teile auf Lager gehalten werden. Die Bestandspuffer kritischer Teile werden durch Nachbestellpunkte gesteuert, die auf Basis einer sogenannten "Nettoflussgleichung" berechnet werden. Sinkt die Nettoflussposition auf einen vorgegebenen Bestellpunkt, wird ein Fertigungsauftrag für den Nachschub kritischer Teile generiert. Die Generierung von unkritischen Teilen (bis zum nächsten Entkopplungspunkt kritischer Teile) basiert auf der Dispositionslogik, die als "entkoppelte Explosion" bezeichnet wird.

2.2 MFC-Methoden für die Auftragsfreigabe

Die in diesem Abschnitt zusammengefassten MFC-Methoden bestimmen, ob Produktionsaufträge an die Fertigung freigegeben werden sollen. Wenn Aufträge direkt nach der Auftragsgenerierung auf dem Shopfloor freigegeben werden, dann ist ein Immediate Release (IMR)-Ansatz effektiv realisiert. Der offensichtliche Nachteil von IMR besteht darin, dass es nicht möglich ist, Aufträge vor dem geplanten Veröffentlichungsdatum zurückzuhalten, was es ermöglichen würde, Produktionsaufträge zu koordinieren, WIP-Niveaus in der Produktion zu regulieren und/oder Lasten auf die Ressourcen in der Fertigung auszugleichen. Bei den meisten Freigabemethoden fließen Aufträge daher nicht direkt auf den Shopfloor, sondern werden in einem sogenannten Backlog oder Pre-Shop-Pool zurückgehalten, aus dem sie zur Erfüllung bestimmter Performance-Ziele freigegeben werden.

Methoden, die sich auf die Koordination konzentrieren, realisieren in der Regel die Freigabe auf der Grundlage des Fälligkeitsdatums eines Auftrags, d. h. Aufträge werden freigegeben, sobald ihr geplantes Freigabedatum erreicht ist, um den Produktionsplan zu realisieren. Die Freigabe nach Fälligkeit ist die klassische Freigabemethode in der Disposition (Thürer et al. 2022). Dies unterstützt die Koordination unterschiedlicher Aufträge für die Montage. In einem Kontext ohne Assemblierung wird dies typischerweise als Backward Infinite Loading bezeichnet (BIL, z. B. Ragatz & Mabert 1988). Die Auftragsfreigabe auf der Grundlage des Fälligkeitsdatums der Bestellung ist jedoch nicht in der Lage, die WIP-Niveaus zu

regulieren oder die Lasten der Workstations auszugleichen, und sie realisiert keine Eingabe-Ausgabe-Steuerung (z. B. Wight 1970).

ConWIP ist wohl die bekannteste Methode zur Auftragsfreigabe, die WIP reguliert, indem sie den Input und Output der Arbeit aufeinander abstimmt (Spearman et al. 1990; 2021; Framinan et al. 2003; Jaegler et al. 2018) und begrenzt die Anzahl der Aufträge oder Jobs, die an die Verkaufsfläche freigegeben werden. Ein wichtiger Vorteil von ConWIP besteht darin, dass es überschüssige WIP-Niveaus in der Produktion effektiv vermeiden kann. Im Gegensatz zur Freigabe nach Fälligkeitsdatum können Aufträge bei ConWIP früher oder später als geplant an den Shopfloor freigegeben werden. Die Reihenfolge, in der Aufträge für die Freigabe in Betracht gezogen werden, wird durch eine sogenannte Backlog-Sequencing-Entscheidung festgelegt, die typischerweise auf Dringlichkeit basiert. Währenddessen verwendet DBR ein sogenanntes Seil, um den Arbeitseinsatz mit der Ausbringungsrates des Engpasses abzugleichen. Im ursprünglichen DBR-Ansatz war dieses Seil ein Vorlaufzeitversatz, der auf der erwarteten Zeit basierte, die ein bestimmter Auftrag benötigte, um den Engpass zu erreichen (siehe z. B. Simons und Simpson 1997). Später wurde das Seil als die Anzahl der bis zum Engpass freigegebenen, aber noch nicht abgeschlossenen Aufträge interpretiert, wobei ein Auftrag immer dann freigegeben wurde, wenn diese Anzahl unter eine Grenze fiel (z. B. Chakravorty & Atwater, 1996; Watson & Patti 2008). Im Allgemeinen können wir Bestands- und Zeitpuffer immer entweder als Inventuren oder als Flusszeiten ausdrücken (Land et al. 2021). Anhand eines Trommelplans wird die Reihenfolge festgelegt, in der Aufträge für die Freigabe in Betracht gezogen werden. Eine ähnliche Methode, die die Summe der Verarbeitungszeiten anstelle der Anzahl der Aufträge steuert, ist der Hungervermeidungsauslöser (SA), der in Glassey & Resende (1988) vorgestellt wird.

Die wohl bekanntesten Methoden, die sich auf den Ausgleich der Arbeitslast zwischen den Stationen konzentrieren, sind Workload Control und Load-Oriented Order Release (LOOR; z. B. Bechte, 1988; Wiendahl et al. 1992; Breithaupt et al. 2002). Die Reihenfolge, in der Aufträge für die Freigabe in Betracht gezogen werden, wird durch eine Pool-Reihenfolgeregel bestimmt. Es gibt auch Workload Control Methoden, die die Engpasslast steuern (z.B. Enns & Prongue Costa 2002; Neuner & Haeussler, 2021) und die die Belastung des Gesamtsystems steuern (die sogenannte Extended-Aggregatlast-Methode in Land & Gaalman 1996). Das Unterscheidungsmerkmal der Workload Control Order Release-Methoden besteht jedoch darin, dass die Last an jeder Station gesteuert wird (z. B. Bechte, 1988; Cigolini, & Portioli-Staudacher 2002; Land 2006). Mit anderen Worten, ein Auftrag wird nur dann freigegeben, wenn seine Auslastung zusammen mit der Auslastung der bereits an eine Station freigegebenen und noch nicht abgeschlossenen Aufträge an allen Stationen seines Arbeitsplans in eine Auslastungsnorm passt. COBACABANA stellt eine kartenbasierte Version der Workload Control Order Release Method dar (Land 2009). Ein Nachteil dieser MFC-Methoden besteht darin, dass bei der Auftragsfreigabe Abweichungen zwischen geplanter und tatsächlicher Sequenzierung auftreten können, da die Aufträge innerhalb der Arbeitslastgrenzen liegen müssen, was die Varianz der Verspätung erhöhen kann.

Schließlich gibt es neben den oben genannten regelbasierten Freigabemethoden auch Freigabemethoden, die eine Optimierung nutzen (Irastorza & Deane 1974, Haeussler & Netzer, 2020; Haeussler et al., 2020) oder maschinelles Lernen (Schneckenreither et al., 2021). Diese Methoden können sich auf die Berechnung geplanter Freigabetermine für die Auftragsfreigabe auf der Grundlage von Fälligkeitsterminen konzentrieren oder auf die Optimierung der Menge der zu veröffentlichenden Aufträge, um eine ausgewogene Auslastung zu realisieren (Fernandes et al. 2020a).

2.3 MFC-Methoden für die Produktionsautorisierung

Die MFC-Methoden, die unter Produktionsgenehmigung zusammengefasst sind, geben den Startschuss für einen bestimmten Vorgang eines Auftrags, der in der Fertigung ausgeführt werden soll. Wenn alle an den Shopfloor freigegebenen Aufträge an den entsprechenden Stationen bearbeitet werden können, dann ist eine sofortige Autorisierung realisiert. Alternativ kann ein zeitbasiertes Fertigungsgenehmigungsverfahren verfolgt werden, das der Auftragsfreigabe nach geplantem Freigabedatum ähnelt. Aufträge dürfen daher nur dann produziert werden, wenn ein vorgangsspezifisches Genehmigungsdatum erreicht ist. Während diese Art der Produktionsgenehmigung ein integraler Bestandteil von POLCA ist, um die vorzeitige Fertigstellung von Aufträgen zu vermeiden, wird sie sowohl in Simulationsstudien als auch nach unserem besten Wissen in der Praxis oft vernachlässigt, da sie sich direkt nachteilig auf das Verspätungsverhalten auswirkt (Thürer et al. 2019).

Das Lastregelungselement von POLCA verwendet Kartenschleifen zwischen den Stationspaaren, z.B. zwischen den Stationen 1 und 2, um zu signalisieren, ob an der nächsten nachgelagerten Station Kapazitäten im Routing eines Auftrags vorhanden sind. Nur wenn eine POLCA-Karte von der nächsten Station im Arbeitsplan eines Auftrags verfügbar ist, kann die Bearbeitung eines Auftrags an einer Station beginnen. Eine ähnliche Methode, die als dezentrale Work-in-Process (DEWIP) bezeichnet wird, wurde von Lödding et al. (2003) eingeführt. Der Unterschied besteht darin, dass DEWIP den WIP an der nächsten Station im Arbeitsplan eines Auftrags zusammen mit dem WIP verwendet, der bereits an einer der vorhergehenden Stationen verarbeitet wurde, um zu entscheiden, ob ein Auftrag die Berechtigung hat, die Verarbeitung zu starten oder nicht.

Beachten Sie, dass die meisten Unternehmen in der Praxis mit sofortiger Genehmigung arbeiten. Durch die Produktionsberechtigung können die WIP-Niveaus jedoch über lokale Regelkreise geregelt werden, was die Kapazitätsverfügbarkeit an den nachgelagerten Stationen sicherstellt und das Potenzial bietet, Stationen mit definierten WIP-Niveaus zu betreiben. Wenn Unternehmen IMR verwenden, löst die Autorisierung des ersten Vorgangs effektiv aus, dass der Auftrag aus dem Rückstand freigegeben wird. Daher kann die Fertigungsgenehmigung als Methode zur Auftragsfreigabe verwendet werden. Im Folgenden interessiert uns jedoch die Kombination aus dedizierten Auftragsfreigabemethoden und Produktionsberechtigung.

2.4 Diskussion der Literatur

In den Abschnitten 2.1, 2.2 und 2.3 oben wurden MFC-Verfahren beschrieben, die speziell für die Auftragsgenerierung, die Auftragsfreigabe und die Produktionsautorisierung geeignet sind. Diese Methoden sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Aus der Tabelle geht hervor, dass es sowohl Push- als auch Pull-Verfahren gibt (z.B. nach Hopp & Spearman 2004), Methoden, die entweder für Lager- oder Auftragsfertigungsumgebungen als geeignet erachtet werden (z.B. nach Stevenson et al. 2005) und Methoden, die als Planung oder Steuerung angesehen werden können.

Wir argumentieren, dass verschiedene Arten von Methoden für unterschiedliche Aufgaben gewählt werden können und dass die verschiedenen Methoden in einem integrierten MFC-System kombiniert werden können. Das heißt, MFC muss immer alle Aufgaben umfassen, um wirksam zu sein, denn wenn Aufträge nicht generiert, freigegeben und autorisiert werden, werden sie letztendlich nicht erstellt. Natürlich

Wenn die Auftragsfreigabe auf die sofortige Freigabe und die Produktionsberechtigung auf die sofortige Genehmigung eingestellt ist, wird im Wesentlichen ein System durch die Generierung von Aufträgen erstellt. Dies sollte jedoch eine bewusste Entscheidung des Managements sein. Wenn nur die Auftragsfreigabe angewendet wird, sollte die Auftragsgenerierung immer noch einer rationalen Methode folgen, die vom Management festgelegt wird. In dieser Studie interessieren wir uns daher für den kombinierten Einsatz von MFC-Methoden, was zu folgender Forschungsfrage führt: *Wie wirkt sich der gleichzeitige Einsatz von drei verschiedenen MFC-Methoden – für die Auftragsgenerierung, die Auftragsfreigabe und die Produktionsfreigabe – auf die Performance im Vergleich zum Einsatz von nur einer oder zwei MFC-Methoden aus?*

Im folgenden Abschnitt wird das ausgewählte integrierte MFC-System beschrieben, bevor die diskrete Ereignissimulation verwendet wird, um den Ansatz zu bewerten und die obige Frage zu beantworten. Unsere Studie ist nach bestem Wissen und Gewissen die erste, die die Auswirkungen der Kombination von drei verschiedenen MFC-Methoden bewertet.

3 Ein integriertes MFC-System

In diesem Abschnitt stellen wir Ihnen ein integriertes MFC-System für die Auftragsgenerierung, -freigabe und -autorisierung vor. Für die Auftragsgenerierung verwenden wir die Bestellpunktmethode, da sie eine der am häufigsten verwendeten Pull-Methoden für die Auftragsgenerierung ist. Da wir eine Montagehalle nicht in Betracht ziehen, ist auch der Einsatz von MRP nicht gerechtfertigt. MRP erstellt Fälligkeitstermine von Aufträgen, um verschiedene Materialflüsse zu koordinieren. In unserem modellierten Szenario müssen die Materialflüsse mit der Kapazität koordiniert werden, nicht mit anderen Materialflüssen. Daher vernachlässigen wir auch Freigabemethoden, die sich auf die Koordination konzentrieren, wie z. B. die

Table 1 Categorization of MFC methods

Type of MFC method	Description	Examples
Order generation	<p>Coordination Controls the generation of new production orders according to a production program</p> <p>Regulating inventory Controls the generation of new production orders in response to actual demand, ensuring stable inventory levels</p>	<p>MRP</p> <p>ROP, Kanban</p>
Order release	<p>Coordination Controls the timely release of production orders to the shop floor so releases of different orders are coordinated</p> <p>Regulating WIP Controls the release of production orders to the shop floor to avoid excess WIP</p> <p>Workload balancing Controls the release of production orders to the shop floor in accordance with capacity to balance the workload across stations to avoid congestion</p> <p>Optimization Controls the release of production orders in accordance with some optimization algorithm. Objective functions can focus on coordination, regulating WIP and/or workload balancing</p>	<p>Release by order due date</p> <p>ConWIP, DBR, starvation avoidance (SA)</p> <p>Workload Control, LOOR, COBACABANA</p> <p>Optimize planned release dates, Optimize load balance</p>
Production authorization	<p>Coordination Controls the timely authorization of orders on the shop floor</p> <p>Regulating WIP Controls the authorization of production orders on the shop floor to avoid excess WIP</p> <p>Capacity usage Controls the authorization of production orders on the shop floor to increase capacity usage and avoid congestion</p>	<p>'A' element of POLCA</p> <p>DEWIP</p> <p>'POLC' element of POLCA</p>

Auftragsfreigabe nach Auftragsfähigkeit (die typischerweise mit der Disposition kombiniert wird), und konzentrieren uns stattdessen auf Freigabemethoden, die Auslastung und Kapazität koordinieren. Für lastbasierte Release-Methoden zeigten Fredendall et al. (2010), dass Workload Control das Potenzial hat, sowohl ConWIP als auch DBR in der Werkstatt zu übertreffen, die in unserer Studie verwendet wird. Für die Auftragsfreigabe setzen wir daher die Auslastungssteuerung ein. Schließlich wird POLCA für die Produktionsgenehmigung verwendet, da es wohl eines der bekanntesten und am weitesten verbreiteten Verfahren für diese spezielle Aufgabe ist. Wir sind uns bewusst, dass diese Wahl der Methoden etwas willkürlich ist, aber wir akzeptieren diese Einschränkung, um unsere These zu testen, dass verschiedene Methoden kombiniert werden können und sollten.

Die Steuerungsstruktur des resultierenden MFC-Systems, das den Meldepunkt, die Arbeitsauslastungssteuerung und POLCA kombiniert, ist in Abb. 2 für einen Betrieb, der drei Produkte (A, B und C) herstellt, die von Station 1 über Station 2 bis Station 3 fahren. Diese vereinfachte Shop-Struktur nutzen wir hier, um eine Visualisierung des Systems zu ermöglichen. Die Abbildung verwendet den in Liberopoulos & Dallery (2000) vorgeschlagenen Rahmen. Es wird die begrenzte Überlappung in den Kontrollsphären dieser drei MFC-Methoden hervorgehoben.

Da wir davon ausgehen, dass es keine Ausgabewarteschlange gibt, gibt es nur vier Elemente. Zunächst enthalten die Bestände SA , SB und SC den Fertigwarenbestand der drei Produkte. Zweitens ist die Queue $P0$ der Pool der generierten Fertigungsaufträge, die in die Fertigung gelangen sollen. Die Queue PA_i enthält die Fertigungsaufträge, die an der vorhergehenden Station abgeschlossen wurden und an die noch eine POLCA-Karte der vorhergehenden Station angehängt ist. Die POLCA-Karten sind in der Queue $AsPOLCA$ für Stationen mit

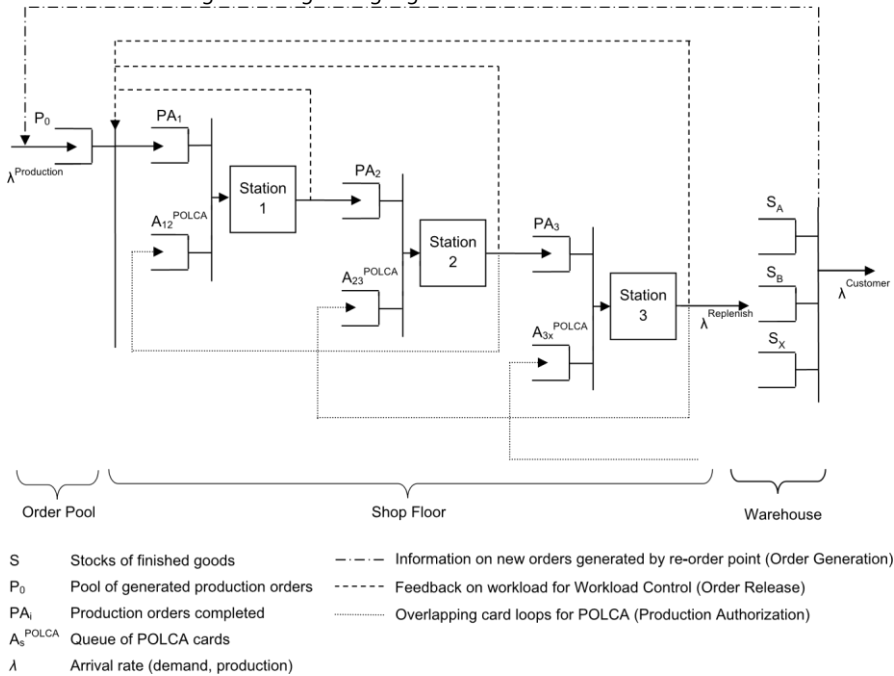


Abb. 2 Steuerungsstruktur eines kombinierten Auftragsgenerierungs- (Bestellpunkt), Auftragsfreigabe (Auslastungssteuerung) und Produktionsberechtigungssystems (POLCA) $s = 1 \dots n$, wobei n die Anzahl der Stationen im System ist. Die drei MFC-Aufgaben können wie folgt zusammengefasst werden:

- *Auftragsgenerierung*: Der Kunde verbraucht Produkte aus den Beständen S_A , S_B und S_C zu einem Absatzsatz λ Kunde, der für jedes Produkt unabhängig ist. Wenn der Meldebestand für ein Produkt erreicht ist, werden Fertigungsaufträge (die Nachbestellmenge) generiert. Dadurch entsteht eine Ankunftsrate von Fertigungsaufträgen λ Produktion in den Pool P_0 , die abhängig von der Absatzquote, der Verfügbarkeit von Produkten, dem Bestellpunkt und der Bestellmenge ist.
- *Auftragsfreigabe*: Alle Aufträge werden immer dann zur Freigabe berücksichtigt, wenn ein neuer Fertigungsauftrag in P_0 eintritt oder ein Arbeitsgang an einer Station in der Fertigung abgeschlossen wird. Nehmen Sie R_j als die geordnete Menge von Operationen im Arbeitsplan von Auftrag j an. Ein Auftrag j wird freigegeben, wenn seine Verarbeitungszeit p_{ij} bei der i -ten Operation in seinem Arbeitsplan – korrigiert um die Stationsposition i – zusammen mit der an Station s freigegebenen und noch zu erledigenden Arbeitslast W_s (entsprechend dem Vorgang i) in p_{ij} mit der Arbeitslastnorm N_s an dieser Station übereinstimmt, d.h. $i + W_s \leq N_s \forall i \in R_j$. Das heißt, er tritt in PA_i ein und sein Lastbeitrag ist enthalten, d.h. $W_s := W_s + p_{-ij} \forall i \in R_j$. Andernfalls verbleibt der Auftrag im Pool und seine

Verarbeitungszeit trägt nicht zur Stationsauslastung bei. Da ein freigegebener Auftrag zu W_s beiträgt, bis sein Vorgang an dieser Station abgeschlossen ist, wird der Lastbeitrag zu einer Station berechnet

indem die Verarbeitungszeit des Vorgangs an einer Station durch die Position der Station im Arbeitsplan eines Auftrags dividiert wird (Oosterman et al. 2000).

- **Produktionsberechtigung:** Nach der Freigabe wartet ein Auftrag in der Queue $PA1$, bis seine Produktion autorisiert ist, d.h. eine POLCA 1–2 Karte ist in der Queue $A1$ verfügbar. Sobald diese Karte verfügbar ist, kann der Auftrag verarbeitet werden. Nach der Verarbeitung wird der Job in die Warteschlange $PA2$ der nächsten Station verschoben (wobei die Karte POLCA 1–2 noch angeschlossen ist). Der Job wartet in der Queue $PA2$, bis eine POLCA 2–3-Karte in der Queue $A2$ verfügbar ist, er die höchste Priorität hat und die Station ausgelastet ist. Nach der Verarbeitung wird die POLCA 1-2-Karte freigegeben und zurück in die Warteschlange $A1$ verschoben, und der Auftrag wird in die Warteschlange der nächsten Station $PA3$ verschoben, an die die POLCA 2-3-Karte angehängt ist. Ist der Auftrag abgeschlossen, fließt er in das Lager oder Fertigwarenlager, wodurch die Nachschubrate (λ Replenish) realisiert wird. POLCA verwendet Hungervermeidungskarten, wie sie von Thürer et al. (2017) vorgeschlagen werden, um vorzeitigen Stationsstillstand und POLCA-spezifische Blockierungen zu vermeiden (Lödding et al. 2003). Schließlich wird die zeitbasierte Autorisierung vernachlässigt, da sie in Thürer et al. (2019) einen direkten negativen Einfluss auf die Durchlaufzeiten und die Verspätungsleistung hat.

4 Simulation

Diese Studie konzentriert sich auf einen Make-to-Stock-Kontext, bei dem Kundenaufträge aus einem Fertigwarenbestand erfüllt werden, der durch ein kapazitives Produktionssystem aufgefüllt wird. Dies unterscheidet sich von Studien über erweiterte Nachfrageinformationen, die ebenfalls davon ausgehen, dass Kunden zufällig rechtzeitig eintreffen, aber jeder Kunde eine Bestellung für eine nicht festgelegte Anzahl von Endprodukten aufgibt, die zu einem bestimmten Zeitpunkt geliefert werden sollen (z. B. Karaesmen et al. 2002; Liberopoulos & Tsikis 2003; Claudio & Krishnamurthy 2009; Jodlbauer & Dehmer 2020). In unserer Studie wird der Bedarf direkt aus dem Fertigwarenbestand gedeckt, und die Hauptentscheidung besteht darin, wann Nachschubaufträge ausgelöst werden. Das Simulationsmodell des kapazitiven Produktionssystems orientiert sich weitgehend an dem Modell einer Halbleiteranlage, das bei Fredendall et al. (2010) verwendet wird. Die Verwendung dieses Modells, das auf einem beobachteten industriellen Beispiel basiert, ermöglicht einen Vergleich mit der bisherigen Literatur und stellt gleichzeitig sicher, dass eine enge Verbindung zur Praxis aufrechterhalten wird. Der Hauptunterschied zu dem in Fredendall et al. (2010) verwendeten Modell besteht in der Einführung eines Lagers mit einem Fertigwarenbestand, aus dem die Nachfrage gedeckt wird, wodurch das

Modell von einem Make-to-Order- zu einem Make-to-Stock-System umgewandelt wird.

Unser Simulationsmodell wird mit der Simulationssoftware ARENA implementiert. Die simulierte Werkstatt produziert 10 verschiedene Produkte an 13 Stationen, wobei jede Station eine einzige Ressource mit konstanter Kapazität ist. Fertigprodukte werden in einem Lager gelagert, wobei der Bedarf aus diesem Fertigwarenbestand gedeckt wird. Tabelle 2 zeigt die Ankunftszeiten des Bedarfs für jeden Produkttyp zusammen mit den Auftragsmerkmalen, während Tabelle 3 die für jede Station verwendeten Verarbeitungszeitverteilungen zusammen mit der durchschnittlichen Auslastungsrate enthält. Alle Verteilungen stammen aus Fredendall et al. (2010) und basieren somit auf einem beobachteten industriellen Beispiel. Das Gleiche gilt für die gleichen mittleren Ankunftszeiten, die eingeführt werden, um diesen Umgebungsparameter zu steuern. Rüstzeiten gelten als sequenzunabhängig und sind Teil der

Tabelle 2 Zeit zwischen dem Eintreffen der Nachfrage für jeden Produkttyp (und die Produktmerkmale)

Produkt	Zwischenankunftszeiten	Routing
1	Erlang 3; Mittelwert = 10 Zeiteinheiten	1, 2, 4, 2, 9, 10, 11
2	Erlang 2; Mittelwert = 10 Zeiteinheiten	1, 2, 5, 2, 8, 9, 10, 11
3	Uniform [5, 15]; Mittelwert = 10 Zeiteinheiten	1, 2, 6, 4, 2, 9, 12, 11
4	Erlang 3; Mittelwert = 10 Zeiteinheiten	1, 2, 7, 4, 2, 9, 10, 11
5	Erlang 4; Mittelwert = 10 Zeiteinheiten	1, 2, 4, 12, 2, 9, 2, 13
6	Erlang 2; Mittelwert = 10 Zeiteinheiten	1, 2, 5, 12, 2, 9, 7, 13
7	Erlang 4; Mittelwert = 10 Zeiteinheiten	1, 2, 6, 12, 2, 8, 2, 13
8	Uniform [5, 15]; Mittelwert = 10 Zeiteinheiten	1, 2, 3, 7, 4, 12, 2, 8, 6, 9, 2, 13
9	Erlang 4; Mittelwert = 10 Zeiteinheiten	1, 2, 3, 5, 4, 6, 12, 2, 8, 2, 10, 6, 13
10	Erlang 2; Mittelwert = 10 Zeiteinheiten	1, 2, 3, 6, 2, 4, 12, 7, 2, 9, 11, 5, 13

Station	Verteilung der Bearbeitungszeit	Variationskoeffizient	Ungefähre Auslastung (%)
1	Gamma: $\alpha = 3, \beta = 0,26$	0.58	78.0
2	Gamma: $\alpha = 3, \beta = 0,12$	0.58	90.0
3	Gamma: $\alpha = 2, \beta = 1,33$	0.71	79.8
4	Gamma: $\alpha = 1, \beta = 1,06$	1.00	74.2
5	Gamma: $\alpha = 3, \beta = 0,67$	0.58	80.4
6	Gamma: $\alpha = 4, \beta = 0,35$	0.50	84.0
7	Gamma: $\alpha = 3, \beta = 0,59$	0.58	70.8
8	Gamma: $\alpha = 3, \beta = 0,63$	0.58	75.6
9	Gamma: $\alpha = 2, \beta = 0,59$	0.71	94.4
10	Gamma: $\alpha = 3, \beta = 0,6$	0.58	72.0

16				M. Thürer et al.
Tabelle 3 Verteilung der Verarbeitungszeit pro Station und realisierte Auslastung	11	Gamma: $\alpha = 1$, $\beta =$ 1,44	1.00	72.0
	12	Gamma: $\alpha = 4$, $\beta =$ 0,29	0.50	69.6
	13	Gamma: $\alpha = 3$, $\beta =$ 0,48	0.58	86.4

Bearbeitungszeit, um unser Studium fokussiert zu halten. Sobald ein Produktionsauftrag generiert wurde, gelangt er in den Pre-Shop-Pool und wartet darauf, in der Fertigung freigegeben zu werden. Sobald ein Auftrag auf dem Shopfloor abgeschlossen ist, gelangt er direkt in das Lager. Das bedeutet, dass die zeitlichen Auswirkungen des Produkttransports weggelassen werden, um unsere Studie auf die drei Kernelemente der MFC zu konzentrieren.

4.1 Parametrisierung der Materialflussteuerung

Wie in vorangegangenen Simulationsstudien zur Auftragsgenerierung, Freigabekontrolle und Produktionsberechtigung (z.B. Land & Gaalman 1998; Cigolini, & Portioli-Staudacher 2002; Fernandes & Carmo-Silva 2006; Germs & Riezebos 2010; Thürer et al. 2012; Harrod & Kanet 2013; Braglia et al. 2014; Fernandes et al. 2021) wird davon ausgegangen, dass alle Aufträge angenommen werden, Materialien verfügbar sind und alle notwendigen Informationen zu Fertigungsrouten, Bearbeitungszeiten etc. bekannt sind, sobald ein Auftrag generiert wird. Die Parametrisierung der verschiedenen MFC-Methoden sieht wie folgt aus.

4.1.1 Generierung von Aufträgen

Die Sicherheitsbestandsbestände (SSLs) in den Bestellpunktberechnungen werden mit Gl. (1) ermittelt. Dieser Ansatz wurde gewählt, da er laut den Ergebnissen von Schmidt et al. (2012) den besten Kompromiss in Bezug auf Einfachheit und Leistung bietet.

SSL-Verbindung

$$= SF(SL) \cdot \sqrt{TRP \cdot \sigma_D^2 + D^2 \cdot \sigma_{TRP}^2} \quad (1)$$

Es werden zwei Stufen des Sicherheitsfaktors SF berücksichtigt: 0 und 1. Eine SF von 0 bedeutet, dass kein Sicherheitsbestand vorhanden ist und dass der ROP gleich dem Bedarf während der Wiederbeschaffungszeit (TRP) ist. Der SF von 1 wurde willkürlich gesetzt, um eine Füllrate zu erzielen, die als gut angesehen werden kann, während die Leistungsunterschiede beibehalten werden. Der mittlere Verbrauch pro Periode (D) ist für alle Produkte gleich und kann aus Tabelle 2 entnommen werden.

Die Standardabweichung der Nachfrage pro Periode σ_D wurde durch eine Monte-Carlo-Simulation für jeden Produkttyp approximiert. Die Wiederbeschaffungszeit TRP und die Standardabweichung der Wiederbeschaffungszeit σ_{TRP} wurden über vorläufige Simulationsexperimente ermittelt. Die Werte basieren auf dem Szenario, in dem alle Aufträge für alle Szenarien sofort freigegeben und autorisiert werden. Die Berechnung des Bestellpunkts ist in der Anhangstabelle 9 zusammengefasst. Die Bestandsposition ergibt sich aus dem Fertigwarenbestand (Lagerbestand) plus Nachschubaufträge auf dem Weg (offene Aufträge) abzüglich eines etwaigen offenen Bedarfs. Er wird mit dem endgültigen (gerundeten) Meldebestand für jeden Produkttyp verglichen, und wenn die Lagerposition gleich oder kleiner als der Meldebestand ist, wird ein Produktionsauftrag generiert.

Wir berücksichtigen auch zwei Stufen von Nachbestellmengen: 1 und 5. In dieser Studie wird die Bestellmenge nicht in Bezug auf die Losgröße ausgedrückt, sondern vielmehr in Bezug auf die Anzahl der generierten Fertigungsaufträge. Da wir sequenzabhängige Rüstzeiten nicht berücksichtigen und andere Effekte der Chargengröße vernachlässigen, um unsere Studie fokussiert zu halten, erscheint eine Nachbestellmenge von 5 nicht aussagekräftig. Wir schließen sie jedoch als experimentelle Variable ein, da sie das Maß an Kontrolle reduziert, das durch die Ordnungspunktmethode ausgeübt wird. Die Produktionsaufträge, die generiert werden, verlaufen unabhängig voneinander, entsprechend den Erkenntnissen von Fernandes et al. (2020b). Der Haupteffekt einer höheren Auftragsmenge besteht folglich darin, dass Fertigungsaufträge mit einer höheren Varianz (d.h. seltener) generiert werden.

4.1.2 Freigabe von Aufträgen

Für die Auftragsfreigabe der Arbeitslaststeuerung werden fünf Arbeitslastnormen berücksichtigt. Die engste Stufe wird auf 3,5 Zeiteinheiten festgelegt, und die Stufe wird schrittweise erhöht, indem die vorhergehende Stufe mit 1,15 multipliziert (und gerundet) wird. Daraus ergeben sich Normen von 3,5, 4, 4,6, 5,3 und 6,1 Zeiteinheiten. Als Basismaßnahme wurden auch Experimente ohne kontrollierte Auftragsfreigabe durchgeführt, d.h. bei denen Aufträge unmittelbar nach der Generierung auf den Shopfloor freigegeben werden (IMR).

4.1.3 Produktionsgenehmigung

POLCA-Schleifen werden erstellt, um jeden möglichen Routing-Schritt von Aufträgen widerzuspiegeln. Es werden vier Stufen für die Anzahl der Karten pro Schleife berücksichtigt: 4, 6, 8 und 10 Karten pro Schleife. Diese Parameter wurden auf der Grundlage von vorläufigen Simulationsexperimenten festgelegt. In jeder Schleife eines bestimmten Experiments wird die gleiche Anzahl von Karten verwendet, um die experimentelle Einstellung angemessen zu halten. Als Basismaßnahme wurden auch Experimente ohne Produktionsberechtigung durchgeführt, d.h. bei denen alle Jobs sofort freigegeben sind (IMA).

4.2 S-Cheduling und Sequenzierung

Ein Auftrag wird eingeplant, sobald er generiert wird. Komplexitäten wie das Anlegen von Fertigungsaufträgen durch das Zusammenfassen oder Teilen von Kundenaufträgen werden in unserer Studie bewusst vernachlässigt, um sie fokussiert zu halten. Die Hauptterminierungsaufgabe ist die Ermittlung von Fälligkeitsterminen für Vorgänge. In dieser Studie werden wir eine einfache Vorausplanung verwenden. Das bedeutet, dass ein Zuschlag für die Durchlaufzeit des Arbeitsgangs zum Fälligkeitsdatum des vorhergehenden Arbeitsgangs addiert wird, beginnend mit dem geplanten Freigabedatum. Das geplante Freigabedatum wird angegeben, indem dem Datum der Auftragsgenerierung ein Zuschuss für die Wartezeit des Pools hinzugefügt wird. Die Berücksichtigung der Stationsdurchlaufzeit und der Pool-Wartezeit ergibt sich aus dem kumulierten gleitenden Durchschnitt, d.h. dem Durchschnitt aller bis zur aktuellen Simulationszeit realisierten Durchlauf- und Wartezeiten. In der Praxis können durchschnittliche Wiederbeschaffungszeiten erreicht werden, indem die erforderlichen Kapazitätsniveaus bereitgestellt werden. Da wir auf die Implementierung einer Kapazitätssteuerung verzichten, variieren die durchschnittlichen Wiederbeschaffungszeiten für jede Kombination von Faktorstufen. Dieser Effekt wird durch die Verwendung eines kumulativen gleitenden Durchschnitts für jedes Szenario kompensiert.

Anhand des geplanten Freigabedatums wird die Reihenfolge festgelegt, in der Aufträge für die Freigabe aus dem Pool berücksichtigt werden. Die Kartenzuordnung für die Produktionsberechtigung folgt den Fälligkeitsterminen des Vorgangs. Schließlich wird das First-Come-First-Served-Prinzip (FCFS) für die Dispositionsentscheidung verwendet, d.h. die Entscheidung, welcher autorisierte Auftrag an einer bestimmten Station auf dem Shopfloor als nächstes bearbeitet werden soll. FCFS wird verwendet, da es die Reihenfolge der Kartenzuweisung beibehält.

4.3 Experimentelles Design und Leistungsmaße

Tabelle 4 enthält eine Zusammenfassung des betrachteten MFC-Systems. Wir haben für dieses System ein vollfaktorielles Design verwendet, das zu 120 Szenarien ($2 \times$

$2 \times 6 \times 5$) führt. Jedes Szenario des Versuchsdesigns wurde 100 Mal repliziert. Die Ergebnisse wurden über 13.000 Zeiteinheiten nach einer Aufwärmphase von 3000 Zeiteinheiten gesammelt. Diese Simulationsbedingungen ermöglichen es uns, stabile Ergebnisse zu erzielen und gleichzeitig die Simulationslaufzeit auf einem vernünftigen Niveau zu halten.

Dabei werden fünf Hauptleistungskennzahlen berücksichtigt: die *Fill Rate (FR)*, d.h. der Anteil der Kundenbestellungen, die ab Lager erfüllt werden können, wenn die Kundenbestellung eintrifft (unser Servicelevel liegt bei 100%, d.h. wir gehen davon aus, dass es keine Umsatzeinbußen gibt); die

Kundenwartezeit (CWait), d.h. die Zeit, die ein Kunde warten muss, wenn das bestellte Produkt nicht vorrätig ist; der *Fertigwarenbestand (FGI)*, d.h. der durchschnittliche Anzahl der Produkte im Lager; die *Gesamtdurchlaufzeit (TTT)*, d.h. der Mittelwert des Lagereingangsdatums abzüglich des Mittelwerts des Pooleintragsdatums (das sich auf das Datum der Auftragsgenerierung bezieht) über Aufträge; und die *Standardabweichung der Gesamtdurchlaufzeit (SDTTT)*. Darüber hinaus und da wir die Auftragsfreigabesteuerung berücksichtigen, messen wir auch den Mittelwert der *Fertigungsdurchlaufzeit (SFTT)*. Während die Gesamtdurchlaufzeit die Zeit umfasst, die ein Auftrag wartet, bevor er freigegeben wird, misst die Durchlaufzeit in der Fertigung nur die Zeit, nachdem ein Auftrag an den Fertigungsbereich freigegeben wurde.

5 Befund

Es wurde eine ANOVA durchgeführt, um einen ersten Hinweis auf den relativen Einfluss der vier experimentellen Faktoren zu geben, d. h. des Sicherheitsfaktors, der Nachbestellmenge, der Workload Control Norm und der Anzahl der POLCA-Karten. Die Ergebnisse sind in einem Anhang wiedergegeben (siehe Tabellen 10, 11, 12, 13, 14, 15). Es wurde gezeigt, dass alle Haupteffekte und die meisten wechselseitigen Wechselwirkungen statistisch signifikant sind, mit Ausnahme des Sicherheitsfaktors. Der Sicherheitsfaktor hat keinen Einfluss auf die Durchlaufzeit in der Fertigung, die Gesamtdurchlaufzeit oder die Standardabweichung der Gesamtdurchlaufzeit. Es gibt einige signifikante Drei-Wege-Wechselwirkungen, aber keine signifikanten Vier-Wege-Wechselwirkungen. Um dies weiter zu bewerten, werden im Folgenden detaillierte Leistungsergebnisse in Abschnitt vorgestellt. 5.1 bevor eine Robustheitsanalyse in Abschn. 5.2. Urheberrecht

5.1 Performance assessment

Die Simulationsergebnisse für einen Sicherheitsfaktor von 1 und 0 sind in den Tabellen 5 bzw. 6 dargestellt. Beim Vergleich der Ergebnisse in den Tabellen 5 und 6 können wir feststellen, dass es erwartungsgemäß zu einer starken Reduzierung der Füllrate und des Fertigwarenbestands kommt, wenn der Sicherheitsfaktor und damit

Table 4 Summary of MFC system considered

Order generation	Order release	Production authorization
Re-order point; re-order quantity of 1 and 5; safety factor of 0 and 1	Workload control with 3.5, 4, 4.6, 5.3, and 6.1 time unit limits; and immediate release	POLCA with 4, 6, 8, 10 cards per loop; and immediate authorization

der Meldebestand reduziert wird. Detaillierte Ergebnisse zeigen auch, dass der Sicherheitsfaktor keinen Einfluss auf die durchlaufzeitbezogenen Leistungsmaße hat, was durch die ANOVA weiter bestätigt wird. Die Auftragsfreigabe von Workload Control reduziert die Durchlaufzeiten in der Fertigung und kann aufgrund der Fähigkeit zum Lastausgleich auch die Gesamtdurchlaufzeiten reduzieren, was wiederum zu einer Erhöhung der Füllrate und des Fertigwarenbestands führt. Sind die Arbeitslastnormen zu eng, erhöht sich die Anzahl der Sequenzabweichungen, wie man an der Standardabweichung der Gesamtdurchlaufzeitergebnisse erkennen kann. Diese Verschlechterung der Timing-Leistung gleicht die Verbesserung des Lastausgleichs an einem bestimmten Punkt aus, sodass die Füllrate abnimmt. Während POLCA bei einer Nachbestellmenge von 1 nahezu keinen Leistungseffekt hat, ermöglicht es bei einer Nachbestellmenge von 5 eine weitere Reduzierung der Durchlaufzeiten. Generell erhöht die Erhöhung der Nachbestellmenge von 1 auf 5 erwartungsgemäß die Ware in Arbeit (und damit die Durchlaufzeiten) und den Fertigwarenbestand. Dadurch werden die Potenziale von Auftragsfreigabe und Produktionsfreigabe zur Reduzierung der Durchlaufzeiten deutlich erhöht.

Table 5 Summary of results for a safety factor of 1

WLC		POLCA		ROQ 1		ROQ 5							
		SFTT (TU) ¹	TTT (TU)	SDTTT (TU)	CWair (TU)	FGI (Items)	FR (%)	SFTT (TU)	TTT (TU)	SDTTT (TU)	CWair (TU)	FGI (Items)	FR (%)
IMR	IMA	34.4	34.4	14.5	8.0	27.2	93.3	52.4	52.4	21.8	10.2	29.6	90.6
6.1	IMA	33.3	33.9	14.4	7.1	27.6	94.2	43.5	47.2	19.7	7.2	34.0	95.9
5.3	IMA	32.4	33.4	14.4	6.7	27.7	94.8	40.3	45.4	19.5	6.8	35.5	96.9
4.6	IMA	31.2	32.9	15.2	6.6	27.4	95.1	36.8	43.8	20.2	6.6	36.1	97.4
4	IMA	29.6	32.4	16.3	7.8	25.3	93.9	33.4	42.5	21.5	7.9	34.8	96.6
3.5	IMA	27.7	32.2	19.8	14.5	20.1	86.4	30.2	42.1	25.5	15.4	29.3	90.8
IMR	10	34.3	34.3	16.9	9.0	27.4	93.5	49.8	51.2	24.0	10.9	30.7	92.0
6.1	10	33.2	33.8	14.9	7.3	27.7	94.1	43.2	47.0	19.8	7.3	34.2	96.0
5.3	10	32.4	33.4	14.7	6.9	27.7	94.7	40.1	45.3	19.5	6.8	35.6	96.9
4.6	10	31.2	32.9	15.2	6.7	27.4	95.1	36.8	43.7	20.0	6.7	36.1	97.4
4	10	29.6	32.4	16.2	7.7	25.3	93.9	33.4	42.5	21.5	7.9	34.8	96.7
3.5	10	27.7	32.3	19.7	14.5	20.1	86.4	30.3	42.1	25.1	15.4	29.3	90.8
IMR	8	34.2	34.3	18.7	9.8	27.5	93.4	48.4	50.5	25.8	11.9	31.4	92.5
6.1	8	33.2	33.7	15.5	7.7	27.7	94.1	42.6	46.7	20.1	7.5	34.6	96.1
5.3	8	32.3	33.3	15.0	7.1	27.8	94.6	39.8	45.1	19.6	6.8	35.8	97.0
4.6	8	31.1	32.8	15.4	6.7	27.4	95.1	36.6	43.5	20.0	6.5	36.3	97.4
4	8	29.5	32.3	16.2	7.7	25.3	94.0	33.3	42.4	21.5	7.9	34.8	96.7
3.5	8	27.7	32.2	20.1	14.5	20.1	86.5	30.2	42.0	25.2	15.4	29.4	90.9
IMR	6	34.2	34.3	23.3	12.3	27.7	93.2	46.4	49.6	29.1	13.6	32.5	92.8
6.1	6	33.0	33.7	18.0	9.1	27.9	93.7	41.6	46.1	21.3	8.1	35.2	96.1
5.3	6	32.2	33.3	16.2	7.7	27.9	94.3	39.1	44.7	20.3	7.1	36.2	97.0
4.6	6	31.0	32.8	16.0	7.0	27.5	94.9	36.2	43.3	20.1	6.8	36.6	97.5
4	6	29.5	32.3	16.5	7.7	25.4	93.9	33.1	42.2	21.3	7.9	35.1	96.8

Table 5 (continued)

		ROQ 5												
WLC POLCA ROQ 1		SFTT (TU) ¹	TTT (TU)	SDTTT (TU)	CWait (TU)	FGI (Items)	FR (%)	SFTT (TU)	TFTT (TU)	TTT (TU)	SDTTT (TU)	CWait (TU)	FGI (Items)	FR (%)
3.5	6	27.7	32.1	19.7	14.4	20.2	86.6	30.1	41.8	41.8	25.1	15.2	29.5	91.1
IMR	4	34.2	34.6	32.0	16.2	27.9	92.1	44.2	48.7	48.7	37.8	16.7	33.7	92.3
6.1	4	33.1	34.2	25.9	12.7	27.9	92.4	40.2	45.6	45.6	27.7	11.5	35.9	95.2
5.3	4	32.2	33.7	22.4	10.7	27.9	93.0	38.0	44.3	44.3	24.1	9.1	36.7	96.3
4.6	4	31.0	33.1	19.5	8.6	27.4	93.7	35.5	43.0	43.0	22.1	7.5	37.0	97.1
4	4	29.3	32.4	18.0	8.3	25.3	93.2	32.6	41.9	41.9	21.9	7.9	35.4	96.8
3.5	4	27.6	32.2	22.2	14.2	20.1	86.4	29.8	41.4	41.4	24.8	14.7	29.8	91.4

¹TU—Time Units

Table 6 Summary of results for a safety factor of 0

WLC		POLCA		ROQ 1		ROQ 5							
		SFTT (TU ¹)	TTT (TU)	SDITT (TU)	CWait (TU)	FGI (Items)	FR (%)	SFTT (TU)	TTT (TU)	SDITT (TU)	CWait (TU)	FGI (Items)	FR (%)
IMR	IMA	34.4	34.4	14.5	10.4	13.2	76.0	52.4	52.4	21.8	13.9	16.5	72.9
6.1	IMA	33.3	33.9	14.4	9.5	13.4	77.0	47.2	47.2	19.7	10.1	19.5	82.3
5.3	IMA	32.4	33.4	14.4	9.1	13.4	77.8	45.4	45.4	19.5	9.3	20.7	85.1
4.6	IMA	31.2	32.9	15.2	9.1	13.1	77.9	43.8	43.8	20.2	9.2	21.2	86.6
4	IMA	29.6	32.4	16.3	11.0	11.8	74.6	42.5	42.5	21.5	11.3	20.4	84.8
3.5	IMA	27.7	32.2	19.8	19.3	9.3	65.1	30.2	42.1	25.5	20.3	17.2	76.4
IMR	10	34.3	34.3	16.9	10.7	13.3	76.5	49.8	51.2	24.0	13.6	17.2	75.4
6.1	10	33.2	33.8	14.9	9.6	13.5	77.2	43.2	47.0	19.8	10.1	19.7	82.8
5.3	10	32.4	33.4	14.7	9.2	13.5	77.9	40.1	45.3	19.5	9.4	20.8	85.3
4.6	10	31.2	32.9	15.2	9.1	13.1	77.9	36.8	43.7	20.0	9.3	21.3	86.7
4	10	29.6	32.4	16.2	11.0	11.8	74.6	33.4	42.5	21.5	11.2	20.4	84.9
3.5	10	27.7	32.3	19.7	19.3	9.3	65.0	30.3	42.1	25.1	20.4	17.2	76.3
IMR	8	34.2	34.3	18.7	11.0	13.4	76.7	48.4	50.5	25.8	13.7	17.7	76.8
6.1	8	33.2	33.7	15.5	9.8	13.5	77.4	42.6	46.7	20.1	10.1	20.0	83.4
5.3	8	32.3	33.3	15.0	9.4	13.5	77.9	39.8	45.1	19.6	9.4	21.0	85.7
4.6	8	31.1	32.8	15.4	9.2	13.2	78.0	36.6	43.5	20.0	9.2	21.4	86.9
4	8	29.5	32.3	16.2	11.0	11.8	74.7	33.3	42.4	21.5	11.2	20.5	85.0
3.5	8	27.7	32.2	20.1	19.3	9.3	65.1	30.2	42.0	25.2	20.3	17.3	76.5
IMR	6	34.2	34.3	23.3	12.0	13.6	77.1	46.4	49.6	29.1	14.3	18.6	78.6
6.1	6	33.0	33.7	18.0	10.5	13.7	77.6	41.6	46.1	21.3	10.3	20.5	84.3
5.3	6	32.2	33.3	16.2	9.7	13.6	78.0	39.1	44.7	20.3	9.5	21.3	86.3
4.6	6	31.0	32.8	16.0	9.4	13.3	78.1	36.2	43.3	20.1	9.3	21.7	87.4
4	6	29.5	32.3	16.5	11.0	11.9	74.8	33.1	42.2	21.3	11.1	20.7	85.5

Table 6 (continued)

		ROQ 5											
WLC POLCA ROQ 1		SFTT (TU) ¹	TTT (TU)	SDTTT (TU)	CWait (TU)	FGI (Items)	FR (%)	SFTT (TU)	TTT (TU)	SDTTT (TU)	CWait (TU)	FGI (Items)	FR (%)
3.5	6	27.7	32.1	19.7	19.2	9.4	65.3	30.1	41.8	25.1	20.1	17.3	76.8
IMR	4	34.2	34.6	32.0	14.2	13.8	77.0	44.2	48.7	37.8	16.1	19.6	80.0
6.1	4	33.1	34.2	25.9	12.5	13.8	77.0	40.2	45.6	27.7	12.0	21.2	84.7
5.3	4	32.2	33.7	22.4	11.4	13.7	77.3	38.0	44.3	24.1	10.5	21.8	86.5
4.6	4	31.0	33.1	19.5	10.4	13.3	77.2	35.5	43.0	22.1	9.6	22.0	87.6
4	4	29.3	32.4	18.0	11.4	11.9	74.4	32.6	41.9	21.9	11.1	20.9	85.9
3.5	4	27.6	32.2	22.2	19.1	9.3	65.1	29.8	41.4	24.8	19.6	17.5	77.4

¹TU—Time units

Insgesamt lassen sich aus den Ergebnissen in den Tabellen 5 und 6 folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- *Generierung von Bestellpunkten*: Die Erfüllungsrate wird weitgehend durch die für jeden Produkttyp berechneten Bestellpunkte bestimmt. Die Durchlaufzeiten werden maßgeblich durch die Nachbestellmenge bestimmt. Eine Erhöhung der Nachbestellmenge erhöht die Anzahl der gleichzeitig erzeugten Fertigungsaufträge, was zu Spitzen in der Auslastung und damit im Work-in-Work-Level führt.
- *Auslastungssteuerung Auftragsfreigabe*: Die Durchlaufzeit in der Fertigung wird maßgeblich durch die Auftragsfreigabe bestimmt, wodurch sich bei entsprechender Normsetzung auch die Gesamtdurchlaufzeiten reduzieren können. Diese Reduzierung der Gesamtdurchlaufzeiten wirkt sich auf die Wiederbeschaffungszeit und damit sowohl auf den Fertigwarenbestand als auch auf die Füllrate aus. Diese Auswirkung ist jedoch marginal, wenn die Auftragsgenerierung effektiv ist (d.h. bei einer Nachbestellmenge von 1).
- *POLCA-Produktionsberechtigung*: Die Durchlaufzeiten in der Fertigung können durch die Ausübung der Produktionsberechtigung weiter reduziert werden, wenn die Auftragsgenerierung und die Auftragsfreigabe weniger effektiv sind, aber die Auswirkungen auf die Leistung geringer sind als bei der Auftragsfreigabe. Wenn die Ordergenerierung effektiv ist, dann hat POLCA keinen oder nur einen negativen Performance-Effekt.

5.2 Analyse der Robustheit

Bei der obigen Darstellung der Ergebnisse wurden die Unterschiede zwischen den Produkten vernachlässigt. Um zu verstehen, ob die oben genannten Ergebnisse von den Eigenschaften bestimmter Produkttypen beeinflusst werden, haben wir auch die Füllrate pro Produkttyp erfasst. Die Ergebnisse für eine Nachbestellmenge von 5 und einen Sicherheitsfaktor von 0 sind in Tabelle 7 dargestellt. Wir konzentrieren uns auf diese Szenarien, da dies die Auswirkungen von Auftragsfreigabe und Auftragsautorisierung hervorhebt.

Hinsichtlich der direkten Wirkung unserer drei MFC-Methoden lässt sich aus Tabelle 8 folgendes erkennen:

- *Die Generierung von Bestellungen zum Bestellpunkt* reagiert empfindlich auf die Variabilität der Ankunftszeiten, was dazu führt, dass die höhere Variabilität der Ankunftszeit für die Produkttypen 2, 6 und 10 (siehe Tabelle 2 oben) zu niedrigeren Ausführungsraten führt. Dies lässt sich an der Zeile für IMR und IMA in Tabelle 8 ablesen. Die Auftragsgenerierung ist auch abhängig von der Arbeitsplanlänge (d. h. der Anzahl der Stationen im Arbeitsplan eines Auftrags), da eine längere Arbeitsplanlänge längere Wiederbeschaffungszeiten bedeutet. Dieser Effekt ist jedoch abhängig von der Nachbestellmenge.

- *Die Auftragsfreigabe der Arbeitslaststeuerung* verbessert die Ausführungsrate für alle Produkttypen, wenn die Arbeitslastnorm entsprechend eingestellt ist. Dies kann an den Zeilen der Tabelle beobachtet werden, die die verschiedenen Arbeitslastnormen und den IMA darstellen.
- *Die POLCA-Produktionsgenehmigung* ist abhängig von der Routing-Reihenfolge. Die Leistung wird für alle Produkttypen mit Ausnahme der Typen 1 und 4 verbessert. Dies kann man beobachten, wenn man sich auf die Reihen für IMR und die verschiedenen Stufen der POLCA-Karten in Tabelle 7 konzentriert. Für Produkttyp 1 beträgt die Füllrate beispielsweise 86,4 % für IMA und 78,4 % für eine Karte der Stufe 4. Werfen wir einen genaueren Blick auf die Routen von

Tabelle 7 Füllrate pro Produkttyp – ROQ von 5 und ein Sicherheitsfaktor von 0

WLC (A nglisch)	POLCA	Füllrate pro Produkttyp									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IMR	IMA	86.4%	69.6%	84.4%	79.9%	82.9%	66.5%	77.2%	68.7%	62.7%	50.3%
6.1	IMA	90.4%	76.1%	91.8%	86.1%	89.9%	74.5%	83.5%	87.3%	78.4%	65.5%
5.3	IMA	91.7%	78.5%	94.1%	88.4%	92.1%	77.5%	85.5%	91.1%	82.4%	70.2%
4.6	IMA	92.6%	80.6%	95.8%	90.5%	94.0%	80.0%	87.4%	91.1%	82.6%	71.7%
4	IMA	93.4%	81.3%	96.4%	91.9%	95.1%	80.9%	88.2%	81.7%	74.8%	65.0%
3.5	IMA	91.8%	77.8%	95.9%	91.3%	94.3%	78.6%	87.6%	53.6%	47.5%	45.8%
IMR	10	85.8%	72.6%	86.5%	79.7%	85.4%	68.7%	80.3%	75.5%	67.1%	52.4%
6.1	10	90.4%	77.4%	91.8%	85.9%	90.3%	74.7%	84.6%	89.1%	79.4%	64.7%
5.3	10	91.5%	79.1%	94.0%	88.3%	92.1%	77.5%	86.1%	91.9%	82.8%	69.7%
4.6	10	92.7%	80.8%	95.7%	90.4%	93.9%	80.1%	87.5%	91.4%	82.7%	71.6%
4	10	93.4%	81.4%	96.5%	91.8%	95.0%	80.7%	88.5%	81.9%	75.0%	65.0%
3.5	10	92.0%	77.7%	95.6%	91.1%	94.3%	78.4%	87.5%	53.7%	47.3%	45.5%
IMR	8	84.9%	74.1%	88.3%	79.4%	86.6%	70.2%	81.9%	79.1%	69.4%	54.5%
6.1	8	90.1%	78.7%	92.2%	85.6%	90.5%	75.2%	85.7%	90.4%	80.5%	65.4%
5.3	8	91.6%	80.1%	94.2%	88.1%	92.6%	77.9%	86.6%	92.8%	83.7%	69.9%
4.6	8	92.8%	81.4%	95.7%	90.4%	94.0%	80.3%	88.1%	92.0%	83.3%	71.5%
4	8	93.4%	81.5%	96.5%	91.7%	95.0%	80.9%	88.6%	82.2%	75.4%	65.0%
3.5	8	92.1%	77.9%	95.8%	91.3%	94.4%	78.7%	87.8%	54.0%	47.6%	45.7%
IMR	6	82.8%	75.4%	90.8%	78.3%	87.8%	72.5%	83.2%	83.6%	72.8%	58.6%
6.1	6	88.5%	79.8%	93.3%	83.8%	91.1%	77.0%	87.0%	92.4%	82.6%	67.6%
5.3	6	90.7%	81.3%	94.7%	87.3%	92.6%	78.7%	88.0%	94.1%	85.2%	70.7%
4.6	6	92.5%	82.4%	96.0%	89.9%	94.2%	80.7%	89.1%	93.0%	84.6%	71.8%
	6	93.4%	82.5%	96.6%	91.5%	95.2%	81.3%	89.3%	83.3%	76.8%	65.1%
3.5	6	91.8%	78.3%	95.8%	91.0%	94.3%	79.2%	88.2%	54.7%	48.5%	46.0%
IMR	4	78.4%	74.6%	92.0%	74.1%	88.8%	75.7%	84.1%	88.6%	78.5%	65.2%
5.1	4	82.5%	79.2%	94.5%	77.8%	91.2%	80.1%	88.2%	95.0%	86.8%	72.2%
5.3	4	86.0%	80.8%	95.0%	81.9%	92.8%	81.4%	89.4%	95.6%	88.3%	74.0%
4.6	4	89.4%	82.5%	95.8%	86.5%	93.8%	81.8%	90.3%	94.6%	87.3%	73.8%
	4	91.6%	82.8%	96.5%	89.8%	94.8%	82.0%	90.7%	85.2%	79.1%	66.3%
3.5	4	91.0%	79.1%	95.8%	90.2%	94.4%	79.6%	89.4%	56.9%	50.8%	47.1%

4

4

die verschiedenen Produkttypen, dann können wir beobachten, dass drei Produkttypen (Typen 1, 2 und 4) den gleichen Routingschritt von Station 9 (der Station mit der höchsten durchschnittlichen Auslastung) zu Station 10 teilen. Das bedeutet, dass es einen hohen Wettbewerb um die POLCA 9-10-Karten gibt, die gleichzeitig viel Zeit in Anspruch nehmen, um im Umlauf zu sein. Um diese Vermutung zu beweisen, fasst Tabelle 8 die Zeit bis zur Kartenzuweisung und die Durchlaufzeit des Vorgangs nach der Kartenzuweisung pro Auftragsstyp für die Stationen 9 und 10 zusammen. Aus der Tabelle können wir ersehen, dass die Wartezeiten für Karten bei Aufträgen, die Station 10 als

Table 8 Operation throughput times per product type—ROQ of 5 and a safety factor of 0

	Cards	Job type													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
Station 9	Time until card allocation	IMA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		10	1.58	0.87	0.00	1.31	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
		8	2.89	1.72	0.01	2.60	0.15	0.02	0.15	0.02	0.02	0.12	0.02	0.02	0.02
		6	5.50	3.41	0.02	4.75	0.47	0.08	0.47	0.08	0.08	0.32	0.08	0.08	0.08
		4	10.44	6.55	0.21	9.16	1.18	0.37	1.18	0.37	0.37	0.82	0.82	0.33	0.33
Station 10	Operation Throughput Time after allocation	IMA	12.32	11.85	11.92	11.99	11.94	12.06	11.90	11.90	11.90	11.90	11.90	11.90	12.08
		10	10.67	10.47	10.53	10.54	10.67	10.64	10.66	10.66	10.66	10.66	10.66	10.66	10.76
		8	9.67	9.53	9.67	9.60	9.86	9.81	9.88	9.88	9.88	9.88	9.88	9.88	9.88
		6	8.14	8.13	8.44	8.17	8.59	8.57	8.62	8.62	8.62	8.62	8.62	8.62	8.56
		4	5.96	6.06	6.69	6.07	6.69	6.78	6.74	6.74	6.74	6.74	6.74	6.74	6.69
Station 9	Time until card allocation	IMA	0.00	0.00	-	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		10	0.04	0.03	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		8	0.10	0.08	-	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6	0.32	0.24	-	0.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4	0.92	0.71	-	0.84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Station 10	Operation throughput time after allocation	IMA	5.25	5.00	-	5.16	-	-	-	-	-	-	-	-	
		10	5.00	4.74	-	4.91	-	-	-	-	-	-	-	-	
		8	4.78	4.54	-	4.71	-	-	-	-	-	-	-	-	
		6	4.41	4.18	-	4.33	-	-	-	-	-	-	-	-	
		4	3.77	3.57	-	3.72	-	-	-	-	-	-	-	-	

The waiting times until card allocation for jobs at Station 9 that have Station 10 as the next routing step are marked in bold

Der nächste Arbeitsplanschritt (fett markiert). Während dieser Anstieg bei Produkttyp 2 ausgeglichen wird, führt er bei Typ 1 und 4 zu der beobachteten Verschlechterung der Füllrate.

6 Diskussion

Im Allgemeinen zeigen unsere Ergebnisse eine klare Hierarchie der Steuerung auf der Grundlage der Arbeitslast, die der Hierarchie der Arbeitslasten ähnelt, die innerhalb des Konzepts der Arbeitslaststeuerung verwendet wird (Kingsman et al. 1989; Kingsman 2000). Die Hierarchie der Arbeitslasten der Arbeitslaststeuerung besteht aus: (i) der Arbeitsauslastung in der Fertigung; ii) die geplante Arbeitsbelastung, die sich aus der Arbeitsauslastung in der Fertigung und den Aufträgen im Vorverkaufspool zusammensetzt; und (iii) die Gesamtauslastung, die sich aus der geplanten Arbeitsbelastung plus einem Prozentsatz von Kundenanfragen auf der Grundlage der Auftragsgewinnungshistorie zusammensetzt, der sogenannten "Trefferquote" (z. B. Kingsman et al. 1996). Diese Gesamtauslastung ähnelt dem Master-Produktionsplan in der MRP-Literatur, aber der MPS ist ein Plan für die Produktion pro Periode, während die Gesamtauslastung teilweise eine Zustandsvariable ist. Bei unserem integrierten MFC-System steuert die Auftragsgenerierung die Übergabe der eingehenden Kundenaufträge in Fertigungsaufträge, also die geplante Auslastung. Die Auftragsfreigabe steuert dann die Übertragung der Pool-Last in die Arbeitslast in der Fertigung. Es hat jedoch keine direkten Auswirkungen auf die Menge der Produktionsaufträge. Schließlich steuert die Produktionsberechtigung die Stationsauslastung, d.h. die Umwandlung von Fertigungsaufträgen in Fertigwaren; Es hat jedoch keine direkten Auswirkungen auf die Menge der Fertigungsaufträge. Folglich wird die Auswirkung der einzelnen Kontrollebenen durch die tatsächlich gesteuerte Arbeitsauslastung begrenzt. Dies ist in Abb. 3. Urheberrecht

Die Hierarchie der Arbeitslasten von Workload Control wurde hauptsächlich für einen Einzelauftragskontext entwickelt, in dem Aufträge stark angepasst werden können, was bedeutet, dass Aufträge erst dann abgeschlossen werden, wenn die Nachfrage bekannt ist (Kingsman et al. 1989). In einer Lagerfertigung

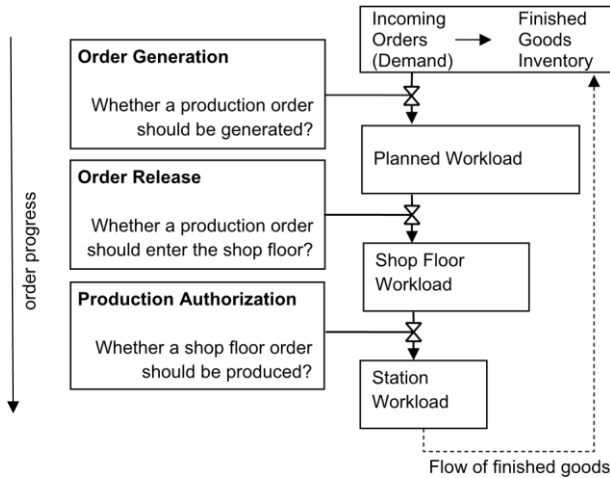


Abb. 3 Zusammenfassung der MFC-Steuerungsstufen und des hierarchischen Workload-Managements. In diesem Kontext, in dem die Nachfrage in der Regel aus Lagerbeständen gedeckt wird, entsteht eine zusätzliche wichtige Arbeitsbelastung – die des Fertigwarenbestands. Vor allem aber ist es der Fertigwarenbestand, der über die Kundenzufriedenheit in Bezug auf die Liefer- und Wartezeit entscheidet, nicht die Durchlaufzeiten. Der Fertigwarenbestand fungiert als Entkopplungs- oder Auftragsdurchdringungspunkt für den Kundenauftrag (van Donk 2001; Olhager 2003; Calle et al. 2016; Land et al. 2021), wodurch der Kunde vom Produktionssystem getrennt wird. Die Durchlaufzeiten, die sich aus der Hierarchie der Arbeitslasten der Arbeitslaststeuerung ergeben, beeinflussen den Fertigwarenbestand und die Füllquote nur indirekt, da Durchlaufzeiten im Lagerfertigungskontext zu Nachschubzeiten werden.

Die Auswirkungen der Auftragsgenerierung und -freigabe im Zeitverlauf sind in Abb. 4. Anmelden Die horizontale Achse bezieht sich auf die (Simulations-)Zeit, während die vertikale Achse die kumulative Anzahl der Bestellungen anzeigt, die angefordert, generiert, freigegeben, abgeschlossen und geliefert werden. Solche kumulativen Darstellungen im Zeitverlauf werden seit vielen Jahrzehnten verwendet, da sie helfen, die industrielle Dynamik zu erklären (z. B. Forrester 1961; Nyhuis & Wiendahl 2008; Land et al. 2021). Der horizontale Abstand zwischen den Kurven gibt den Durchsatz und die Wartezeiten an, während der vertikale Abstand zwischen den Kurven die Arbeitslast zwischen zwei Entscheidungen zu einem beliebigen Zeitpunkt angibt. Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt eines repräsentativen Simulationslaufs für einen Sicherheitsfaktor von 1, eine Nachbestellmenge von 1 und eine Arbeitslastnorm von 4 mit sofortiger Berechtigung.

Abbildung 4 zeigt, dass die Summe aus Fertigwarenbestand und geplanter Auslastung (d.h. der vertikale Abstand zwischen Liefer- und Eingangskurve) nicht von der Auftragsfreigabe beeinflusst wird. Stattdessen wird sie hauptsächlich durch die Ordergenerierung bestimmt. Die Auftragsfreigabe wirkt sich nur auf den

Zeitpunkt aus, zu dem Ware in Arbeit zum Fertigwarenbestand wird. Die Hierarchie der Arbeitslast führt somit zu folgender Steuerungshierarchie:

Auftragsgenerierung, die den Fertigwarenbestand und die geplante Auslastung steuert. Auftragsfreigabe und Produktionsfreigabe wirken sich nur indirekt über die Wiederbeschaffungszeiten aus. Das bedeutet, dass wenn der Fokus auf dem Fertigwarenbestand und der Ausführungsrate liegt und wenn eine effektive Methode zur Auftragsgenerierung

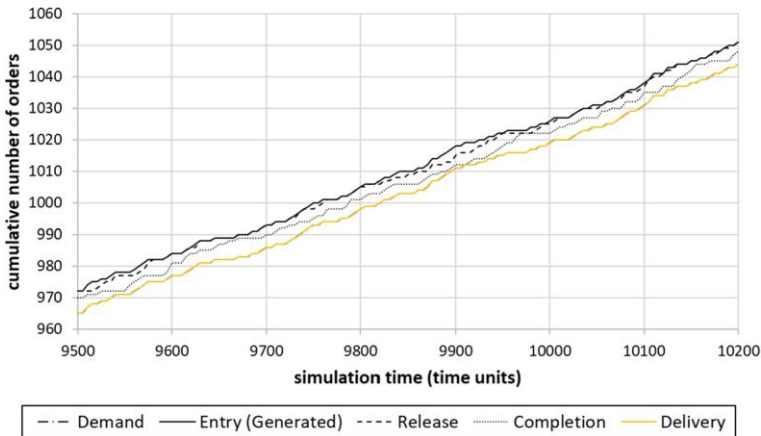


Abb. 4 Einfluss der Auftragsgenerierung und -freigabe im Zeitverlauf

vorhanden ist, dann ist der Einsatz von Auftragsfreigabe und Produktionsberechtigung fragwürdig. Dafür sprechen die in den Tabellen 5 und 6 mit einer Nachbestellmenge von 1 erzielten Ergebnisse sowie die ANOVA-Ergebnisse für die Füllrate und die Gesamtdurchlaufzeit, die die geplante Auslastung widerspiegeln. Beide sind im Anhang aufgeführt (siehe Tabellen 10 bzw. 13).

Auftragsfreigabe, die die Auslastung in der Fertigung steuert. Das bedeutet, dass sich die Steuerung weitgehend auf die Durchlaufzeiten in der Fertigung konzentriert. Die Auftragsfreigabe wirkt sich nur durch ihre Load-Balancing-Fähigkeit auf die Gesamtdurchlaufzeiten aus, aber dieser Effekt ist marginal, wenn die Auftragsgenerierung die geplante Auslastung bereits streng steuert. Dafür sprechen die ANOVA-Ergebnisse für die Gesamtdurchlaufzeiten und die Durchlaufzeiten auf dem Shopfloor. Beide sind im Anhang aufgeführt (siehe Tabellen 13 bzw. 15). In der Zwischenzeit verzögert die Auftragsfreigabe bestimmte Auftragsarten, wenn die Normen zu eng sind, was den in den Tabellen 5 und 6 beobachteten starken Effekt auf die Wartezeiten der Kunden erklärt. Dies wird auch durch die ANOVA-Ergebnisse für die Wartezeit der Kunden in Anhang Tabelle 11 untermauert. Wenn die Auftragsgenerierung bei der Steuerung der geplanten Arbeitslast weniger effektiv ist, hat die Auftragsfreigabe durch ihre Auswirkungen auf die Wiederbeschaffungszeiten auch einen erheblichen Einfluss auf den Fertigwarenbestand und die Füllrate. Dies wird durch die Ergebnisse unterstützt, die mit einer Nachbestellmenge von 5 erzielt wurden. In ähnlicher Weise wird die Auftragsfreigabe in Kontexten wichtiger, in denen es keinen

Fertigwarenbestandspuffer gibt, z. B. in Einzelfertigungskontexten, in denen häufig eine sofortige Auftragsgenerierung realisiert wird. Ein effektives Kundenanfragemanagement, das bereits einen ausgeglichenen Arbeitsaufwand schafft, hat jedoch einen ähnlichen Effekt wie eine effektive Auftragsgenerierung im Einzelkundenkontext (Thürer et al. 2014b).

Produktionsberechtigung, die die Stationslasten steuert. Das bedeutet, dass sich die Steuerung weitgehend auf die Durchlaufzeiten des Betriebs konzentriert, was sich auf die Durchlaufzeiten in der Fertigung auswirkt. Die Produktberechtigung kann in Abwesenheit der Auftragsfreigabekontrolle als Ersatz fungieren, da die Freigabe durch die Berechtigung der ersten Station im Arbeitsplan des Jobs gesteuert wird. Die positiven Performance-Effekte sind jedoch geringer, was zu negativen Gesamtpformance-Effekten führen kann, wenn die Auftragsgenerierung effektiv ist. Wenn eine effektive Methode zur Auftragsfreigabe vorhanden ist, besteht die Hauptauswirkung der Produktionsgenehmigung darin, die Durchlaufzeiten in der Fertigung weiter zu verkürzen. Die begrenzte Wirkung von POLCA wird auch durch die im Anhang dargestellten ANOVA-Ergebnisse gestützt.

Diese Hierarchie erweitert die Idee hierarchischer Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme, in denen Entscheidungen auf höherer Ebene, die längere Zeiträume (und mehr aggregierte Informationen) berücksichtigen, Entscheidungen auf niedrigerer Ebene, die kürzere Zeiträume berücksichtigen, einschränken (McKay et al. 1995). Die grundlegende Struktur dieser hierarchischen Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme besteht aus einer Planungsebene, die typischerweise für die Auftragsgenerierung und -koordination verwendet wird, und einer Planungsebene, die die Produktion autorisiert (Missbauer & Uzsoy 2022). Beides wird durch die Auftragsfreigabe vermittelt. Die oben dargestellte Hierarchie der Arbeitsbelastung erweitert hierarchische Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme, weil: die Arbeitsbelastung enger mit Leistungsindikatoren verknüpft ist, da sie jede Entscheidung vermittelt; und die Ordergenerierung berücksichtigt nicht unbedingt längere Zeiträume, z.B. konzentrierten sich alle drei in unserer Studie integrierten MFC-Methoden (Re-Order Point, Workload Control und POLCA) nur auf aktuelle Informationen.

Schließlich erweitert unsere Studie auch die Forschung zu allgemeinen MFC-Systemen, die in der Lage sind, andere MFC-Methoden nachzuahmen, wie z.B. Production Authorization Cards (PAC; z.B. Buzacott & Shanthikumar 1992). PAC ermöglicht es, je nach Parametrisierung verschiedene MFC-Methoden zu realisieren. Es wurde daher nicht in Abschn. 2, da sich die Kategorisierung als Auftragsgenerierung, Auftragsfreigabe oder Produktionsberechtigung entsprechend der Parametrisierung ändern würde. PAC kann jedoch jeweils nur ein MFC-System nachahmen. Er müsste daher dreimal entlang des Materialflusses oder Produktlebenszyklus angewendet werden, um alle drei MFC-Aufgaben auszuführen. Zukünftige Forschung ist daher erforderlich, um PAC und/oder kundenspezifische tokenbasierte Produktionssteuerungssysteme zu erweitern (z.B. González-R und Framinan 2009). Dies würde den Unternehmen mehr Flexibilität bieten und ihre

idiosynkratischen Bedürfnisse, die sich im Laufe der Zeit ändern können, besser widerspiegeln.

7 Schlüsse

Die Materialflusssteuerung (MFC) ist ein wichtiger Bestandteil der Produktionsplanung und -steuerung. MFC-Methoden können danach kategorisiert werden, wie die Materialflusssteuerung realisiert wird, z. B. als Pull-System, wenn eine Work-in-Process-Kappe durchgesetzt wird, oder andernfalls als Push-System. In ähnlicher Weise können die verschiedenen Methoden als besser geeignet für Lager- oder Auftragsfertigungsumgebungen angesehen werden. Dabei wird jedoch übersehen, dass Entscheidungen zur Materialflusssteuerung entlang des Auftragsflusses in drei voneinander unabhängige Aufgaben unterteilt werden können: ob ein Auftrag erzeugt werden soll, ob ein Auftrag freigegeben werden soll und ob die Produktion eines Auftrags genehmigt werden soll. Dadurch wird eine neue Kategorisierung von MFC-Methoden bereitgestellt, die vorhandene Kategorisierungen erweitert. MFC-Methoden sind in der Regel für eine dieser drei Aufgaben konzipiert, was bedeutet, dass ein erheblicher Teil des Auftragsflusses unzureichend oder unkontrolliert bleiben kann, wenn nur eine Methode angewendet wird. Um unsere Forschungsfrage zu beantworten: *Wie wirkt sich die gleichzeitige Verwendung von drei verschiedenen MFC-Methoden – für die Auftragsgenerierung, die Auftragsfreigabe und die Produktionsautorisierung – auf die Leistung im Vergleich zur Verwendung von nur einer oder zwei MFC-Methoden aus?* – haben wir festgestellt, dass:

- Prinzipiell können MFC-Methoden für die Auftragsgenerierung, die Auftragsfreigabe und die Produktionsberechtigung kombiniert werden, da jede eine andere Auslastung in der Hierarchie der Auslastungen und damit unterschiedliche Leistungsmetriken beeinflusst.
- Da es jedoch eine Hierarchie von Workloads gibt, in der die Auftragsgenerierung die Auftragsfreigabe und die Auftragsfreigabe die Produktionsautorisierung einschränkt, sind die Vorteile der gleichzeitigen Anwendung verschiedener MFC-Methoden begrenzt. Wenn beispielsweise eine effektive Auftragsgenerierung vorhanden ist, kann die Nützlichkeit von Auftragsfreigabe und Produktionsberechtigung in Frage gestellt werden. Unsere Studie steht im Zusammenhang mit der Lagerfertigung; Das Gleiche gilt aber auch für Einzelfertigungskontexte, wenn das Kundenanfragemanagement bereits einen ausgeglichenen Arbeitsaufwand schafft (wie in Thüerer et al. 2014b).

7.1 Auswirkungen auf das Management

Auftragsfreigabe und Produktionsfreigabe haben aus Kundensicht nur marginale Auswirkungen, wenn: (i) es einen Fertigwarenbestand gibt, der den Kunden vom

Shopfloor puffert oder entkoppelt, wie es in der Lagerfertigung üblich ist, und (ii) es eine effektive Auftragsgenerierungsmethode gibt, um den Fertigwarenbestand und die geplante Arbeitslast zu steuern. Die Auftragsfreigabe kann in diesem Zusammenhang helfen, die Durchlaufzeiten der Ware in Arbeit und der Fertigung zu steuern, und in gewissem Umfang kann die Produktionsberechtigung die Auftragsfreigabe ersetzen. Im Mittelpunkt steht die Frage, ob die zusätzlichen Investitionen, die erforderlich sind, um ein durchgängiges Materialflusssystem zu erreichen, vertretbar sind. Im Gegensatz dazu erfährt der Kunde in Einzelfertigungskontexten ohne Fertigwarenbestand die gesamte Durchlaufzeit direkt in Form einer Wartezeit. In diesem Zusammenhang wirkt sich die Auftragsfreigabe aus Kundensicht stärker aus und ist daher viel mehr gerechtfertigt.

7.2 Grenzen und zukünftige Forschung

Eine wesentliche Einschränkung unserer Studie ist die begrenzte experimentelle Umgebung. Wir haben uns zwar für ein weithin akzeptiertes Modell einer realen Werkstatt entschieden, aber diese Werkstatt vernachlässigt komplexe Aspekte wie die Montage, die einen anderen Fokus erfordern würde als bei unserem MFC-System. Im Allgemeinen gibt es für jedes MFC-Element (d. h. Auftragsgenerierung, Auftragsfreigabe und Produktionsberechtigung) unterschiedliche alternative MFC-Systeme, bei denen die Wahl weitgehend durch den Steuerungsfokus in jeder Phase bestimmt wird, d. h. ob der Schwerpunkt auf der Arbeitsauslastung oder auf der Koordination (Timing) liegt. In dieser Studie haben wir willkürlich eine Reihe von Methoden ausgewählt, um unsere These zu testen, dass drei verschiedene MFC-Methoden kombiniert werden können und sollten. Zukünftige Forschung ist erforderlich, um unsere Ergebnisse zu verallgemeinern und zu falsifizieren, indem andere Methodenkombinationen in Betracht gezogen werden. Zukünftige Forschung könnte auch maßgeschneiderte tokenbasierte Systeme verwenden, um eine MFC-Methode zu schaffen, die eine flexiblere Integration der verschiedenen MFC-Aufgaben ermöglicht. Eine weitere Haupteinschränkung ist die Vernachlässigung der Sequenzierung. Dies ist zwar durch unseren Fokus auf MFC gerechtfertigt, aber zukünftige Forschung könnte untersuchen, wie sich verschiedene Sequenzierungsregeln auf die Ergebnisse auswirken. Dies wird im Montagekontext noch wichtiger. Schließlich könnte die zukünftige Forschung auch die kombinierte Wirkung von MFC, Sequenzierung und Kapazitätsanpassungen untersuchen, obwohl die Komplexität, alle drei Arten von Entscheidungen gleichzeitig zu berücksichtigen, wahrscheinlich neue Lösungen erfordert, z. B. in Form von fortschrittlichen Planungs- und Terminierungssystemen. Unsere Studie bietet einen Ausgangspunkt für die Information über die Struktur solcher Systeme.

Anhang

Siehe Tabellen 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 und Abb. 5. Aufbereitung.

Table 9 Summary of ROPs and calculations

	Product type										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Demand	Mean	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	Var	1.04	1.88	0.45	1.04	0.93	1.69	0.78	0.55	1.26	2.41
Replenishment time, TRP from simulation (IMR; IMA; ROQ=1)	Mean	26.1	32.4	29.1	29.5	28.3	32.5	22.7	45.9	45.4	52.2
	SD	10.2	11.5	10.5	10.5	10.5	11.4	7.4	12.5	11.3	13.8
	Var	104.9	132.3	110.9	110.9	111.1	128.8	54.0	155.8	126.6	191.0
	$ROP = D * TRP + SSL$										
Safety factor	0	2.6	3.2	2.9	3.0	2.8	3.3	2.3	4.6	4.5	5.2
	1	4.1	5.0	4.2	4.4	4.3	5.0	3.4	6.0	6.1	7.3
	ROP (rounded)										
Safety factor	0	3	3	3	3	3	3	2	5	5	5
	1	4	4	4	4	4	5	3	6	6	7

Tabelle 10 ANOVA-Ergebnisse – Füllrate

Ursache der Abweichung	Summe der Quadrate	Freiheitsgrad	Mittlere Quadrate	F-Verhältnis	<i>p</i> -Wert
Sicherheitsfaktor (SF)	687057.53	1	687057.53	79699.48	0.00
Nachbestellmenge (ROQ)	73547.54	1	73547.54	8531.60	0.00
Norm (WLC)	124688.33	5	24937.67	2892.80	0.00
Karten (POLCA)	529.32	4	132.33	15.35	0.00
SF × ROQ	21344.09	1	21344.09	2475.94	0.00
SF × WLC	6247.67	5	1249.53	144.95	0.00
SF × POLCA	1010.18	4	252.54	29.30	0.00
ROQ × WLC	22053.23	5	4410.65	511.64	0.00
ROQ × POLITIK	1241.50	4	310.37	36.00	0.00
WLC × POLCA	1181.62	20	59.08	31199.00	0.00
SF × ROQ × WLC	3700.01	5	740.00	85.84	0.00
SF × ROQ × POLCA	108.79	4	27.20	42430.00	0.01
SF × WLC × POLCA	538.26	20	26.91	44898.00	0.00
ROQ × WLC × POLCA	586.49	20	29.32	14671.00	0.00
SF × ROQ × WLC × POLCA	88.40	20	4.42	0.51	0.96
Restlich	102412.76	11880	8.62		

Tabelle 11 ANOVA- stomer waiting Ergebnisse—c

Ursache der Abweichung	Summe der Quadrate	Freiheitsgrad	Mittlere Quadrate	F-Verhältnis	<i>p</i> -Wert
Sicherheitsfaktor (SF)	20442.47	1	20442.47	2157.50	0.00
Nachbestellmenge (ROQ)	461.18	1	461.18	48.67	0.00
Norm (WLC)	118234.02	5	23646.80	2495.69	0.00
Karten (POLCA)	6676.48	4	1669.12	176.16	0.00
SF × ROQ	110.60	1	110.60	24777.00	0.00
SF × WLC	4289.59	5	857.92	90.54	0.00
SF × POLCA	857.05	4	214.26	22.61	0.00
ROQ × WLC	2281.12	5	456.22	48.15	0.00
ROQ × POLITIK	433.17	4	108.29	16011.00	0.00
WLC × POLCA	6375.49	20	318.77	33.64	0.00
SF × ROQ × WLC	93.85	5	18.77	35796.00	0.08
SF × ROQ × POLCA	7.37	4	1.84	0.19	0.94
SF × WLC × POLCA	892.26	20	44.61	26024.00	0.00
ROQ × WLC × POLCA	90.00	20	4.50	0.47	0.98
SF × ROQ × WLC × POLCA	10.60	20	0.53	0.06	1.00
Restlich	112563.64	11880	9.48		

Tabelle 12 ANOVA-Ergebnisse – Bestand an Fertigerzeugnissen

Ursache der Abweichung	Summe der Quadrate	Freiheitsgrad	Mittlere Quadrate	F-Verhältnis	<i>p</i> -Wert
Sicherheitsfaktor (SF)	570808.67	1	570808.67	210000.00	0.00
Nachbestellmenge (ROQ)	172281.56	1	172281.56	62639.36	0.00
Norm (WLC)	44443.02	5	8888.60	3231.78	0.00
Karten (POLCA)	1016.87	4	254.22	92.43	0.00
SF × ROQ	267.63	1	267.63	97.31	0.00
SF × WLC	3396.47	5	679.29	246.98	0.00
SF × POLCA	5.28	4	1.32	0.48	0.75
ROQ × WLC	8280.08	5	1656.02	602.11	0.00
ROQ × POLITIK	497.07	4	124.27	45.18	0.00
WLC × POLCA	602.17	20	30.11	34973.00	0.00
SF × ROQ × WLC	217.15	5	43.43	15.79	0.00
SF × ROQ × POLCA	10.11	4	2.53	0.92	0.45
SF × WLC × POLCA	11.14	20	0.56	0.20	1.00
ROQ × WLC × POLCA	293.26	20	14.66	12175.00	0.00
SF × ROQ × WLC × POLCA	5.88	20	0.29	0.11	1.00
Restlich	32674.42	11880	2.75		

Tabelle 13 ANOVA-

Ergebnisse – bis taler Durchlaufzeit

Ursache der Abweichung	Summe der Quadrate	Freiheitsgrad	Mittlere Quadrate	F-Verhältnis	<i>p</i> -Wert
Sicherheitsfaktor (SF)	0.00	1	0.00	0.00	1.00
Nachbestellmenge (ROQ)	414455.80	1	414455.80	150000.00	0.00
Norm (WLC)	41157.45	5	8231.49	3009.01	0.00
Karten (POLCA)	649.82	4	162.46	59.39	0.00
SF × ROQ	0.00	1	0.00	0.00	1.00
SF × WLC	0.00	5	0.00	0.00	1.00
SF × POLCA	0.00	4	0.00	0.00	1.00
ROQ × WLC	14358.92	5	2871.78	1049.78	0.00
ROQ × POLITIK	912.99	4	228.25	83.44	0.00
WLC × POLCA	377.80	20	18.89	33390.00	0.00
SF × ROQ × WLC	0.00	5	0.00	0.00	1.00
SF × ROQ × POLCA	0.00	4	0.00	0.00	1.00
SF × WLC × POLCA	0.00	20	0.00	0.00	1.00
ROQ × WLC × POLCA	460.70	20	23.03	15554.00	0.00
SF × ROQ × WLC × POLCA	0.00	20	0.00	0.00	1.00
Restlich	32499.13	11880	2.74		

Tabelle 14 ANOVA-Ergebnisse – Standardabweichung der Gesamtdurchlaufzeit

Ursache der Abweichung	Summe der Quadrate	Freiheitsgrad	Mittlere Quadrate	F-Verhältnis	<i>p</i> -Wert
Sicherheitsfaktor (SF)	0.00	1	0.00	0.00	1.00
Nachbestellmenge (ROQ)	68208.43	1	68208.43	2235.92	0.00
Norm (WLC)	62242.75	5	12448.55	408.07	0.00
Karten (POLCA)	63287.72	4	15821.93	518.65	0.00
SF × ROQ	0.00	1	0.00	0.00	1.00
SF × WLC	0.00	5	0.00	0.00	1.00
SF × POLCA	0.00	4	0.00	0.00	1.00
ROQ × WLC	2418.13	5	483.63	15.85	0.00
ROQ × POLITIK	2579.02	4	644.75	21.14	0.00
WLC × POLCA	47292.56	20	2364.63	77.51	0.00
SF × ROQ × WLC	0.00	5	0.00	0.00	1.00
SF × ROQ × POLCA	0.00	4	0.00	0.00	1.00
SF × WLC × POLCA	0.00	20	0.00	0.00	1.00
ROQ × WLC × POLCA	409.00	20	20.45	0.67	0.86
SF × ROQ × WLC × POLCA	0.00	20	0.00	0.00	1.00
Restlich	362408.39	11880	30.51		

Tabelle 15 ANOVA-Ergebnisse –
Fertigungsdurchsatz UT Zeit

Ursache der Abweichung	Summe der Quadrate	Freiheitsgrad	Mittlere Quadrate	F-Verhältnis	<i>p</i> -Wert
Sicherheitsfaktor (SF)	0.00	1	0.00	0.00	1.00
Nachbestellmenge (ROQ)	144238.74	1	144238.74	96070.56	0.00
Norm (WLC)	197881.07	5	39576.21	26359.83	0.00
Karten (POLCA)	3177.36	4	794.34	529.07	0.00
SF × ROQ	0.00	1	0.00	0.00	1.00
SF × WLC	0.00	5	0.00	0.00	1.00
SF × POLCA	0.00	4	0.00	0.00	1.00
ROQ × WLC	43969.24	5	8793.85	5857.16	0.00
ROQ × POLITIK	2255.83	4	563.96	375.62	0.00
WLC × POLCA	2472.73	20	123.64	82.35	0.00
SF × ROQ × WLC	0.00	5	0.00	0.00	1.00
SF × ROQ × POLCA	0.00	4	0.00	0.00	1.00
SF × WLC × POLCA	0.00	20	0.00	0.00	1.00
ROQ × WLC × POLCA	2437.53	20	121.88	81.18	0.00
SF × ROQ × WLC × POLCA	0.00	20	0.00	0.00	1.00
Restlich	17836.43	11880	1.50		

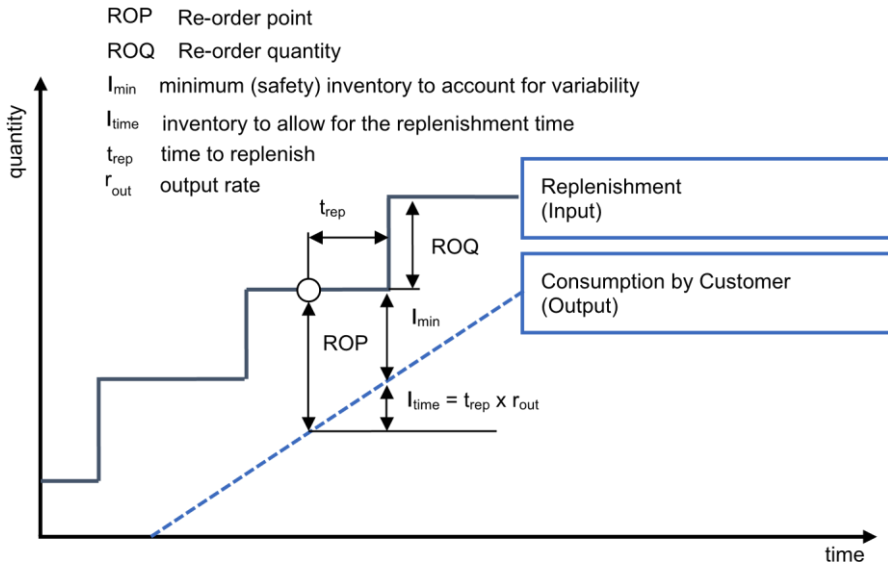


Abb. 5 Darstellung eines Nachbestellpunktsystems

Finanzierung: Open-Access-Förderung, ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Datenverfügbarkeit Die Daten, die die Ergebnisse dieser Studie stützen, sind auf begründete Anfrage beim korrespondierenden Autor [MT] erhältlich.

Deklarationen

Interessenkonflikt: Es besteht kein potenzieller Interessenkonflikt.

Open Access Dieser Artikel steht unter einer Creative Commons Attribution 4.0 International License, die die Nutzung, Weitergabe, Bearbeitung, Verbreitung und Vervielfältigung in jedem Medium und Format erlaubt, solange Sie den ursprünglichen Autor und die Quelle angemessen erwähnen, einen Link zur Creative Commons-Lizenz bereitstellen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die Bilder oder anderes Material von Drittanbietern in diesem Artikel sind in der Creative-Commons-Lizenz des Artikels enthalten, sofern in einer Quellenangabe zum Material nichts anderes angegeben ist. Wenn das Material nicht in der Creative-Commons-Lizenz des Artikels enthalten ist und Ihr Verwendungszweck durch gesetzliche Vorschriften nicht gestattet ist oder über die erlaubte Nutzung hinausgeht, müssen Sie die Genehmigung direkt vom Rechteinhaber einholen. Eine Kopie dieser Lizenz finden Sie unter <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Referenzen

- Acosta PVA, Mascle C, Baptiste P (2020) Anwendbarkeit von bedarfsgesteuerter MRP in einer komplexen Fertigungsumgebung. *Int J Prod Res* 58(14):4233–4245
- Bagni G, Godinho Filho M, Thürer M, Stevenson M (2021) Systematische Überprüfung und Diskussion von Produktionssteuerungssystemen, die zwischen 1999 und 2018 entstanden sind. *Prod Plan Control* 32(7):511–525

- Baynat B, Buzacott JA, Dallery Y (2002) Mehrprodukt-Kanban-ähnliche Steuerungssysteme. *Int J Prod Res* 40(16):4225–4255
- Bechte W (1988) Theorie und Praxis der lastorientierten Fertigungssteuerung. *Int J Prod Res* 26(3):375–395
- Bertolini M, Braglia M, Romagnoli G, Zammori F (2013) Erweiterung der Wertstromanalyse: der SynchroMRP-Fall. *Int J Prod Res* 51(18):5499–5519
- Bonvik AM, Couch CE, Gershwin SB (1997) Ein Vergleich der Steuerungsmechanismen von Produktionslinien. *Int J Prod Res* 35(3):789–804
- Braglia M, Castellano D, Frosolini M (2014) Optimierung von POLCA-gesteuerten Produktionssystemen mit einem simulationsgesteuerten genetischen Algorithmus. *Int J Adv Manuf Technol* 70:385–395
- Braglia M, Marrazzini L, Padellini L (2021) COBACABANA: eine reale industrielle Anwendung in einem Lohnfertigungssystem. *Prod Plan Control* (im Druck).
- Breithaupt JW, Land M, Nyhuis P (2002) Das Konzept der Auslastungssteuerung: Theorie und praktische Erweiterungen der lastorientierten Auftragsfreigabe. *Steuerung des Prod-Plans* 13(7):625–638
- Buzacott JA, Shanthikumar JG (1992) Ein allgemeiner Ansatz zur Koordinierung der Produktion in Fertigungssystemen mit mehreren Zellen. *Prod Oper Manag* 1(1):34–52
- Calle M, González-R PL, Leon JM, Pierreval H, Canca D (2016) Integriertes Management von Bestands- und Produktionssystemen auf der Grundlage von gleitenden Entkopplungspunkt- und Echtzeitinformationen: eine simulationsbasierte Analyse. *Int J Prod Econ* 181:48–57
- Cigolini R, Portioli-Staudacher A (2002) Eine experimentelle Untersuchung zu Methoden zur Begrenzung der Arbeitsbelastung mit ORR-Richtlinien in einer Job-Shop-Umgebung. *Kontrolle des Prod-Plans* 13(7):602–613
- Claudio D, Krishnamurthy A (2009) Kanban-basierte Pull-Systeme mit Vorab-Nachfrageinformationen. *Int J Prod Res* 47(12):3139–3160
- Dallery Y, Gershwin SB (1992) Fertigungsflussliniensysteme: eine Überprüfung von Modellen und Analyseergebnissen. *Warteschlangensysteme* 12(1):3–94
- Dallery Y, Liberopoulos G (2000) Erweitertes Kanban-Kontrollsystem: Kombination von Kanban und Grundmaterial. *IIE Trans* 32(4):369–386
- Enns ST, Prongue Costa M (2002) Die Wirksamkeit der Eingabekontrolle basierend auf aggregierten und Engpass-Workloads. *Prod Plan Control* 13(7):614–624
- Fernandes NO, Carmo-Silva S (2006) Generisches POLCA – ein Produktions- und Materialflusssteuerungsmechanismus für eine reaktionsschnelle Fertigung. *Int J Prod Econ* 104(1):74–84
- Fernandes NO, Thürer M, Pinho TM, Torres P, Carmo-Silva S (2020a) Auslastungssteuerung und optimierte Auftragsfreigabe: eine Bewertung durch Simulation. *Int J Prod Res* 58(10):3180–3193
- Fernandes NO, Thürer M, Stevenson M, Carmo-Silva S (2020b) Chargensynchronisation in Einzelfertigungsgeschäften mit Auftragsfreigabesteuerung: eine Bewertung durch Simulation. *Int J Prod Res* 58(21):6724–6738
- Fernandes NO, Thürer M, Stevenson M (2021) Direkte Auslastungssteuerung: Vereinfachung der kontinuierlichen Auftragsfreigabe. *Int J Prod Res* (im Druck)
- Forrester JW (1961) *Industrial dynamics*. MIT Press, Cambridge
- Framinan JM, González PL, Ruiz-Usano R (2003) Das CONWIP-Produktionssteuerungssystem: Überprüfungs- und Forschungsfragen. *Prod Plan Control* 14(3):255–265
- Fredendall LD, Ojha D, Patterson JW (2010) Zur Theorie der Arbeitsbelastungskontrolle. *Eur J Oper Res* 201(1):99–111
- Geraghty J, Heavy C (2004) Ein Vergleich von hybriden Push/Pull- und CONWIP/Pull-Bestandskontrollrichtlinien. *Int J Prod Econ* 91(1):75–90
- Germis R, Riezebos J (2010) Workload-Balancing-Fähigkeit von Pull-Systemen in der MTO-Produktion. *Int J Prod Res* 48(8):2345–2360
- Glassey CR, Resende MG (1988) Closed-Loop-Steuerung der Auftragsfreigabe für die Herstellung von VLSI-Schaltungen. *IEEE Trans Semicond Manuf* 1:36–46
- Goldratt EM, Cox J (1984) *Das Ziel: Exzellenz in der Fertigung*. North River Press, New York
- González-R PL, Framinan JM (2009) Die Pull-Evolution: von Kanban zu maßgeschneiderten tokenbasierten Systemen. *Prod Plan Control* 20(3):276–287
- González-R PL, Framinan JM, Pierreval H (2012) Token-basierte Pull-Produktionssteuerungssysteme: ein einführender Überblick. *J Intell Manuf* 23(1):5–22

- Graves RJ, Konopka JM, Milne RJ (1995) Literaturrecherche zu Mechanismen zur Steuerung des Materialflusses. *Prod-Plan-Steuerung* 6(5):395–403
- Hall RW (1986) Synchro MRP: Kombination von Kanban und MRP. Das Yamaha PYMAC-System. In: Die Produktivitätsmaschine antreiben: Produktionsplanung und -steuerung in Japan. APICS, Falls Church, S. 43–56
- Harrod S, Kanet JJ (2013) Anwendung der Workflow-Steuerung in Make-to-Order-Shops. *Int J Prod Econ* 143:620–626
- Haeussler S, Stampfer C, Missbauer H (2020) Vergleich von zwei optimierungsbasierten Auftragsfreigabemodellen mit festen und variablen Vorlaufzeiten. *Int J Prod Res* 227.
- Haeussler S, Netzer P (2020) Vergleich zwischen regel- und optimierungsbasierten Workload-Steuerungskonzepten: ein Simulationsoptimierungsansatz. *Int J Prod Res* 58(12):3724–3743
- Hopp WJ, Spearman ML (2004) Ziehen oder nicht ziehen: Was ist die Frage? *Manuf Serv Oper Manag* 6(2):133–148
- Irastorza JC, Deane RH (1974) Eine Belastungs- und Ausgleichsmethode für die Lohnfertigungssteuerung. *AIIE Trans* 6(4):302–307
- Jaegler Y, Jaegler A, Burlat P, Lamouri S, Trentesaux D (2018) Das ConWip-Produktionssteuerungssystem: eine systematische Überprüfung und Klassifizierung. *Int J Prod Res* 56(17):5736–5757
- Jodlbauer H, Dehmer M (2020) Eine Erweiterung der Bestellpunktmethode unter Verwendung von Informationen über die Vorabnachfragespitze. *Comput Oper Res* 124:105055
- Karaesmen F, Buzacott JA, Dallery Y (2002) Integration von Vorabbestellinformationen in Lagerfertigungssysteme. *IIE Trans* 34(8):649–662
- Kingsman BG (2000) Modellierung der Input-Output-Workload-Steuerung für die dynamische Kapazitätsplanung in Produktionsplanungssystemen. *Int J Prod Econ* 68(1):73–93
- Kingsman BG, Tsiopoulos IP, Hendry LC (1989) Eine strukturelle Methodik zur Verwaltung von Fertigungsvorlaufzeiten in Einzelfertigungsunternehmen. *Eur J Oper Res* 40:196–209
- Kingsman BG, Hendry LC, Mercer A, De Souza A (1996) Beantwortung von Kundenanfragen in Make-to-Order-Unternehmen: Probleme und Lösungen. *Int J Prod Econ* 46–47:219–231
- Lage Junior M, Godinho Filho M (2010) Variationen des Kanban-Systems: Literaturrecherche und Klassifizierung. *Int J Prod Econ* 125:13–21
- Land M (2006) Parameter und Sensitivität bei der Arbeitsbelastungssteuerung. *Int J Prod Econ* 104(2):625–638
- Land MJ (2009) Cobacabana (Kontrolle des Gleichgewichts durch kartenbasierte Navigation): ein kartenbasiertes System zur Lohnfertigungssteuerung. *Int J Prod Econ* 117:97–103
- Land MJ, Gaalman GJC (1996) Konzepte zur Steuerung der Arbeitsbelastung in Lohnfertigen: eine kritische Bewertung. *Int J Prod Econ* 46–47:535–538
- Land MJ, Gaalman GJC (1998) Die Leistung von Arbeitslaststeuerungskonzepten in Lohnfertigern: Verbesserung der Freigabemethode. *Int J Prod Econ* 56–57:347–364
- Land MJ, Thürer M, Stevenson M, Fredendall LD, Scholten K (2021) Bestandsdiagnose zur Verbesserung der Strömung – ein designwissenschaftlicher Ansatz. *J Oper Manag* 67(5):560–587
- Liberopoulos G, Tsikis I (2003) Einheitlicher Modellierungsrahmen für mehrstufige Produktions- und Bestandskontrollpolitiken mit Losgrößen- und Vorabnachfrageinformationen. In: Stochastische Modellierung und Optimierung von Fertigungssystemen und Lieferketten. Springer, New York
- Liberopoulos G, Dallery Y (2000) Ein einheitliches Framework für Pull-Control-Mechanismen in mehrstufigen Fertigungssystemen. *Ann Oper Res* 93(1–4):325–355
- Lödding H (2012) *Handbuch der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*. Springer Science & Business Media, Heidelberg
- Lödding H, Yu K-W, Wiendahl H-P (2003) Dezentrale WIP-orientierte Fertigungssteuerung (DEWIP). *Prod-Plan-Kontrolle* 14(1):42–54
- McKay KN, Safayeni FR, Buzacott JA (1995) Ein Überblick über die hierarchische Produktionsplanung und ihre Anwendbarkeit für die moderne Fertigung. *Prod Plan Control* 6(5):384–394
- Miclo R, Luras M, Fontanili F, Lamothe J, Melnyk SA (2019) Bedarfsgesteuerte MRP: Bewertung eines neuen Ansatzes für die Materialwirtschaft. *Int J Prod Res* 57(1):166–181
- Missbauer H, Uzsoy R (2022) Auftragsfreigabe in Produktionsplanungs- und Steuerungssystemen: Herausforderungen und Chancen. *Int J Prod Res* (im Druck)

- Neuner P, Haeussler S (2021) Regelbasierte Workload-Steuerung in der Halbleiterfertigung überarbeitet. *Int J Prod Res* 59(19):5972–5991
- Nyhuis P, Wiendahl HP (2008) Grundlagen der Produktionslogistik: Theorie, Werkzeuge und Anwendungen. Springer Science & Business Media, Heidelberg
- Ohno T (1988) Toyota-Produktionssystem: jenseits der Großserienproduktion, 1. Aufl. Productivity Press, New York
- Olaitan OA, Geraghty J (2013) Bewertung von Produktionssteuerungsstrategien für vernachlässigbar eingerichtete, mehrproduktige, serielle Linien unter Berücksichtigung der Robustheit. *J Manuf Technol Manag* 24(3):331–357
- Olhager J (2003) Strategische Positionierung des Order-Penetration-Punktes. *Int J Prod Econ* 85(3):319–329
- Onyeocha CE, Wang J, Khoury J, Geraghty J (2015) Ein Vergleich der Steuerungsstrategien von HK-CONWIP und BK-CONWIP in einem Fertigungssystem mit mehreren Produkten. *Oper Res Perspect* 2:137–149
- Oosterman B, Land MJ, Gaalman G (2000) Der Einfluss von Betriebsmerkmalen auf die Arbeitsbelastungskontrolle. *Int J Prod Econ* 68(1):107–119
- Orlicky J (1975) Planung des Materialbedarfs. McGraw-Hill, New York
- Ptak C, Smith C (2011) Orlicky's Materialbedarfsplanung 3/E. McGraw Hill Professional, New York
- Ptak C, Smith C (2016) Bedarfsgesteuerte Materialbedarfsplanung (DDMRP). Industriepresse, Norwalk
- Ragatz GL, Mabert VA (1988) Eine Evaluierung der Mechanismen zur Auftragsfreigabe in einer Lohnfertigungsumgebung. *Decis Sci* 19(1):167–189
- Riezebos J (2010) Entwurf von POLCA-Materialsteuerungssystemen. *Int J Prod Res* 48(5):1455–1477
- Schmidt M, Hartmann W, Nyhuis P (2012) Simulationsbasierter Vergleich von Methoden zur Berechnung des Sicherheitsbestands. *CIRP Ann* 61(1):403–406
- Schneckenreither M, Haeussler S, Gerhold C (2021) Auftragsfreigabeplanung mit prädiktiven Durchlaufzeiten: ein Ansatz des maschinellen Lernens. *Int J Prod Res* 59(11):3285–3303
- Shingo S (1989) Eine Studie über das Produktionssystem von Toyota aus Sicht der Wirtschaftstechnik. Productivity Press, Cambridge, MA
- Simons JV, Simpson WP III (1997) Eine Darstellung der Planung mehrerer Einschränkungen, wie sie im Zielsystem implementiert ist (ehemals Katastrophe). *Prod Oper Manag* 6:3–22
- Spearman ML, Woodruff DL, Hopp WJ (1990) CONWIP: eine Pull-Alternative zu Kanban. *Int J Prod Res* 28(5):879–894
- Spearman ML, Woodruff DL, Hopp WJ (2021) CONWIP Redux: Reflexionen über 30 Jahre Entwicklung und Implementierung. *Int J Prod Res* (im Druck)
- Stevenson M, Hendry LC, Kingsman BG (2005) Ein Überblick über die Produktionsplanung und -steuerung: die Anwendbarkeit von Schlüsselkonzepten auf die Auftragsfertigungsindustrie. *Int J Prod Res* 43(5):869–898
- Suri R (1998) Schnelle Fertigung: ein unternehmensweiter Ansatz zur Verkürzung der Vorlaufzeiten. Produktivitätspresse, Portland
- Thürer M, Stevenson M, Silva C, Land MJ, Fredendall LD (2012) Workload Control (WLC) und Order Release: eine schlanke Lösung für Make-to-Order-Unternehmen. *Prod Oper Manag* 21(5):939–953
- Thürer M, Land MJ, Stevenson M (2014a) Kartenbasierte Arbeitslaststeuerung für Lohnfertiger: Verbesserung von COBACABANA. *Int J Prod Econ* 147: 180–188
- Thürer M, Stevenson M, Silva C, Land MJ, Fredendall LD, Melnyk SA (2014b) Lean Control für Einzelunternehmen: Integration von Kundenanfragemanagement und Auftragsfreigabe. *Prod Oper Manag* 23(3):463–476
- Thürer M, Fernandes NO, Carmo-Silva S, Stevenson M (2017) Verbesserung der Leistung in POLCA-kontrollierten Geschäften mit hoher Vielfalt: eine Bewertung durch Simulation. *J Manuf Syst* 44: 143–153
- Thürer M, Fernandes NO, Stevenson M, Silva C, Carmo-Silva S (2019) POLC-A: eine Bewertung des Autorisierungselements von POLCA. *J Intell Manuf* 30(6):2435–2447
- Thürer M, Fernandes NO, Stevenson M (2020) Materialflusssteuerung in vielfältigen Make-to-Order-Shops: Kombination von COBACABANA und POLCA. *Prod Oper Manag* 29(9):2138–2152
- Thürer M, Fernandes NO, Stevenson M (2022) Produktionsplanung und -steuerung in mehrstufigen Montagesystemen: eine Bewertung von Kanban, MRP, OPT (DBR) und DDMRP durch Simulation. *Int J Prod Res*

- 60(3):1036–1050 van Donk DP (2001) Auf Lager oder auf Bestellung: Der Entkopplungspunkt in der lebensmittelverarbeitenden Industrie. *Int J Prod Econ* 69(3):297–306
- Vandaele N, Van Nieuwenhuysse I, Claerhout D, Cremmery R (2008) Load-based POLCA: Ein integriertes Materialsteuerungssystem für Werkstätten mit mehreren Produkten und mehreren Maschinen. *Manuf. Serv. Oper. Manag* 10(2):181–197
- Vollmann TE, Berry WL, Whybark DC (1997) *Fertigungsplanungs- und Steuerungssysteme*. McGrawHill, Irwin
- Watson KJ, Patti A (2008) Ein Vergleich der JIT- und TOC-Pufferungsphilosophien in Bezug auf die Systemleistung mit ungeplanten Maschinenstillständen. *Int J Prod Res* 46(7):1869–1885
- Watson KJ, Blackstone JH, Gardiner SC (2007) Die Entwicklung einer Managementphilosophie: die Theorie der Einschränkungen. *J Oper Manag* 25:387–402
- Weiss S, Schwarz JA, Stolletz R (2019) Das Problem der Pufferzuweisung in Produktionslinien: Formulierungen, Lösungsmethoden und Instanzen. *IISE Trans* 51(5):456–485
- Wiendahl HP, Gläßner J, Petermann D (1992) Anwendung der lastorientierten Fertigungssteuerung in der Industrie. *Prod-Plan-Kontrolle* 3(2):118–129
- Wight O (1970) Eingangs-/Ausgangssteuerung: ein echter Griff in die Vorlaufzeit. *Prod Invent Manag J* 11(3):9–31

Anmerkung des Herausgebers: Springer Nature bleibt neutral in Bezug auf Zuständigkeitsansprüche in veröffentlichten Karten und institutionellen Zugehörigkeiten.

Matthias Thürer ist Inhaber des Lehrstuhls für Fabrikplanung und Intralogistik an der Technischen Universität Chemnitz. Er trug zur Verbesserung, Vereinfachung und Integration von Materialflusststeuerungssystemen und deren Integration mit Industrie 4.0 bei. Neben dem Operations Management interessiert sich Matthias auch für gesellschaftliche und philosophische Fragestellungen wie Systemtheorie, Kybernetik, Kausalität und Wissenschaftstheorie.

Nuno O. Fernandes arbeitet derzeit als Professor für Operations Management am Polytechnischen Institut von Castelo Branco (Portugal) und als Forscher an ALGORITMI (Universität Minho, Portugal). Er promovierte in Produktions- und Systemtechnik an der University of Minho. Seine Forschungsinteressen liegen in den Bereichen Produktionsplanung und -steuerung, Auslastungssteuerung, bedarfsgesteuerte MRP und diskrete Ereignissimulation. Er hat in mehreren internationalen Fachzeitschriften publiziert und war als Gutachter tätig.

Hermann Lödding studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Kaiserslautern und promovierte an der Universität Hannover als Diplomingenieur. Von 2004 bis 2009 war er für die Robert Bosch GmbH tätig. Seit 2009 ist er als Professor für Produktionsmanagement an der Technischen Universität Hamburg-Harburg tätig.

Mark Stevenson ist Professor für Operations Management an der Lancaster University Management School (LUMS) der Lancaster University in Großbritannien. Zu seinen Forschungsinteressen gehören die Steuerung von Materialflüssen in Produktionsumgebungen, die Resilienz von Lieferketten und nachhaltiges Lieferkettenmanagement. Seine Arbeiten sind in führenden internationalen Fachzeitschriften erschienen, darunter das *Journal of Operations Management*, *Production and Operations Management*, das *Journal of Supply Chain Management* und das *International Journal of Operations and Production Management*.

Autoren und Affiliationen

Matthias Thüerer¹  · **Nuno O. Fernandes**^{2,3} · **Hermann Lödding**⁴
Mark Stevenson⁵



Matthias Thüerer,
matthiasthuerer@workloadcontrol.com
Nuno O. Fernandes, nogf@ipcib.pt
Hermann Lödding, loedding@tuhh.de
Mark Stevenson,
m.stevenson@lancaster.ac.uk

¹ Technische Universität Chemnitz, Lehrstuhl für Fabrikplanung und Intralogistik, Erfenschlager Straße 73, 09125 Chemnitz

² Polytechnisches Institut von Castelo Branco, Av. do Empresario, 6000-767 Castelo Branco, Portugal

³ ALGORITMI Research Unit, Universität Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal

⁴ Technische Universität Hamburg,, Produktionsmanagement und -technik, Denickestraße 17 (L), 21073 Hamburg, Germany

⁵ Abteilung für Managementwissenschaften, Lancaster University Management School, Lancaster University, LA1 4YX Bailrigg, Großbritannien

Dies war eine Übersetzung ins Deutsche des frei verfügbaren Fachartikels:

Original:

„Material flow control in make-to-stock production systems: An assessment of order generation, order release and production authorization by simulation“.

Matthias Thüerer ¹ · Nuno O. Fernandes ^{2,3} · Hermann Lödding ⁴ · Mark Stevenson ⁵: Material flow control in make-to-stock production systems: An assessment of order generation, order release and production authorization by simulation, 2024.

Verfügbar unter (Stand 23.6.2025):

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10696-024-09532-2>
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10696-024-09532-2.pdf>

Dies war eine nicht offizielle deutsche Übersetzung des Originals durch:

Markus Bans
ATS Prozessoptimierung Markus Bans
Web: <https://simio-simulation.de>

Lizenz:

Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

S. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>