

Schlussbericht vom 31.08.2025

zum IGF-Vorhaben 22742 N / 1

Thema

Harmonisierte und dezentrale Produktions- und Logistikregelung für KMU (HaProLoK)

Berichtszeitraum

01.05.2023 bis 31.08.2025

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

Schlachte 31

28195 Bremen

Forschungseinrichtung(en)

Universität Stuttgart, Institut für Fördertechnik und Logistik

Holzgartenstraße 15 B

70174 Stuttgart

Hochschule Mannheim, Kooperationsnetzwerk Moderne Produktion (KMP)

Paul-Wittsack-Straße 10

68163 Mannheim

Platz für ein Logo

Inhaltsverzeichnis

1	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	3
1.1	Arbeitspaket 1: Anforderungsdefinition und Datenerhebung.....	3
1.2	Arbeitspaket 2: Weiterentwicklung der DPR und Entwicklung der Logistikregelung	6
1.3	Arbeitspaket 3: Konzeptionelle Zusammenführung der PLR	11
1.4	Arbeitspaket 4: Simulationsbasierter Funktionsnachweis der PLR.....	14
1.5	Arbeitspaket 5: Nutzbarmachung des Ansatzes für Unternehmen	26
2	Verwendung der Zuwendung	36
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	36
4	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	36
5	Wissenstransfer in die Wirtschaft.....	37
6	Durchgeführte Transfermaßnahmen	37
7	Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	37
8	Literaturverzeichnis	38

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

1.1 Arbeitspaket 1: Anforderungsdefinition und Datenerhebung

Im Rahmen des Projekts wurden umfassende Vorarbeiten durchgeführt, um die Grundlage für die Entwicklung und Implementierung der dezentralen Produktions- und Logistikregelung zu schaffen.

Vom IFT durchgeführte Arbeiten:

Zu Beginn wurde ein Merkmalskatalog für den innerbetrieblichen Transport entwickelt, der auf einer detaillierten Literaturanalyse basiert. Dieser Katalog dient der systematischen Erfassung und Klassifikation der relevanten Merkmale des innerbetrieblichen Transports und stellt eine zentrale Grundlage für die spätere Integration in die dezentrale Produktionsregelung dar. Im Anschluss wurde in Zusammenarbeit mit PA-Partnern und weiteren interessierten Unternehmen eine Anforderungs- und Parameterliste erarbeitet. Die Erhebung dieser Anforderungen erfolgte über einen strukturierten Fragebogen sowie durch persönliche Interviews mit Fachleuten aus der Industrie. Die Ergebnisse dieser Datenerhebung ermöglichten eine präzise Definition der spezifischen Anforderungen und Parameter, die für die Gestaltung und Modellierung der dezentralen Produktions- und Logistikregelung erforderlich sind. Des Weiteren wurde eine Ist-Prozessanalyse bei einem Partnerunternehmen durchgeführt. Dabei wurden relevante Auftrags- und Stammdaten aus den bestehenden IT-Systemen des Unternehmens extrahiert. Diese Daten bilden die Grundlage für eine simulationsbasierte Untersuchung des aktuellen Produktions- und Logistikprozesses. Ziel war es, potenzielle Schwachstellen und Verbesserungspotenziale zu identifizieren, die durch die Implementierung der dezentralen Regelung adressiert werden können.

Vom KMP durchgeführte Arbeiten:

Im Rahmen der Weiterentwicklung der Produktionsregelung wurde eine umfassende Auflistung aller Anforderungen, Parameter und Annahmen bezüglich der Produktionsmerkmale durchgeführt. Diese umfasst insbesondere die Kapazitätsanforderungen, Materialflusssynamiken und Maschinenverfügbarkeiten, die für die spätere Ausgestaltung der dezentralen Regelung berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus wurden die Ziele für die zu entwickelnde Produktionsregelung als Bestandteil einer Gesamtregelung präzise definiert. Die Hauptziele umfassen die Begrenzung der Umlaufbestände und die Sicherstellung der Termintreue bei optimaler Ressourcennutzung. Die Produktionsregelung soll dabei als integraler Bestandteil einer Gesamtregelung fungieren, die eine harmonisierte Steuerung der Produktionsressourcen und Logistikressourcen gewährleistet. Anschließend wurde eine Analyse bestehender Regelungsansätze aus der Literatur durchgeführt. Die identifizierten Methoden und Konzepte wurden auf ihre Eignung zur Weiterentwicklung der dezentralen Produktionsregelung hin bewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse führten zur Entscheidung für ein Regelungskonzept und flossen direkt in den Entwurf und die Konzeption der neuen Regelungsstrategie.

Erzielte Ergebnisse des IFT:

Auftragsbezogene Parameter:

- Auftragspriorität (Damit Materialien rechtzeitig an Bearbeitungsstation sind)
- Interne Wiederbeschaffungszeit von Materialien (Transportzeit, Auslagerzeit)
- Bedarfszeitpunkt (wann muss Material an Bearbeitungsstation sein)
- Bedarfsmenge

- Durchlaufzeit/Bearbeitungszeit/Liegezeit pro Bearbeitungsstation (Beeinflusst den Bedarfszeitpunkt an anderen Bearbeitungsstationen sowie den Transport des Produkts)
- Terminabweichung
- Verzugskosten

Transportmittelbezogen:

- Verfügbarkeit (technische Verfügbarkeit / Ausfallszeit / Wartung, Reichweite Akku inkl. Laden)
- Belegungszustand
- Fassungsvermögen (Wie viele LE passen auf Transportmittel)
- Mittlere Geschwindigkeit
- Mittlere Beschleunigung
- Dimension
- Anzahl Transportmittel
- Art der Transportmittel
- Transportkosten

Logistik-/Materialbereitstellungssystem:

- Lagerstufen (Wareneingang, Kommissionierung, maschinennahe Lagerung/Puffer an Bearbeitungsstation)
- Materialabruf (Bedarfs- / verbrauchsgesteuert)
- Bestand / Reichweite (Abhängig von Lagerstufe)
- Bestandskosten

Die Praxisdaten der Partnerunternehmen wurden soweit als möglich ermittelt. Dazu gehören alle Daten zu den Themenbereichen „Mitarbeiter“, „(IT)-Infrastruktur und Technologie“, „Daten“ und „Prozesse“. Zu den Auftragsdaten wurden repräsentative Auftragseingänge für Zeiträume bis zu einem Jahr von einem Partnerunternehmen geliefert.

Erzielte Ergebnisse des KMP:

Eine detaillierte Recherche zeigte auf, dass es unter den in der Literatur beschriebenen Ansätzen zur Regelung der Produktion mehrere ausreichend konkretisierte Konzepte gibt, die Elemente einer Produktionsregelung entsprechend dem Forschungsantrag enthalten.

Der Ansatz von Märtens, Eisweiser und Nickel (Märtens 2007) ist allerdings primär ein Framework, das Orientierung bei der Entwicklung einer Produktionsregelung bieten kann. Es modularisiert die Produktionssysteme und definiert Daten, die der Eingangspuffer den Reglern für ihre Regelentscheidungen zur Verfügung stellt. Jedoch werden keine Führungs- oder Regelgrößen näher definiert, diese müssen selbst bestimmt werden. Auch wird die Kapazitätssteuerung rein zentral durch eine Rückstandsregelung durchgeführt, was nicht den Anforderungen des Projektes entspricht.

Der Ansatz nach Pielmeier (2019) eignet sich für das Projekt HaProLok aus mehreren Gründen nicht. Zwar erfordert der Ansatz keine hohe Plangenaugigkeit, allerdings basiert das Konzept im Wesentlichen auf der automatischen Analyse und Klassifizierung von Ereignissen und der Anwendung von Künstlicher Intelligenz. Dies hat einerseits den Nachteil, dass zur Analyse der Ursache-Wirkungs-Paare hochqualifizierte Mitarbeitende benötigt werden und die Regelung KI-Technologien erfordert. Weiterhin besteht die grundsätzliche Problematik automatisierter Mustererkennung, dass die Ergebnisse für die Mitarbeitenden nicht

nachvollziehbar sind und die Korrektheit nicht überprüfbar ist. Zusätzlich wird für die Wahl der Regelentscheidung das Ergebnis einer jeden möglichen Entscheidung berechnet und anschließend anhand der zuvor definierten Kennzahlen verglichen. Zwar kann die Anzahl an möglichen Maßnahmen durch den Einsatz der Ursache-Wirkungs-Matrix im Vorfeld reduziert werden, der Rechenaufwand wird durch die hohe Anzahl an Maßnahmen jedoch weiterhin höher liegen als beim Einsatz eines vordefinierten Algorithmus.

Der Ansatz von Engelhardt (2015) hat mehrere Nachteile. Nur die bestandsregelnde Auftragsfreigabe erfolgt nach dem Pull-Prinzip, die anderen Elemente basieren auf dem Push-Prinzip, somit sind diese nicht mit den Anforderungen des Projekts vereinbar. So erfolgt bei der Reihenfolgebildung eine definierte Aufteilung der Schlupfzeit der Aufträge auf die einzelnen Produktionssysteme, was einer Feinterminierung auf Basis der einzelnen Produktionssysteme entspricht.

Der Ansatz von Grundstein (2017) entspricht in großen Teilen zwar den Anforderungen des Projektes Ha-ProLok, allerdings sind die Regler der Fertigungsregelung sehr stark auf die Termintreue der Fertigungsaufträge ausgelegt. So kann in der Kapazitätssteuerung bereits ein einzelner Fertigungsauftrag bei Nichteinhaltung des Fertigstellungstermins dazu führen, dass das gesamte Produktionssystem seine Kapazität erhöhen soll, was zur Überreaktion führen kann. Nachteilig ist ebenfalls, dass bei Auftragsfreigabe die Fertigungsaufträge vom Vorgängersystem bereits den jeweiligen Stationen innerhalb des Produktionssystems zugeordnet werden. Dies erscheint weniger sinnvoll, wenn reihenfolgeabhängige Rüstzeiten innerhalb des Produktionssystems und mehrere parallele Stationen vorhanden sind.

Der Ansatz von Isenberg (2016) fokussiert sich auf die Reihenfolgebildung von Losen und Fertigungsaufträgen und betrachtet weder eine Auftragsfreigabe noch eine Kapazitätsveränderung. Außerdem werden aktuell bearbeitete Aufträge nicht in der Steuerung berücksichtigt. Zusätzlich besteht der Nachteil, dass für die Losbildung Methoden des Clusterings angewendet werden und für die Reihenfolgebildung ein rechenintensiver Algorithmus verwendet wird, sodass eine Anwendung dieser Methoden ohne IT-Unterstützung kaum möglich ist.

Die Produktionssteuerung von Niehues (2017) veranlasst lediglich eine neue Reihenfolgebildung, sodass weder Bestände innerhalb des Produktionssystems geregelt werden, noch kann eine Kapazitätsanpassung erfolgen, falls das System trotz Reihenfolgeänderung in Rückstand gerät. Die Arbeit von Ostgathe (2012) fokussiert sich auf die Montage und die Produktionssteuerung bei Qualitätsabweichungen. Die Arbeit von Weckmann (2017) schließlich basiert auf dem Push-Konzept. Somit sind diese Arbeiten ebenfalls nicht als Grundlagen für die vorliegende Arbeit geeignet.

Den grundlegenden Projektanforderungen entspricht der Ansatz von Brinzer (2005 und 2012). Dieser definiert je Arbeitssystem drei dezentrale Regler mit den Regelgrößen Bestand, Terminabweichung und Durchsatz sowie den Stellgrößen Auftragsfreigabe, Bearbeitungsreihenfolge und Kapazität. Logistische Anforderungen werden jedoch nicht berücksichtigt, detaillierte Algorithmen etwa zur Reihenfolgebildung fehlen.

Die oben beschriebenen Ansätze wurden bei der Weiterentwicklung der Produktionsregelung berücksichtigt, indem einzelne Aspekte als Anregung übernommen und dokumentiert wurden. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die meisten Ansätze entweder vorhandene Produktionspläne mit Terminvorgaben voraussetzen oder auf KI-Ansätzen wie dem Machine Learning aufbauen. Diese benötigen rechenintensive Anlernphasen mit einem umfangreichen Bestand an Produktionsdaten, und die Qualität der Steuerung ist schwer vorhersehbar. Zu den für dieses Projekt definierten Anforderungen gehört jedoch, dass eine Produktionsregelung ohne vordefinierte Produktionspläne, mit geringem Berechnungsaufwand und geringer

Komplexität entwickelt werden soll. Daher wurden diese Ansätze als ungeeignet für eine darauf aufsetzende Weiterentwicklung befunden. Als Basisansatz für die Weiterentwicklung wurde daher die im Antrag bereits vorgestellte Regelung von Brinzer bestätigt, deren Regelungsansatz mit den Anforderungen des Projektes übereinstimmt.

1.2 Arbeitspaket 2: Weiterentwicklung der DPR und Entwicklung der Logistikregelung

Vom IFT durchgeführte Arbeiten:

Im Rahmen der Entwicklung einer zur Produktionsregelung kongruenten Logistikregelung für den innerbetrieblichen Transport wurden verschiedene Schritte durchgeführt, um eine enge Verzahnung mit der bestehenden Produktionsregelung zu gewährleisten. Die in AP 1 gesammelten Informationen wurden umfassend ausgewertet, um die relevanten logistischen Zielgrößen zu identifizieren. Es wurde analysiert, inwieweit diese Zielgrößen zur Regelung des innerbetrieblichen Transports genutzt werden können, wobei insbesondere Effizienzpotenziale und Flexibilitätsanforderungen berücksichtigt wurden. Auf Grundlage dieser Analyse wurden lokale Entscheidungsräume und Entscheidungsregeln für den innerbetrieblichen Transport ausgearbeitet. Ziel war es, ein robustes und dynamisches Systemverhalten zu erreichen, das eine Freisetzung der Potenziale des innerbetrieblichen Transports ermöglicht. Im nächsten Schritt wurden verschiedene Optionen zur Zusammenführung der Transportregelung mit der Produktionsregelung untersucht und daraus ein Integrationsansatz entwickelt, der die spätere Zusammenführung der beiden Regelungskomponenten erlaubt. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die Synchronisation von freien Produktions- und Transportressourcen mit den Bedarfen durch Bearbeitungsentscheidungen von Produktvarianten für den folgenden Bearbeitungsschritt gelegt, um eine optimale Ressourcennutzung zu gewährleisten. Darüber hinaus wurden die lokalen Regelkreise für den innerbetrieblichen Transport aufgebaut. Diese Regelkreise bilden die Grundlage für die spätere Implementierung und ermöglichen eine effiziente Steuerung der Transportprozesse innerhalb der Produktion. Lokale Regler wurden definiert, die auf den in AP 1 ermittelten Parametern basieren, zur Echtzeitsteuerung des Transports eingesetzt werden können und Transportbedarfe mit den freien Transportkapazitäten in Einklang bringen. Der Grundablauf der Regelung wurde als Ablaufdiagramm visualisiert. Diese Visualisierung umfasst alle relevanten Steuerungsprozesse und berücksichtigt dabei die Schnittstellen zu angrenzenden Systemen die als Softwareklassen skizziert sind.

Vom KMP durchgeführte Arbeiten:

Im Rahmen des Projekts wurde zunächst die Regelung nach Brinzer in Plant Simulation modelliert. Das Modell bildete die zentralen Regelungsmechanismen ab und verknüpfte Produktions- und Logistikprozesse miteinander, um das Verhalten des Systems unter verschiedenen Bedingungen zu untersuchen. Anschließend erfolgte eine eingehende Analyse der Schwachstellen dieser Regelung. Dabei wurden Engpässe, ineffiziente Ressourcennutzung und mögliche Konflikte zwischen den Produktions- und Logistikprozessen identifiziert. Auf Basis dieser Analyse wurden potenzielle Weiterentwicklungsansätze formuliert, die auf eine Steigerung der Effizienz und Flexibilität des Systems abzielten.

Die ausgewählten Weiterentwicklungsansätze wurden in der Simulation implementiert und kontinuierlich optimiert. Dies umfasste die Verbesserung der Regelungslogik sowie die Einführung zusätzlicher Parameter zur besseren Anpassung an die realen Bedingungen. Nach der Implementierung erfolgte eine Validierung des Modells, bei der das Simulationsergebnis mit realen Produktions- und Logistikdaten abgeglichen wurde, um die Genauigkeit und Praktikabilität der entwickelten Regelung zu überprüfen und sicherzustellen, dass die identifizierten Schwächen erfolgreich adressiert wurden.

Erzielte Ergebnisse des IFT:

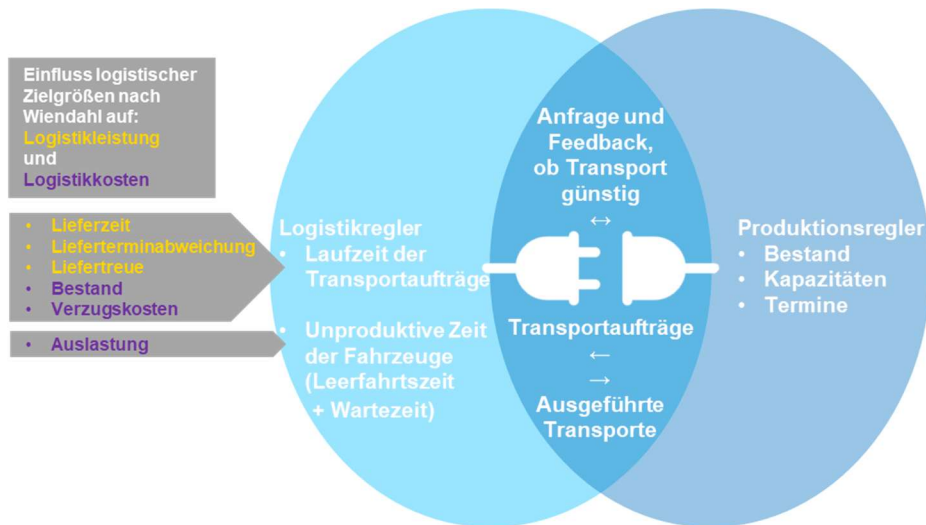


Abbildung 1: Zusammenhang von Transport-, Produktions- und Logistikregelung

In der obigen Abbildung links dargestellten sind die logistischen Zielgrößen nach Wiendahl vgl. (Lödding, 2016), S.21, die sich auf die Leistung bzw. die Kosten eines Transportsystems auswirken. Diese können in einer innerbetrieblichen Produktions- und Transportregelung durch die Transportregelung über die Laufzeit der Transportaufträge sowie die unproduktive Zeit, bestehend aus Leerfahrten und Wartezeiten der Fahrzeuge, beeinflusst werden. Die Produktionsregelung, bestehend aus Bestandsregelung, Kapazitätsregelung und Terminregelung, regelt die Bestände in den lokalen Puffern sowie die Terminabweichung und die Termintreue der Fertigungsaufträge. Termintreue und Bestände beeinflussen die Durchlaufzeit. Um Interferenzen zwischen Produktions- und Logistikregelung zu vermeiden, wird die Logistikleistung vom Logistikregler nur über die Laufzeit der von der Produktionsregelung freigegebenen Transportaufträge geregelt. Da die Produktionsregelung nach dem Pull-Prinzip arbeitet, führt eine geregelte Laufzeit der Transportaufträge zu geregelten Kosten durch die von der Produktionsregelung gesteuerten Bestände. Darüber hinaus kommt es zu geregelten Terminverzug/-abweichungen, damit zu einer hohen Termintreue und schließlich zu einer geregelten Durchlaufzeit der Fertigungsaufträge. Unterschiedliche Verzugskosten je nach Auftragsart werden derzeit noch nicht betrachtet. Werden die Werkstätten als Kunden des Transportsystems betrachtet, so lassen sich die Anteile der Durchlaufzeit, der Terminabweichung und der Termintreue auf die logistischen Zielgrößen Lieferzeit, Lieferterminabweichung und Liefertreue zurückführen. Die Auslastung hängt mit der Leerlaufzeit und der Wartezeit zusammen. Werden z.B. die Transportaufträge mit der höchsten Laufzeit nach Freigabe durch die Produktionsregelung von der Transportregelung vorrangig bearbeitet, so kommt es zu höheren Leerfahrtsanteilen der Fahrzeuge. Dagegen muss ohne auftretende Leerlaufzeiten nach jeder Übergabe eines Transportgutes an den lokalen Puffer der nachfolgenden Werkstatt sofort wieder ein Transportgut für einen neuen Transportauftrag aufgenommen werden können. Wird die Leerlaufzeit der Fahrzeuge sowie die Laufzeit der Transportaufträge zu groß und die Wartezeit zu klein, kann die Kapazität des Transportsystems durch die Bestellung weiterer Fahrzeuge aus Fahrzeugpools anderer Systeme und ggf. durch die Verlagerung von Personalkapazitäten aus anderen Arbeitssystemen des Unternehmens erhöht werden. Die Schnittstelle zur Produktionsregelung erfolgt zum einen über die Freigabe und Abarbeitung von Transportaufträgen. Zum anderen erfolgt die Schnittstelle über eine Anfrage der Produktionsregelung, auf die eine Antwort der Logistikregelung folgt, inwieweit ein angefragter Transport kostengünstig durchgeführt werden kann. Um eine hohe Auslastung des Transportsystems anzustreben, müssen die Abholorte eines neuen

Transportauftrages möglichst mit den Abgabeorten des vorherigen Transportauftrages übereinstimmen. Es werden Zeitreihen der Heatmaps der Standorte der freien Zeitfenster der Fahrzeuge für Abholung und Zustellung erstellt. Durch einen Vergleich der Heatmaps mit den Daten der angefragten Transporte für Abholung und Zustellung können Werte generiert werden, die angeben, inwieweit Leerfahrten vermieden werden können. Ein geringerer Anteil an Leerfahrten erhöht die Auslastung der Fahrzeuge und ermöglicht eine höhere logistische Leistung bei gleicher Kapazität.

Der Grundablauf der Transportregelung wurde wie folgt ausgearbeitet:

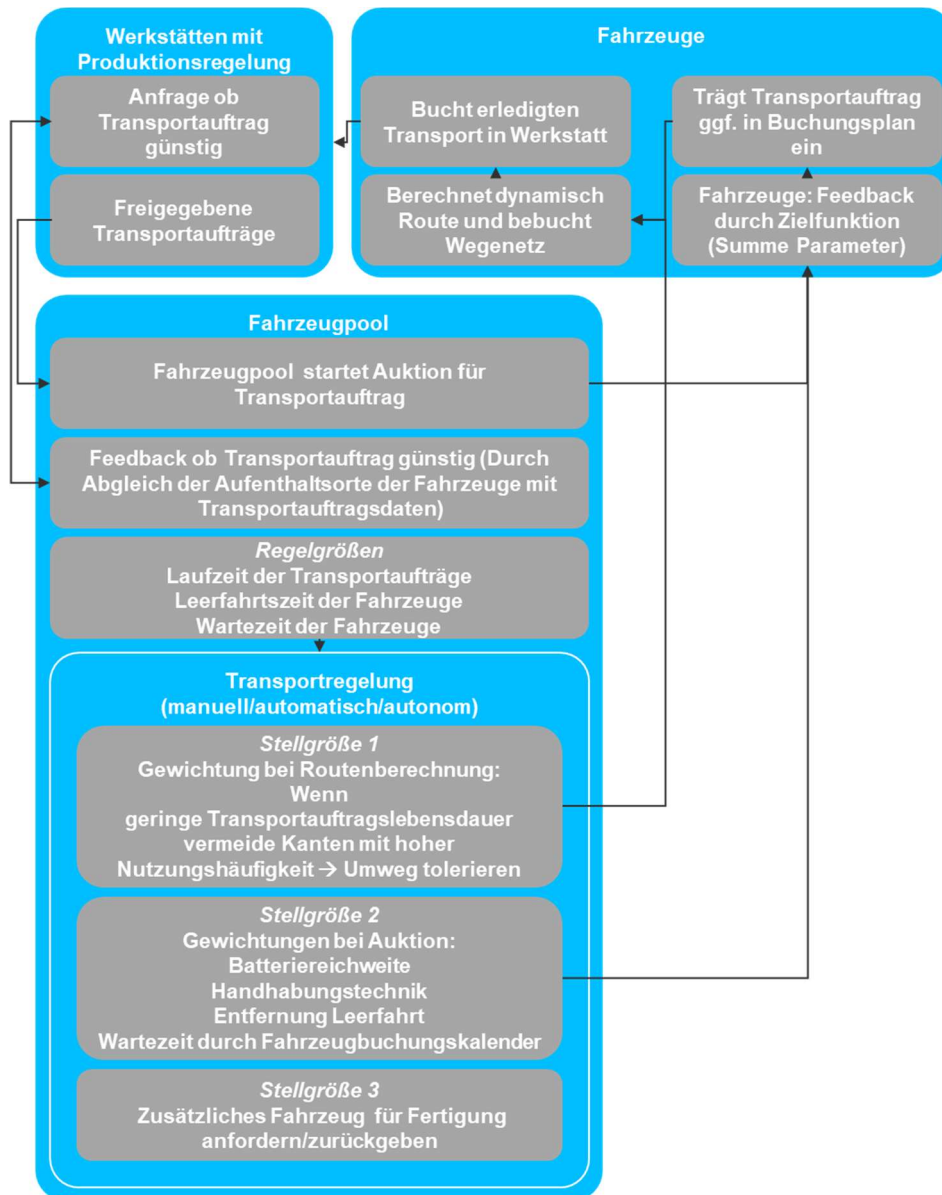


Abbildung 2: Grundablauf der Transportregelung

Die Softwareklassen für das Simulationsmodell und die Hauptkommunikationsrichtung werden in der nachfolgenden Abbildung Sicht der Transportregelung dargestellt:

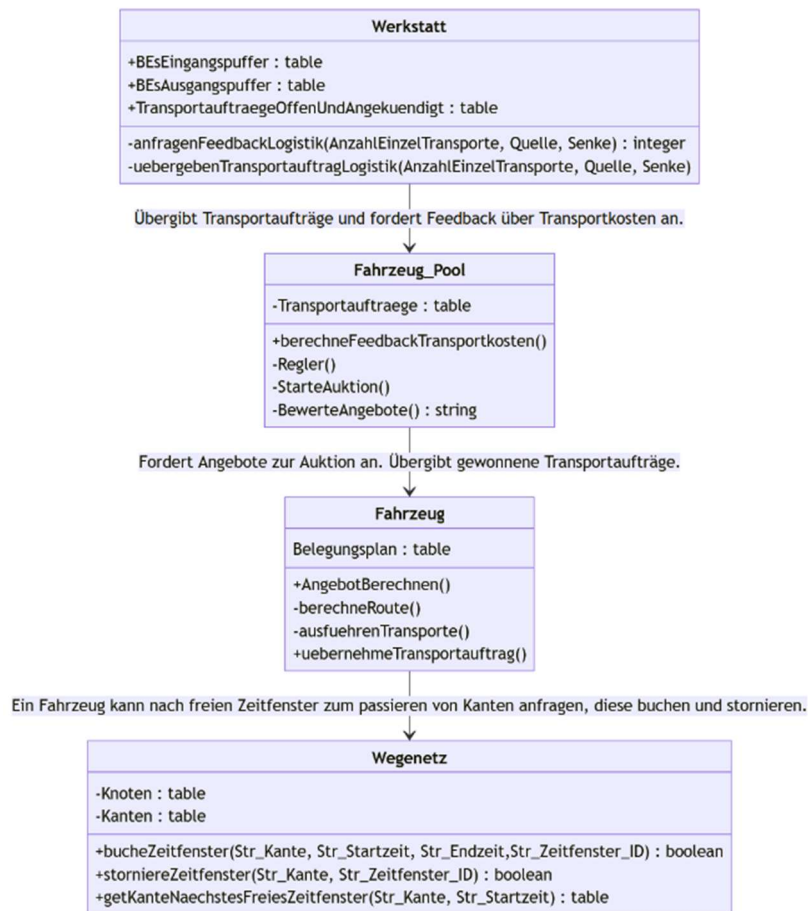


Abbildung 3: Softwareklassen und Hauptkommunikationsrichtung der Transportsteuerung

Erzielte Ergebnisse des KMP:

Der Grundablauf der entwickelten Dezentralen Produktionsregelung ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

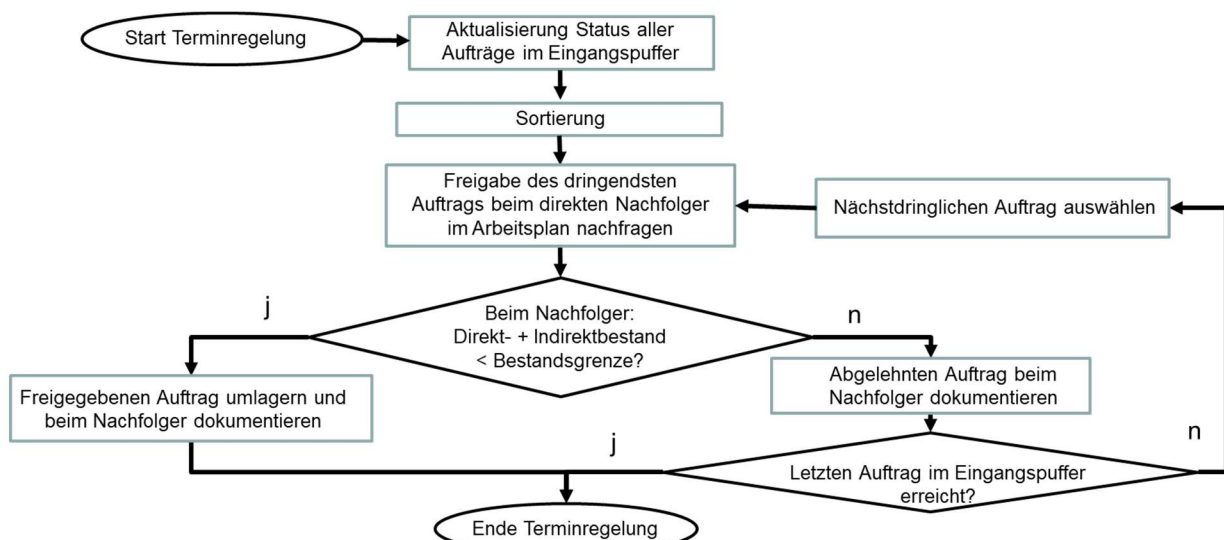


Abbildung 4: Grundablauf der Dezentralen Produktionsregelung

Als ein Ergebnis des AP 2 ist dieser Grundablauf durch die Weiterentwicklung und Optimierung von Algorithmen zur Bestands- und Terminregelung operativ umsetzbar ausgearbeitet. Ein detailliertes Simulationsmodell zur Abbildung variantenreicher Produktionsabläufe mit Arbeitsplätzen oder Werkstätten wurde in der Simulationsumgebung Plant Simulation erstellt (Abbildung 5). Dieses ist vielfältig parametrierbar und kann deshalb eine große Bandbreite von Produktionsumgebungen ohne Programmieraufwand abbilden. Beispielsweise lassen sich Arbeitsplätze bzw. Arbeitsplatzgruppen auf Basis einer Tabelle automatisch generieren. Ebenso sind alle Regelparameter tabellarisch hinterlegt und veränderbar. Auftragslisten, Arbeitspläne und Stücklisten lassen sich importieren.

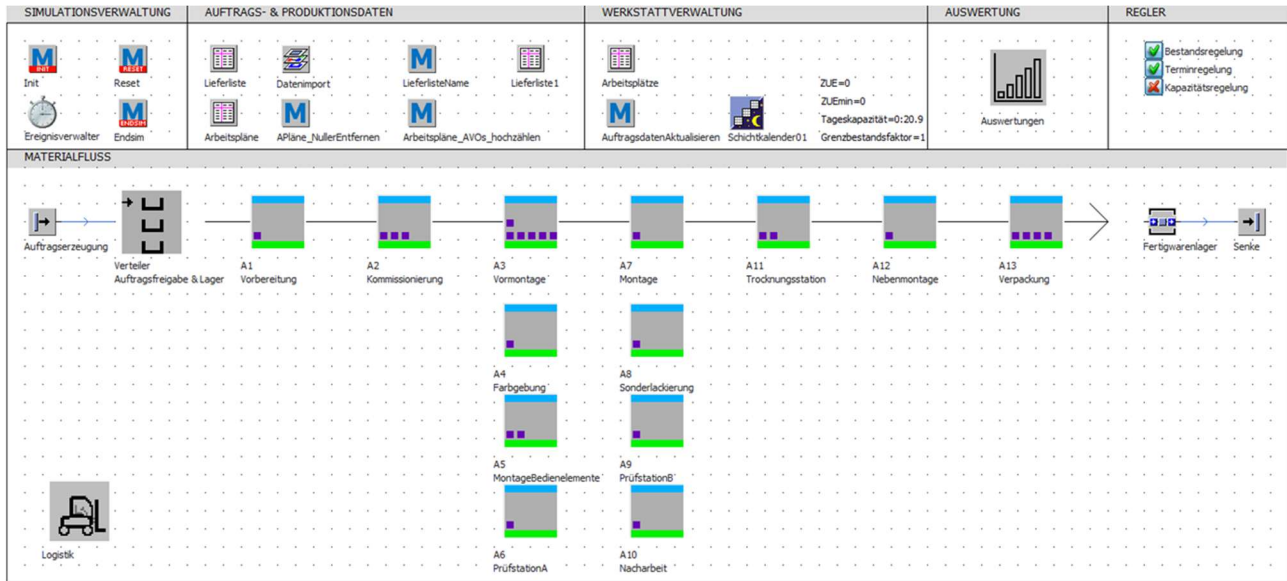


Abbildung 5: Simulationsschnittstelle zur Übersichtsebene der Produktion (Übersichtsebene der Produktion, 2D-Darstellung)

Eine Vielzahl von Kennzahlen und Auswertungen zu den Simulationsläufen sind abrufbar, um die Funktion, Leistung und Zielerreichung der Regelung zu analysieren und zu dokumentieren.

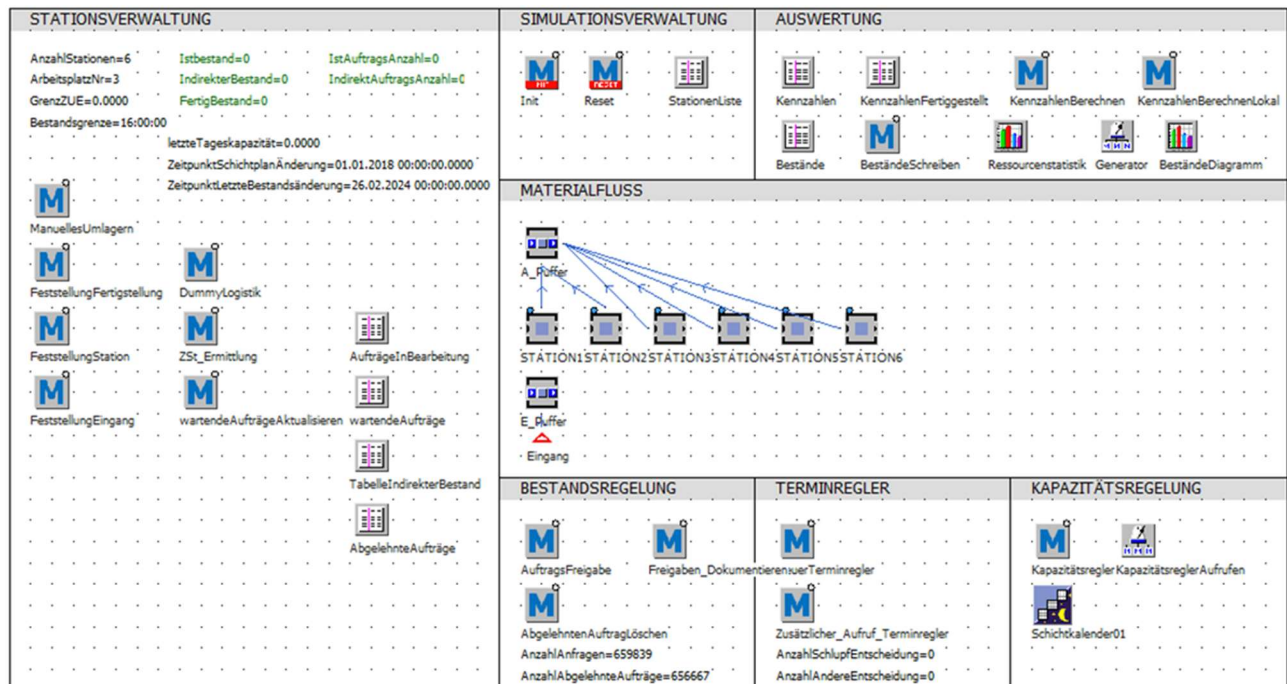


Abbildung 6: Simulationsschnittstelle zur Beispielszene einer Arbeitsplatzgruppe (Beispiel einer Arbeitsplatzgruppe, 2D-Darstellung)

Auf Arbeitsplatz- bzw. Werkstattebene (Abbildung 6) sind die einzelnen Arbeitsplätze, Puffer und lokalen Regler abgebildet, und es lassen sich weitere Kennzahlen und Auswertungen abrufen.

Die beiden Forschungseinrichtungen erstellen basierend auf der Weiterentwicklung der Produktionsregelung und Entwicklung der Transportregelung ein gemeinsames Simulationsmodell der zusammengeführten Produktions- und Transportregelung um deren Funktion nachzuweisen.

1.3 Arbeitspaket 3: Konzeptionelle Zusammenführung der PLR

Ziel des AP ist die Zusammenführung der in AP 2 weiterentwickelten dezentralen Produktionsregelung (DPR) und der neu entworfenen Transportregelung. Diese Aufgabe wurde gemeinsam durch die beiden Forschungsstellen durchgeführt.

Im Vorhaben ist eine dezentrale Regelung geplant, welche die zeitliche Verteilung der Transportbedarfe und des Transportaufkommens mit den Arbeitssystemen der Produktion abstimmt. Die in diesem Arbeitspaket entwickelte Produktions- und Logistikregelung (PLR) umfasst einen nach dem Werkstattprinzip organisierten Produktionsbereich mit dessen Werkstätten bestehend aus Pufferflächen, Arbeitsplätzen und Werkern für die Produktion. Die Anordnung der Werkstätten im Produktionslayout sowie das Wegenetz werden berücksichtigt. Eine Flotte aus fahrerlosen Transportfahrzeugen mit konfigurierbarer Fahrzeuganzahl erfüllt die Transporte und legt die Fahrstrecken über eine Routengenerierung fest. Arbeitsaufträge mit deren Haupt- und Nebenkomponenten werden über eine Quelle zugeführt, abhängig von einem Lastprofil. Der Input besteht zunächst aus Realdaten, die über eine Produktionsplanung generiert wurden. Diese setzt die Produktionsstrategie Make-to-Order um und übernimmt die Auftragserzeugung sowie die Auftragsterminierung. Die Aufträge beinhalten Arbeitspläne mit Arbeitsgängen und Bearbeitungszeiten. Die detaillierten Prozesse des Wareneingangs und –ausgangs, die Läger sowie vorgelagerte Fertigungsbereiche werden

nicht abgebildet. Durch die Produktionsplanung wird sichergestellt, dass die benötigten Teile und Komponenten bei der Auftragsfreigabe verfügbar sind. Die Systemgrenze wird in der folgenden Grafik dargestellt:

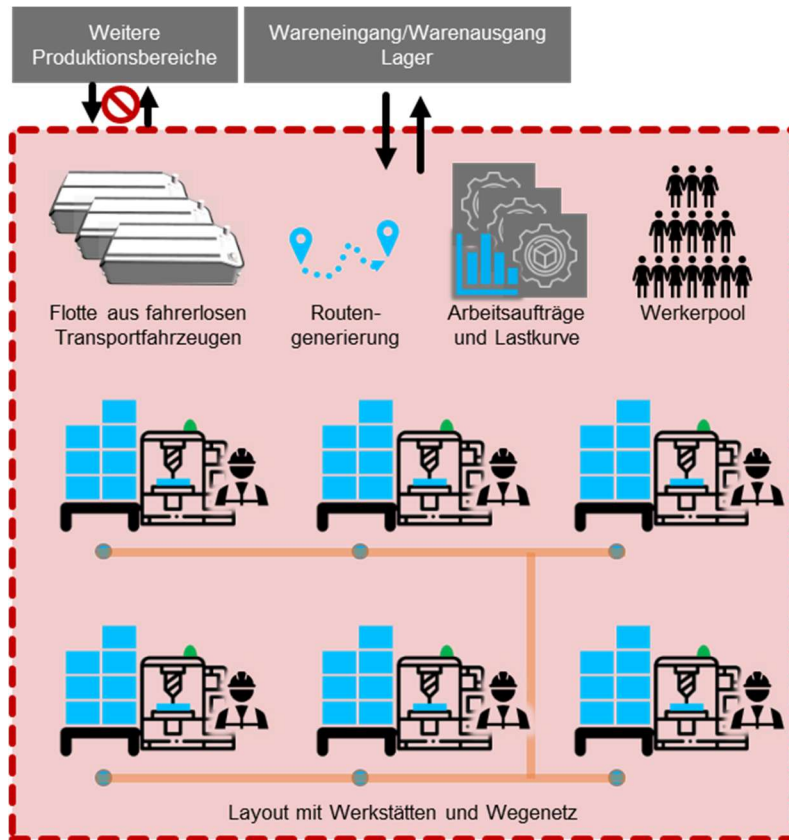


Abbildung 7: Betrachtungsbereich

Bei der variantenreichen Werkstattfertigung gibt es zu den meisten Werkstätten mehrere Vorgängerwerkstätten, deren Erzeugnisse angeliefert werden. Stehen alle Haupt- und Nebenkomponten aus vorgelagerten Werkstätten und weiteren Quellen für die Weiterbearbeitung von Aufträgen bereit und wechselt die Werkstatt nach Abschluss eines Arbeitsvorgangs von arbeitend auf bereit, wird eine Belegungsentscheidung erforderlich.

Bei der bidirektionalen Kommunikation zwischen Werkstätten wird unter Umsetzung des Pull-Prinzips angefragt und rückgemeldet, ob Bestandsgrenzen überschritten werden. Werkstätten können alle weiteren Werkstätten über ausgegebene Transportaufträge informieren. Die Kommunikation zwischen Werkstätten und einem Flottenmanager der Fahrzeuge erfolgt unidirektional über Transportaufträge. Den Materialfluss zwischen beliebigen Werkstätten führen Fahrerlose Transportfahrzeuge aus.

Belegungsentscheidungen werden durch die Produktions- und Logistikregelung getroffen. Es stehen zunächst die Aufträge zur Auswahl, deren Haupt- und Nebenkomponten zur Durchführung des weiteren Bearbeitungsschritts bereits vollständig angeliefert wurden, um das System störungsresistent zu gestalten. Das Ziel der Belegungsentscheidung ist in der nachfolgenden Werkstatt eine Deckelung der direkten (bereits vor Ort beim Nachfolger) und indirekten Bestände (in Bearbeitung, aber noch nicht beim Nachfolger), als auch eine hohe Termintreue. Die Bestände, sowie die Termintreue dient daher als Regelgröße. Eine Regelgröße muss allgemein möglichst an einen Vorgabewert angeglichen werden. Die Auftragsreihenfolge ergibt sich über Belegungsentscheidungen und stellt neben dem Zugang in die Nachfolgerwerkstatt eine Stellgröße dar. Die

Änderung einer Stellgröße beeinflusst ihre jeweilige Regelgröße. Die Auftragsreihenfolge beeinflusst die Termintreue, als auch die Zeitpunkte der Transportbedarfe und der Zugang beeinflusst primär die Bestände. Die Führungsgröße, welche eine Veränderung der Stellgröße Zugang erforderlich machen kann, ist die Bestandsgrenze in der jeweiligen Werkstatt. Die Auftragsreihenfolge wird durch die Führungsgrößen Soll-Endtermin mit Gewichtung, als auch durch einen Logistikkennwert mit Gewichtung festgelegt. Führungsgrößen legen allgemein den Wert fest, auf dem eine Regelgröße gehalten werden soll. Die Produktionsplanung legt Soll-Endtermine vorab fest und ändert diese nicht nach Einlasten in das einzelne Produktionssystem. Der Logistikkennwert hängt von der zeitlich schwankenden Transportrate ab, welche durch die Belegungsentscheidung beeinflusst wird. In einer Simulationsstudie, die im folgenden AP durchgeführt wird, werden unterschiedliche Kriterien untersucht, die zur Bewertung der Änderung der Transportrate über die Zeit genutzt werden können, um eine hohe Termintreue zu erzielen. Arbeitsaufträge mit großem Terminpuffer können Arbeitsaufträgen mit geringem Spielraum für Bearbeitungsverzögerungen den Vortritt bei der Nutzung von Produktionsressourcen lassen. Auf der Logistikseite muss die Transportauftragslaufzeit gesenkt werden, um die Termintreue zu fördern. Die Transportkapazität bleibt im Betrieb konstant, wird aber so ausgelegt, dass Transporte zu derer frühester Freigabezeit in den meisten Fällen begonnen werden können. Für die Berechnung der aggregierten logistischen Kenngröße können folgende Teilkennwerte überprüft werden:

- die Glattheit und die Spitzen im Verlauf der zeitlichen Rate an Transportvorgängen (Verzögerungen in der Transportausführung treten bei Lastspitzen auf),
- oder Abfolgen und Dauern von hohen bzw. geringen Werten des Verlaufs der zeitlichen Rate an Transportvorgängen (die Dauer von Verzögerungen in der Transportausführung und die Dauer zur Abarbeitung der verzögerten Transportaufträge) um Transportverzögerungen durch Überlast zu vermeiden.

Die Subkriterien werden gewichtet und in einer Funktion in einen logistischen Kennwert überführt. Die Gewichtungen an dieser Stelle, als auch diejenigen bei den Führungsgrößen Soll-Endtermin und Logistikkennwert, sowie die Bestandsgrenzen werden über Simulationsstudien vorausgelegt und sollen während dem laufenden Betrieb durch qualifiziertes Personal weiter angepasst werden. Die Regelung von Kapazitäten während des Betriebs wird im Projekt aus Zeitgründen nicht umgesetzt, jedoch ist eine Vorauslegung notwendig. Die folgende Prinzipskizze zeigt ergänzend, wie die logistische Auslastung über die Zeit ausgehend von Belegungsentscheidungen miteinbezogen wird:

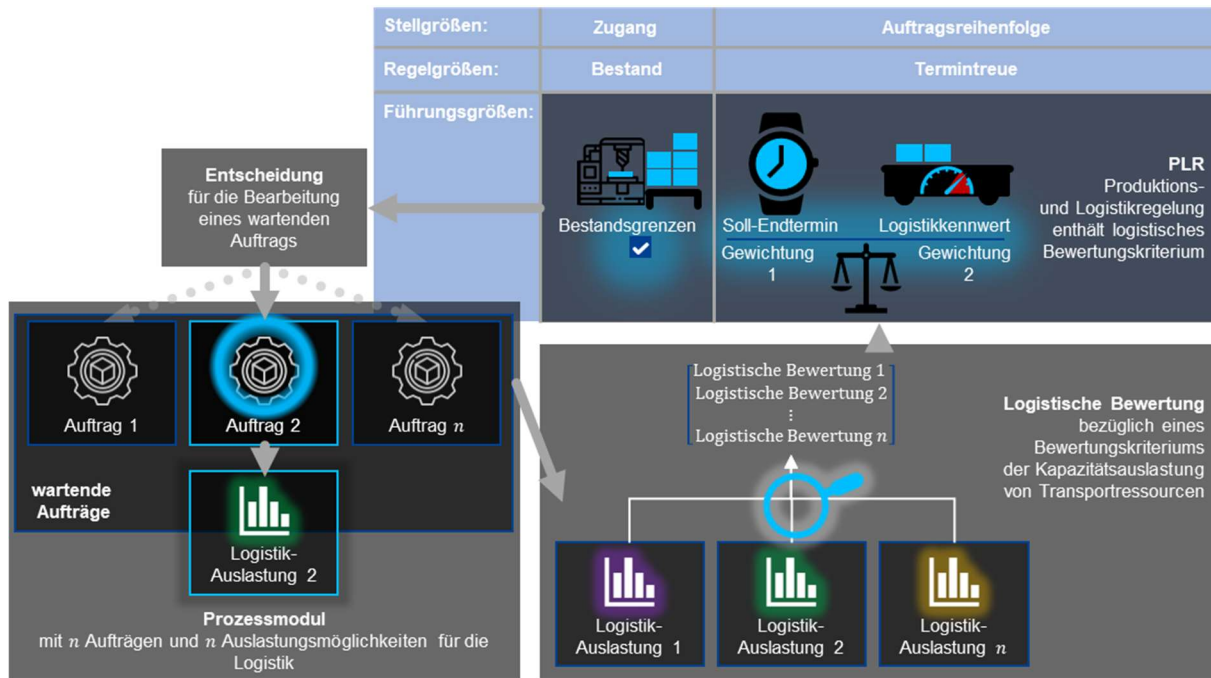


Abbildung 8: Prinzipskizze der Regelung mit Regel-, Stell- und Führungsgrößen

Während dieser Ablauf klar vorgibt welcher Auftrag am Besten bearbeitet werden sollte, können die Mitarbeitenden vor Ort entgegen dieser Entscheidung handeln und einen anderen Auftrag für die Bearbeitung wählen (solange die Bestandsgrenze der Nachfolgerwerkstatt unterschritten ist). Dies wirkt sich positiv auf den Schlupf des vorgezogenen Auftrags aus, sodass dieser in der Priorisierung beim Folgesystem weiter unten landen wird. Dabei ist der Schlupf die Differenz zwischen dem Sollendtermin und dem aktuellen Termin zuzüglich aller noch ausstehenden Rüst- und Bearbeitungszeiten. Gleichzeitig hat die Entscheidung einen negativen Einfluss auf den Schlupf des nun wartenden Auftrages, sodass dieser bei der nächsten Werkstatt stärker priorisiert wird. Solange der Schlupf des priorisierten Auftrags positiv genug ist und genug ausstehende Arbeitsvorgänge vorhanden sind, ist die Produktions- und Logistikregelung in der Lage diese Variation der Bearbeitungsreihenfolge zu regeln und dafür zu sorgen, dass die Streuung des Schlupfes der fertiggestellten Aufträge nicht zu groß ist. Dieser Eingriff kann am laufenden Betrieb erfolgen. Als weitere Eingriffsmöglichkeit können die Bestandsgrenzen der einzelnen Werkstätten erhöht oder gesenkt werden. Dies sollte allerdings nur bei einer längerfristigen Veränderung der Produktionsnachfrage oder des Produktionskapazitätsprofils geschehen.

In diesem AP wurde ein übergeordnetes Zielsystem definiert, sowie eindeutige Regelprinzipien mit Stell-, Führungs- und Regelgrößen definiert, um auf veränderliche Auftragseingänge reagieren zu können.

Die Systemgrenzen und Abhängigkeiten wurden betrachtet, sowie beschrieben, die auch Handlungsspielräume des Personals beleuchten. Die Schnittstellen zur Beschreibung von Material- und Informationsflüssen über die Systemgrenzen wurden definiert.

AP-Ergebnis: Es liegt ein harmonisierter und dezentraler PLR-Ansatz vor.

1.4 Arbeitspaket 4: Simulationsbasierter Funktionsnachweis der PLR

In diesem Arbeitspaket wurde die Modellimplementierung des zuvor konzeptionell entwickelte PLR-Ansatzes vom KMP und IFT durchgeführt. Die Konzeptmodelle und Pseudocodes wurden in die

Simulationssprache von Plant Simulation überführt. Zunächst hat das KMP die DPR-Logik in einem Simulationsmodell und das IFT die innerbetriebliche Transportregelung in einem zweiten Simulationsmodell implementiert. Um die als Produktionsszenario ausgewählte Montage eines Drittunternehmens realitätsnäher abzubilden, wurden zusätzliche Varianten der Werkstattmodelle erzeugt und Anpassungen durchgeführt.

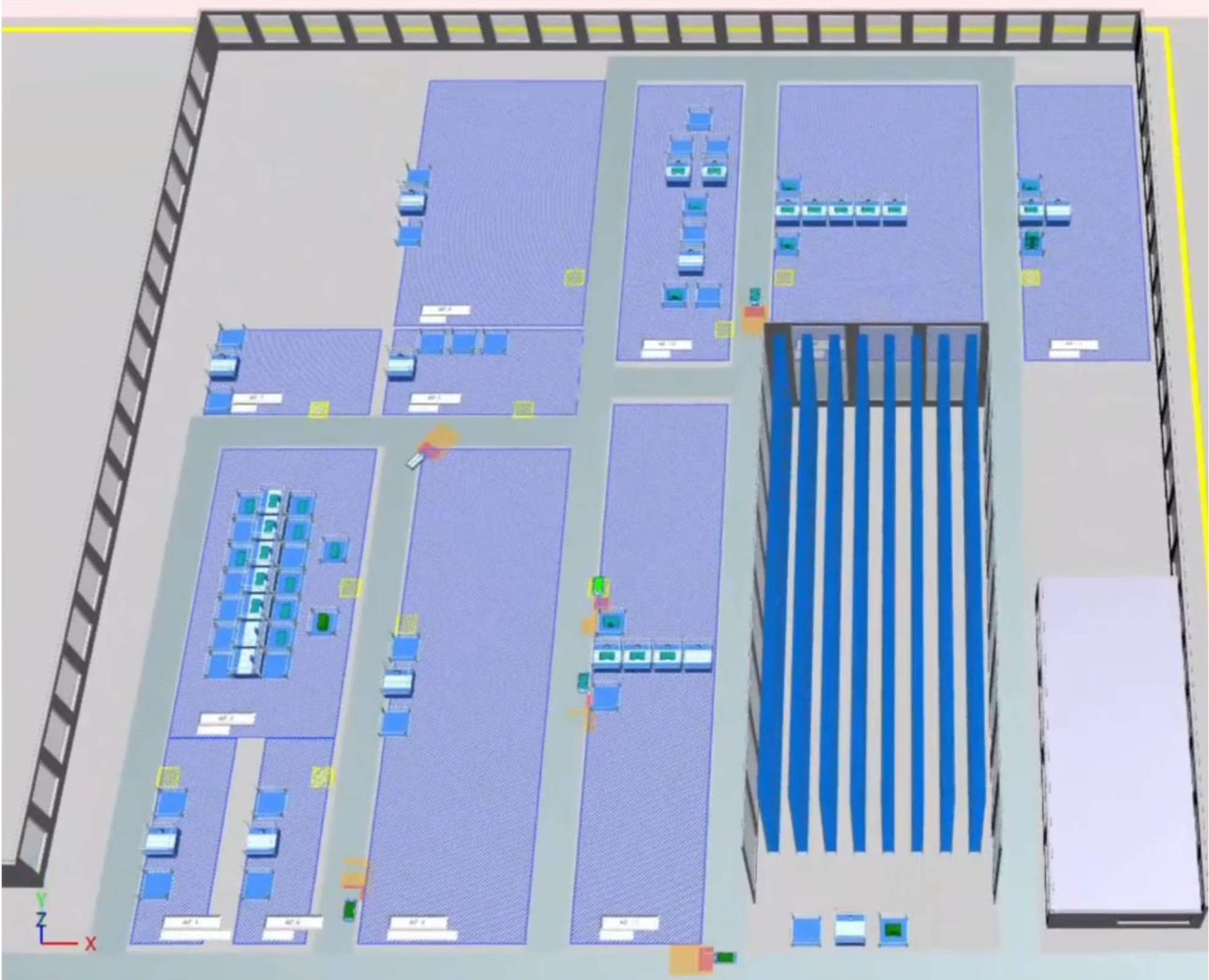


Abbildung 9: Gesamt-Simulationsmodell mit PLR (Übersichtsebene der Produktion, 3D-Darstellung)

Im Anschluss an die Entwicklung und Validierung der beiden einzelnen Simulationsmodelle wurden die Modelle unter Berücksichtigung der gegebenen Layoutstrukturen zusammengeführt (Abbildung 9). Dabei wurden die in Arbeitspaket 3 definierten Schnittstellen verwendet, um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten. Experimente wurden definiert und eine systematische Versuchsplanung unter Variation des Parameterraums durchgeführt. Die Ausführung und Analyse der Experimente zum Gesamtmodell werden nachfolgend beschrieben.

Logik der harmonisierten Produktions- und Logistikregelung

Die Produktions- und Logistikregelung wird bei einer anstehenden Belegungsentscheidung in einer Werkstatt aufgerufen. Zuerst wird der lokale Terminregler der DPR in dieser Werkstattaufgerufen. Dieser regelt die Termintreue der Aufträge, indem er die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge in einem Produktionssystem festlegt. Zunächst stößt er dabei die Aktualisierung der auftragsbezogenen Kennzahlen zur Dringlichkeit und zur Eignung aller wartenden Aufträge im aktuellen Produktionssystem an und löst anschließend die

Berechnung des Logistikkennwertes durch die innerbetriebliche Transportregelung aus. Dabei werden die laut Arbeitsplan und Stückliste benötigten Transporte für jeden der im aktuellen Produktionssystem wartenden Aufträge übergeben. Nachdem durch die Logistik ein Abgleich des benötigten Transportbedarfes mit der aktuellen Transportkapazität durchgeführt wurde, wird ein Logistikkennwert für jeden Auftrag gebildet und dieser an den Terminregler zurückgemeldet. Die darauf folgende Bewertung und Priorisierung der Aufträge erfolgt abhängig von der gewählten Gewichtung der Termintreue und des Logistikkennwertes. Zur Ermittlung der Dringlichkeit der Auftragsbearbeitung wird eine Kennzahl auf Basis des Auftragschlupfs berechnet. Nachdem die Termintreue und der Logistikkennwert je Auftrag miteinander verrechnet wurden und ein Gesamt-Kennwert feststeht, können alle wartenden Aufträge nach diesem sortiert werden und der am höchsten Priorisierte ausgewählt werden. Für diesen kann im nächsten Schritt der Bestandsregler des nachfolgenden Arbeitssystems ausgelöst werden, welcher die Bestände in diesem Produktionssystemen durch Auftragsfreigaben regelt. In der Parametrierung der DPR muss hier für jede Werkstatt eine Bestandsgrenze festgelegt werden, welche nicht überschritten werden darf. Solange diese Bestandsgrenze unterschritten ist, können Aufträge freigegeben werden. Sollte eine Werkstatt die Bestandsgrenze erreicht oder überschritten haben, gibt der Bestandsregler für diese Werkstatt keine weiteren Aufträge frei, bis sie nach Bearbeitung eines oder mehrerer Aufträge wieder unterschritten wurde. Wird der Auftrag mit der höchsten Priorität nicht freigegeben, dann wird der Auftrag mit der nächsthöchsten Priorität gewählt und für diesen der Bestandsregler aktiviert, bis schließlich entweder ein Auftrag freigegeben wurde oder alle Aufträge in der Warteliste abgelehnt wurden. Falls ein Auftrag durch den Bestandsregler freigegeben wurde, werden nun alle für diesen Auftrag benötigten Transportaufträge an die Logistik übergeben und diesmal in die Transportkapazität fest eingeplant. Der Gesamtablauf ist auch in der nachfolgenden Abbildung zu sehen:

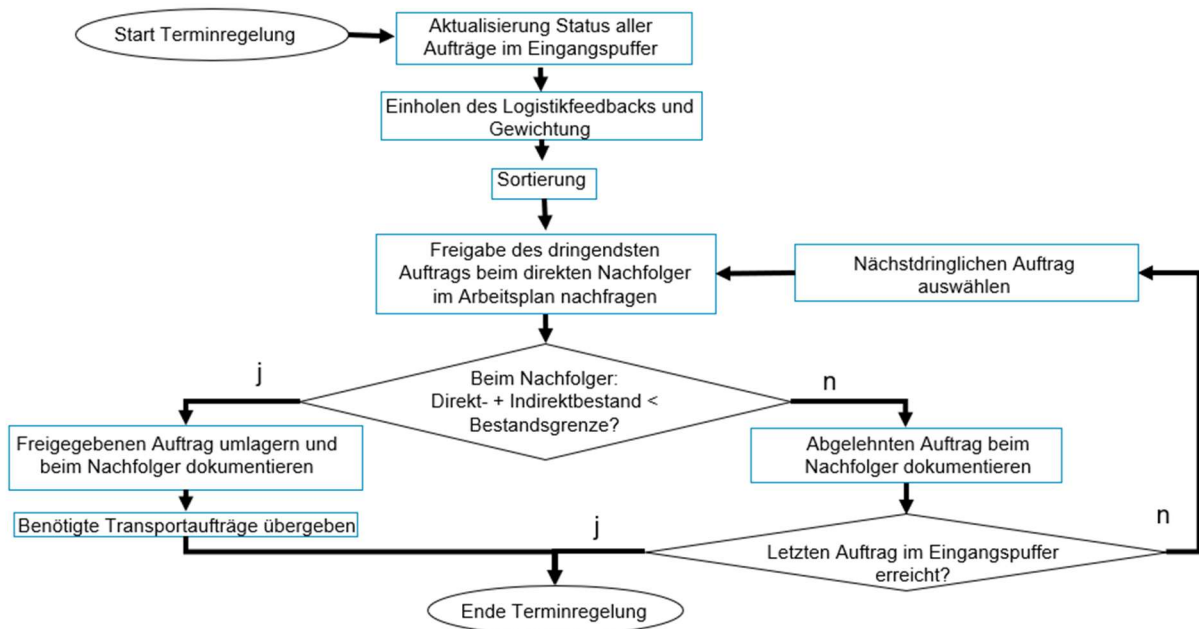


Abbildung 10: Grundablauf der PLR

Die Logik der Produktions- und Logistikregelung ist in der nachfolgenden Grafik nochmals als Pseudocode verdeutlicht:

```

--Start Terminregelung
1. Aktualisierung der wartenden Aufträge
--Anfang Logistikfeedback
2. Anfrage des Logistikfeedbacks für wartende Aufträge
3. Abgleich Transportbedarf mit Transportkapazität
4. Übergabe Feedback an Produktionsregler
--Ende Logistikfeedback
5. Sortierung nach Gewichtung der Termintreue und Logistikkenwert
while kein Auftrag freigegeben or letzter Auftrag in Liste nicht erreicht
  --Anfang Bestandsregelung
  6. Freigabe des dringendsten Auftrags beim Nachfolger erfragen
  if Direktbestand + Indirektbestand bei Nachfolger < Bestandsgrenze
    7. Auftrag umlagern, dokumentieren
    8. Benötigte Transporte an Logistik übergeben
  else
    7. Abgelehnten Auftrag dokumentieren
  end
  --Ende Bestandsregelung
end
--Ende Terminregelung

```

Abbildung 11: Grundablauf der PLR als Pseudocode

Modularität, Einbindung der Layoutinformationen und die Logistikregelung

Von Seiten der DPR-Logik wurden zwei Hauptbausteine für Werkstätten entwickelt, einer für die Fertigung und einer für die Montage. Der einzige Unterschied besteht darin, dass bei der Montage geprüft wird, ob alle benötigten Komponenten im aktuellen Produktionssystem vorhanden sind, bevor die Produktionsregelung den Auftrag zur Bearbeitung freigeben kann. Im Fertigungsbaustein kann eine Freigabe direkt nach Eingang des Auftrags in das Produktionssystem erfolgen. Bei allen Fertigungs- und Montagebausteinen wurde im Produktionsszenario eine technische Verfügbarkeit von 95% mit einer MTTR von 45 Minuten abgebildet.

Im Simulationsmodell des gewählten Produktionsszenarios wurden zwei Werkertypen mit unterschiedlichen Qualifikationsprofilen abgebildet: Zum einen Montagewerker, welche reine Montagetätigkeiten durchführen, während der zweite Werkertyp alle weiteren Tätigkeiten durchführt. Es besteht die Möglichkeit, hier nach Bedarf noch wesentlich detaillierter zu unterscheiden und zu spezifizieren. Um reale Produktivitätsschwankungen der Werker abzubilden, wurden bei diesen Ausfallzeiten abgebildet, welche eine MTTR von 10 Minuten haben. Damit haben die Werker eine Verfügbarkeit von 95%. Die Werker arbeiten hier auf Basis eines Schichtplans, der für das gesamte Simulationsmodell gilt, es wurde aber auch die Möglichkeit eingebaut werkstattspezifische Schichtpläne zu erstellen und zu verwenden.

Bestehende dezentralen Transportsteuerungsansätze fokussieren auf folgende Klassen von Steuerungsaufgaben: Zuweisung von Aufträgen zu Fahrzeugen, Positionierung von Leerfahrzeugen und/oder Routing. Diese Aufgaben decken sich jedoch nicht mit der Fragestellung dieses Forschungsvorhabens, sondern sind dieser unterlagert. Dennoch wurden in das Modell die Aspekte „Zuweisung von Aufträgen zu Fahrzeugen“ und „Routing“ integriert, um die zeitliche Verteilung der Transportbedarfe und des Transportaufkommens realitätsnaher abbilden zu können, was durch den aggregierten logistischen Kennwert wiederum die Auftragsreihenfolge beeinflusst.

Das Modell betrachtet räumliche Informationen zu den Übergabestellen von Werkstätten für Transportgüter, sowie den Wegenetzen, die von den Fahrzeugen genutzt werden können. Wegenetze lassen sich im Simulationswerkzeug Plant Simulation mit Wegmarken aufbauen. Für eine schnelle Anpassung des Layouts im Modell werden die räumlichen Informationen über csv-Dateien vom Modell eingelesen und daraus die

Positionen für die Koordinaten der einzufügenden Objekte berechnet. Die Werkstattobjekte werden automatisch von zuvor angelegten vorkonfigurierten Klassen abgeleitet und im Modell positioniert, sowie konfiguriert. Die Konfigurationsdaten werden im Modell manuell tabellarisch angelegt. Es sind Klassen für Werkstätten vorgesehen, die die Produktions- und Logistikregelung beinhalten, sowie Klassen für Fahrzeuge und einen Flottenmanager, die Methoden für die Transportregelung beinhalten. Für die Erstellung der Layout-Importdatei im csv-Format wurde ein html-basiertes Tool entwickelt, das Layoutpläne einliest und über ein Anwählen von Stützpunkten halbautomatisiert Informationen zu Wegenetzen erstellt. Auch die Positionen von Werkstätten, sowie deren Ausdehnung, als auch die Positionen der Übergabestellen sind halbautomatisch konfigurierbar. Zuvor muss ein Koordinatennullpunkt und Maßstab des eingelesenen Layouts erstellt werden. Das Flottenmanagerobjekt nimmt durch einen Methodenaufruf Transportaufträge, bestehend aus Startort, Zielort und Startzeit entgegen. Die Fahrzeuge nehmen durch einen Methodenaufruf des Flottenmanagers Auktionsanfragen entgegen und melden ihr jeweiliges Gebot zurück. Der Flottenmanager übergibt an das optimalste Fahrzeug den Transportauftrag. Die Werkstätten erstellen Transportaufträge und sammeln die Informationen zu allen aufgegebenen Transportaufträge, was für die logistische Bewertung von Arbeitsaufträgen genutzt wird, ohne Kenntnis über den genauen Ausführungsstand durch die Fahrzeugflotte zu haben und somit ohne weitere Schnittstelle auszukommen. Je genauer das Abbild dem aktuellen Stand des Flottenmanagers entspricht, desto genauer ist schließlich die logistische Bewertung. Im Modell werden Störungen bei der Transportausführung, beispielsweise durch weitere Logistikteilnehmer wie manuelle Routenzüge und Stapler vernachlässigt. Verzögerungen durch die gemeinsame Nutzung von Streckenabschnitten durch fahrerlose Transportfahrzeuge werden vereinfacht durch eine Verlangsamung der Fahrt bei Begegnungen abgebildet.

Die Transportregelung wurde über einen zentralen Flottenmanager realisiert, der über ein Auktionsverfahren Transportaufträge an Fahrzeuge vergibt. Die Gebote bei der Auktion berechnen sich aus der Summe der Anfahrtszeit und der Zeit bis zu einem freien Zeitfenster. Die dezentrale Implementierung ist mit den passenden Kommunikationsprotokollen und einem gewissen Aufwand möglich, jedoch wird hierdurch keine Verbesserung der Modellgenauigkeit erwartet. Die genaue Abbildung eines realen Flottenmanagers erhöht die Vorhersagekraft des Modells, jedoch auch den zeitlichen Aufwand für die Implementierung.

Für die Generierung der Routen wird der A*-Algorithmus verwendet, der in Flottenmanagern häufig Anwendung findet.

Logistische Bewertung von Belegungsalternativen:

Bei der logistischen Bewertung werden die potenziell zusätzlichen Transporte jeder Belegungsalternative mit der logistischen Lastsituation während der Abarbeitungszeit verglichen. So lässt sich das Überlastungspotenzial der möglichen Arbeitsaufträge zueinander in Relation setzen. Da bei transportverursachenden Belegungsentscheidungen über alle Arbeitsmodule situativ entschieden wird, ist der logistische Planungshorizont kurz. Ein logistisch ungünstiger Arbeitsauftrag kann daher bei mehreren aufeinanderfolgenden Belegungsentscheidungen in einem Arbeitsmodul so lange zurückgestellt werden, bis eine günstigere logistische Situation vorliegt oder die terminliche Dringlichkeit überwiegt. Die Höhe der „Bestrafung“ für logistische Ungünstigkeit ist gewichtbar.

Kurze logistische Reaktionszeiten senken den Anteil des Indirektbestands, erhöhen die Zahl startfähiger Aufträge bei Belegungsentscheidungen und fördern so die optimale Funktionsfähigkeit der Produktionsregelung.

Beispiel:

1. In einem Arbeitsmodul liegen alle für den aktuellen Arbeitsschritt benötigten Komponenten mehrerer wartender Arbeitsaufträge in den Eingangspuffern bereit. Durch die Belegungsentscheidung wird ein Auftrag zur Bearbeitung ausgewählt, der Arbeitsschritt beginnt, und der Indirektbestand des nachfolgenden Moduls steigt.
2. Nach Abschluss des Arbeitsschritts wird der Auftrag im Ausgangspuffer für die Abholung bereitgestellt. Ein Transportauftrag für die Haupt- und ggf. Nebenkompenten wird an die Fahrzeugflotte übergeben. Ist die Flotte zu diesem Zeitpunkt ausgelastet, entsteht eine Reaktionszeit > 0 , deren Höhe von der Dauer der Überlastsituation abhängt. Steht ein Fahrzeug sofort zur Verfügung, startet die Abholung unmittelbar (Reaktionszeit = 0). Der Auftrag verbleibt bis dahin im Indirektbestand des Nachfolgemoduls.
3. Sind alle Transporte des betrachteten Auftrags abgeschlossen, wechselt dessen Bestand im Nachfolgemodul vom Indirekt- in den Direktbestand. Der Auftrag kann nun bei folgenden Belegungsentscheidungen berücksichtigt und anhand der Freigabe durch den Nachfolger, seiner terminlichen Dringlichkeit und der logistischen Bewertung priorisiert werden.

Für die logistische Bewertung von Belegungsalternativen wird aus der Transportdichte, die sich aus den Transportaufträgen früherer Belegungsentscheidungen ergibt, eine Datenreihe gebildet. Diese besteht aus Transporten, die von den Werkstätten aufgegeben werden und ein verzerrtes Abbild der tatsächlichen Ausführung durch die Fahrzeuge entspricht. Im Modell wird die zusätzliche Schnittstelle zum Flottenmanager vermieden, wodurch keine Rückmeldung über den Ausführungsstand vom Flottenmanager an den PLR erfolgt. Bei der Verwendung der Zusätzlichen Schnittstelle kann durch eine Rückmeldung des Ausführungsstands für die Erstellung der Datenreihe verwendet werden.

Der folgende Pseudocode stellt den Ablauf zur Berechnung des aggregierten logistischen Kennwerts dar:

1. Alle gebuchten Transportaufträge (Startzeit/Startort/Zielort) sind bekannt. Die Dauer für Transportausführung wird aus der Strecke und der Fahrzeuggeschwindigkeit ermittelt. Die Strecke wird entweder über die Manhattan-Metrik berechnet, oder direkt durch die Route ermittelt (besser bei häufig konkaven Wegabschnitten und wenn Fahrt diagonal zu den Koordinatenachsen).
2. Eine Pauschale für Anfahrt wird addiert, da der vorherige eingeplante Transport eines bestimmten Fahrzeugs nicht bekannt ist.
3. Zusätzlich wird eine Pauschale für das Handling addiert (manuell/Fördertechnik) z. B. über Zeitbausteine/Richtwerte.
4. Es werden weitere Datenreihen der Transportdichte der Transportaufträge bisheriger Belegungsentscheidungen erstellt und zusätzlich der potenziellen Transporte, die aus den Belegungsalternativen resultieren.
5. Die Teilkennwerte werden für jedes logistische Bewertungskriterium zu den Datenreihen berechnet.
6. Die Differenzen der Teilkennwerte bestehender Transportdichte und der Transportdichte mit Belegungsalternativen werden berechnet.
7. Die aggregierte logistische Kennzahl aus den gewichteten Teilkennwerte wird berechnen und an Terminregler übergeben.

Die in der folgenden Abbildung 12 dargestellt Tabelle aus dem Modell dient zur Berechnung des aggregierten logistischen Kennwerts. In den Versuchsläufen ist die Gewichtung der Teilkennwerte konfigurierbar

(linker Rahmen) und bestimmt den Anteil, mit dem der in der jeweiligen Methode berechnete Teilkenwert (rechter Rahmen) in den aggregierten logistischen Kennwert eingeht.

	integer 1	string 2	real 3	object 4
string	Gewichtung	Beschreibung	W...	Methode
1	0	Kosten durc...		.Benutzerobjekte_Export.Objekte_Stuttgart.Transportdurchsatz_Glätten.GlättungskPI_KostenTermin
2	0	Kosten durc...		.Benutzerobjekte_Export.Objekte_Stuttgart.Transportdurchsatz_Glätten.GlättungskPI_KostenLeerlauf
3	1	Steigung imBenutzerobjekte_Export.Objekte_Stuttgart.Transportdurchsatz_Glätten.GlättungskPI_1AbleitungNumerisch
4	0	Sprünge imBenutzerobjekte_Export.Objekte_Stuttgart.Transportdurchsatz_Glätten.GlättungskPI_2AbleitungNumerisch
5	0	AbweichungBenutzerobjekte_Export.Objekte_Stuttgart.Transportdurchsatz_Glätten.GlättungskPI_AbweichungGGM
6	0	Standardab...		.Benutzerobjekte_Export.Objekte_Stuttgart.Transportdurchsatz_Glätten.standardabweichung
7	0	Differenz de...		.Benutzerobjekte_Export.Objekte_Stuttgart.Transportdurchsatz_Glätten.GlättungskPI_AbweichungGGM1GGM2
8	0	1. AbleitungBenutzerobjekte_Export.Objekte_Stuttgart.Transportdurchsatz_Glätten.GlättungskPI_AbweichungGGM1GGM2_1Ableitung
9	0	2. AbleitungBenutzerobjekte_Export.Objekte_Stuttgart.Transportdurchsatz_Glätten.GlättungskPI_AbweichungGGM1GGM2_2Ableitung

Abbildung 12: Tabelle im Modell, die zur Berechnung des aggregierten logistischen Kennwerts dient

Die Abtastung des Ergebnisraums mit einer feinen Variierung der Gewichtungen hat sich als äußerst rechenintensiv erwiesen, weshalb mit der vielversprechendsten Berechnung des logistischen Kennwerts fortgefahren wurde. Der im Folgenden beschriebene Kennwert ist an Kosten angelehnt, die durch verspätete Erfüllung von Aufgaben entstehen. Die logistische Reaktionszeit wird durch den Transportrückstand bestimmt, der zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft entsteht, an dem ein neuer Transportaufwand erforderlich wird. Dieser Rückstand repräsentiert die Menge an Transportaufträgen, die noch nicht abgearbeitet sind und zu einem späteren Zeitpunkt abgeschlossen werden müssen. Der Transportaufwand zu diesem Zeitpunkt wird mit den möglichen Alternativen abgeglichen, die bei der Belegungsentscheidung zur Verfügung stehen. Das bedeutet, dass für jeden neuen Transportauftrag nicht nur der aktuelle Auftragsrückstand berücksichtigt wird, sondern auch die unterschiedlichen Alternativen hinsichtlich ihrer Transportaufwände. Diese alternativen Transportaufwände können z. B. variierende Transportmittelanzahlen, unterschiedliche Routen oder unterschiedliche Fahrzeugarten umfassen. Ein entscheidender Punkt ist, dass der Transportrückstand in die Entscheidung über den neuen Transportaufwand einfließt, sodass die Flotte und die Kapazitäten optimal ausgelastet werden können, ohne unnötige Verzögerungen oder Überlastungen zu verursachen. Die Belegungsentscheidung erfolgt somit unter der Berücksichtigung der gesamten aktuellen und zukünftigen Transportaufwände, wobei sowohl der bestehende Rückstand als auch die zu erwartenden Aufwände dynamisch abgestimmt werden, um eine effiziente und termingerechte Abwicklung sicherzustellen. Die logistische Abstimmung konkurriert letztendlich mit der Terminpriorität und der grundsätzlichen Bearbeitbarkeit durch das Pull-Prinzip.

Parametrierung (Produktionsteil):

Für die kapazitätsbezogene Auslegung des Modells musste dieses zunächst grob parametrierung werden. Dafür wurde in einem ersten Schritt die Parametrierung ohne die Logistik durchgeführt, um die benötigte Anzahl der Stationen und Werker festlegen zu können. Nachdem dies gemacht wurde, erfolgte anschließend die Feinparametrierung mit der Logistik.

Für die Grobparametrierung wurden Versuchsreihen durchgeführt, bei denen die Anzahl der Werker im Simulationsmodell, die Anzahl der Arbeitsstationen pro Werkstatt und die Bestandsgrenzen der einzelnen Werkstätten variiert wurden. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Aufträge mit einem positiven mittleren Schlupf und einer Termintreue über 99% fertiggestellt werden, während gleichzeitig die Auslastungen der Stationen und der Werker so hoch wie möglich sind. Zusätzlich sollten die Bestandsgrenzen so niedrig wie möglich gesetzt werden, um die Bestände entsprechend dem Lean-Konzept möglichst niedrig zu halten.

Nach der Durchführung der Simulationsläufe wurden jeweils in einer Auswertungsphase die Ergebnisse der Experimente analysiert. Die Simulationsläufe wurden mit realen Arbeitsplänen und einem realitätsnahen Auftragsmix durchgeführt, der jedoch auf Wunsch des Unternehmens unter Verwendung von Zufallszahlen generiert wurde. Daher war im Rahmen der anschließenden Validierung des Modells ein direkter Vergleich mit den real erzielten Produktionsergebnissen nicht möglich. Die Übereinstimmung der am Modell ermittelten Kapazitätsbedarfe, Durchlaufzeiten und Terminabweichungen ohne Regelung mit der realen Situation wurde aber von den Produktionsexperten des Unternehmens bestätigt.

Die Funktionsfähigkeit der Termin- und Bestandsregler und die resultierende Verbesserung der Produktionskennzahlen konnten bereits nachgewiesen werden, ebenso die Funktionsfähigkeit der Transportauftragszuweisung an Fahrzeuge, der Routengenerierung sowie des logistischen Bewertungsmechanismus. Das Potenzial des Bewertungsmechanismus muss jedoch in weiteren Simulationsläufen untersucht werden um Aussagen über die Vorteilhaftigkeit gewinnen zu können. Die Anzahl der durchzuführenden Experimente bei neun Parametern ergibt sich beispielsweise bei der Varrrierung je Gewichtung von null bis eins mit einer Schrittweite von 0,1 zu 11^9 möglichen Kombinationen mit einer Rechenzeit von 20 Minuten pro Experiment. 20 Minuten Simulationszeit entsprechen hierbei fünf Wochen in der Realität. Um den Lösungsraum schneller explorieren zu können wird ein genetischer Algorithmus verwendet, der in Plant Simulation bereits als Werkzeug implementiert ist. Als Kennzahlen zur Bewertung der Simulationsläufe werden folgende verwendet:

- Produktion:
 - Mittelwert Schlupf der fertiggestellten Aufträge
 - Verteilung Schlupf der fertiggestellten Aufträge
 - Mittlere Durchlaufzeit der Aufträge
 - Auslastung der Stationen und Werker
 - Mittlerer Bestand in der Produktion (WIP)
- Logistik:
 - Wartezeit der Produktionsaufträge auf den Start des Transports
 - IST-Auslastung der Fahrzeuge
 - Soll-Auslastung der Fahrzeuge

Auswertung der Simulationsstudie mit Produktions- und Fahrzeugflottenmodell, sowie der dezentralen Produktions- und Logistikregelung

Für die Bewertung der integrierten Produktions- und Logistikregelung wird das variantenreiche Produktionsszenario zusätzlich mit fahrerlosem Transportsystem (FTS) simuliert. Zur Beurteilung werden mehrere Kennzahlen verwendet: die logistische Reaktionszeit (Wartezeit eines Transportauftrags bis zum Start), die Auslastung und Anzahl der Fahrzeuge, die Termintreue (Verteilung der Terminabweichungen) sowie der zeitliche Verlauf des Gesamtbestands im System.

Zunächst wird die Fahrzeugflotte dimensioniert. Dazu wird die Anzahl der Fahrzeuge in mehreren Läufen von acht bis zwölf variiert, jeweils über einen Simulationszeitraum von vier Wochen mit täglichen Auftrags-eingängen (ohne Wochenenden). Mit zu wenigen Fahrzeugen steigt der Bestand schnell an, und es treten

verspätete Fertigstellungen auf. Bei einer Flottengröße von zwölf Fahrzeugen lassen sich alle Aufträge termingerecht bei moderatem Bestandsniveau abarbeiten. Für die Detailanalyse wird anschließend bewusst eine Flottengröße knapp unterhalb dieses Optimums gewählt (elf Fahrzeuge), um den Einfluss der unterschiedlichen Regelstrategien auf Bestände, Termine und Flottenauslastung sichtbar zu machen.

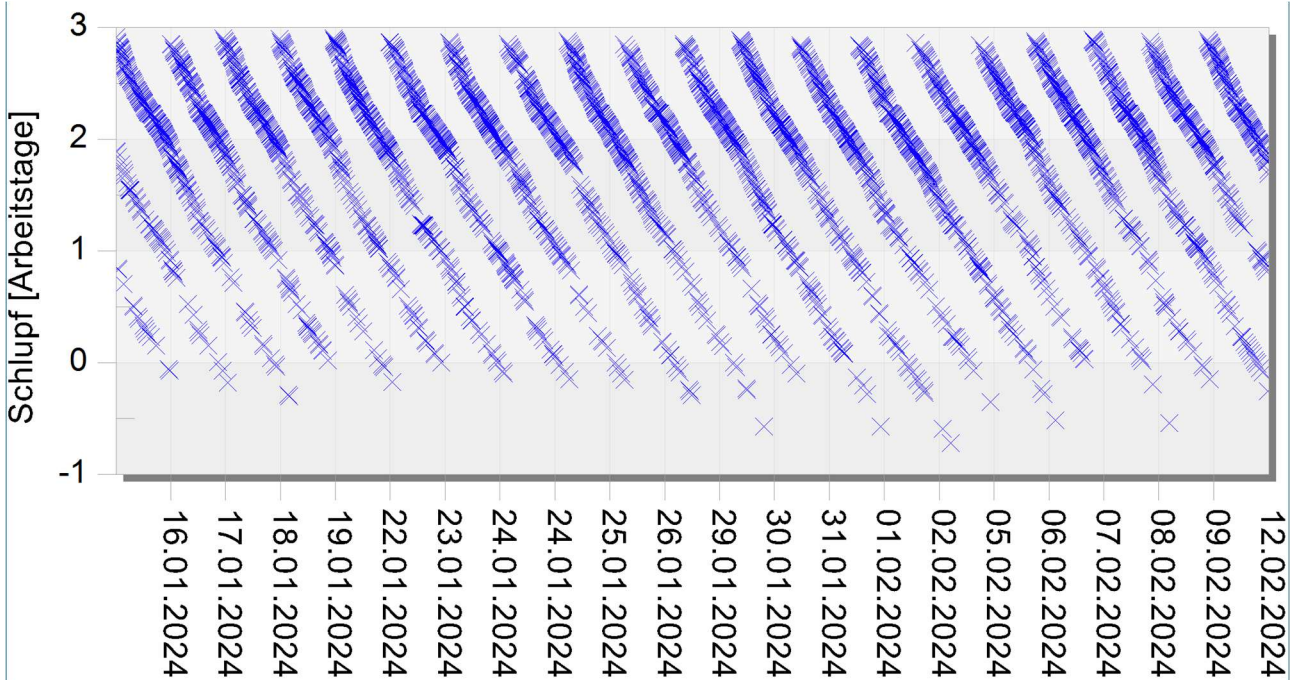


Abbildung 13: Verbleibende Terminpuffer: Schlupfwert nach Ausschleuszeit (ungeregelt, 11 Fahrzeuge)

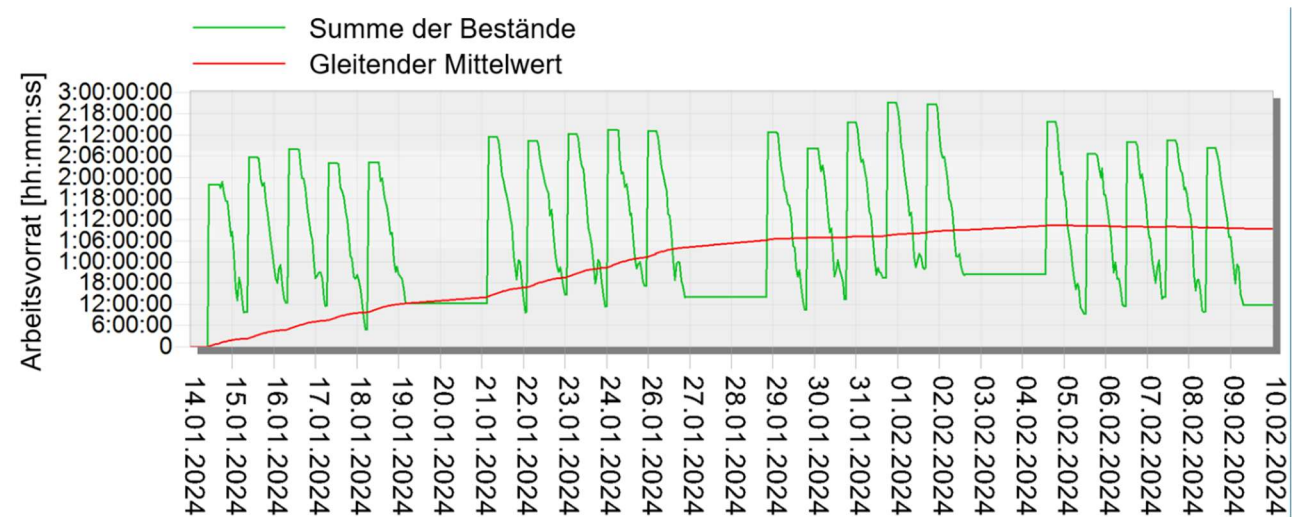


Abbildung 14: Beständediagramm: Gesamtbestandsentwicklung über die Zeit (ungeregelt, 11 Fahrzeuge)

Im unregelmäßigen Referenzfall (Bearbeitungsreihenfolge nach FIFO, ohne Termin- und Bestandsregler) dessen verbleibende Terminpuffer in der Abbildung 13 dargestellt sind, wird deutlich, dass sich zwar viele Aufträge vor ihrem Solltermin fertigstellen lassen, gleichzeitig aber ein relevanter Anteil verspätet fertig wird. Die Streuung der Terminpuffer ist hoch und der gleitende Mittelwert des Arbeitsvorrats steigt im Verlauf der vier Wochen auf einen deutlich erhöhten, aber stabilen Wert an, wie in Abbildung 14 dem gleitenden Mittelwert zu entnehmen.

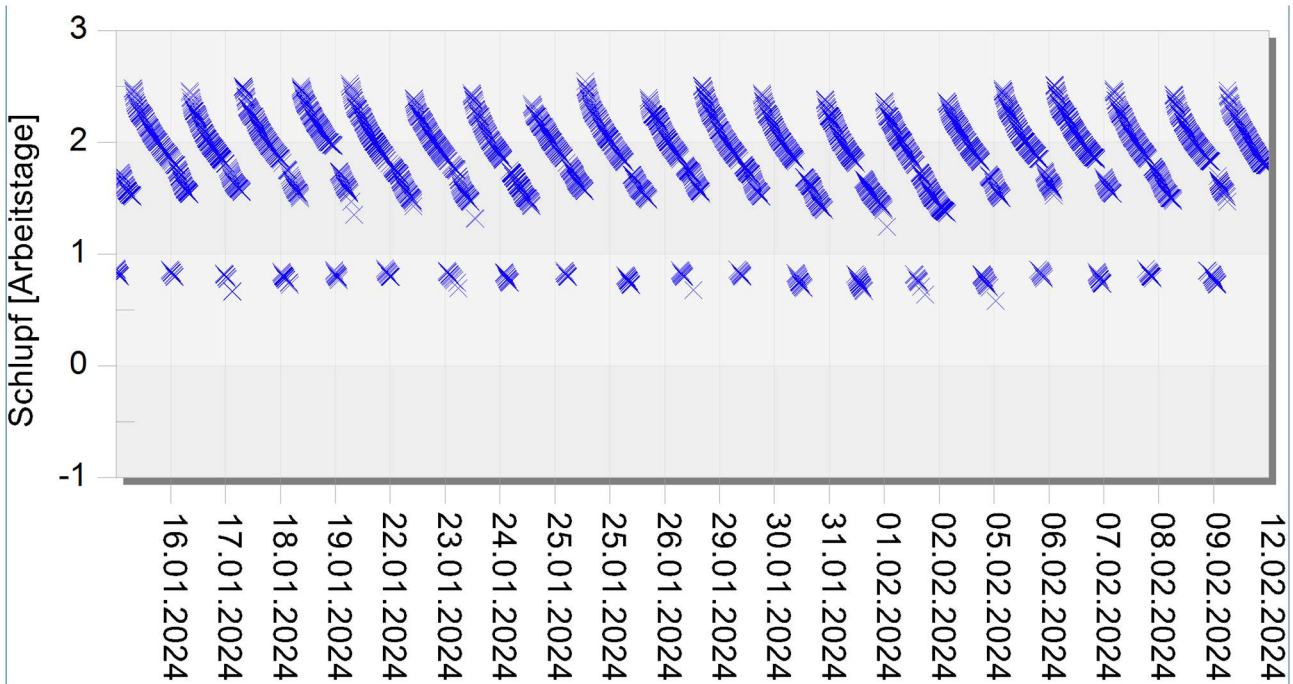


Abbildung 15: Verbleibende Terminpuffer: Schlupfwert nach Ausschleuszeit (Terminregelung, 11 Fahrzeuge)

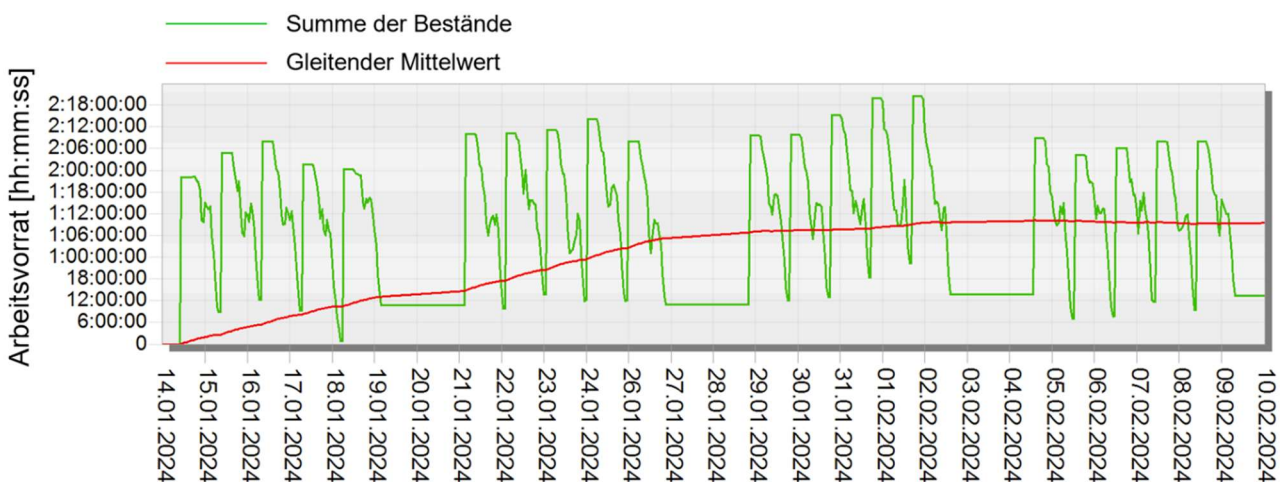


Abbildung 16: Beständediagramm: Gesamtbestandsentwicklung über die Zeit (Terminregelung, 11 Fahrzeuge)

Wird die dezentrale Terminregelung zugeschaltet, ordnet sich die Verteilung der Terminpuffer neu: Aufträge mit knappem Terminpuffer werden priorisiert bearbeitet, Aufträge mit größerem Puffer können warten. Im Ergebnis sind in dieser Variante keine verspäteten Fertigstellungen in Abbildung 15 zu beobachten, und die Punktwolken der Terminpuffer bilden klar erkennbare Cluster je ursprünglicher Terminvorlaufklasse. Der Bestandsverlauf in Abbildung 16 über die vier Wochen ähnelt dem unregulierten Fall, jedoch ohne die negativen Auswirkungen auf die Termintreue.

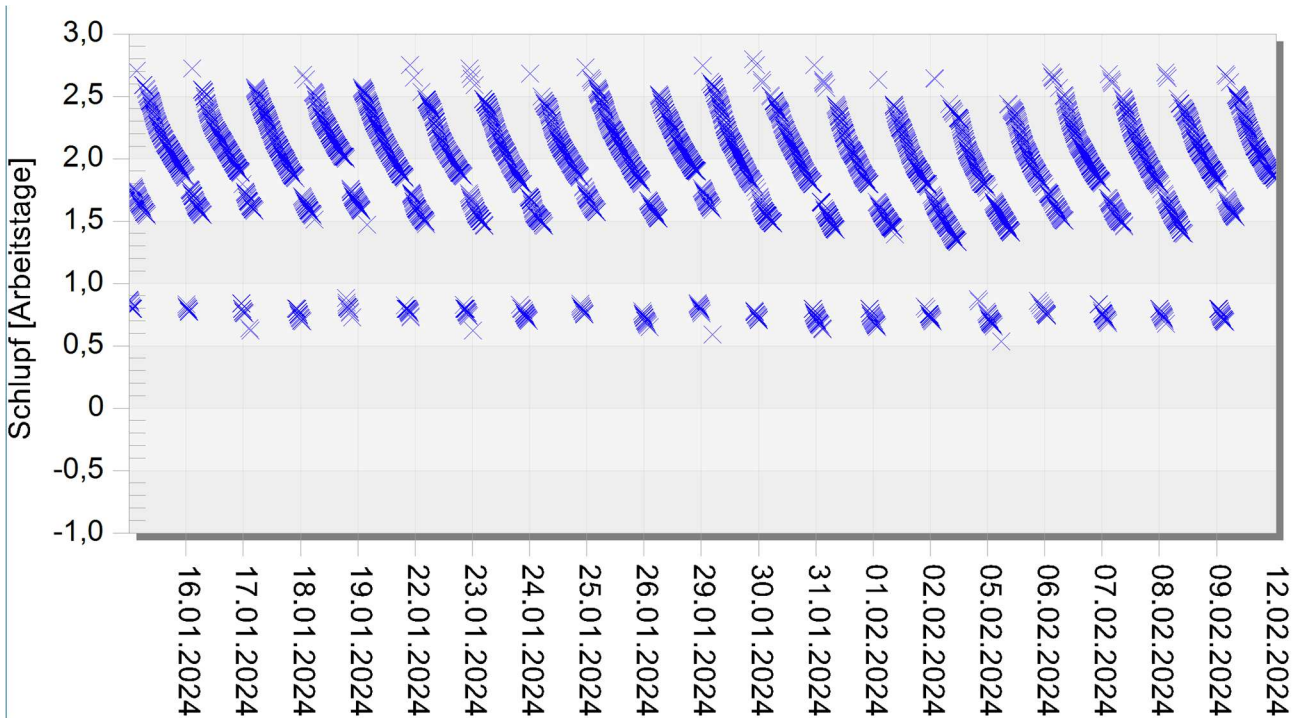


Abbildung 17: Verbleibende Terminpuffer: Schlupfwert nach Ausschleuszeit (Termin- und Bestandsregelung, 11 Fahrzeuge)

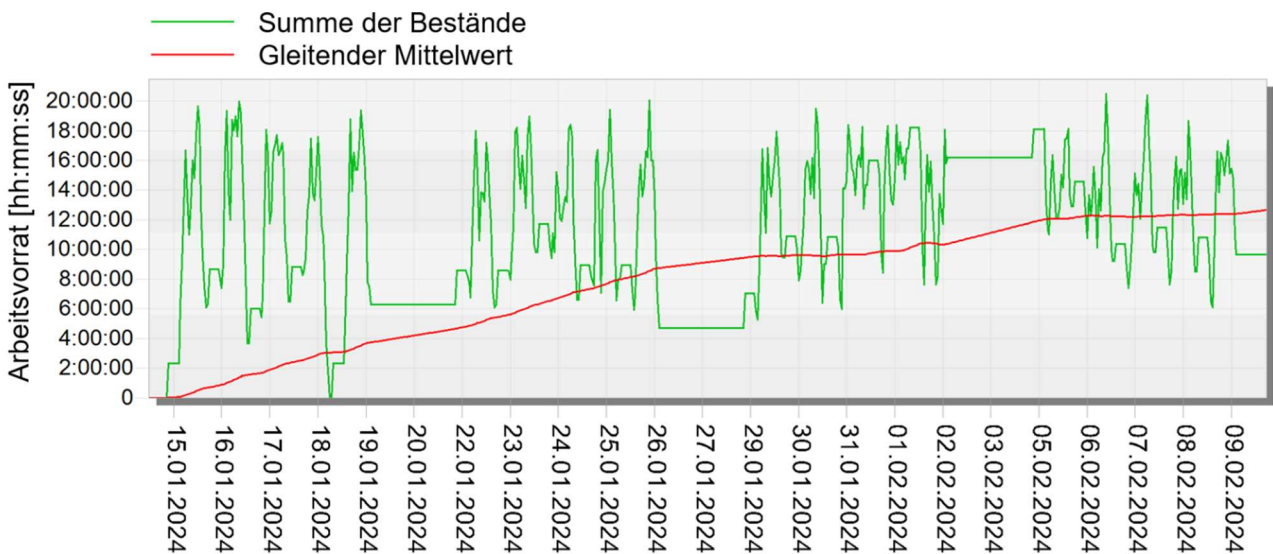


Abbildung 18: Beständediagramm: Gesamtbestandsentwicklung über die Zeit (Termin- und Bestandsregelung, 11 Fahrzeuge)

Die Kombination aus Termin- und Bestandsregelung reduziert den Arbeitsvorrat im System deutlich wie in Abbildung 18 am gleitenden Mittelwert erkennbar. Der gleitende Mittelwert des Gesamtbestands bleibt über die vier Wochen deutlich unter den Werten der Szenarien ohne Bestandsregelung, ein Trend zum Umlaufbestandsaufbau ist jedoch erkennbar. Die Termintreue in Abbildung 17 dargestellt, bleibt weitgehend erhalten. Auf Flottenseite führt diese Variante zu einem mittleren Wartezeitanteil von rund einem Drittel der Fahrzeugzeit und einer durchschnittlichen logistischen Reaktionszeit von etwas über zwei Minuten pro Transport. Die Flotte ist damit gut ausgelastet, ohne dass die Transportwartezeiten kritisch ansteigen.

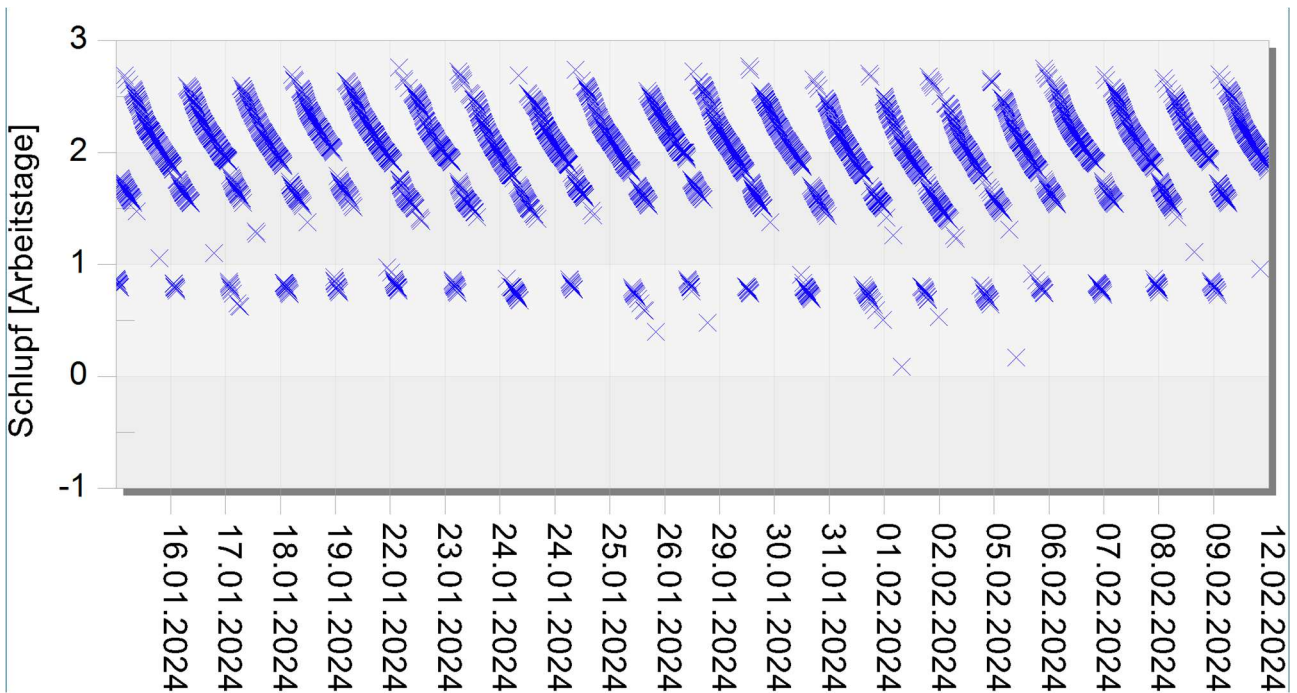


Abbildung 19: Verbleibende Terminpuffer: Schlupfwert nach Ausschleuszeit (Produktions- und Logistikregelung, 11 Fahrzeuge)

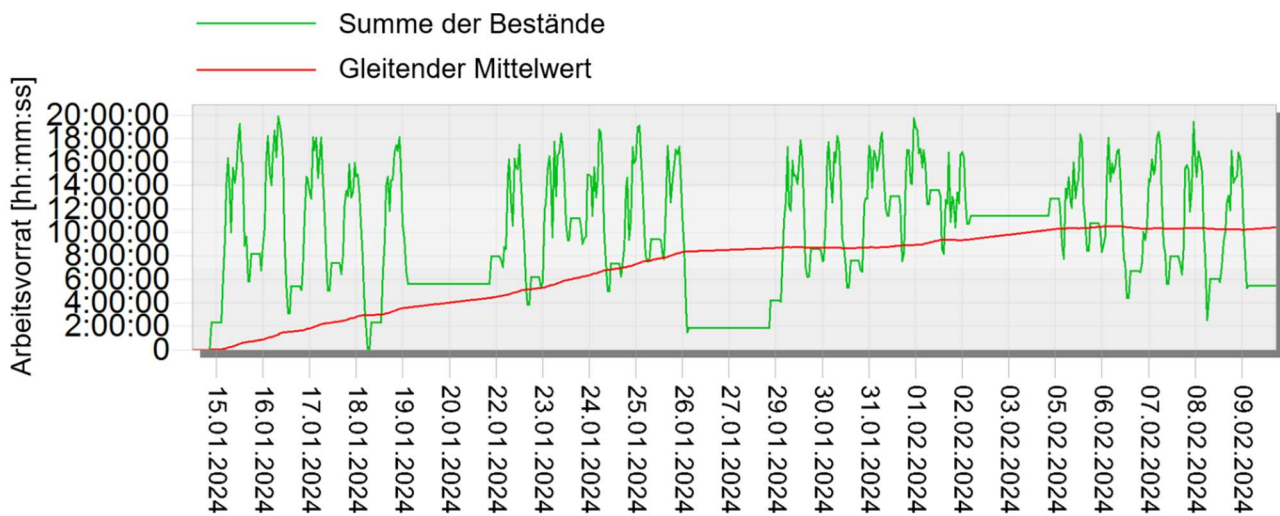


Abbildung 20: Beständediagramm: Gesamtbestandsentwicklung über die Zeit (Produktions- und Logistikregelung, 11 Fahrzeuge)

In der erweiterten Variante wird zusätzlich eine logistische Priorität in die Belegungsentscheidung einbezogen. Die Produktions- und Logistikregelung bewertet dabei, wie transportintensiv ein anstehender Arbeitsgang ist und in welcher Phase sich die Flottenauslastung voraussichtlich befindet. Ziel ist es, transportaufwändige Arbeitsschritte eher in logistisch günstigere Phasen zu verschieben und Transportspitzen zu glätten, ohne Termine oder Bestandsgrenzen zu verletzen.

Die Simulation zeigt in Abbildung 17 und Abbildung 18, dass diese Kopplung von Termin-, Bestands- und Logistikpriorität im betrachteten vierwöchigen Horizont zu moderaten, aber messbaren Verbesserungen führt, verglichen mit den Ergebnissen mit Termin- und Bestandregelung in Abbildung 19 und Abbildung 20. Die Termintreue bleibt vollständig erhalten, obwohl zusätzliche Restriktionen durch die Logistik berücksichtigt werden. Es zeigen sich etwas größere Schwankungen der Terminschlupfwerte der Eilaufträge bei Fertigstellung, da die Interessen der Logistik mitberücksichtigt werden. Der gleitende Mittelwert des

Arbeitsvorrats liegt über den vier Wochen nochmals leicht niedriger als in der Variante ohne logistische Priorisierung und erreicht in der vierten Woche eine neutrale Steigung. Der Bestand kann somit gesenkt werden.

Auch auf Flottenseite sind leichte Verbesserungen erkennbar: Der durchschnittliche Wartezeitanteil der Fahrzeuge sinkt geringfügig, und die mittlere logistische Reaktionszeit pro Transport reduziert sich um einige Sekunden gegenüber der reinen Termin- und Bestandsregelung. Die Effekte sind im untersuchten Szenario marginal, könnten jedoch in andern Produktionsumgebungen/-Szenarien wesentlich ausgeprägter/bedeutsamer sein. Ein Grund dafür ist, dass lokale Bestandsgrenzen und Terminbedingungen die Auswahl an bearbeitbaren Auftragsalternativen in vielen Situationen stark einschränken. Häufig liegen im lokalen Eingangspuffer nur wenige Aufträge mit heterogenem Transportaufwand vor, sodass die logistische Priorität die Reihenfolge nur begrenzt beeinflussen kann. Zudem werden Transporte erst nach der Fertigbearbeitung ausgelöst, was die Sicherheit für den sinnvollen Einsatz von Transportkapazität bezüglich Störsituationen erhöht, den kurzfristigen Hebel zur Lastverschiebung aber reduziert.

In der Gesamtschau ergänzt die logistische Harmonisierung die bereits wirksame Termin- und Bestandsregelung um eine feinere Abstimmung mit der Flottenauslastung. Die vierwöchige Simulation zeigt, dass sich Bestände und logistische Reaktionszeiten weiter leicht verbessern lassen, ohne die Termintreue zu gefährden. Zusammen mit der ganzjährigen Betrachtung der Produktionsregelung entsteht so ein konsistentes Bild: Die dezentrale Produktions- und Logistikregelung stabilisiert Termine, begrenzt Umlaufbestände und ermöglicht gleichzeitig eine gezieltere Nutzung der vorhandenen Transportkapazität.

1.5 Arbeitspaket 5: Nutzbarmachung des Ansatzes für Unternehmen

Zur Nutzbarmachung des Ansatzes für Unternehmen wurden Qualitative Überlegungen zur Informationsplattform mit Eingabemaske gemacht. Relevante Produktions- und Logistikparameter die das Potenzial zur Eignung der PLR bestimmen sind im Folgenden aufgeführt:

- Abgeleitet aus Produktionsaufträgen
 - Schlupfvorrat aus dem Fertigstellungstermin abzüglich der Summe der Bearbeitungszeiten → je heterogener, desto mehr Potenzial
 - Anzahl der Arbeitsgänge → je höher, desto mehr Potenzial
 - Logistischer Aufwand pro Arbeitsgang (Anzahl nötiger Transporte/Fahrzeuge, Transportdistanzen, individuelle Materialflüsse, Bearbeitungsdauern) → je heterogener, desto mehr Potenzial
- Verhältnis der Kosten von Produktionsressourcen verglichen mit den der Logistikressourcen ist hoch → geringeres Potenzial

Die qualitativen Gedanken wurden nach Abschluss der Simulationsstudie mit Daten untermauert und in einen Entscheidungsbaum überführt. Mittels des Entscheidungsbaums kann die Eignung, des zu erwartenden Potentials sowie des Umsetzungsaufwands zur Einführung der PLR abgeleitet werden.

Auf der Informationsplattform sind die folgenden Inhalte verfügbar:

- Implementierungsleitfaden
 - Zielsetzung der Dezentralen Produktions- und Logistikregelung
 - Grundansatz der Dezentralen Produktions- und Logistikregelung

- Kriterien für den Einsatz einer Dezentralen Produktions- und Logistikregelung
 - Möglichkeit zur Integration des PLR-Moduls in die bestehende Systemlandschaft
 - Ort der Implementierung des PLR-Moduls
 - Weitere Implementierungsmöglichkeiten
 - Hinweis zur projektspezifischen Umsetzung in einem Unternehmen
- Eingabemaske für die Bewertung eines Produktionsszenarios für den Einsatz einer Dezentralen Produktions- und Logistikregelung

Die Inhalte des Implementierungsleitfadens werden im Folgenden vorgestellt:

Implementierungsleitfaden: Zielsetzung der Dezentralen Produktions- und Logistikregelung

Das Ziel der dezentralen Produktions- und Logistikregelung ist es, Termine zuverlässig einzuhalten, Umlaufbestände zu begrenzen und die Logistikauslastung zu glätten, was zu verbesserten logistischen Reaktionszeiten führt, bis die Ausführung von Transporten ab deren Soll-Startzeitpunkt begonnen wird. Es ist dabei erforderlich, dies auf Basis der bestehenden Produktions- und Logistikstrukturen zu erreichen, ohne diese grundlegend umbauen zu müssen.

Implementierungsleitfaden: Grundansatz der Dezentralen Produktions- und Logistikregelung

Die Regelung folgt einem dezentralen Ansatz: Die Entscheidungslogik ist nicht zwingend in einem zentralen Leitsystem gebündelt, sondern wird auf die beteiligten Ressourcen verteilt. Ein zentrales Hosten der Algorithmen ist jedoch grundsätzlich möglich, um eine einfache Integrierbarkeit der Regelung in bestehende Systeme zu ermöglichen. Entscheidungen werden auf Basis der jeweiligen aktuellen Situation von Maschinen, Montagearbeitsplätze und Puffer sowie Transportmittel getroffen. Ein zentraler Entscheidungspunkt ist, welcher Auftrag als Nächstes bearbeitet oder transportiert wird. Grundlage sind einfache, lokal verfügbare Informationen wie Belegungszustände, Pufferfüllstände, Terminpuffer, Transportaufwände und Fahrzeugverfügbarkeit.

Produktion und Logistik werden dabei bewusst zusammen betrachtet. Die Regelung verbindet die Produktionsressourcen (z. B. Maschinen, Montageplätze) mit den Logistikressourcen (z. B. Fahrerlose Transportfahrzeuge, manuelle Fahrzeuge, oder andere innerbetriebliche Transportfahrzeuge ohne feste Taktung), indem Belegungsentscheidungen in der Produktion und Transportentscheidungen der Logistik auf gemeinsame Regeln und Prioritäten zurückgreifen. So kann z. B. ein Arbeitsgang nur dann gestartet werden, wenn sowohl Produktionskapazität als auch Materialverfügbarkeit und absehbare Transportkapazität zusammenpassen.

Das zugrunde liegende Steuerungsprinzip ist ein Pull-Prinzip: Aufträge werden von nachgelagerten Stationen und Prozessen angefordert, sobald dort Kapazität und Bedarf entstehen – nicht pauschal „von oben“ in die Produktion gedrückt. Analog werden Transporte nur dann ausgelöst, wenn ein konkreter Bedarf besteht und die Logistikressourcen dafür geeignet und verfügbar sind. Auf diese Weise passt sich das System fortlaufend an die aktuelle Situation an und nutzt die vorhandenen Ressourcen möglichst effizient.

Implementierungsleitfaden: Kriterien für den Einsatz einer Dezentralen Produktions- und Logistikregelung

Die dezentrale Produktions- und Logistikregelung entfaltet ihr Potenzial vor allem in Umgebungen, in denen mehrere Produktionssysteme, variable Auftragsstrukturen und eine logistische Varianz vorhanden sind. Grundvoraussetzung ist, dass die dezentrale Produktionsregelung für das Einsatzszenario grundsätzlich

geeignet ist. Darauf aufbauend kann die Logistik integriert werden, um insbesondere die Logistikauslastung zu glätten.

Geeignete Produktionsstrukturen liegen typischerweise in Batchfertigungen, Teilefertigungen und Montagen vor. Organisatorisch passen Werkstatt-, Nest-, Insel- und flexible Reihenproduktionen gut zum Regelprinzip, da sie Freiheitsgrade in der Zuordnung von Aufträgen zu Betriebsmitteln bieten. Reine Fließproduktionen mit festem Takt sind dagegen wenig geeignet, weil die starre Taktung der Idee einer dezentralen, ereignisgesteuerten Belegungsentscheidung widerspricht. Ein zentrales Kriterium ist die Anzahl der Produktionssysteme: Ab etwa drei Systemen (z. B. Werkstätten, Nester oder Linien) wird die Systemkomplexität so groß, dass der Nutzen der dezentralen Regelung den Implementierungsaufwand typischerweise rechtfertigt. Die Regelkreise lassen sich dann auf eine größere Anzahl von Produktionssystemen skalieren, da die Regelprinzipien identisch angewendet werden. Der zusätzliche Aufwand liegt vor allem in der Parametrierung. Die Echtzeitfähigkeit hängt von der IT-Infrastruktur ab, die mit ausreichenden Datenraten, Speichergrößen und Rechengeschwindigkeiten ausgestattet sein muss. Der Datenaustausch ist dabei vergleichsweise gering, auch wenn die Logistik eingebunden wird.

Innerhalb eines Produktionssystems können beliebig viele parallel belegbare Stationen betrieben werden. Nach der Belegungsentscheidung auf Systemebene werden Aufträge durch einfache Regeln an freie Arbeitsstationen verteilt. Die Gesamtanzahl der Anlagen oder Arbeitsplätze spielt für die Komplexität der Regelung eine untergeordnete Rolle. Durch die Mindestanzahl von drei Produktionssystemen mit mindestens je einer Station liegt sie bei mindestens drei und ist nach oben offen. Die technisch und organisatorisch bedingte Verfügbarkeit der Anlagen ist ebenfalls relevant: Bei hohen Verfügbarkeiten sind klassische Planungs- und Steuerungsverfahren nach dem Push-Prinzip (MRP, MRP II u. a.) eher anwendbar, bei geringerer Verfügbarkeit steigt durch Unvorhersehbarkeit die Dynamik, und damit wächst das Potenzial der Regelung, Schwankungen in der verfügbaren Kapazität aktiv auszugleichen.

Bei den Produktionsaufträgen sind sowohl die Losgrößen als auch die Anzahl gleichzeitig im System befindlicher Aufträge entscheidend. Grundsätzlich sind beliebige Losgrößen steuerbar. Je kleiner die Lose und je höher die Variantenvielfalt, desto größer ist der Nutzen der dezentralen Regelung, weil mehr feingranulare Belegungsentscheidungen möglich werden. Sobald mehr als ein Auftrag im System ist und mehrere Aufträge zur gleichen Zeit an derselben Station bearbeitet werden könnten, entstehen Belegungsentscheidungen. Je größer diese Alternativmenge, desto höher das Regelungspotenzial. Geringe Schwankungen in Auftragszahlen und -mengen ermöglichen eine eher statische Kapazitäts- und Reihenfolgeplanung, während starke Schwankungen die Vorteilhaftigkeit der dezentralen Regelung deutlich erhöhen, weil sie Lastspitzen und Engpässe dynamisch abfedern kann. Ähnliches gilt für den Auftragsmix: Ist dieser über die Zeit nahezu konstant, wird der Materialfluss relativ statisch. Ist er schwankend und schlecht vorhersagbar, kommt die Stärke der Regelung zum Tragen.

Die Struktur der Arbeitspläne wirkt direkt auf den Materialfluss. Mit einer höheren Anzahl an Produktvarianten und unterschiedlichen Arbeitsplänen steigt die Verzweigtheit der Materialflüsse und damit das Potenzial einer geregelten Belegungsauswahl. Bei identischen Arbeitsplänen mit gleichen Vorgabezeiten und einheitlicher Reihenfolge kann die Kapazitätsplanung relativ statisch erfolgen. Bereits ab zwei unterschiedlichen Arbeitsplänen entstehen Abzweigungen, und mit jeder weiteren Variante wächst der Nutzen der Regelung. Unterschiedliche Vorgabezeiten pro Arbeitsvorgang (AVO) führen zu schwankendem Durchsatz und damit zu variablen Kapazitätsbedarfen. Je stärker diese Unterschiede sind, desto mehr Potenzial bietet eine dynamische Regelung. Eine mittlere Anzahl von mindestens drei AVOs je Arbeitsplan stellt sicher, dass im

Durchschnitt mindestens drei Produktionssysteme genutzt werden und das Regelprinzip über mehrere Stufen hinweg wirksam werden kann. Der Anteil an gemeinsamer AVO-Reihenfolge ist dabei ein Maß für die Verzweigkeit: Ein gewisser gemeinsamer Standardfluss ist hilfreich, aber wenn mehr als etwa zwei Drittel der AVO-Sequenzen identisch sind, wird der Materialfluss so linear, dass die Regelung weniger Freiheitsgrade hat.

Besondere Strukturen entstehen, wenn es keine durchgängige gemeinsame Reihenfolge der AVOs gibt. Entfallen einzelne AVOs für bestimmte Varianten, durchlaufen diese Aufträge bestimmte Betriebsmittel gar nicht. Dadurch werden einzelne Stationen unregelmäßiger belastet, der Materialfluss verzweigt sich stärker und das Potenzial der Regelung wächst, weil Aufträge die nach einem Arbeitsgang weniger ausgelasteten Pfaden folgen, bevorzugt werden. Engpässe führen so nicht automatisch zu Bestandsaufbau. Wenn verschiedene Arbeitspläne die gleichen Betriebsmittel in unterschiedlicher Reihenfolge nutzen, entstehen kreuzende Materialflüsse und wechselnde Prioritätskonflikte. Eine statische Planung stößt hier schnell an Grenzen. Eine dezentrale Regelung kann in Echtzeit auf Termineinhaltung, lokale Bestände und logistische Rahmenbedingungen reagieren und für jeden Auftrag laufend dessen Priorität anpassen.

Die Intralogistik bestimmt, in welchem Maße eine Glättung der Logistikauslastung über die Regelung möglich ist. Stetigförderer und Transportmittel mit festen, zyklischen Routen bieten wenig Spielraum zur Optimierung, weil Wege und Zeitpunkte weitgehend fix sind. Größeres Potenzial besteht bei manuell bedienten Transportmitteln oder fahrzeuggestützten Systemen (z. B. Fahrerlosen Transportsystemen, kurz: FTS) mit flexibler Routenwahl: Hier können Materialbereitstellungen nur dann ausgelöst werden, wenn die Regelung einen Auftrag freigibt. Transportaufwände lassen sich zeitlich verschieben. Je unterschiedlicher die Anzahl der Transporte pro AVO und je größer die Varianz der Transportaufwände, desto mehr Möglichkeiten gibt es, transportintensive Aufträge in Zeiten geringer Transportlast und transportarme Aufträge in bereits ausgelastete Zeitfenster zu verschieben. Die Voraussetzung dafür ist, es befinden sich genügend Aufträge mit unterschiedlicher Transportintensität gleichzeitig im System. Auch unterschiedliche Transportzeiten tragen zur Logistikintensität eines Auftrags bei. Solange diese nicht nahezu identisch sind, kann die kombinierte Produktions- und Logistikregelung Aufträge so disponieren, dass Transportzeiten und freie Kapazitäten besser zueinander passen. Die Anzahl der Transportmitteltypen ist prinzipiell nicht begrenzt. Entscheidend ist, dass sich je Typ unterschiedliche Logistikaufwände ergeben, sodass die Regelung diese Unterschiede nutzen kann. Schließlich spielen die Transportkosten eine wirtschaftliche Rolle. Sind sie sehr gering, lohnt sich eine komplexe Logistikregelung oft nicht, da Entscheidungen primär nach Terminkriterien getroffen werden. Sind die Transportkosten hingegen relevant, steigt der Anreiz, Logistikaufwände gezielt zu glätten und in die dezentrale Regelung einzubeziehen.

Die folgende Tabelle fasst die Randbedingungen zusammen, die für einen Einsatz der DPR und der PLR sprechen:

Kategorie	Kriterium	Geeignete Ausprägung
Produktionsstruktur	Art der Produktion	Batch-Produktion, Teilefertigung und Montage

	Organisationsform	Werkstätten, Nester/Inseln und Reihenproduktion
	Anzahl der Produktionssysteme (Werkstätten, Nester, Linien, ...)	3 oder mehr
	Mittlere Anzahl Anlagen bzw. Arbeitsplätze pro Produktionssystem	beliebig
Anlagen/Arbeitsplätze	Gesamtzahl einzelner Anlagen bzw. Arbeitsplätze	3 oder mehr
	Verfügbarkeit der Anlagen bzw. Arbeitsplätze (technisch + organisatorisch)	beliebig
Produktionsaufträge	Unterschiedlichkeit der Losgrößen	beliebig
	Anzahl Aufträge im Mittel gleichzeitig in der Produktion	einer oder mehr pro Anlage bzw. Arbeitsplatz
	Schwankungen der Auftragszahlen bzw. Mengen	beliebig
	Schwankungen im Auftragsmix	beliebig
Arbeitspläne	Anzahl der Teile- bzw. Produktvarianten	beliebig
	Anzahl unterschiedlicher Arbeitspläne	mindestens 2
	Unterschiedlichkeit der Vorgabezeiten (Planzeiten) je AVO	beliebig
	Mittlere Anzahl AVOs je Arbeitsplan	mindestens 3
	Gemeinsame Reihenfolge der AVOs (Standard-Auftragsfluss)	maximal 2/3 gemeinsame AVO-Reihenfolge
Auftragsfluss (wenn keine gemeinsame AVO-Reihenfolge)	einzelne AVOs entfallen	beliebig oft
	Schleifen im Arbeitsplan (gleiches Betriebsmittel mehrfach durchlaufen)	nicht bei allen Arbeitsplänen
	Unterschiedlichkeit der AVO-Reihenfolgen der Arbeitspläne	beliebig
Intralogistik	Verwendete Transportmittel (Mehrfachnennung möglich)	manuelle Transportmittel oder AGV/AMR mit mehreren Routen

	Anzahl der Transporte pro AVO	unterschiedliche Transportzahlen
	Unterschiedlichkeit der Transportzeiten	deutliche Unterschiede (Faktor 2 oder mehr)
	Anzahl unterschiedlicher Transportmitteltypen	beliebig
	Transportkosten insgesamt	mittleres bis hohes Potenzial
	Auslastung der Transportmittel	hoch
	Verlauf des Transportaufwands	schwankender Transportbedarf

Abbildung 21: Relevante und geeignete Produktionsparameter für den Einsatz einer PLR

Implementierungsleitfaden: Möglichkeit zur Integration des PLR-Moduls in die bestehende Systemlandschaft

In der im Projektverlauf untersuchten Implementierungsmöglichkeit wird das Produktions- und Logistikregelungsmodul (PLR-Modul) als eigenständige Komponente in die bestehende IT-Landschaft eingebunden. Es greift nicht in die grundlegende Auftragslogik von ERP, MES und Warehouse-Management-System (WMS) ein, sondern ergänzt diese Systeme um eine operative Regelungsebene, die Belegungs- und Transportentscheidungen trifft und die Logistikauslastung glättet. Die Kommunikationskanäle sind in der folgenden Grafik zwischen den bestehenden Planungs- und Steuerungssystemen in blau dargestellt. Die erforderlichen Kommunikationskanäle durch eine dezentrale Produktionsregelung, sind rot dargestellt. Für eine im Projekt untersuchten Glättung der Logistikbedarfe werden weitere Kommunikationskanäle benötigt, die in orangener Farbe dargestellt sind.

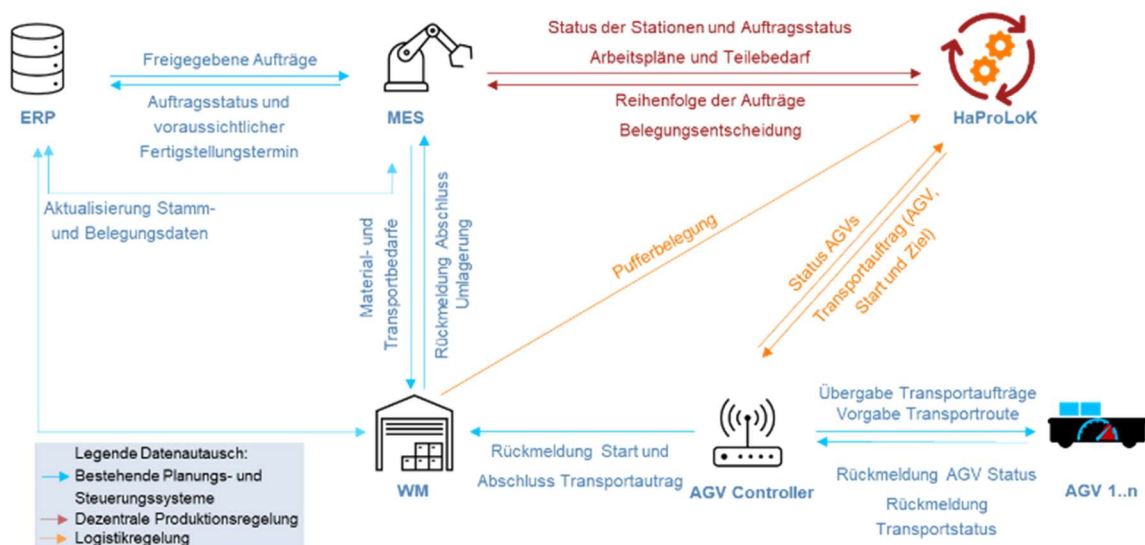


Abbildung 22: Konzeptmodell der PLR

Das in diesem Leitfaden als „PLR-Modul“ bezeichnete Element steht in erster Linie für die Regelungslogik der dezentralen Produktions- und Logistikregelung. Diese Logik muss nicht zwingend als eigenständiges Softwaremodul umgesetzt werden, sondern kann in unterschiedlicher Form in der Systemlandschaft eines Unternehmens wirken.

Das PLR-Modul erhält seine Produktionsdaten in dieser Variante über eine Schnittstelle zum MES. Vom MES bekommt es den Status der Stationen, also beispielsweise Informationen darüber, welche Arbeitsplätze frei, belegt oder gestört sind. Außerdem werden der Auftragsstatus, die relevanten Arbeitspläne sowie der Teilebedarf übergeben. Auf dieser Basis kann das PLR-Modul für jede Station und jeden Auftrag entscheiden, welcher Auftrag weiterbearbeitet werden soll. Diese Art der Datennutzung entspricht im Wesentlichen der dezentralen Produktionsregelung nach Brinzer.

Zusätzlich benötigt das PLR-Modul Informationen zur Pufferbelegung, um Materialverfügbarkeit und Bestände an Ein- und Ausgangspuffern in die Regelung einzubeziehen. Diese Daten kommen vom Warehouse-Management-System. Das WMS kennt Lagerbestände, Pufferplätze und deren Belegung und kann dem PLR-Modul melden, wo Material bereits verfügbar ist und wo sich Bestand aufbaut. Diese Informationen werden sowohl für die Produktions- und Logistikregelung als auch für die spätere Entscheidung herangezogen, ob und wann ein Transport ausgelöst wird.

Neu im Vergleich zur reinen Produktionsregelung ist, dass das PLR-Modul bei Integration der Logistikregelung auch Daten über den Status der Transportfahrzeuge berücksichtigt. Ziel ist es, die verfügbare Logistikkapazität mit der prognostizierten Transportlast abzugleichen und Arbeitsaufträge die Transportaufträge induzieren, so zu terminieren, dass die Auslastung der Flotte geglättet wird. Das PLR-Modul erhält diese Fahrzeugstatusdaten vom Flottencontroller. Der Flottencontroller liefert beispielsweise Informationen darüber, welche Fahrzeuge verfügbar sind, sich in einer Lastfahrt oder Leerfahrt befinden oder aufgrund von Störungen nicht zur Verfügung stehen. Dadurch kann das PLR-Modul seine Belegungsentscheidungen nicht nur an Produktionskapazitäten und Materialverfügbarkeit ausrichten, sondern auch an der aktuell und zukünftig erwarteten Transportkapazität.

Aus den Entscheidungen des PLR-Moduls entstehen sowohl Bearbeitungsfreigaben als auch Transportaufträge. Auf der Produktionsseite übermittelt das PLR-Modul an das MES, welche Aufträge an welcher Station als Nächstes bearbeitet werden sollen und in welcher Reihenfolge wartende Aufträge priorisiert werden. Das MES setzt diese Entscheidungen in konkrete Steuerbefehle an die Stationen um. Auf der Logistikseite sendet das PLR-Modul Transportaufträge an den Flottencontroller. Jeder Transportauftrag enthält mindestens die benötigte Fahrzeugart, die erforderliche Fahrzeuganzahl sowie Start- und Zielposition des Transports, etwa von einem Ausgangspuffer einer Station zu einem Eingangspuffer einer anderen Station oder von einer Lagerzone zu einer Station. Der Flottencontroller plant diese Transportaufträge in die Flotte ein, weist sie einzelnen Fahrzeugen zu und meldet Statusänderungen zurück.

Die bestehenden Datenflüsse zwischen ERP, MES, WMS und Flottencontroller grundsätzlich erhalten. Das MES sendet Material- und Transportbedarfe an das WMS, sodass das WMS Ein- und Auslagerungen sowie Umlagerungen anstößt. Das WMS gibt Rückmeldungen über den Abschluss dieser Umlagerungen an das MES. Der Flottencontroller wiederum informiert das WMS über den Start und den Abschluss von Transportaufträgen, sodass das WMS seine Bestände und Buchungen aktualisieren kann. Zwischen ERP und WMS ist zusätzlich weiterer bestehender Datenaustausch denkbar, der hier nicht im Mittelpunkt steht.

Zwischen MES und ERP besteht weiterhin der klassische Austausch: Das ERP-System übergibt freigegebene Produktionsaufträge mit Terminvorgaben an das MES, während das MES den Auftragsstatus und den voraussichtlichen Fertigstellungstermin zurückmeldet. Außerdem werden zwischen ERP und MES Stamm- und Belegungsdaten wie Arbeitspläne, Stücklisten oder Ressourcenstrukturen aktualisiert. Das PLR-Modul wird in diese Landschaft als zusätzlicher, spezialisierter Dienst eingebunden, der Entscheidungslogik bereitstellt, ohne die Rollen der bestehenden Systeme grundlegend zu verändern.

Implementierungsleitfaden: Ort der Implementierung des PLR-Moduls

Das PLR-Modul, also die Komponente, die die Regelungsberechnungen durchführt, kann an unterschiedlichen Stellen in der System- und Steuerungsarchitektur eines Unternehmens implementiert werden. Grundsätzlich lassen sich drei typische Ausprägungen unterscheiden, die sich vor allem darin unterscheiden, ob die Rechenlogik eher nah an den physischen Ressourcen, als zentraler Dienst oder in ein bestehendes System integriert ausgeführt wird.

In einer ersten Ausprägung wird die Regelungslogik möglichst dezentral in cyber-physischen Systemen auf Shopfloor-Ebene umgesetzt. Maschinen, Anlagen und Transportfahrzeuge werden dann als eigenständige Einheiten betrachtet, die über lokale Rechenleistung und Kommunikation verfügen. Die lokalen Steuerungen erfassen Zustände wie Belegung, Störungen, Pufferstände und Fahrzeugstatus, werten diese anhand der PLR-Regeln aus und treffen eigenständig Entscheidungen über Freigaben zur Weiterbearbeitung eines Auftrags und Transportanforderungen. Die Entscheidungsmuster der PLR werden dabei als Algorithmen in diesen lokalen Steuerungen hinterlegt. Der Vorteil dieser Variante liegt in einer sehr guten Echtzeitfähigkeit, einer verteilten Rechenlast und einer hohen Robustheit gegenüber dem Ausfall einzelner Komponenten. Allerdings steigt der Aufwand für Implementierung, Wartung und Rollout von Updates, da die Logiken auf viele Einheiten verteilt sind.

In einer zweiten Ausprägung wird das PLR-Modul als zentraler Service auf einem Unternehmensserver, einem Edge-Server im Produktionsnetz oder in einer Cloud-Umgebung betrieben. Maschinen, WMS, Flottencontroller und MES melden ihre Zustände und Bedarfe an diesen Dienst, der darauf basierend Belegungs- und Transportentscheidungen berechnet und wieder an die beteiligten Systeme zurückspeilt. Die Regelung ist damit logisch zentralisiert. Diese Variante ist in der Regel gut wartbar, da die Regelungslogik an einem Ort gebündelt ist und dort weiterentwickelt und überwacht werden kann. Versionierung, Monitoring und IT-Sicherheit lassen sich zentral organisieren. Gleichzeitig müssen Netzwerkstabilität und Latenzzeiten ausreichend gut sein, damit die Regelung in der notwendigen zeitlichen Auflösung reagieren kann. Im Kontext der PLR bedeutet Echtzeitfähigkeit, dass die Auftragssteuerung direkt nach Bearbeitungsende reagiert und den nächsten Auftrag prioritätsbasiert auswählt. Wartezeiten zwischen den Bearbeitungen müssen vermieden werden und die Berechnung soll auf möglichst aktuellen Systemzustandsdaten beruhen. Fällt der zentrale Dienst aus, ist die Regelung temporär eingeschränkt, sodass ggf. Fallback-Strategien vorgesehen sein sollten.

In einer dritten Ausprägung werden die PLR-Funktionalitäten in ein bestehendes System integriert, typischerweise in das MES, alternativ in ein leistungsfähiges WMS oder einen Leitstand. Die Regelungsalgorithmen werden dann als Modul innerhalb dieses Systems realisiert. Das MES besitzt ohnehin Zugriff auf die relevanten Produktionsdaten wie Auftragsstatus, Stationszustände und Arbeitspläne. Über Schnittstellen zum WMS und zum Flottencontroller können zusätzlich Puffer- und Fahrzeugstatusdaten eingebunden werden. Dadurch ist das MES in der Lage, neben der klassischen Ausführungssteuerung auch die PLR-Regellogik abzubilden. Der Vorteil dieser Lösung liegt in einer reduzierten Systemvielfalt und der Nutzung

vorhandener Oberflächen und Bedienkonzepte. Allerdings muss das integrierende System die zusätzliche Rechen- und Kommunikationslast tragen können und die Flexibilität zur Umsetzung des spezialisierten Regelungsverfahrens kann durch die Architektur des jeweiligen Systems begrenzt sein.

Welche dieser Varianten am besten geeignet ist, hängt von der bestehenden IT- und OT-Landschaft, den Echtzeit-Anforderungen, der vorhandenen Infrastruktur und den unternehmensspezifischen Präferenzen hinsichtlich Wartbarkeit, Verantwortlichkeiten und Systemarchitektur ab. Wichtig ist, dass die gewählte Implementierung sicherstellt, dass das PLR-Modul Zugriff auf die genannten Datenquellen (MES, WMS, Flottencontroller) hat und seine Entscheidungen rechtzeitig an die entsprechenden Systeme zurückspielen kann.

Implementierungsleitfaden: Weitere Implementierungsmöglichkeiten

Neben der im Rahmen des Projekts beschriebenen Ausprägung als eigenständiges PLR-Modul, das über definierte Schnittstellen an MES, WMS, Flottencontroller und ERP angebunden wird, lassen sich zwei weitere Implementierungsvarianten unterscheiden.

- **Integration der PLR-Funktionalitäten in bestehende Systeme:**

In dieser Variante wird auf ein separates PLR-Modul verzichtet. Die Regelungslogik wird direkt in ein bereits etabliertes System integriert, typischerweise in das MES, alternativ in ein leistungsfähiges WMS oder einen Leitstand. Die Produktionsregelung nutzt dann unmittelbar die im MES vorhandenen Daten zu Auftragsstatus, Stationszuständen und Arbeitsplänen. Puffer- und Fahrzeugstatusdaten werden über Schnittstellen aus dem WMS und vom Flottencontroller in dieses System eingebunden. Belegungs- und Transportentscheidungen werden innerhalb des MES/WMS berechnet und von dort aus an Stationen und Flotte weitergegeben. Der Vorteil dieser Lösung liegt in einer reduzierten Systemvielfalt und der Nutzung vorhandener Oberflächen, Datenmodelle und Administrationsstrukturen. Gleichzeitig muss das integrierende System für die zusätzliche Rechenlast und Kommunikationsdichte ausgelegt sein, und der Gestaltungsspielraum für die Regelungsverfahren hängt stärker von der Architektur und den Anpassungsmöglichkeiten des jeweiligen Systems ab.

- **Verteilte, CPS-nahe Umsetzung der PLR-Logik:**

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die PLR-Regelung konsequent dezentral in cyber-physischen Systemen auf der Shopfloor-Ebene umzusetzen. Maschinen, Anlagen, Puffer und Transportfahrzeuge werden dabei als eigenständige, vernetzte Einheiten verstanden, die lokale Zustände erfassen und anhand hinterlegter PLR-Regeln selbst Entscheidungen treffen, zum Beispiel zur Freigabe eines Auftrags oder zur Anforderung eines Transports. Die Koordination erfolgt über einfache, standardisierte Nachrichten zwischen diesen Einheiten, während übergeordnete Systeme wie MES, WMS und Flottencontroller vor allem Planungs-, Monitoring- und Dokumentationsaufgaben übernehmen. Diese Variante bietet eine hohe Echtzeitfähigkeit, eine gute Skalierbarkeit und eine hohe Robustheit gegenüber dem Ausfall einzelner Komponenten. Sie eignet sich insbesondere für Produktionsumgebungen, in denen bereits CPS- oder IIoT-Strukturen vorhanden sind oder neu aufgebaut werden. Gleichzeitig erfordert sie eine sorgfältige Konzeption der lokalen Regelalgorithmen und Kommunikationsprotokolle.

Projektspezifische Umsetzung in einem Unternehmen:

Welche dieser Varianten für ein Unternehmen geeignet ist, hängt stark von der bestehenden Systemlandschaft, den Echtzeitanforderungen, den organisatorischen Rahmenbedingungen und den geplanten

Erweiterungen ab. Bei Interesse an einer Implementierung der dezentralen Produktions- und Logistikregelung kann daher in Kooperation mit unseren Forschungseinrichtungen eine individuelle Lösung entwickelt werden, die die technische Architektur, die benötigten Schnittstellen und die schrittweise Einführung in der jeweiligen Produktionsumgebung projektspezifisch auslegt.

Die Simulation wurde in einer ersten Version im Videoformat visualisiert und derart aufbereitet dem Projektbegleitenden Ausschuss präsentiert. Eine öffentliche Version wird auf der Online-Informationsplattform bereitgestellt und veranschaulicht begleitend zu den weiteren Inhalten die dezentrale Produktions- und Logistikregelung im untersuchten Fallbeispiel.

2 Verwendung der Zuwendung

Verwendung der Zuwendung FST 1 (IFT):

- 12 Monate HPA-Gruppe A: 140.836,44 €
- Bruttoentgelte für Hilfskräfte: 12.232,25 €
- Pauschale für Personalausgaben: 10.714,81 €
- Pauschale für sonstige Ausgaben: 32.756,69 €

Verwendung der Zuwendung FST 2 (KMP):

- 20 Monate HPA-Gruppe A: 167.835,44 €
- Pauschale für Personalausgaben: 11.748,48 €
- Pauschale für sonstige Ausgaben: 35.916,78 €

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten sind für die Zielsetzung des Projektes notwendig. Die Arbeitspakete eins und zwei wurden entsprechend dem Forschungsantrag bearbeitet. Sie dienen als Grundlage für die weiteren Arbeitspakete. Der Projektstart wurde auf 01.05.2023 verschoben. Die benötigte Zeit der in 2023 bearbeiteten AP entspricht der für das jeweilige AP geplanten Zeit. Das AP 3 wurde entsprechend dem Forschungsantrag bearbeitet. Die AP 4 und AP 5 wurden bearbeitet. Die Ergebnisse aus AP 4 dienen als Grundlage für das AP 5 sowie den Abschlussbericht in AP 6. Die benötigte Zeit für das in 2024 bearbeitete AP 3 entspricht der für das AP geplanten Zeit. Für das AP 4 wird jedoch ein zusätzlicher Monat an Zeit benötigt und weitere drei Monate, um die Übertragbarkeit der PLR auf abweichende Szenarien weiter zu untersuchen. Das AP 5 wurde in der geplanten Zeit erarbeitet.

4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Die erzielten Ergebnisse bieten sowohl einen wissenschaftlich-technischen als auch einen wirtschaftlichen Nutzen, insbesondere für KMU. Wissenschaftlich wird durch die Entwicklung einer dezentralen Produktions- und Logistikregelung ein neuartiger Ansatz zur Optimierung von Produktions- und Logistikprozessen in variantenreichen Montage- und Fertigungssystemen bereitgestellt. Dieser Ansatz kombiniert lokale, dynamische Entscheidungsprozesse für Produktion und Logistik und verbessert so die Ressourcennutzung und Termintreue. Wirtschaftlich profitieren KMU durch eine verbesserte Auslastung ihrer Ressourcen, die Reduktion von Beständen und eine gesteigerte Flexibilität in der Produktion, ohne dass hohe Investitionen in neue Infrastruktur erforderlich sind. Der innovative Beitrag dieser Arbeit liegt in der Integration von Produktion und Logistik in einer dezentralen Regelung, die auf existierenden IT-Systemen aufbaut und gleichzeitig dynamische Anpassungen im turbulenten Produktionsumfeld ermöglicht. Die industrielle Anwendbarkeit ist gegeben, da der Ansatz flexibel in bestehende Produktionsumgebungen integriert werden kann, was KMU eine effiziente und kostengünstige Umsetzung ermöglicht.

5 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Mittels der frei zugänglichen Informationsplattform (www.kmp.hs-mannheim.de, freigeschaltet ab 01/2025) können sich KMU mit geringem Aufwand über das Potential des Ansatzes informieren und den erforderlichen Finanzierungsaufwand zur Implementierung abschätzen. Ein Entscheidungsbaum bietet die Möglichkeit, eigene Produktionsparameter einzugeben um eine Aussage über die Eignung der entwickelten Produktionsregelung bzw. Produktions- und Logistikregelung (PLR) für die eigene Produktion zu erhalten. Der ergänzende Leitfaden zur Umsetzung bietet eine Anleitung für eine einfache und aufwandsarme Integration in bestehende Betriebsstrukturen. Zusätzlich unterstützen die Forschungsstellen interessierte Unternehmen bei der Umsetzung nach Projektende in Form angewandter Forschung. Weitere Transfermaßnahmen sind nachfolgend aufgelistet.

6 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Zeitpunkt
1. Projekttreffen des PA	Juli 2023
Interview Fragebogen Runde 1	
Interview Fragebogen Runde 2	
Vortrag inkl. Veröffentlichung auf der WGTL	September 2024
2. und 3. Projekttreffen	Sommer 2024 / Frühjahr 2025
Vorstellung des Projekts auf dem Messestand des IFTs im Rahmen der LogiMAT	März 2025
Labday mit Projektpräsentation vor Wirtschaftsvertretern an der Hochschule Mannheim	April 2025
4. Projekttreffen	Sommer 2025
Vortrag inkl. Veröffentlichung auf der WGTL	Oktober 2025

7 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Zeitpunkt
Ergebnisvorstellung beim Arbeitskreis Matrixproduktion	Dezember 2025
Akademische Ausbildung	ständig

8 Literaturverzeichnis

- Brinzer, B. (2005): Produktionsregelung für die variantenreiche Serienfertigung. Dissertation. Universität Stuttgart. Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen.
- Brinzer, B.; Kemkemer, J. (2012): Management mit Bestand – Fließende Fertigung mit dezentraler Fertigungsregelung. In: Industrie Management 28 (2012) 1, S. 17-21.
- Engelhardt, Philipp Ronald (2015): System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Zugl.: München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Diss., 2015. München: Utz (Forschungsberichte IWB / Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München, 299).
- Grundstein, Sebastian (2017): Fertigungsregelung flexibler Fließfertigungen und Werkstattfertigungen zur Einhaltung von Lieferterminen. Dissertation. Universität Bremen.
- Isenberg, Marc-Andre (2016): Produktionsplanung und -Steuerung in mehrstufigen Batchproduktionen. Methoden der Loskomposition und -terminierung bei stufenspezifischen Auftragsfamilien. Dissertation. Universität Bremen, Bremen.
- Lödding, H. (2016): Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- Märtens, A.; Elsweier, M.; Nickel, R. (2007): Adaptive, dezentrale Produktionssteuerung. In: wt 97 (6), S. 471-478.
- Niehues, Michael Richard (2017): Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung. Dissertation. Herbert Utz Verlag.
- Ostgathe, Martin (2012): System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2012. München: Utz (Forschungsberichte / IWB, 265).
- Pielmeier, Julia Nina (2019): System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung. Dissertation. Technische Universität München.
- Weckmann, Sebastian (2017): Dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung der Produktion. Dissertation. Online verfügbar unter <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-ds-111243>.