

Qualitative Analyse der Potenziale und simulative Verifizierung der Produktions- und Logistikregelung beim Einsatz in variantenreichen Produktionsszenarien

Domenic Schmidpeter¹,
Robert Schulz¹,
Boris Brinzer²,
Dominik Behrendt²

¹Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart

²Kooperationsnetzwerk Moderne Produktion (KMP), Hochschule Mannheim

Dieser Beitrag führt einen Ansatz zur dezentralen Produktionsregelung auf Pull-Basis zu einer integrierten Produktions- und Logistikregelung fort. In Simulationen werden Auswirkungen auf Bestände, Termintreue sowie Flottenauslastung untersucht. Die Ergebnisse zeigen Potenziale zur Reduktion von Terminabweichungen und Umlaufbeständen bei gleichzeitiger Glättung der Flottenauslastung auf. Damit wird ein praktikabler Weg zur KMU-tauglichen, integrierten Produktions- und Logistikregelung aufgezeigt.

[Schlüsselwörter: Produktionssteuerung, variantenreich, fahrerloses Transportsystem, cyber-physisches System, Simulation]

This paper extends a decentralized, pull-based production control approach to an integrated production and logistics control concept. Effects on inventories, due-date adherence, and fleet utilization are investigated by simulation. The results indicate potential to reduce schedule deviations and work-in-process while simultaneously smoothing fleet utilization. The findings outline a practical path toward an SME-suitable, integrated production and logistics control.

[Keywords: production control, multi-variant, automated guided vehicle system, cyber-physical system, simulation]

1 EINLEITUNG

In modernen Produktionen führen Nachfrageschwankungen, kurze Produktlebenszyklen und zunehmende Produktindividualisierung dazu, dass Materialflüsse und Kapazitäten vor Ort adaptiv geregelt werden müssen, sobald sich Rahmenbedingungen verändern. Variantenreiche Kleinserienfertigungen in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) sind hiervon besonders betroffen.

Digitalisierungsfortschritte leisten bereits einen wertvollen Beitrag zur Steuerung von Fertigung und Montage, es bestehen jedoch weiterhin Lücken bei Datenerfassung und -nutzung [1], Systemparameter werden häufig nur angenähert und die Vielzahl wechselseitiger Abhängigkeiten bleibt modellseitig unvollständig. Zentrale, detaillierte Materialflussplanung stößt in mehrstufig verzweigten Prozessen an praktische Grenzen [2]. Zugleich können zentrale Planungsansätze in stabilen und genau modellierten Umgebungen gute Leistungen erzielen. Bei Störungen und hoher Variabilität sinkt ihre Wirksamkeit jedoch, da sie eine hohe Modellgüte, aktuelle Daten sowie geringe Rechen- und Kommunikationslaufzeiten voraussetzen. Bei dem in dieser Arbeit untersuchten und weiterentwickelten dezentralen Regelungsansatz werden Entscheidungen nahe am Entstehungsort der Informationen in den Arbeitsmodulen auf Basis aktueller Zustände getroffen, Umlaufbestände durch Pull-Mechanismen begrenzt und die Abstimmung mit der innerbetrieblichen Logistik erfolgt integriert. Hinweise auf die Leistungsfähigkeit dezentraler, transportnaher Steuerungen finden sich beispielsweise in [3].

Aufbauend auf der Vorarbeit zur dezentralen Produktions- und Logistikregelung (PLR) wird der Ansatz methodisch weiterentwickelt und simulativ evaluiert [4].

Es wird quantifiziert, inwieweit die erweiterte PLR Bestände, Terminabweichungen und Flottenauslastung in

KMU-tauglichen Szenarien verbessert und Gestaltungsempfehlungen abgeleitet werden.

Der Artikel gliedert sich wie folgt: Kapitel 2 stellt die gegenüber der Vorarbeit erzielten Modell- und Konzepterweiterungen dar. Kapitel 3 formalisiert das Konzept zur Kopplung von Termin- und Logistikpriorität und analysiert dessen Potenzial zur Beeinflussung der Auftragsreihenfolge. Kapitel 4 präsentiert Simulationsergebnisse zu Beständen, Termintreue und Flottenauslastung. Kapitel 5 beschreibt die Eignung des Ansatzes für die reale Implementierung als cyber-physische Systeme. Kapitel 6 diskutiert den Ansatz. Kapitel 7 fasst zusammen und gibt einen Ausblick.

2 ERWEITERUNGEN GEGENÜBER DER VORARBEIT

Aufbauend auf der Vorarbeit [4] wird sowohl das Simulationsmodell als auch das Regelungskonzept erweitert. Die bisher betrachtete Produktionsumgebung mit hoher Variantenvielfalt, abgebildeter Produktionsstruktur und einer übergeordneten Produktionssteuerung nach dem Push-Prinzip mit Tagesplänen aus dem PPS-System bleibt erhalten. Die lokalen Termin- und Bestandsregler werden fortgeführt, da das vorliegende Projekt deren Erweiterung adressiert.

2.1 MODELLERWEITERUNGEN

Die folgenden Erweiterungen des Simulationsmodells werden implementiert:

- Werker werden mit Qualifikationsprofilen und Verfügbarkeiten abgebildet und optional können Bearbeitungsstörungen zugeschaltet werden.
- Grenzen der Fahrzeugflotten-Kapazität sind modelliert, inklusive einer Vergabestrategie (FIFO-basiert) zur Zuweisung von Transportaufträgen an Fahrzeuge mit kürzester Anfahrt zum Abholort.
- Pufferflächen der Arbeitsmodule werden geometrisch berücksichtigt, woraus die Transportdistanzen je Auftrag und Arbeitsschrittfolge resultieren.
- Störungen einzelner Fahrzeuge sowie Interferenzen (gegenseitige Behinderungen) können ein- und ausgeschaltet werden.
- Innerhalb der Bearbeitungsketten bestimmter Auftragsstypen entstehen zusätzliche Transportaufwände durch benötigte Komponenten aus Kommissioniermodulen für bestimmte Arbeitsschritte.

2.2 ERWEITERUNG DER REGELUNG

Neben der Terminpriorität wird eine *logistische Priorität* $\pi_{\log} \in [0, 1]$ eingeführt (0 = höchste Priorität; 1 = geringste Priorität). Ziel ist die indirekte Beeinflussung unproduktiver Fahrzeugzeiten (Leerfahrt- und Wartezeit) bei der Auftragsreihenfolgenbildung durch höhere Prioritäten der aktuell passenderen Aufträge.

Zur Belegungsentscheidung wird eine Gesamtpriorität π verwendet.

Die Bestandsregler werden beibehalten. Arbeitsaufträge, deren Nachfolger-Bestandsgrenzen überschritten würden (*Istbestand+Indirektbestand*), werden vorab herausgefiltert.

2.3 LOGISTISCHE REAKTIONSZEIT

Der Fahrzeugbedarf berechnet sich nach [5] über die minimale Transportzeit, die zur Erfüllung aller Transportaufträge in einem Betrachtungszeitraum aufgewendet werden muss. Durch Korrekturfaktoren werden Einflüsse wie Verfügbarkeit, Störungen und Auslastbarkeit miteinbezogen, die die Zeit verringern, in der Fahrzeuge effektiv Transporte abarbeiten können. Darüber hinaus wird auch darauf hingewiesen, dass die Transportnachfrage nicht zeitlich gleichmäßig verteilt auftritt, was zu Transportauftragshäufungen und schließlich temporär zu Transportrückstand führt. In Zeiten mit weniger Transportauftragseingängen kann der Rückstand wieder abgebaut werden. Aus Fahrzeugsicht treten die Zeiten für Lastfahrten, Leerfahrten und Lastübergaben auf. Aus Transportauftrags-sicht beinhaltet der durch Transporte beeinflusste Anteil der Durchlaufzeit zusätzlich eine Wartezeit, bis ein Leerfahrzeug verfügbar ist. Diese Wartezeit wird im Folgenden *logistische Reaktionszeit* genannt. Die Autoren machen auf den Zusammenhang zwischen der Volatilität der Anzahl an Transportauftragseingängen und dem Aufkommen von Transportrückständen aufmerksam und dass die Art der Transportauslösung hierbei keinen Einfluss hat. Um Blockaden vorzubeugen, müssen jedoch ausreichend Ausgangspufferplätze vorgehalten werden. Die Feststellung, dass eine Auslegung der Fahrzeuganzahl auf Spitzenlasten meist wirtschaftlich nicht machbar ist, führt zu der Betrachtung, dass lediglich zu einem noch wirtschaftlichen Anteil der Zeit alle Transporte abgearbeitet werden müssen und die Folgen der Transportverschiebung berücksichtigt werden. Fahrzeuginterferenzen nehmen mit der Flottengröße zu (längere effektive Fahrzeiten), während Leerfahrten tendenziell sinken (höhere Chance auf nahe Folgeaufträge).

Das modellierte Transportsystem arbeitet FIFO-basiert und stellt eine konstante Transportkapazität bereit. Der Transportrückstand ist zu einem Zeitpunkt die aufsummierte Restzeit aller Transporte, die vor einem neu einzulastenden Transportauftrag abgearbeitet werden müssen. Die War-

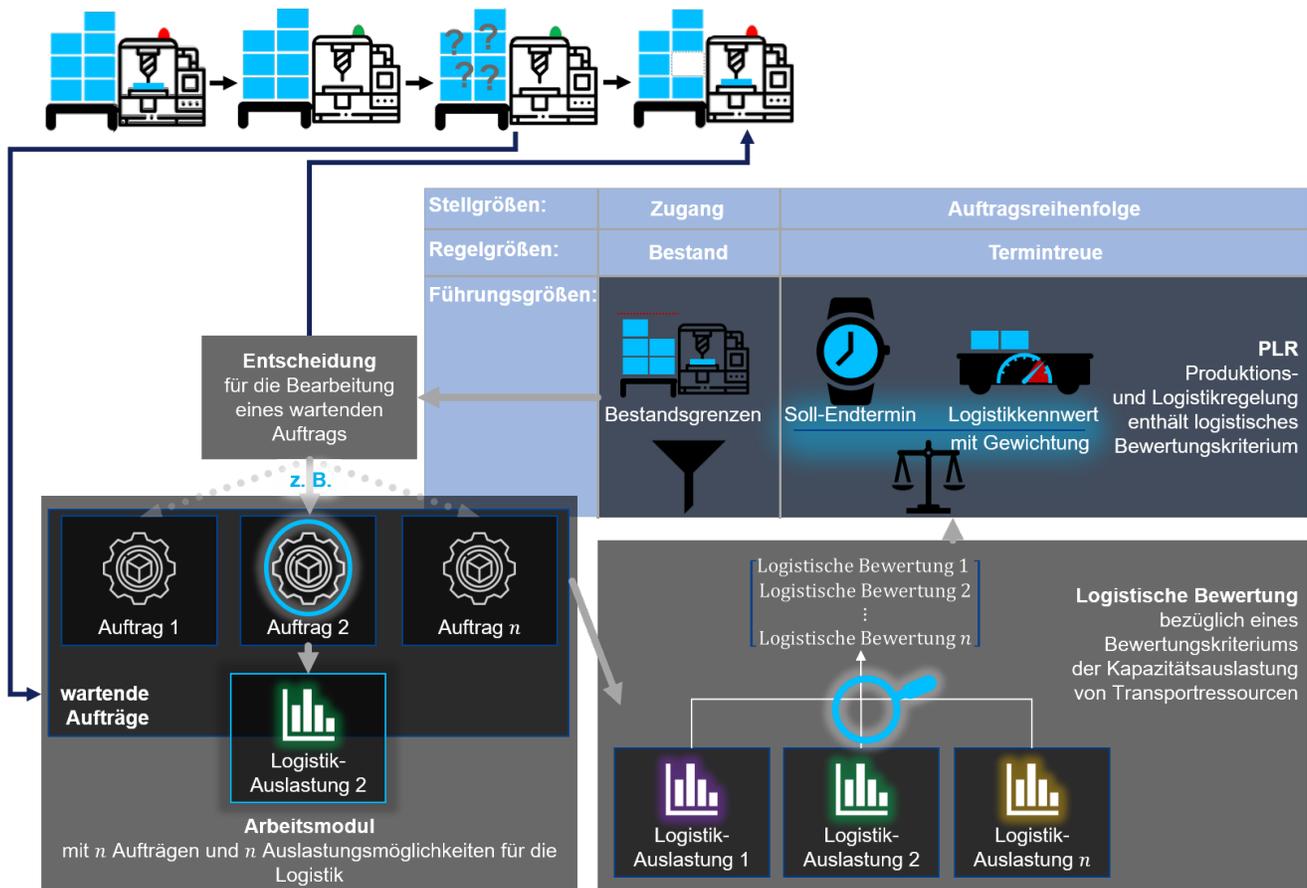


Abbildung 1: Ablauf der Belegungsentscheidung. Ein Arbeitsmodul wird frei und es liegt Istbestand vor. Kandidaten werden gegen die Bestandsgrenzen der Nachfolger (Istbestand+Indirektbestand) gefiltert, Termin- und Logistikpriorität werden berechnet, wobei die Logistikpriorität den aus der Bearbeitung resultierenden Transportbedarf mit der prognostizierten Transportlast im relevanten Zeitfenster abgleicht. Aus beiden Prioritäten wird eine Gesamtpriorität gebildet und der beste Auftrag zur Bearbeitung freigegeben.

tezeit steigt nichtlinear, wenn die Transportkapazität kleiner ist als diese temporär benötigt wird (Grundprinzipien vgl. [6]). Die logistische Reaktionszeit bestimmt zuzüglich der Leerfahrtzeit, Lastfahrtzeit und Handlingzeit, wie lange ein Auftrag im Indirektbestand verbleibt, nachdem die Bearbeitung im Vorgängerarbeitsmodul abgeschlossen ist.

2.4 AUSLÖSEZEITPUNKT FÜR TRANSPORTAUFTRÄGE

Im ersten Beitrag wurden die Vor- und Nachteile für den Auslösezeitpunkt der Transportaufträge diskutiert. [4] In dieser Arbeit wird die Auslösung bei Fertigbearbeitung verwendet, um die Entkopplung kurzfristiger Transportverzögerungen vom aktuell belegten Arbeitsmodul zu erzielen. Solange Istbestand im Arbeitsmodul vorhanden ist, kann weitergearbeitet werden. Der Istbestand im Eingangspuffer eines Arbeitsmoduls ist ohne weitere Transporte sofort bearbeitbar und steht bei einer Belegungsentscheidung

zunächst zur Auswahl. Der Bearbeitungs-, oder Transportprozess des Indirektbestands ist durch eine vorgelagerte Belegungsentscheidung bereits angestoßen (in Bearbeitung, im Ausgangspuffer des Vorgängers oder auf Fahrzeugen). Dieser steht jedoch bei einer Belegungsentscheidung noch nicht zur Verfügung.

3 KOPPLUNG VON TERMIN- UND LOGISTIKPRIORITÄT

Ziel ist die abgestimmte Belegungsentscheidung aus logistischer Priorität und Terminpriorität. Zur Berechnung der Gesamtpriorität wird eine Funktion vorgeschlagen, deren Parameterwahl simulativ festgelegt wird. Dabei werden die Abhängigkeiten betrachtet, wie lange logistisch ungünstige Arbeitsaufträge verzögert werden können, bis sich eine günstigere Transportsituation ergibt, ohne Termine oder Bestandsgrenzen zu überschreiten.

3.1 GESAMTPRIORITÄT UND GEWICHTUNG

In Kapitel 2.2 wird die Terminpriorität $\pi_{\text{term}} \in [0, 3]$ genannt und die logistische Priorität $\pi_{\text{log}} \in [0, 1]$ beschrieben. Der Wert $\pi_{\text{term}} = 1$ entspricht einem Terminpuffer von einem Tag. Im untersuchten Produktionsszenario liegen die Werte im Normalbetrieb zwischen null (Terminpuffer aufgebraucht) und drei Tagen Terminpuffer. Die Gesamtpriorität eines bearbeitbaren Auftrags j lautet

$$\pi(j) = \pi_{\text{term}}(j) + \alpha \pi_{\text{log}}(j), \quad \alpha \in [0, 3].$$

Der Parameter α kann statisch oder lastadaptiv gewählt werden, um den Anteil der anstehenden Bearbeitungsschritte mit hohen logistischen Aufwänden zu erhöhen, oder zu senken, um z. B. vor Pausen die logistisch anspruchsvollen Arbeitsschritte durchzuführen. Bei Gleichstand der Prioritäten wird nach π_{term} entschieden. Bei der Belegungsentscheidung sind nur Aufträge mit nicht überschrittener Nachfolger-Bestandsgrenze zulässig. Der Istbestand plus Indirektbestand wird mit der Bestandsgrenze abgeglichen. Zusätzlich müssen deren vollständige Materialien für den kommenden Bearbeitungsschritt im Arbeitsmodul vorliegen.

Der gesamte Ablauf einer Belegungsentscheidung ist in Abbildung 1 dargestellt und gestaltet sich wie folgt:

- Bestände und Verfügbarkeit prüfen.
- π_{term} und π_{log} bestimmen.
- Nach Gesamtpriorität π sortieren.
- Wähle den Auftrag j mit höchster Gesamtpriorität.

Transportaufträge werden nach Fertigbearbeitung ausgelöst und anschließend unter Einbeziehung neu eingetrophener Aufträge eine erneute Belegungsentscheidung getroffen.

3.2 VERZÖGERBARKEIT DER AUFTRÄGE UND TRANSPORTAUFWÄNDE

Jeder Arbeitsauftrag weist einen bestimmten Zeitpuffer bis zu seinem spätesten Start- bzw. Fertigstellungstermin auf. Innerhalb dieses Puffers darf der Auftrag verzögert werden, ohne die Terminvorgabe zu verletzen.

Zur Veranschaulichung des frühesten Zeitpunkts, zu dem die Transportflotte voraussichtlich wieder über genügend freie Kapazität verfügt, um neue Transporte ohne Zusatzwartezeit aufzunehmen, wird der kurzfristig aufgelaufene Transportrückstand betrachtet. Dieser entspricht der Summe der noch abzuarbeitenden Transportaufwände. Dem Transportrückstand wird die in diesem kurzen Horizont verfügbare Transportkapazität gegenübergestellt (abhängig von Anzahl und Verfügbarkeit der Fahrzeuge). Sobald die verfügbare Transportkapazität den Rückstand wieder einfängt, sind keine logistischen Reaktionszeiten für neue Transporte zu erwarten.

Liegt der Zeitpunkt innerhalb des Zeitpuffers des betrachteten Auftrags, darf der Auftrag bis dorthin aufgeschoben werden, um eine logistisch günstigere Phase zu nutzen. Liegt dieser außerhalb des Puffers oder ist keine Entlastung in absehbarer Zeit erkennbar, hat die Terminpriorität Vorrang und der Auftrag wird nicht weiter verzögert. Wird der Zeitpuffer eines Auftrags jedoch bei einem frühen Arbeitsschritt aufgebraucht, so gilt dieser anschließend als Eilauftrag und der Parameter α ist so zu wählen, dass der Zeitpuffer mit dem größten Nutzen abgebaut wird.

In Phasen mit Überlast wächst der Transportrückstand und in Unterlastphasen wird er wieder abgebaut. Das Verzögern der Bearbeitung bestimmter Aufträge wird genutzt, um bei anstehenden Unterlastphasen transportintensive Aufträge für geringe logistische Reaktionszeiten gezielt zu starten, ohne Termine zu gefährden.

Die Länge des Zeithorizonts, für den die Transportlast prognostiziert werden kann, ergibt sich aus den Bearbeitungszeiten. Es können keine genauen Schwankungen der Flotte zum Fertigstellungszeitpunkt bereits bei der Belegungsentscheidung erfasst werden. Wenn die Logistikauslastungsprognose unsicher ist, kann die Gewichtung zugunsten der Terminpriorität angepasst werden, was jedoch das Potenzial der Harmonisierung schmälert.

Die Verzögerbarkeit hängt von der Varianz der Transportaufwände im lokalen Eingangspuffer ab (Teilmenge der Varianz im Produktionssystem). Hohe lokale Varianz erhöht die Chance, kurzfristig einen logistisch günstigeren Auftrag zu wählen. Sinkt die Varianz (z. B. durch Bestandsgrenzen der Nachfolger oder hohe Indirektbestände), reduziert sich die Auswahl und Verzögerungsspielräume werden kleiner.

Bei der Freigabe von Aufträgen aus dem Tagesvorrat bietet sich eine abgewandelte Berechnung der logistischen Priorität an. In Kombination mit einem Lernverfahren werden die längerfristigen Lastphasen prognostiziert. Ziel ist hierbei, transportintensive Arbeitsschritte in Phasen mit freier Kapazität zu legen und in erwarteten Engpassphasen eher geringe Transportaufwände zu bearbeiten. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Effekt der logistischen Priorität an der lokalen Belegungsentscheidung isoliert untersucht. Wird bereits im Tagesvorrat eingegriffen, lässt sich der Zugewinn nicht mehr eindeutig den lokalen Reglern zuordnen.

Der Einfluss der Bestände auf die Verzögerbarkeit von Aufträgen lässt sich wie folgt annehmen: hohe Indirektbestände beschleunigen das Erreichen der Nachfolger-Bestandsgrenzen, verkleinern die zulässige Auswahlmenge und erschweren das Finden eines logistisch günstigen Auftrags. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Terminpriorität die Logistikpriorität dominiert. Beschleunigt die Logistikpriorität einen Auftrag, sinkt dessen zukünftige π_{term} relativ, während die Terminpriorität verdrängter Aufträge steigt.

4 SIMULATIONSERGEBNISSE

4.1 VERWENDETE KENNZAHLEN

Zur Bewertung der Reglerwirkung werden Kennzahlen verwendet, die jeweils einen anderen Aspekt der Zielerreichung abbilden:

- **Logistische Reaktionszeit:** Zeit bis zum Start eines Transportauftrags. Sie dient als Indikator für kurzfristige Engpässe in der Flotte: hohe Mittelwerte deuten auf Phasen mit Transportrückstand hin.
- **Flottenauslastung und Fahrzeuganzahl:** Durchschnittliche Auslastung der Fahrzeuge sowie die benötigte Fahrzeugzahl. Eine hohe mittlere Auslastung gilt als positiv, sofern die Termintreue nicht leidet.
- **Termintreue:** Verteilung der Terminabweichungen (Punktwolken des Terminpuffers). Relevant sind die Streuung, der Anteil verspäteter Aufträge und mögliche Schiefebenen der Verteilung.
- **Bestände:** Zeitverlauf des Gesamtbestands.

4.2 SIMULATIONSERGEBNISSE OHNE HARMONISIERUNG MIT DER LOGISTIK

Auslegung der Fahrzeugflotte

Zur Auslegung der Fahrzeugflotte wird im Produktionszenario mit Bestands- und Terminregelung die Anzahl der Fahrzeuge pro Simulationsdurchlauf schrittweise von acht auf zwölf erhöht. Jeder Simulationslauf erstreckt sich über einen Zeitraum von vier Wochen mit täglichen Auftragsengängen, ausgenommen an den Wochenenden.

- **Fahrzeuganzahl 8:** Schneller Bestandsaufbau. Ab der zweiten Woche treten verspätete Fertigstellungen einzelner Arbeitsaufträge auf.
- **Fahrzeuganzahl 9:** Schneller Bestandsaufbau. Pünktliche Fertigstellung mit Trend in Richtung verspäteter Auftragsfertigstellung.
- **Fahrzeuganzahl 10:** Mittlerer Bestandsaufbau. Pünktliche Fertigstellung mit mittlerem Abbau des Terminpuffers.
- **Fahrzeuganzahl 11:** Mittlerer Bestandsaufbau. Pünktliche Fertigstellung mit leichtem Abbau des Terminpuffers.
- **Fahrzeuganzahl 12:** Geringer Bestandsaufbau. Pünktliche Fertigstellung mit stabilem Terminpuffer.

Die Untersuchung ergab zwölf Fahrzeuge als eine optimale Anzahl für den Betrachtungszeitraum. Für die weiteren

Untersuchungen wird die Fahrzeuganzahl mit elf Fahrzeugen bewusst reduziert gewählt, um eine Annäherung an das Optimum zu beobachten.

Ungeregeltes Produktionssystem

Das ungeregelte Produktionssystem zeigt in Abbildung 2, wie Arbeitsaufträge der anfänglichen diskreten Terminvorlaufklassen von ein bis drei Tagen zufällig über den Tagesverlauf fertiggestellt werden. Mit Voranschreiten des Arbeitstages verschieben sich die verbleibenden Terminvorläufe in Richtung später Fertigstellung. Ein Großteil der Aufträge wird vorzeitig fertiggestellt, jedoch treten bei einem kleineren Anteil der Aufträge Verspätungen von über einem halben Tag auf. Die Werte entstehen deterministisch durch den Produktmix, die Arbeitspläne und die Einlassungsreihenfolge.

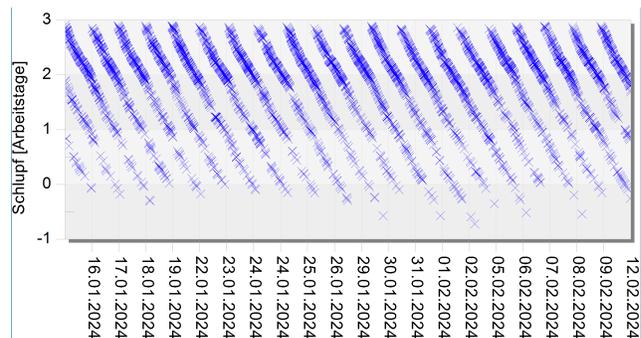


Abbildung 2: Verbleibende Terminpuffer: Schlupfwert nach Ausschleuszeit (ungeregelt, 11 Fahrzeuge)

Der gleitende Mittelwert aller Bestände des ungeregelten Produktionssystems zeigt in Abbildung 3 zunächst einen Anstieg durch den Anlaufeffekt der gemittelten Werte. Anschließend ist ein Anstieg auf bis zu 35 Stunden Arbeitsvorrat im Produktionssystem nach der dritten Woche zu beobachten und eine leicht negative Steigung in der vierten Woche.

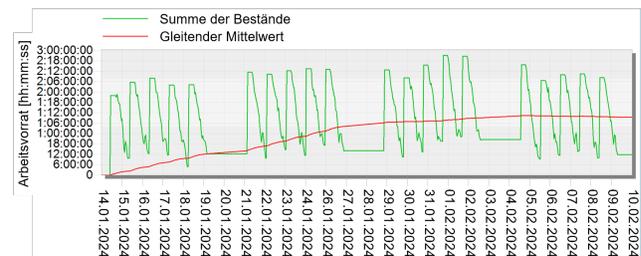


Abbildung 3: Beständediagramm: Gesamtbestandsentwicklung über die Zeit (ungeregelt, 11 Fahrzeuge)

Einfluss der Terminregelung auf die Pünktlichkeit

Das geregelte Produktionssystem zeigt in Abbildung 4, dass die verbleibenden Terminvorläufe fertiggestellter Arbeitsaufträge innerhalb der einzelnen Terminvorlaufklassen deutlich weniger streuen und sich klar erkennbare Cluster im Diagramm bilden. Arbeitsaufträge mit anfänglich einem Tag Terminvorlauf werden priorisiert bearbeitet, sodass sie ihren ursprünglichen Terminvorlauf nahezu beibehalten und kein Auftrag seinen Fertigstellungstermin überschreitet. Dagegen werden Arbeitsaufträge mit anfänglich drei Tagen Terminvorlauf am stärksten verzögert.

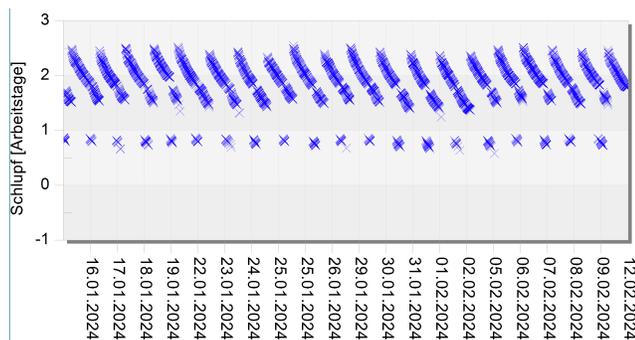


Abbildung 4: Verbleibende Terminpuffer: Schlupfwert nach Ausschleuszeit (Terminregelung, 11 Fahrzeuge)

Der gleitende Mittelwert aller Bestände des geregelten Produktionssystems zeigt in Abbildung 5 ein ähnliches Verhalten wie in Abbildung 3, mit einem Anstieg des Arbeitsvorrats bis zur dritten Woche und einer leicht negativen Steigung in der vierten Woche.

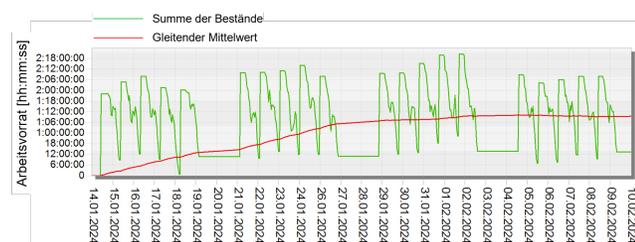


Abbildung 5: Beständediagramm: Gesamtbestandsentwicklung über die Zeit (Terminregelung, 11 Fahrzeuge)

Auswirkung der Bestandsregelung mit Terminregelung

Die Terminpuffer bei Auftragsfertigstellung mit Termin- und Bestandsregelung in Abbildung 6 weisen ein ähnliches Muster wie in Abbildung 4 auf, jedoch ist die terminliche Sortierung der fertiggestellten Arbeitsaufträge weniger

strikt. Die Cluster der einzelnen Terminvorlaufklassen sind weiterhin erkennbar, zeigen jedoch kleinere Ausreißer, die sich von den Hauptgruppen absetzen.

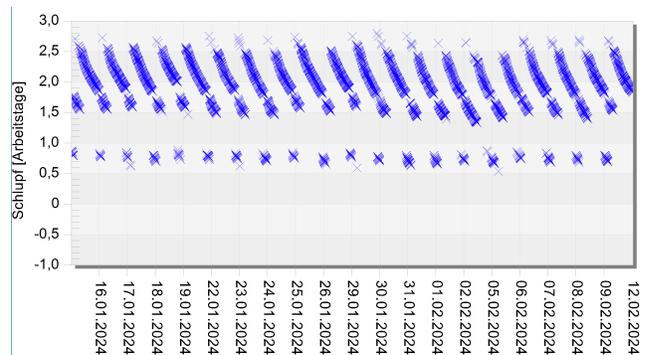


Abbildung 6: Verbleibende Terminpuffer: Schlupfwert nach Ausschleuszeit (Termin- und Bestandsregelung, 11 Fahrzeuge)

Der gleitende Mittelwert des Arbeitsvorrats im Produktionssystem bleibt in Abbildung 7 unter 13 Stunden und zeigt über den betrachteten Zeitraum keine negative Steigung, was einem kontinuierlichen Bestandsaufbau entspricht. Der erreichte maximale Wert liegt deutlich unter dem der Szenarien ohne Bestandsregelung.

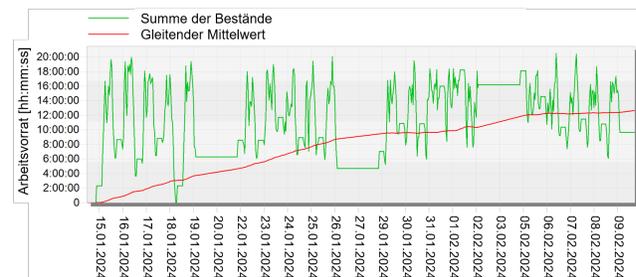


Abbildung 7: Beständediagramm: Gesamtbestandsentwicklung über die Zeit (Termin- und Bestandsregelung, 11 Fahrzeuge)

Der Wartezeitanteils über alle Fahrzeuge gemittelt beträgt 32,9%.

Die mittlere logistische Reaktionszeit über alle Fahrzeuge beträgt 133 Sekunden pro Transport.

4.3 EFFEKTE MIT LOGISTISCHER HARMONISIERUNG UND DEREN BEITRAG ZUR ZIELERREICHUNG

In Abbildung 8 zeigt sich ein ähnliches Bild wie in Abbildung 6, jedoch treten bei den fertiggestellten Arbeitsaufträgen mit anfänglich einem Tag Terminvorlauf einzel-

ne Ausreißer nach unten auf. Diese Aufträge halten jedoch weiterhin ihre geplanten Fertigstellungstermine ein.

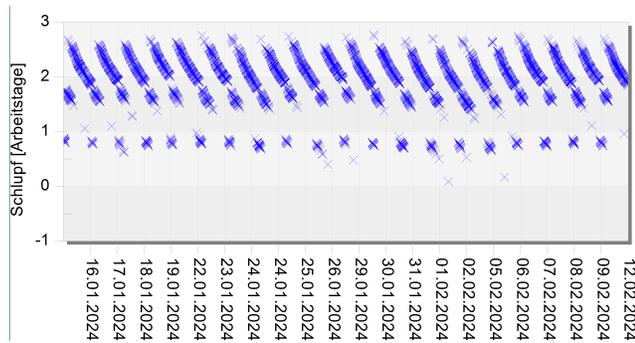


Abbildung 8: Verbleibende Terminpuffer: Schlupfwert nach Ausschleuszeit (Produktions- und Logistikregelung, 11 Fahrzeuge)

Der gleitende Mittelwert des Arbeitsvorrats bleibt in Abbildung 9 unter 11 Stunden und weist in der vierten Woche eine neutrale Steigung auf, was eine leichte Verbesserung darstellt im Vergleich zu Abbildung 7.

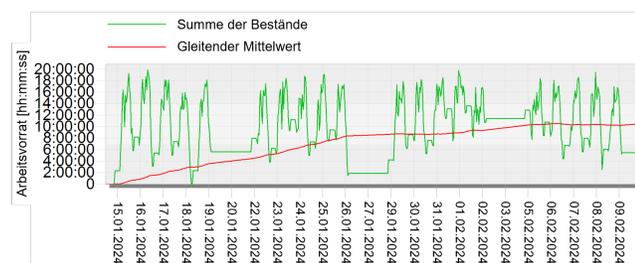


Abbildung 9: Beständediagramm: Gesamtbestandsentwicklung über die Zeit (Produktions- und Logistikregelung, 11 Fahrzeuge)

Die Summe des Wartezeitanteils über alle Fahrzeuge gemittelt beträgt 32,6% und liegt damit leicht unter dem Wartezeitanteil der Fahrzeuge im Produktionsszenario mit Bestands-, sowie Terminregelung und ohne logistischer Priorisierung.

Die mittlere Reaktionszeit über alle Fahrzeuge beträgt 128 Sekunden pro Transport und liegt somit minimal unter der logistischen Reaktionszeit der Fahrzeuge im Produktionsszenario mit Bestands-, sowie Terminregelung und ohne logistischer Priorisierung.

5 EIGNUNG DES ANSATZES FÜR DIE REALE IMPLEMENTIERUNG ALS CYBER-PHYSISCHE SYSTEME

Der PLR-Ansatz basiert auf lokal wirkenden Reglern. Diese Logiken lassen sich unmittelbar in cyber-physische Systeme (CPS) einbinden, da sie vor Ort Sensorik/Aktorik nutzen und Entscheidungen autonom ausführen. CPS übersetzen Eingangssignale (Zustände von Stationen, Puffern, Fahrzeugen) in Aktionen (Freigaben, Prioritäten, Transportauslösung) und kommunizieren Ergebnisse an andere CPS. Arbeitsmodule (Maschinen/Anlagen) und Fahrzeuge decken typischerweise Ebenen von der Prozess- bis zur Prozessleitebene ab und sind als CPS instanziiert. Enterprise Resource Planning (ERP), Warehouse Management System (WMS) und Manufacturing Execution System (MES) sind als Cybersysteme in das CPS-Netz eingebunden (ohne eigene Sensorik und Aktorik) und liefern Aufträge, Stammdaten und Freigaben.

Mehr Arbeitsmodule/Fahrzeuge bedeuten mehr CPS, nicht zwingend mehr zentrale Rechenlast. Sind die Reglerlogiken in lokalen CPS implementiert, verteilt sich die Last. Die dezentrale Reglerstruktur bietet sich somit für die Integration in CPS an. Ist die Einbindung der Reglerlogiken in Shopfloor-CPS nicht möglich, können die Logiken alternativ zentral betrieben werden, auf unternehmensinternen Servern oder in der Cloud. Die Ausführung kann als eigenständige Module bzw. Dienste betrieben werden oder in bestehende Systeme integriert werden, wie z. B. das bereits genannte MES. Hieraus folgen die jeweiligen Vor- und Nachteile beispielsweise in folgenden Kriterien und müssen abgewogen werden: Echtzeitfähigkeit, Safety, Security, Resilienz, Wartbarkeit und Kosten. Die Logiken des PLR-Ansatzes sind damit flexibel vom Shopfloor bis zur Unternehmens-IT platzierbar.

6 DISKUSSION DES ANSATZES ZUR HARMONISIERUNG DER AUFTRAGSREIHENFOLGE MIT DER LOGISTIK

Die Einführung der logistischen Priorität in der Belegungsentscheidung führt in den untersuchten Szenarien zu geringen Verbesserungen der Mittelwerte bei logistischer Reaktionszeit, Fahrzeugwartezeiten, die Termintreue bleibt erhalten und der Bestandsaufbau schwächt sich leicht ab. Die Gesamteffekte bleiben jedoch moderat.

Lokale Bestandsgrenzen und terminliche Vorgaben schränken die Auswahlmenge der bearbeitbaren Aufträge so stark ein, dass die logistische Priorität seltener wirksam wird. In Phasen mit nahezu durchgängiger Unterlast (oder Überlast) konvergiert das Verhalten gegen das mit Termin- und Bestandsregelung. Prioritäten ändern die Reihenfolge dann nur geringfügig. Die Varianz der Transportaufwände im jeweiligen Eingangspuffer liegt über die meisten Tagesphasen hinweg unter der logistischen Varianz der großen Menge an Aufträgen im Tagesarbeitsvorrat. Damit fehlen

Alternativen, um passendere Aufträge zu wählen. Transportaufträge werden erst nach Fertigbearbeitung ausgelöst. Das stabilisiert die Modul-Auslastung, reduziert aber zugleich den kurzfristigen Hebel zur Lastverschiebung.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Auslegung ermöglicht nur geringfügige Verbesserungen bei den Reaktionszeiten und beim Bestandsaufbau. Eine tagesarbeitsvorratsbasierte Auftragsfreigabe stellt ein vielversprechendes Werkzeug dar, um die hohen Transportlasten über längere Tagesphasen hinweg zu verschieben um beispielsweise Pausenzeiten günstig für die automatisierte Fahrzeugflotte zu nutzen. Der Analysefokus muss zukünftig auf Spitzenwerte der Reaktionszeit-, oder der Fläche unter der Transportrückstandskurve gelegt werden. Der Ansatz ist aufgrund seiner Dezentralität praktikabel und skalierbar über CPS umsetzbar und bietet eine Basis, auf der Erweiterungen aufsetzen können um Transportkapazitäten noch effizienter zu nutzen.

8 FÖRDERHINWEIS

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen des Projekts „Harmonisierte und dezentrale Produktions- und Logistikregelung für KMU (HaProLoK)“. Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung des Programms „Industrielle Gemeinschaftsforschung“ (IGF) und dem „DLR Projektträger“.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



LITERATUR

- [1] S. Gröger, Ed., *Nachhaltiges Qualitätsdatenmanagement: Bericht zur GQW-Jahrestagung 2022 in Chemnitz*. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2023. [Online]. Available: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-40588-5>
- [2] C. Reuter, F. Brambring, T. Hempel, and A. Gützlaff, “Prosense*/prosense – improving the forecast quality of detailed planning,” *wt Werkstattstechnik online*, vol. 106, no. 04, pp. 218–223, 2016.
- [3] N. Vojdani and M. Knop, “Ein ki-basierter ansatz für eine dezentrale transportsteuerung zur bedarfsge-rechten materialbereitstellung in der montage,” *Logistics Journal: Proceedings*, 2019. [Online]. Available: <https://proc.logistics-journal.de/article/view/962>
- [4] D. Schmidpeter, R. Schulz, and B. Brinzer, “Konzeption und implementierung einer dezentralen logistik- und produktionsregelung für variantenreiche produktionsumgebungen mit kleinen losgrößen,” *Logistics Journal: Proceedings*, 2024. [Online]. Available: <https://proc.logistics-journal.de/article/view/1117>
- [5] J. Fottner, S. Galka, S. Habenicht, E. M. Klenk, I. Meinhardt, and T. Schmidt, *Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen: Fahrzeugsysteme*, ser. Intralogistik. Berlin and Heidelberg: Springer Vieweg, 2022. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-63973-3_4
- [6] W. J. Hopp, *Factory physics*, 3rd ed., ser. McGraw Hill higher education. Boston: McGraw-Hill/Irwin, 2008. [Online]. Available: https://books.google.de/books/about/Factory_Physics.html?id=TfcWAAAQBAJ&redir_esc=y

Domenic Schmidpeter, M.Sc., Wiss. Mitarbeiter, Institut für Fördertechnik und Logistik an der Universität Stuttgart.
Phone: +49 (0)711 685 83795
Email: domenic.schmidpeter@ift.uni-stuttgart.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Schulz, Leiter des Instituts für Fördertechnik und Logistik an der Universität Stuttgart.
Phone: +49 (0)711 685 83771
Email: robert.schulz@ift.uni-stuttgart.de

Prof. Dr.-Ing. Boris Brinzer, Leiter des Kooperationsnetzwerks Moderne Produktion an der Hochschule Mannheim.
Phone: +49 (0)621 292-6215
Email: b.brinzer@hs-mannheim.de

Dominik Behrendt, M.Sc., Wiss. Mitarbeiter, Kooperationsnetzwerk Moderne Produktion an der Hochschule Mannheim.