

Konzeption und Implementierung einer dezentralen Logistik- und Produktionsregelung für variantenreiche Produktionsumgebungen mit kleinen Losgrößen

Domenic Schmidpeter¹,
Robert Schulz¹,
Boris Brinzer²

¹ Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart

² Kooperationsnetzwerk Moderne Produktion (KMP), Hochschule Mannheim

Dieser Beitrag erläutert den bestehenden Ansatz einer dezentralen Produktionsregelung nach dem Pull-Prinzip und zeigt auf, wie sie durch die Einbeziehung der Logistiksysteme zur Logistik- und Produktionsregelung erweitert und optimiert werden kann. Hierzu wird eine logistische Bewertung konzipiert und integriert. Die Produktionsregelung wird in einem Modell einer realen variantenreichen Produktion mit kleinen Losgrößen implementiert, angepasst und getestet.

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

This article explains the existing approach of decentralised production control based on the pull principle and shows how it can be expanded and optimised by integrating logistics systems for logistics and production control. A logistical evaluation is designed and integrated for this purpose. The production control is implemented, adapted and tested in a model of a real multi-variant production with small batch sizes.

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

1 EINLEITUNG

In industriellen Wertschöpfungsprozessen müssen Materialflüsse und Kapazitäten kontinuierlich an sich wandelnde Rahmenbedingungen angepasst werden, wie etwa Nachfrageschwankungen oder Produktänderungen bis hin zur Pro-

duktindividualisierung. Besonders betroffen sind variantenreiche Kleinserienfertigungen, die für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) eine erhebliche Herausforderung darstellen. Aktuell besteht für KMU ein Verbesserungspotenzial bei der Erfassung und Nutzung von Daten in Fertigung und Montage [1]. Systemparameter werden ungenau ermittelt und in IT-Systemen abgebildet. Zudem ist es bei hoher Systemkomplexität schwierig, die Vielzahl der Abhängigkeiten umfassend zu modellieren. Hinzu kommt, dass eine genaue zentrale Planung der Materialflüsse in komplexen, mehrstufigen und verzweigten Fertigungs- und Montageprozessen schwierig ist. [2].

Dieser Beitrag ist in 7 Kapitel unterteilt. Nach der Einleitung in Kapitel 1 werden in Kapitel 2 die Bereiche Produktionsregelung und dezentrale Realisierungsansätze für die innerbetriebliche Logistik auf der Grundlage aktueller Literatur detailliert beschrieben. In Kapitel 3 wird das Konzept der Produktionsregelung, sowie das Modell des realen Produktionsszenarios vorgestellt. Kapitel 4 zeigt das Konzept der Produktions- und Logistikregelung auf. In Kapitel 5 wird die Einordnung der Produktions- und Logistikregelung in die Systeme der Automatisierungsebenen beschrieben. In Kapitel 6 werden erste Ergebnisse des Modells vorgestellt. Die Zusammenfassung und der Ausblick folgen in Kapitel 7.

2 STAND DER TECHNIK

2.1 ZENTRALE UND DEZENTRALE ANSÄTZE ZUR PRODUKTIONSSTEUERUNG

Zentrale Steuerungsansätze können prinzipiell Verbundeffekte zwischen Entscheidungsaufgaben in Produktion und Logistik berücksichtigen, insbesondere den Restriktionsverbund durch produktionsübergreifende Kapazitätsbeschränkungen. Allerdings können bei den existie-

renden zentralen Produktionsplanungs- und Steuerungssystemen (PPS-Systemen) aufgrund der Komplexität der Planungsaufgabe wenige der Verbundeffekte bei Kapazitäten und Terminen berücksichtigt werden.

Dezentrale Selbstregelung bietet hingegen die Vorteile situativer, anhand der aktuellen Situation vor Ort getroffener Entscheidungen, insbesondere wenn bei hoher Systemkomplexität die Vielzahl der Abhängigkeiten mathematisch nicht umfassend modellierbar ist, oder wenn Systemparameter ungenau ermittelbar oder abgebildet sind. Dezentrale Selbstregelung ermöglicht darüber hinaus die Umsetzung des Pull-Prinzips, indem eine Bestandsgrenze für die Produktionsbestände (work in process) festgelegt wird und die Aufträge abhängig vom aktuellen Zustand der Produktion freigegeben werden [3]. Eine ausführliche Übersicht über die existierenden Regelungsverfahren nach dem Pull-Prinzip wird in [4] gegeben. Die bekanntesten dezentralen Regelungsverfahren sind Kanban, Conwip, als deren Kombination der hybride Kanban-Conwip-Ansatz, sowie Basestock und Polca. Für diese Verfahren sind auch Anwendungen in der Praxis dokumentiert [4].

2.2 DIE DEZENTRALE PRODUKTIONSREGELUNG NACH BRINZER

Die nachfolgenden Ausführungen basieren weitgehend auf [5]. Der zu regelnden Produktion liegt eine Stückgutfertigung mit Fertigungslosen zugrunde. Das betrachtete Produktionssystem lässt sich in teilautonome Arbeitssysteme (AS) einteilen, die nicht starr verkettet sind. Für diese Produktionssysteme werden keine Einschränkungen bezüglich des Aufbaus oder des Automatisierungsgrads gemacht. Es kann sich daher um Maschinen, Maschinengruppen, flexible Fertigungssysteme, flexible Fertigungszellen oder manuelle Arbeitsplätze handeln, jeweils einschließlich der zugeordneten Mitarbeiter. Durch eine grobe Terminierung und Kapazitätsprüfung in der übergeordneten Produktionsplanung soll bei der dezentralen Produktionsregelung nach Brinzer (DPR) sichergestellt sein, dass die termingerechte Fertigstellung der Fertigungsaufträge nicht unmöglich ist. Es muss also mindestens sichergestellt sein,

- dass bei jedem Auftrag nach seiner Freigabe durch die Planung die Betriebszeiten in der Fertigung bis zum Soll-Endtermin größer sind als die Summe der Auftragszeiten, der Auftragsvorlauf also positiv ist, und
- dass die den Produktionssystemen im Mittel zur Verfügung stehende Kapazität ausreicht, die eingepflanzten Aufträge termingerecht fertig zu stellen.

Auf der Ebene des einzelnen Produktionssystems wurden für den Entwurf der DPR die lokal verfügbaren Systemgrößen bezüglich ihrer Verwendbarkeit im Rahmen einer Produktionsregelung analysiert. Eine kurze Auflistung

der im Folgenden verwendeten Begriffe mit Erklärung soll der Verständlichkeit dienen:

- Regelgröße: Auf einem bestimmten Wert zu haltende Größe.
- Führungsgröße: Von außen zugeführte Größe, der die Regelgröße folgen soll.
- Stellgröße: Durch deren Änderung ist eine Beeinflussung der Regelgröße möglich.
- Störgröße: Wirkt von außen auf die Regelgröße ein. Beeinträchtigt die angestrebte Beeinflussung durch die Regelung.

Die Auftragspriorität lässt sich regelungstechnisch als Führungsgröße deuten, wenn sie durch eine Produktionsregelung dazu genutzt werden kann, die Bearbeitung eines Auftrags in Abhängigkeit von seinem Terminverzug zu beschleunigen oder zu verzögern. Wird die Auftragspriorität von der Planung oder von Kundenseite fest vorgegeben, dann wirkt sie als Störgröße auf die Fertigung ein. Der Zugang kann bei einer Regelung des Abgangs als Führungsgröße betrachtet werden. Als Stellgröße steht er zur Verfügung, wenn er in Verbindung mit geeigneten Freigabemechanismen für die Produktionsaufträge, wie sie beispielsweise Steuerungsverfahren nach dem Pull-Prinzip und die dezentrale bestandsorientierte Fertigungsregelung verwenden, auf der Ebene des einzelnen Produktionssystems direkt beeinflusst werden kann. Andernfalls ist der Zugang in der Fertigung nach dem Werkstattprinzip eine ereignisdiskrete und zufällig schwankende Größe und kann daher, beispielsweise bei einer Bestandsregelung, für das einzelne Produktionssystem auch einen Störeinfluss darstellen. Um einen hohen Grad an Teilautonomie zu ermöglichen, sollten Kapazitäten und Bearbeitungsreihenfolgen lokal festgelegt werden können. Dies bedingt, dass für den einzelnen Arbeitsvorgang keine festen Bearbeitungstermine im Sinne einer Steuerung nach dem Push-Prinzip vorgegeben werden. Wenn aber Bearbeitungstermine, Kapazitäten und Bearbeitungsreihenfolgen nicht im Detail vorgegeben werden können, dann ist auch keine Planabweichung definiert. Damit existiert hier Rückstand auf der Ebene des einzelnen Produktionssystems nicht als potenzielle Regelgröße. Aus den gleichen Gründen entfällt der Fertigstellungsgrad als potenzielle Regelgröße.

Für das teilautonome, einzelne Produktionssystem gibt es somit insgesamt die drei Stellgrößen Kapazität, Zugang und Auftragsreihenfolge. Diese drei Stellgrößen am Produktionssystem lassen sich offensichtlich unabhängig voneinander verändern. Damit ist es theoretisch möglich, bis zu drei unabhängige Regelgrößen festzulegen, die durch diese Stellgrößen im Sinne einer Angleichung an ihre Führungsgrößen beeinflusst werden können.

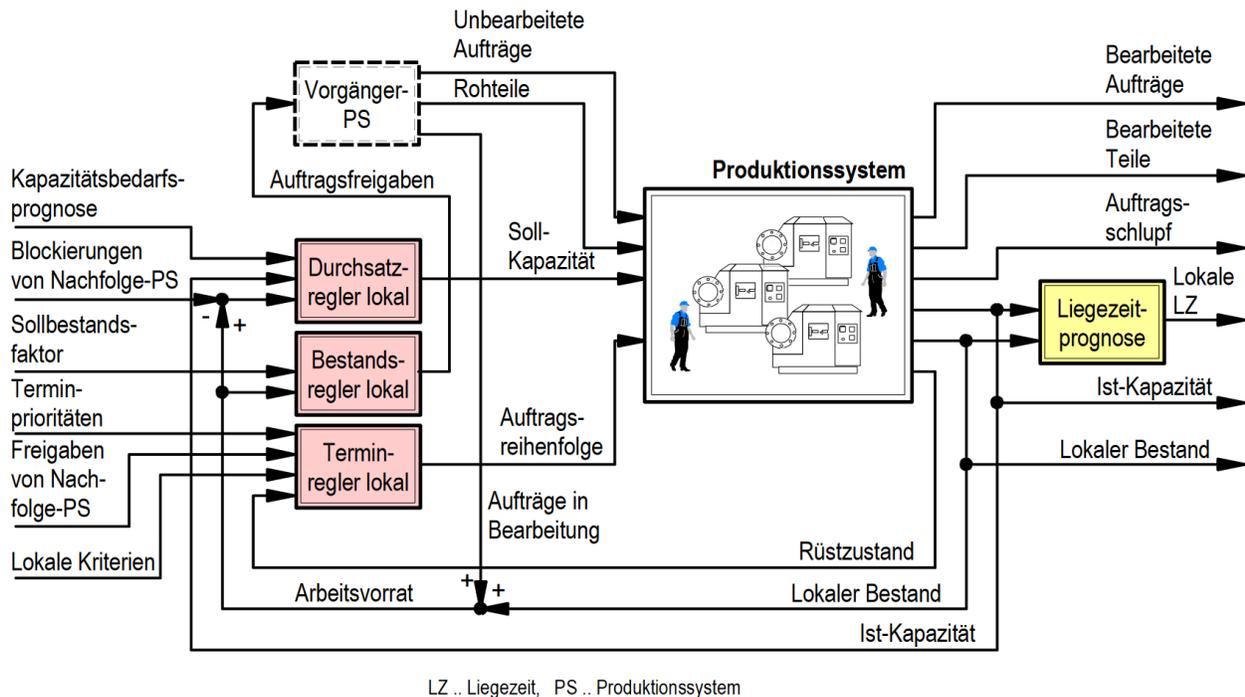


Abbildung 1: Lokale Regelkreise der DPR nach [5]

Als Ergebnis der in [5] angestellten Überlegungen ergeben sich für das dezentral geregelte Produktionssystem in der Fertigung nach Brinzer drei primäre Regelgrößen: Durchsatz, Bestand und Terminabweichung. Als sekundäre Regelgröße kann zusätzlich der Rüstanteil mit dem Ziel seiner Begrenzung oder Minimierung berücksichtigt werden. Auf Basis der festgelegten Stell- und Regelgrößen wurde nun die DPR mit drei Regelkreisen für das einzelne Produktionssystem aufgebaut, welche in Abbildung 1 dargestellt sind. Den lokalen Regelkreisen übergeordnet können zwei zusätzliche, zentrale Regelkreise zur Beeinflussung der Sollbestände und der Terminprioritäten zentrale Eingriffs- und Koordinationsmöglichkeiten bieten. Die Auftragserzeugung und -terminierung durch die übergeordnete Produktionsplanung stellt ein weiteres zentrales, koordinierendes Element dar.

Diese Produktionsregelung ist für die variantenreiche Serienfertigung besonders geeignet. Ihre Struktur ist auf die Werkstattfertigung mit komplexen Auftragsflüssen abgestimmt. Ihre Funktionsfähigkeit ist unabhängig von der Anzahl unterschiedlicher Aufträge oder Teiletypen in der Fertigung. Der Ansatz der DPR nach Brinzer wurde unter anderem mit Realdaten aus einer Fertigung simulativ überprüft und inzwischen bei der Firma Trumpf im Werk Grösch erfolgreich angewendet, wo signifikant reduzierte Bestandsschwankungen und Durchlaufzeit sowie eine wesentlich höhere Termintreue erreicht wurden [5],[6].

2.3 DEFIZITE BEI DER INTEGRATION INNERBETRIEBLICHER LOGISTIK

Für den innerbetrieblichen Transport ist kein Regelungsansatz bekannt, der mit einer Produktionsregelung harmonisiert und für KMU mit vertretbarem Aufwand umsetzbar ist. Aufgrund seiner einfachen praktischen Realisierbarkeit mit wenigen Parametern und geringem Datenbedarf sowie einer erfolgreichen Anwendung in der Praxis ist die DPR nach Brinzer ein vielversprechender Regelungsansatz für KMU, welche allerdings derzeit keine Transporte berücksichtigt. Im Projekt HaProLoK wird daher auf der DPR aufgebaut und die Logistik in die Regelung eingebunden, sodass durch diese Produktions- und Logistikregelung (PLR) eine bidirektionale Abstimmung „auf Augenhöhe“ von Produktion und Logistik in KMU erreicht wird.

2.4 DEZENTRALE ANSÄTZE FÜR DIE INNERBETRIEBLICHE LOGISTIK

In der Literatur findet sich eine Vielzahl an Arbeiten zu dezentralen Ansätzen für die innerbetriebliche Logistik. Ein wichtiger Forschungsbereich beschäftigt sich mit dezentralen Koordinationsmechanismen für fahrerlose Transportsysteme (FTS) [7], [8]. Ein ausführlicher aktueller Überblick mit über 100 Arbeiten findet sich beispielsweise in [9], weitere in [10]. Derzeit werden insbesondere agentenbasierte und schwarmbasierte Ansätze in der Forschung

genutzt. Diese dezentralen Ansätze fokussieren jeweils auf eine oder mehrere der folgenden Klassen von Steuerungsaufgaben: Zuweisung von Transportaufträgen zu Fahrzeugen, Positionierung von Leerfahrzeugen und/oder Routing.

Gegenwärtig wird der innerbetriebliche Transport als untergeordneter Bestandteil der hierarchisch organisierten Unternehmens- und Produktionsebenen verstanden. Mittels PPS- oder ERP- (Enterprise Resource Planning) Systemen werden alle Aktivitäten zur Güterherstellung koordiniert, indem diese Systeme Materialbedarfe planen, Ressourcen verwalten und Aufträge auf den hierarchisch untergeordneten Leitebenen zur Durchführung des Produktionsprozesses auslösen. Daraufhin bestimmt das auf der Fertigungsleitebene angesiedelte Manufacturing Execution System (MES) die Bearbeitungszeitpunkte, organisiert die Materialbereitstellung und übermittelt Informationen für die Feinsteuerung der Transportauftragsabwicklung an die untergeordneten Systeme nach dem top-down Prinzip [11]. In Forschungsarbeiten und Richtlinien existieren Überlegungen und Ansätze zur vernetzten Integration und Dezentralisierung im Kontext der Automatisierungspyramide [12], [13]. Werden Entscheidungsfunktionen von einer zentralen Instanz auf individuelle Objekte (z. B. Maschinen) verteilt und übertragen, wird von Selbststeuerung gesprochen [14]. Bei der Selbststeuerung logistischer Prozesse leistet das Objekt Informationsverarbeitung, Entscheidungsfindung und -ausführung selbst [14], was Regeln bzw. auf Regelkreisen basierende Mechanismen impliziert.

Als ein Umsetzungsansatz dezentraler Produktions- und Logistikkonzepte werden Agentensysteme entwickelt und angewendet [15], [16], [17]. Eine anerkannte Beschreibung für (technische) Agenten bietet [18], wobei ein Agent als eine abgrenzbare Hard- oder Softwareeinheit mit festgelegten Zielen charakterisiert wird, die er durch selbstständiges Verhalten zu erreichen bestrebt ist und dabei mit seiner Umgebung und anderen Agenten interagiert. Eine Menge von interagierenden Agenten wird als Agentensystem bezeichnet [18]. In komplexen Produktions- und Logistiksystemen führt der große Abstimmungsaufwand zwischen den Systemen mit vielen Entscheidungsfreiheitsgraden zu Einschränkungen bezüglich der Planbarkeit und Prognosefähigkeit [19]. Das cyber-physische Produktionssystem (CPPS) stellt eine Erweiterung der agentenbasierten Konzepte dar, da es Datenverarbeitung, Sensorik und Aktorik integriert sowie über die Fähigkeit zur offenen Vernetzung über digitale Kommunikationstechnologien und über Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügt. Dadurch wird ein neuer, aufwandsarmer Umsetzungsansatz für die angestrebte PLR ermöglicht. Die Funktionalität der lokalen Regelungen lässt sich direkt über AS als cyber-physische Systeme (CPS) abbilden. CPS sind nach [20] „... gekennzeichnet durch eine Verknüpfung von realen (physischen) Objekten und Prozessen mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Objekten und Prozessen über offene, teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze.“

3 MODELLIERUNG UND REGELUNG EINES REALEN PRODUKTIONSSZENARIO

Als Anwendungsfall für die vorhandene dezentrale Produktionsregelung und für die geplante Erweiterung der Regelung zur integrierten PLR wurde ein reales Produktionsszenario in der Simulationsumgebung Plant Simulation nachgebildet. Dabei handelt es sich um eine Produktion von technischen Geräten nach dem Werkstattprinzip. Sie ist in dreizehn Arbeitsplätze bzw. Arbeitsplatzgruppen („Arbeitsysteme“) mit lokalen Auftrags- und Teilebeständen unterteilt wie in Abbildung 2 gezeigt.

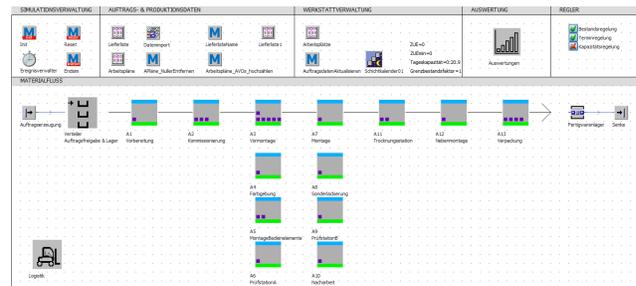


Abbildung 2: Simulationsmodell des Produktionsszenarios mit den 13 AS, jeweils bestehend aus einer oder mehreren Stationen

Eine umfangreiche Analyse der Produktionsdaten ergab eine sehr große Variantenvielfalt bis hin zu kundenindividuellen Konfigurationen, die in einer Vielzahl unterschiedlicher Arbeitsschrittfolgen und Materialflüsse resultierte. Im Simulationsmodell abgebildet wurden insbesondere die Struktur der Produktion, die Anzahl der Arbeitsplätze, Schichtkalender, Transportzeiten, Produktionsaufträge mit Erstellungs- und Lieferterminen, Arbeitspläne sowie Störungen bzw. Verzögerungen bei der Bearbeitung. In dieser ersten Ausbaustufe des Modells sind die Werker mit ihren Qualifikationen sowie die Grenzen der Transportkapazitäten und Pufferflächen noch nicht abgebildet.

Die Produktionssteuerung erfolgt nach dem Push-Prinzip mit Tagesplänen, die vom PPS-System generiert und freigegeben werden. Zur Validierung des Modells und als Benchmark für Regelungsansätze wurden Simulationsläufe mit einem realen Auftragsbestand durchgeführt. Anschließend wurde die beschriebene dezentrale Produktionsregelung modelliert. Implementiert wurden für jedes AS die folgenden lokalen Regler:

- **Terminregler:** Dieser regelt die Termintreue der Aufträge bei Fertigstellung durch die Anpassung der lokalen Bearbeitungsreihenfolge unter Berücksichtigung von Dringlichkeit und Schlupf der einzelnen Aufträge im Bestand, aber gegebenenfalls auch von Rüstzuständen und Rüstgruppen. Der Auf-

ruf erfolgt jedesmal, wenn eine Belegungsentscheidung bei einer Station ansteht.

- Bestandsregler: Dieser regelt und begrenzt die lokalen Bestände nach dem Pull-Prinzip durch Erteilen oder Verweigern der Auftragsfreigabe am Vorgängersystem, abhängig vom Erreichen einer Bestandsgrenze durch den aktuellen oder avisierten Bestand. Der Aufruf erfolgt durch den Terminregler vor einer Belegungsentscheidung.
- Kapazitätsregler: Dieser regelt optional Auslastung und Auftragsrückstand des AS durch Anpassung der Kapazitäten an den aktuellen und prognostizierten Auftragszugang unter Berücksichtigung der vorhandenen Kapazitätsstufen und der Reaktions- und Mindestinstallationszeiten bei der Kapazitätsanpassung.

Da das vorliegende Projekt auf die Optimierung und Erweiterung der Termin- und Bestandsregelung abzielt, wird die lokale Kapazitätsregelung im Folgenden nicht weiter berücksichtigt und angewendet.

4 KONZEPT DER PRODUKTIONS- UND LOGISTIKREGELUNG

4.1 IDENTIFIZIERUNG VON UNTERZIELEN ZUR OPTIMIERUNG DER ZIELERREICHUNG

Wie in Abbildung 3 dargestellt, dienen die betrachteten Transporte sowohl dem Transport des Halbfertigteils, oder der Baugruppe und somit der Verbindung der AS, als auch der Zuführung von Rohmaterialien, Komponenten, oder Baugruppen zur AS.

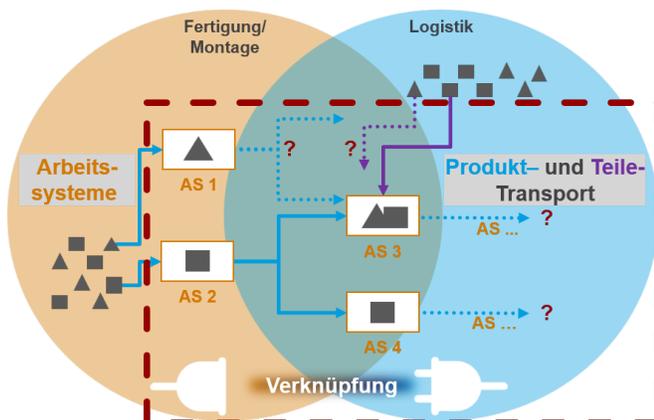


Abbildung 3: Systemgrenze der Betrachtung

Für eine Produktion oder Montage mit individuellen Produkten und kleiner Stückzahl gibt es typischerweise kei-

ne feste Abfolge von AS. Aus Sicht der Logistik kann die zu durchlaufende Abfolge an AS bis zur Produktfertigstellung jeweils unterschiedlich sein.

Die logistischen Zielgrößen bestehend aus Logistikleistung und -kosten gilt es bei der Gestaltung des Produktionsprozesses und im Betrieb zu optimieren. Produktionsreglerseitig wird die Zielerreichung über die Regelung der Bestände und erreichten Fertigstellungstermine angestrebt. Die Logistik kann über die unproduktive Zeit der Fahrzeuge, bestehend aus Leerfahrts- und Wartezeit, Einfluss auf die Auslastung der FTS nehmen. Die erreichte Laufzeit der Transportaufträge spiegelt sich in der Durchlaufzeit, Terminabweichung, den Beständen, sowie den resultierenden Verzugskosten wieder. Durch eine Erhöhung der Anzahl eingesetzter Fahrzeuge im System steigt letztendlich die unproduktive Zeit der Fahrzeuge und die Laufzeit der Transportaufträge sinkt. Eine Verringerung der Fahrzeuganzahl hat einen gegenteiligen Effekt. Befinden sich die beiden Größen im Mittel in einem ausgewogenen Verhältnis, kommt es durch Schwankungen im Auftragseingang dennoch zu Verschiebungen. Der Zugang an Transportaufträgen lässt sich beeinflussen, indem die Produktionsregelung Rücksicht auf die logistische Situation nimmt. Abhängig vom Verhältnis der Transportauftragslaufzeit und der unproduktiven Zeit der Fahrzeuge muss der Transportaufwand gesenkt werden, oder es können transportaufwändigere Aufträge in den AS freigegeben werden.

4.2 HARMONISIERUNG MIT DER PRODUKTIONSREGELUNG

Wie bereits aufgezeigt zielt die verwendete Produktionsregelung auf eine rechtzeitige Fertigstellung der Arbeitsaufträge und Deckelung der Bestände der nachfolgenden AS ab. Bei der Belegungsentscheidung von AS stehen zunächst eine Reihe an Arbeitsaufträgen zur Auswahl, die in der arbeitsauftragspezifischen Bearbeitungskaskade bis zum aktuellen AS gelangt sind und von der Produktionsregelung bezüglich der Termineinhaltung und Bestandsdeckelung bewertet werden. Das Ziel welches durch die Harmonisierung zwischen Produktion und Logistik erreicht werden soll, ist die Glättung der Auslastung der gesamten Fahrzeugflotte über die Zeit. Hierdurch minimiert sich die unproduktive Zeit der Fahrzeuge, und folglich auch die maximal vorzuhaltende Transportkapazität. Da ein Materialabriss, oder eine Blockade der Puffer durch Überlast der FTS unwahrscheinlicher wird, ist die Funktion des Produktionsreglers sichergestellt.

Die Konzeptionierung des weiteren Bewertungskriteriums für die Harmonisierung zwischen Produktion und Logistik wird im folgenden aufgezeigt. Dieses umfasst die Bewertung des Transportaufwands von Arbeitsaufträgen in Zusammenhang mit den aktuell und in naher Zukunft zu bewältigenden Transportaufwänden bei der Belegungsentscheidung von AS. Es entsteht eine rückgekoppelte Kom-

munikation zwischen den AS und der Logistik. Die Belegungsentscheidung in den AS berücksichtigt somit indirekt die Auslastung der Transportkapazitäten zu bestimmten Zeitpunkten. Die Performance des Produktionsreglers weicht folglich, verglichen mit der alleinigen Betrachtung von Terminen sowie Beständen, durch die Berücksichtigung eines dritten Aspekts von seinem Optimum ab. Dies gilt jedoch nur bei einer unendlichen Transportkapazität, sowie dem Ausschluss von Störungen in der Logistik. Bei Einbeziehung des Modells einer Fahrzeugflotte und simulierten Störungen wird jedoch eine bessere Performance erwartet. Einerseits können erwartungsgemäß die Transportkapazitäten durch eine gleichmäßigere Auslastung gesenkt werden. Andererseits werden Leistungsminderungen in der Logistik, die durch temporäre Störungen verursacht werden, besser abgefangen. Tritt eine logistische Störung auf, werden durch die Harmonisierung temporär Arbeitsaufträge mit geringerem Transportaufwand bevorzugt. Im Mittel sind jedoch Arbeitsaufträge aus dem gesamten Transportaufwandsspektrum zu bearbeiten, da bei Belegungsentscheidungen sowohl die Einhaltung der termingerechten Fertigstellung, als auch die Begrenzung der Bestände in den Nachfolger-AS angestrebt wird. Um eine einfache Integration in bestehende Systeme zu ermöglichen, wird ein geringer Kommunikationsaufwand angestrebt. Die aktuell zu bewältigenden Transportaufwände werden bei jedem der folgenden Ereignisse aktualisiert: wenn ein Transportauftrag von der Produktionsregelung avisiert wird, dem Flottenmanager gemeldet wird oder in einem Arbeitssystem als erledigt rückgemeldet wird.

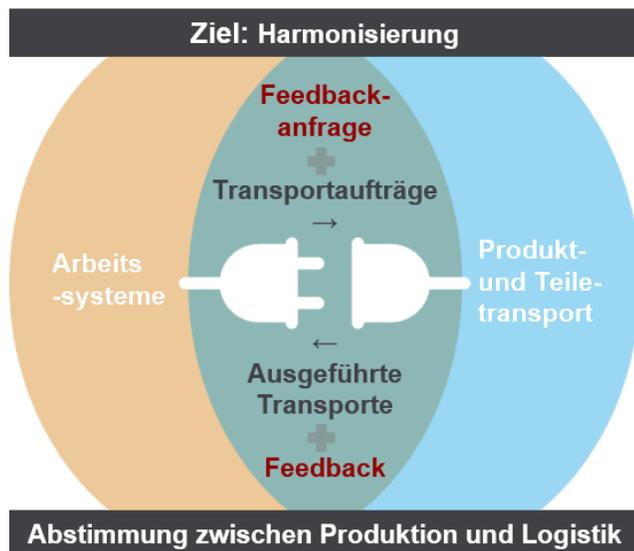


Abbildung 4: Harmonisierung über logistische Bewertung

In Abbildung 4 ist neben der alleinigen Übergabe von Transportaufträgen von den AS an die Logistik, die auch

ohne Harmonisierung erfolgt, ebenfalls die Bewertungsanfrage gezeigt. Der Zeitpunkt der Bewertungsanfrage und die anschließende Beantwortung fallen hier mit der Belegungsentscheidung des AS zusammen. Die Erstellung von Transportaufträgen muss zeitlich nicht zwingend mit der Belegungsentscheidung zusammenfallen, was später weiter ausgeführt wird. Abbildung 5 stellt den zusätzlichen Ablauf dar. Die Bewertung umfasst den aktuell zu bewältigenden Transportaufwand, sowie den logistischen Aufwand, der aus jedem zu bewertenden Arbeitsauftrag resultiert, bis die nächste Belegungsentscheidung für diesen Arbeitsauftrag in einem nachfolgenden AS ansteht. Der logistische Aufwand für einen Arbeitsauftrag schlüsselt sich über die Summe der Zeit für die Ausführung aller Transporte auf, die für die Fertigstellung des Arbeitsauftrags im zu betrachtenden AS nötig sind. Der aktuelle Transportaufwand im Ausführungszeitraum der Transporte eines möglichen Arbeitsauftrages setzt sich aus den bereits an den Flottenmanager gemeldeten und den noch nicht gemeldeten Transportaufträgen zusammen. Für den Aufruf der logistischen Bewertung bei der Belegungsentscheidung wird für jeden angefragten Arbeitsauftrag ein Rückgabewert definiert, so dass aus logistischer Sicht bestimmte Arbeitsaufträge zu bevorzugen sind. Ziel ist es, die maximal in Anspruch genommene Transportkapazität zu minimieren, während die Bestände in den AS gering gehalten werden und die erreichten Fertigstellungstermine eine rechtsschiefe Verteilung mit geringer Streuung um den Erwartungswert aufweisen. Der Erwartungswert ist in Richtung verfrühter Fertigstellung um den Soll-Fertigstellungstermin verschoben. Eine derartige Verteilung wird in Abbildung 8 im Kapitel zu den ersten Erkenntnissen zum Konzept gezeigt.

Eine zeitlich verzögerte Übermittlung ist für eine allgemeingültige Schnittstelle zwischen PLR und Flottenmanager notwendig. Die zeitliche Verzögerung bezüglich der gewünschten Startzeitpunkte der Transporte und Meldung eines Transportauftrags an den Flottenmanager, lässt sich somit auf die Eigenschaften des Flottenmanagers anpassen. Erfolgt vom Flottenmanager die Zuweisung von Transportaufträgen auf einzelne Fahrzeuge zu früh, so ergibt sich bei der Nutzung von Transportauftragskalendern, oder -listen eine höhere Abweichung der Soll- und Ist-Abarbeitungszeitpunkte durch Störungen, falls die Transportaufträge nicht zwischen Fahrzeugen getauscht werden können.

Nach erhaltener logistischer Bewertung der Arbeitsaufträge erteilt die PLR Belegungsentscheidungen. Von den Belegungsentscheidungen hängen schließlich die auszuführenden Transporte ab. Sind Transporte erteilt, werden diese unter den nicht zugewiesenen Transporten gemerkt und mit einem zu dimensionierenden Zeitvorlauf vor Ausführungsende an die Flottenmanager weitergeleitet. Die Flottenmanager weisen die Transportaufträge Fahrzeugen zu, welche die Transporte ausführen. Die Generierung der Transportaufträge kann zu zwei Zeitpunkten durchgeführt

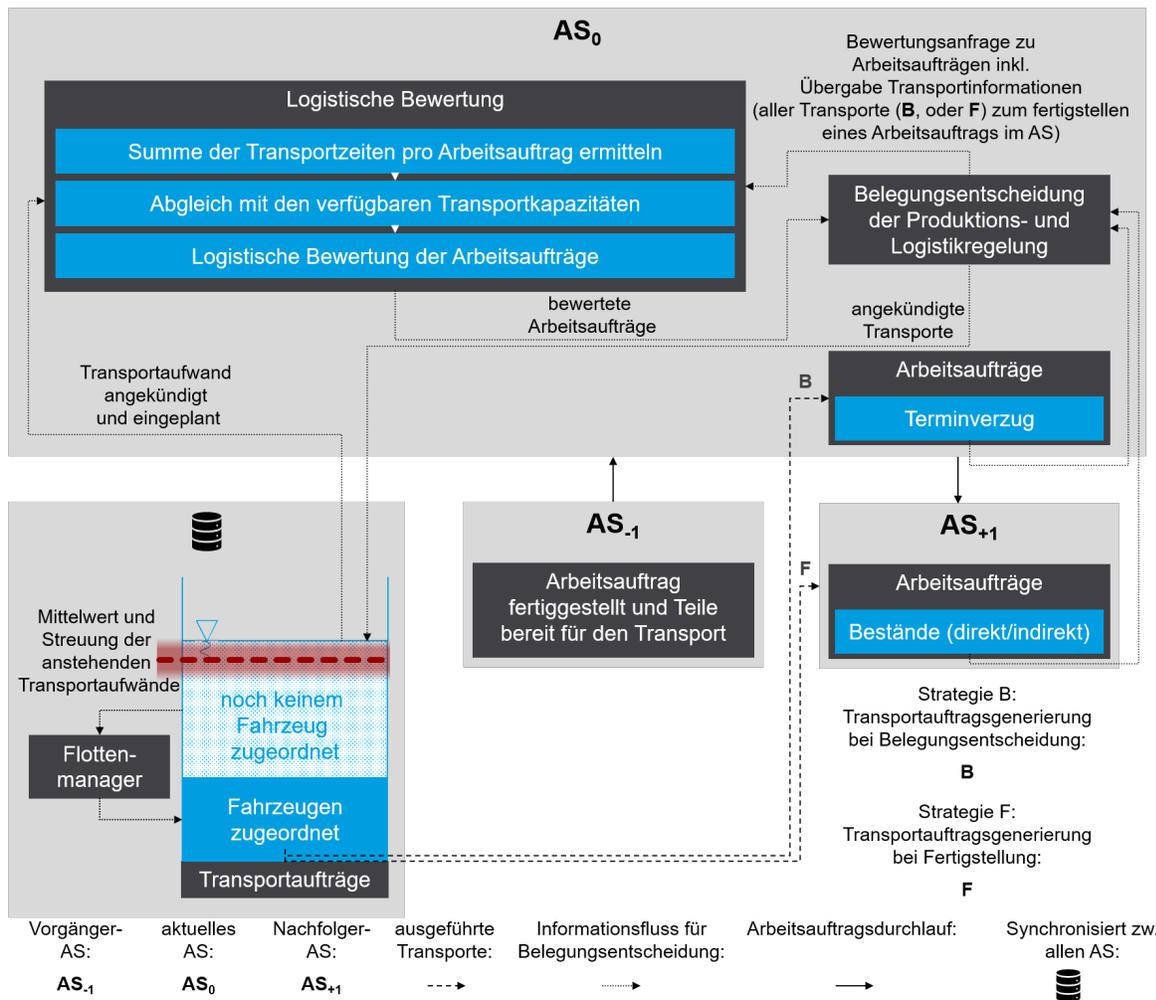


Abbildung 5: Erweiterter Ablauf der Produktions- und Logistikregelung

werden. Der Zeitpunkt liegt entweder bei der Belegungsentscheidung im AS, oder alternativ bei der Fertigstellung eines Arbeitsauftrags. Die Vor- und Nachteile einer Transportauftragsgenerierung bei Belegungsentscheidungen ergeben sich wie folgt:

Vorteile

- Weniger Eingangspufferplatz wird im AS₀ belegt wo die Entscheidung ansteht. Transportgüter die nicht von AS₋₁ ausgehen, sondern von einem Lager (mit eigenen Zielen und Prozessen), passieren später die Systemgrenze.
- Die Ausführung der Transporte ist zeitlich näher am Aufruf der logistischen Bewertung, was ein dynamischeres System ermöglicht.
- Bei Störungen im AS₀ werden Transportkapazitäten während der Störungsdauer nicht gebucht, da keine weitere Belegungsentscheidung erfolgt.

Nachteile

- Ausgangspufferplätze im AS₋₁ werden länger belegt.
- Bei Störungen in der Logistik kommt es schneller zum Materialabriss, da die Belegung des AS₀ an einen Transport geknüpft ist.

Die erwartbaren Vor- und Nachteile einer Transportauftragsgenerierung bei Fertigstellung ergeben sich konträr zur Generierung bei Belegungsentscheidungen.

Die Berechnung der Transportaufwände für die Arbeitsaufträge bei Bewertungserstellung durch die logistische Bewertung variiert je nach angewandter Strategie:

- Strategie-Belegungsentscheidung: Transporte vom vorhergehenden AS_{-1} und Transporte ohne AS als Vorgänger müssen bewertet werden.
- Strategie-Fertigstellung: Transporte zum nachfolgenden AS_{+1} müssen vom Feedback berücksichtigt werden.

5 ANBINDUNG AN MANUFACTURING EXECUTION SYSTEM UND PRODUKTIONSPLANUNG

Da ausschließlich die AS in der Produktion und die Transportsysteme als Akteure kommunizieren, ist es ausreichend nur diese als CPS zu realisieren. Die Erweiterung von Aufträgen, Transporteinheiten und/oder Produkten zu eigenen CPS ist für die PLR nicht erforderlich und kann, wenn dafür Potenzial erkennbar wird, zu einem späteren Zeitpunkt ergänzt werden. Die Architektur für die Implementierung orientiert sich an CPS. Die Logiken der einzelnen AS und FTS werden in CPS gekapselt und in das Netzwerk des CPPS eingebunden. Die PLR ist in den AS verankert und kommuniziert über Transportaufträge mit den FTS, wie in Abbildung 6 dargestellt.

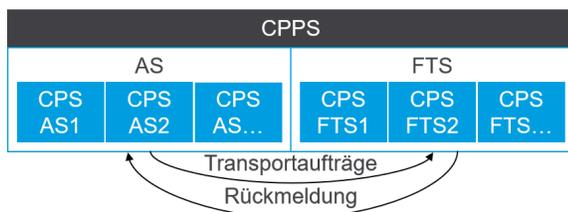


Abbildung 6: AS und FTS als CPS

Durch die PLR entsteht ein CPPS mit einer geringen Komplexität bezüglich Struktur und Vernetzung sowie einer relativ geringen Anzahl von CPS. Somit ergibt sich für KMU ein niedrighwelliger Einstieg in die Anwendung von Industrie 4.0 (vgl. dazu die Realisierung in [6]). Auch rein manuelle Arbeitsplätze ohne rechnerbasierte Entscheidungsunterstützung können durch einen Satz von einfachen „wenn-dann“ Anweisungen als weitere Akteure in den Ansatz eingebunden werden.

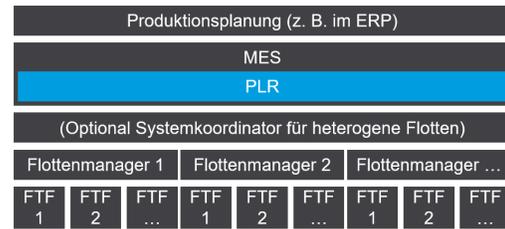


Abbildung 7: Einordnung der Produktions- und Logistikregelung in die Systeme der Automatisierungsebenen

Die PLR ist auf der Entscheidungsebene eines MES angesiedelt, wie in Abbildung 7 dargestellt. Eine übergeordnete Produktionsplanung übernimmt eine erste (oder „grobe“) Termin- und Kapazitätsplanung. Arbeitsaufträge für einen mittelfristigen Zeitraum werden an die PLR übergeben, die die genaue Abarbeitungsreihenfolge in den AS regelt. An den AS werden lokal Auftragstermine, Bestände sowie logistische Bewertungen der Aufträge abgefragt und fließen in die Belegungsentscheidung der AS ein. Die Transportaufträge werden entsprechend den in den AS freigegebenen Aufträgen generiert. Die Transportaufträge werden aufbereitet und an den Flottenmanager des FTS weitergeleitet. In der Entscheidungsebene zwischen PLR und Flottenmanagern können auch Konzepte von Systemkoordinatoren für heterogene Flotten integriert werden, falls mehrere FTS genutzt werden. Die Transportaufträge werden dem FTS mit den am besten geeigneten Fahrzeugen zugewiesen. Die Zuweisung und Ausführung der Transportaufträge erfolgt auf den Ebenen des Flottenmanagers und der Fahrzeuge.

6 ERSTE ERGEBNISSE ZUM ENTWICKELTEN KONZEPT

Die nachfolgenden Ergebnisse dienen dazu, die Funktion der Termin- und Bestandsregler zu erläutern und ihre Wirksamkeit aufzuzeigen. Detailliertere Untersuchungen mit quantitativen Analysen werden im Laufe des Projekts folgen. Zur Bewertung der Reglerfunktion wurden insbesondere die beiden Regelgrößen, Bestände der AS und Termintreue der fertiggestellten Aufträge, analysiert. Dazu wurden die Verteilungen und Verläufe der Terminabweichungen aller fertiggestellten Aufträge sowie die Maximalwerte, Mittelwerte und Verläufe der lokalen Bestände betrachtet. Da der Auftragseingang im betrachteten Zeitraum die vorhandenen Kapazitäten zeitweilig nicht ausschöpft, werden die meisten Aufträge früher als notwendig abgearbeitet und daher deutlich vor ihrem Sollendtermin fertiggestellt (positiver Schlupf). Ohne Termin- und Bestandsregelung werden dennoch einige der Aufträge zu spät fertiggestellt (negativer Schlupf), bei gleichzeitig großer Streuung der Terminabweichungen (Abbildung 8 oben). Mit der Termin- und Bestandsregelung nimmt die Streuung der Ter-

minabweichungen deutlich ab und es gibt keine Aufträge mehr mit relevantem Terminverzug (Abbildung 8 unten). Lediglich zwei Aufträge haben störungsbedingt noch einen Verzug von wenigen Stunden. Mit der Regelung werden systematisch an jedem Tag zunächst die dringendsten der neu freigegebenen Aufträge fertiggestellt, während im Verlauf des Tages sukzessive die weniger dringenden Aufträge mit den vorhandenen Kapazitäten abgearbeitet werden. Es zeigt sich, dass die verfrühte Fertigstellung von Aufträgen im Wesentlichen nur noch am Anfang und am Ende des Simulationszeitraums auftritt, wo der Auftragszugang geringer und temporär Überkapazität vorhanden war. Die weitere Streuung der Terminabweichungen ist primär auf Verzögerungen im Produktionsablauf durch daraus resultierende Auslastungsschwankungen sowie auf Störungen der AS zurückzuführen.

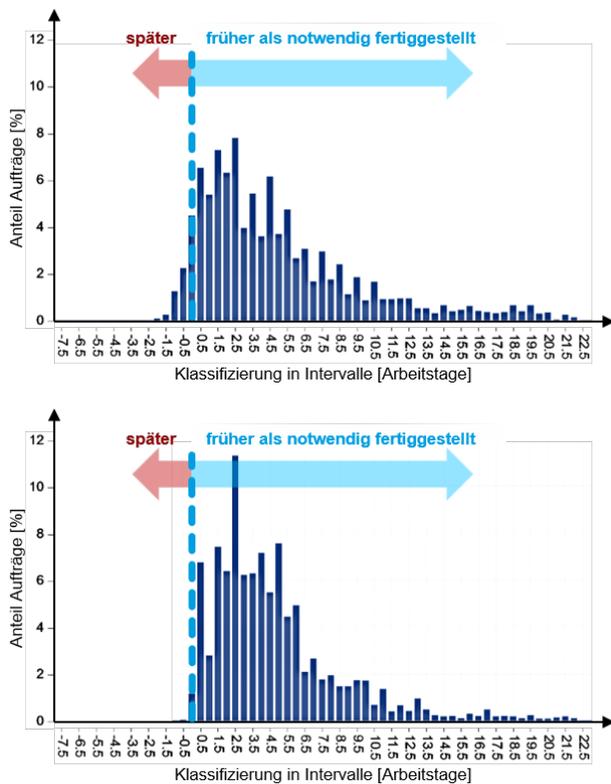


Abbildung 8: Anteile der fertiggestellten Aufträge nach Schlupf-Bereichen (Terminvorlauf) **ohne Regelung oben** und **mit Regelung unten**

Für den Einsatz der lokalen Bestandsregler ist als Führungsgröße je geregelterm AS eine Bestandsgrenze zu definieren. Diese soll einerseits möglichst niedrig sein, so dass Bestandsaufbau und Liegezeiten am AS reduziert werden. Andererseits soll diese so hoch sein, dass die Gefahr von Leerlauf am AS und von Blockierung von Vorgänger-

AS möglichst gering ist. Auf Basis dieser Überlegungen kann die Bestandsgrenze „im Betrieb“ festgelegt und ggf. iterativ reduziert werden [4], alternativ wird in [4] auch ein mathematisches Berechnungsverfahren vorgeschlagen. Für die ersten Untersuchungen im Simulationsmodell wurde hier der erstere Ansatz gewählt.

Abbildung 9 zeigt die zeitliche Entwicklung des Gesamtbestands in der simulierten Produktion als Summe der Bestände an den AS in Stunden Vorgabezeit ohne (oben) und mit Termin- und Bestandsregelung (unten). Als Vergleichsmaßstab sind die festgelegten Bestandsgrenzen aller AS aufsummiert und als gestrichelte Linie in beiden Graphen eingezeichnet. Ohne Regelung zeigt sich in Zeiten starken Auftragszugangs ein unkontrollierter Bestandsaufbau bis zum 6,5-fachen der Bestandsgrenze, während mit Bestandsregelung die Gesamtbestandsgrenze nicht überschritten wird. Aufgrund der temporären Überkapazitäten liegt der mittlere Gesamtbestand in der geregelten Produktion bei ca. 60% der Gesamtbestandsgrenze. Dies ist weniger als 30% des Bestandes in der Produktion ohne Bestandsregelung, bei gleichzeitig verbesserter Termintreue.

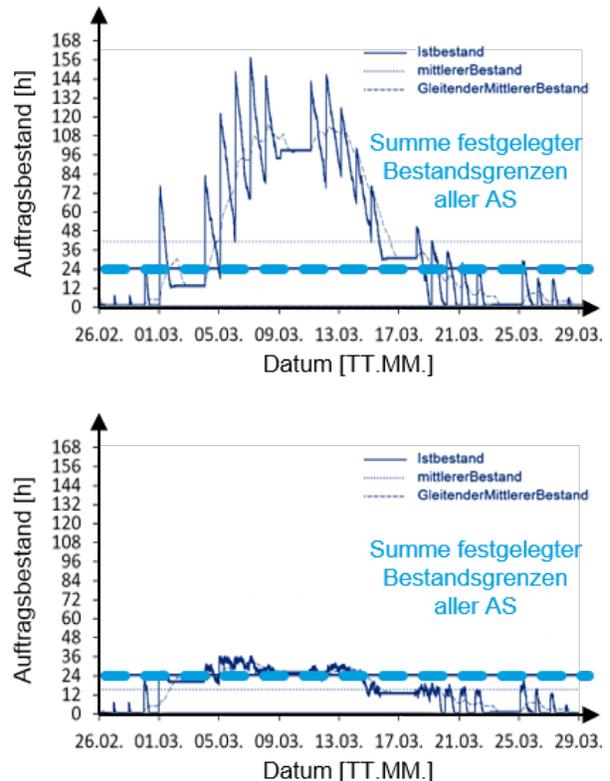


Abbildung 9: Summe der Auftragsbestände an den AS in Stunden Vorgabezeit. Verlauf über der Zeit am Beispiel eines Produktionsmonats **ohne Regelung (oben)** und **mit Regelung (unten)**

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zusammenfassend zeigt sich, dass mit der vorgestellten DPR als einer vollständig dezentralen Produktionsregelung eine Erhöhung der Termintreue mit wesentlich geringeren Beständen in der Produktion erreicht wird. Die dezentralen Termin- und Bestandsregler erfüllen im Produktionsszenario ihre Funktion:

- Alle Bestände werden begrenzt und geregelt,
- Terminverzug von Produktionsaufträgen wird weitestgehend verhindert, und
- die verfrühte Fertigstellung der Aufträge wird reduziert (vorhandene Aufträge werden bei Überkapazität jedoch abgearbeitet).

Die dezentrale Produktionsregelung soll nun mit den vorgestellten Logistikkonzepten zur harmonisierten dezentralen Produktions- und Logistikregelung (PLR) zusammengeführt werden. Ein Funktionsnachweis soll auf Basis detaillierterer simulativer Untersuchungen des Reglerkonzepts erbracht werden. Als nächste Schritte ergeben sich somit die Erweiterung des Modells um die Abbildung der Werker mit ihren Arbeitszeiten und Kompetenzen sowie entsprechende Kapazitätsanpassungen. Zudem werden das Produktions- und das Logistikmodell zur detaillierten Abbildung der Produktion mit Transporten und Transportmittelkapazitäten zusammengeführt. Die implementierte Produktionsregelung wird zur harmonisierten dezentralen PLR erweitert. Schließlich erfolgt eine detaillierte simulationsbasierte Bewertung der Leistungsfähigkeit der harmonisierten dezentralen PLR, wobei die Auswirkungen auf Bestände, Durchlaufzeiten, Termintreue und Auslastungen der Arbeits- und Transportsysteme untersucht werden.

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 der „Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen“ (AIF).

Gefördert durch:



**Forschungsnetzwerk
Mittelstand**



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

LITERATUR

- [1] S. Gröger, *Nachhaltiges Qualitätsdatenmanagement: Bericht zur GQW-Jahrestagung 2022 in Chemnitz*, 1st ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden and Springer Vieweg, 2023.
- [2] C. Reuter, F. Brambring, T. Hempel, and A. Gützlaff, “Prosense – improving the forecast quality of detailed planning,” *wt Werkstattstechnik online*, vol. 106, no. 04, pp. 218–223, 2016. [Online]. Available: https://web.archive.org/web/20220115102232id_/https://elibrary.vdi-verlag.de/10.37544/1436-4980-2016-04-28.pdf
- [3] W. J. Hopp and M. L. Spearman, *Factory physics*, 3rd ed., ser. The McGraw-Hill Irwin series operations and decision sciences : Operations management. Boston: McGraw-Hill, 2011. [Online]. Available: https://books.google.de/books/about/Factory_Physics.html?id=TfcWAAAQBAJ&redir_esc=y
- [4] H. Lödding, *Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*, 3rd ed., ser. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg and Imprint and Springer Vieweg, 2016. [Online]. Available: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-48459-3>
- [5] B. Brinzer, *Produktionsregelung für die variantenreiche Serienfertigung*, ser. ISW-Forschung und -Praxis. Heimsheim: Jost-Jetter, 2005, vol. Nr. 154. [Online]. Available: <https://katalog.bibliothek.kit.edu/bib/288753>
- [6] B. Boris, “Management mit bestand,” *Industrie Management*, vol. 28, no. 1, pp. 17–21, 2012, [Online]. Available. [Online]. Available: [https://www.gito-verlag.de/homepage/im/imhp.nsf/0/E2F2EE235F988DE6C125798F003C4F71/\\$FILE/brinzer_Management-mit-Bestand%20IM_2012_1.pdf](https://www.gito-verlag.de/homepage/im/imhp.nsf/0/E2F2EE235F988DE6C125798F003C4F71/$FILE/brinzer_Management-mit-Bestand%20IM_2012_1.pdf)
- [7] M. de Ryck, M. Versteyhe, and F. Debrouwere, “Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 54, pp. 152–173, 2020. [Online]. Available: <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/562161>
- [8] F. Gehlhoff, “Agent-based decentralised architecture for integrated process planning and scheduling of transport and production processes,” Ph.D. dissertation, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, 2023. [Online]. Available: <https://openhsu.ub.hsu-hh.de/entities/publication/15181>
- [9] T. Schmidt, K. B. Reith, N. Klein, and M. Däumler, “Research on decentralized control strategies for automated vehicle-based in-house transport systems: A survey,” *Logistics Research*, vol. 13, no. 1, pp. 1–27, 2020. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10419/297186>
- [10] J. Fottner, D. Clauer, F. Hormes, M. Freitag, T. Beinke, L. Overmeyer, S. N. Gottwald, R. Elbert, T. Sarnow, T. Schmidt, K. B. Reith, H. Zadek, and F. Thomas, “Autonomous systems in intralogistics – state of the art and future research challenges: Publications of darmstadt technical university, institute for business studies (bwl).” [Online]. Available: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:dar:wpaper:124957>
- [11] “Fertigungsmanagementsysteme (manufacturing execution systems - mes),” Berlin. [Online]. Available: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-5600-blatt-1-fertigungsmanagementsysteme-manufacturing-execution-systems-mes>
- [12] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, *MES im Umfeld von Industrie 4.0*. VDMA, 2019. [Online]. Available: <https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/vdma-66412-40/312797545>
- [13] W. Günthner and P. Tenerowicz, “Modularisierung und Dezentralisierung in der Intralogistik,” *Industrie Management*, vol. 27, no. 1, pp. 25–29, 2011. [Online]. Available: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1188398/file.pdf>
- [14] K. Windt and M. Hülsmann, *Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics*. Berlin, New York: Springer, 2007. [Online]. Available: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-47450-0>
- [15] Verein Deutscher Ingenieure und Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik, *Agentensysteme in der Automatisierungstechnik: Anwendung*, ser. VDI/VDE 2653 Blatt 3. Berlin: VDI/VDE, 2020. [Online]. Available: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdivde-2653-blatt-3-agentensysteme-in-der-automatisierungstechnik-anwendung>
- [16] R. Youseffar, “Entwicklung eines agentenbasierten Konzepts zur flexiblen Systemplanung von Distributionszentren,” Dissertation, Universität Stuttgart, Aachen, 2018. [Online]. Available: <https://www.shaker.de/shop/978-3-8440-6036-2>
- [17] S. Bussmann, N. Jennings, and M. Wooldridge, *Multiagent Systems for Manufacturing Control*. Berlin: Springer, 2004. [Online]. Available: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-08872-2>
- [18] Verein Deutscher Ingenieure und Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik, *Agentensysteme in der Automatisierungstechnik: Grundlagen*, ser. VDI/VDE 2653 Blatt 1. Berlin: VDI/VDE, 2018. [Online]. Available: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdivde-2653-blatt-1-multi-agent-systems-in-industrial-automation-fundamentals>
- [19] E. Rehder and A. Schatz, “Reifegradbasierte koppelung - koordinierte selbststeuerung für dezentrale produktionssysteme,” *wt Werkstattstechnik online*,

vol. 104, no. 3, pp. 129–131, 2014. [Online]. Available: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/aa76d717-7504-46dd-921e-e65b5beffc55/details>

- [20] V.-G. M.-u. Automatisierungstechnik, *Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation*. VDI Verlag, 2013. [Online]. Available: <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/cyber-physical-systems-chancen-und-nutzen-aus-sicht-der-automation>

Domenic Schmidpeter, M.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter am 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 (KMP) an der Hochschule Mannheim.

Phone: +49 (0)621 292-6215

Email: b.brinzer@hs-mannheim.de