

Agentenbasierte Transportsteuerung für Pickup & Delivery in der Produktion

Agent-based transport control for pickup & delivery in production

Nina Vojdani
Axel Zahn

Universität Rostock

Herausforderungen wie die zunehmende Produktheterogenität, steigende Produktionskosten und die Forderung nach immer kürzeren Lieferzeiten durch den Kunden verlangen nach der Implementierung von flexiblen Produktionskonzepten. Diese Möglichkeit kurzfristiger Änderungen am Produktionsprogramm wirkt sich auf die Materialbereitstellungsprozesse aus. Es gilt, anpassungsfähige Konzepte für den innerbetrieblichen Materialtransport zu entwickeln. Dieser Beitrag stellt ein Konzept zur Implementierung des Pickup & Delivery-Ansatzes innerhalb einer intelligenten Produktion vor. Zur Lösung des daraus entstehenden Pickup & Delivery-Problems wird ein Steuerungssystem auf Basis eines Multi-Agenten-Systems entwickelt. Das Konzept findet Anwendung bei der Versorgung von Fertigungssystemen innerhalb einer beispielhaften Werkstattfertigung. Das entwickelte Steuerungssystem wird in einer Materialflusssimulation umgesetzt.

[Schlüsselwörter: Transportsteuerung, Pickup & Delivery, Multi-Agenten-System, Werkstattfertigung, Simulation]

Challenges such as increasing product heterogeneity, rising production costs and the demand for shorter delivery times by the customer require the implementation of flexible production concepts. This possibility of changes to the production program at short notice has an impact on material supply processes. It is necessary to develop more adaptive concepts for internal material transport. This paper presents a concept for the implementation of the pickup & delivery approach within an intelligent production. To solve the resulting pickup & delivery problem, a control system based on a multi-agent system is developed. The concept is applied to the supply of manufacturing stations within an exemplary shopfloor production. The developed control system is implemented in a material flow simulation.

[Keywords: transport control, pickup & delivery, multi agent system, shopfloor manufacturing, simulation]

1 EINFÜHRUNG

Die steigende Individualität der Produkte erfordert den Einsatz flexibler Produktions- und Logistiksysteme. Es gilt, die steigende Produktvarianz bei gleichbleibender Qualität zu möglichst geringen Kosten und in schnellstmöglicher Zeit zu bewältigen. Aktuell verwendete Planungs- und Steuerungssysteme im Bereich des innerbetrieblichen Materialflusses kommen den Anforderungen an Dynamik und Wandlungsfähigkeit nur bedingt nach.

Die Zunahme der kundenindividuellen Produkte unterstreicht die Bedeutung der Werkstattfertigung, in welcher bedingt durch die räumliche Distanz ein hoher Aufwand für den Transport der Materialien und Halbfabrikate zwischen den Werkstätten entsteht. [Nie16], [KMO+12] Daraus resultieren Wartezeiten vor und nach der Bearbeitung auf einer Station. Hinzu kommen potenzielle Rüstzeiten, welche sich aus der Heterogenität des Produktspektrums ergeben. [Bra09] Die damit einhergehenden erhöhten Durchlaufzeiten bringen negative Auswirkungen auf die Termintreue mit sich. Daraus ergibt sich letztlich eine Diskrepanz zwischen der notwendigen Flexibilität eines Systems und der Forderung nach kurzen Lieferzeiten bei hoher Liefertermintreue. [Fle05]

Der Pickup & Delivery-Ansatz stellt im Rahmen der Distribution ein etabliertes Steuerungskonzept für bedarfsgerechte Warentransporte dar. Dabei werden nur nachgefragte Güter entsprechend einer Bestellung an den jeweiligen Kunden geliefert. Neben Verteilverkehren an Delivery-Points besteht die Möglichkeit für Sammelverkehre an sogenannten Pickup-Points. [Tem18] Das damit verbundene Tourenplanungsproblem wird in der Literatur als Pickup & Delivery-Problem (PDP) diskutiert.

Das PDP ist bereits seit längerer Zeit Bestandteil wissenschaftlicher Untersuchungen. Ausgehend vom klassischen Vehicle Routing Problem hat sich eine Vielzahl von Autoren mit der Entwicklung neuer Optimierungsverfahren beschäftigt. Die Publikationen in diesem Bereich konzentrieren sich vorrangig auf Szenarien außerhalb einer Produktionsumgebung. Nur wenige Autoren untersuchen

die Anwendungspotentiale des Pickup & Delivery-Ansatzes im Zusammenhang mit der innerbetrieblichen Logistik.

Chen et al. [CAB+21] beschäftigen sich mit der Auftragsallokation sowie der Routenplanung von Robotern für die Durchführung von Transportprozessen innerhalb von automatisierten Lagerhäusern. Mit Hilfe eines Multi-Agenten-Systems (MAS) erfolgt die Auftragszuweisung unter Berücksichtigung tatsächlicher Lieferkosten. Der Ansatz beinhaltet die Nutzung einer Heuristik zur Betrachtung der Grenzkosten sowie eine Metaheuristik auf Grundlage einer großen Nachbarschaftssuche zur Verbesserung der Ergebnisse. Das Optimierungsziel liegt in der Minimierung der Gesamtfahrzeit unter Vermeidung von Kollisionen.

Wu et al. [WLT+21] verwenden ebenfalls ein MAS zur Handhabung des PDP und berücksichtigen dabei individuelle Fristen zur Ausführung der Aufträge. Es handelt sich dabei um einen kombinierten Ansatz zur Auftragsallokation und der Routenplanung unter Einbezug der Zustände der jeweiligen Agenten innerhalb von zwei beispielhaften Lagerhäusern. Die Bearbeitungsreihenfolge der einzuplanenden Transportaufträge wird dabei durch einen prioritätsbasierten Rahmenplan gesteuert. Das Optimierungsziel liegt in der Maximierung der Erfolgsrate bei der Durchführung von Transporten innerhalb der jeweiligen Deadline.

Baiou et al. [BMQ+22] beschäftigen sich mit der Steuerung einer Flotte von Automated Guided Vehicles (AGVs) innerhalb eines intralogistischen Systems. Die Steuerung besteht aus einer hierarchischen Überwachungsstruktur und berücksichtigt die Einplanung von Pickup & Delivery-Aufgaben sowie die Gewährleistung eines sicheren Betriebes an Kreuzungen. Der Ansatz beruht auf der Verwendung einer Bilevel-Optimierung sowie eines A*-Algorithmus. Angestrebt wird ein optimaler Kompromiss aus Geschwindigkeit und minimalem Risiko bei der Durchführung der Transportaufträge.

Pakpahan et al. [PKS+18] betrachten das PDP vor dem Hintergrund des innerbetrieblichen Materialflusses in einer beispielhaften Werkstattfertigung. In einem kleinen Anwendungsszenario werden zwei unterschiedliche Prioritätsregeln für den Transport von Materialien und Halbfabrikaten zwischen den Stationen untersucht. Neben dem Bauteil mit der längsten Wartezeit soll auch das räumlich nächstgelegene Bauteil gewählt werden können, um die Durchlaufzeit zu minimieren. Die Auswertung bezieht sich auf die Auslastungsgrade der Fahrzeuge sowie die Durchlaufzeiten der Produkte.

Schulte et al. [Sch20] beschäftigen sich mit regelmäßigen Warenbewegungen zwischen verschiedenen Einrichtungen einer Produktion. Das Optimierungsproblem besteht in einem zyklischen PDP mit verschiedenen Transportgütern. Der Lösungsansatz basiert auf einem mathematischen Modell unter Verwendung einer zweistufigen Heuristik. Die Optimierung einer initialen Lösung erfolgt

mit Hilfe einer adaptiven großen Nachbarschaftssuche. Die Ergebnisse werden mit den Daten einer Gurobi Lösung verglichen.

Die Zielsetzung dieses Beitrags besteht in der Implementierung des Pickup & Delivery-Ansatzes in einer intelligenten Produktion. Zur Handhabung der genannten intralogistischen Herausforderungen wurde ein MAS entwickelt, welches die autonome Steuerung der Transport- und Fertigungsprozesse innerhalb einer Werkstattfertigung ermöglicht. Zur Überprüfung des entwickelten Konzepts wurde die Transportsteuerung mittels der Simulationssoftware Plant Simulation in einem experimentellen Modell abgebildet.

Der Beitrag ist wie folgt strukturiert: Zunächst wird in Abschnitt 2 das PDP näher erläutert. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 3 auf die theoretischen Grundlagen von MAS eingegangen, bevor in Abschnitt 4 das neu entwickelte Konzept zur Umsetzung des Pickup & Delivery-Ansatzes zur intelligenten Steuerung der Transport- und Fertigungsprozesse vorgestellt wird. Anschließend wird die Implementierung des entwickelten Ansatzes innerhalb einer ereignisdiskreten Simulationsumgebung in Abschnitt 5 beschrieben. Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt durch eine Gegenüberstellung von zwei Modellvarianten in Abschnitt 6. Die Vorteile des Pickup & Delivery-Ansatzes werden durch einen Vergleich mit einem Modell ohne Pickup & Delivery veranschaulicht. Abschnitt 7 beinhaltet eine kurze Zusammenfassung.

2 DAS PICKUP & DELIVERY-PROBLEM

Die Aufgabe der Tourenplanung liegt in der Zusammenfassung mehrerer kleinerer Transportaufträge, welche das zu nutzende Fahrzeug einzeln betrachtet nicht auslasten. Die Kombination mehrerer solcher Transporte resultiert in einer Route bestehend aus mehreren Haltepunkten. Die Tourenplanung kann sich dabei auf den Sammelverkehr, den Verteilverkehr sowie eine Kombination aus diesen beziehen. Ausgangspunkt einer jeden Route stellt ein Depot dar, von welchem aus die Fahrzeuge ihre Fahrt starten und an welchen sie nach Beendigung der Transportprozesse zurückkehren. [Tem18]

Tabelle 1: Merkmale von Tourenplanungsproblemen nach [Kry09]

Merkmal		Ausprägungen
Fahrzeuge	Anzahl	<ul style="list-style-type: none"> • ein Fahrzeug • mehrere Fahrzeuge
	Eignung	<ul style="list-style-type: none"> • jedes Fahrzeug für jeden Auftrag • Zuordnung bestimmter Aufträge zu Fahrzeugen
	Homogenität	<ul style="list-style-type: none"> • alle Fahrzeuge sind gleich • Einsatz unterschiedlicher Fahrzeuge
	Kapazitätsbeschränkung	<ul style="list-style-type: none"> • keine • begrenzte Kapazität
	Fahrzeugeinsatzzeit	<ul style="list-style-type: none"> • keine Begrenzung • Begrenzung
	Standort der Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> • ein Depot • mehrere Depots • kein zentraler Standort
Aufträge	Art des Lieferverkehrs	<ul style="list-style-type: none"> • Sammel- und Auslieferungsverkehr (VRP) • Be- und Entladeort für jeden Auftrag gegeben (PUPD)
	Reihenfolge der Aufträge (Prioritäten)	<ul style="list-style-type: none"> • ist gegeben • ist nicht gegeben
	Zeitfenster	<ul style="list-style-type: none"> • keine • weiche (Verstoß mit Strafen) • harte (zwingend einzuhalten)
	Kapazität	<ul style="list-style-type: none"> • FTL • LTL

Entscheidend für die Planung sind die verschiedenen zugrundeliegenden Parameter, Tabelle 1. Neben der Anzahl zu beliefernder Kunden und deren Bedarfsmengen sind die Distanzen zwischen den Haltepunkten und somit die Fahrzeiten entscheidend. Des Weiteren steht für die Durchführung der Transporte nur eine gewisse Anzahl an Fahrzeugen mit beschränkten Kapazitäten zur Verfügung. Ziel der Planung ist eine Minimierung der Gesamtstrecke zur Erfüllung aller Transportaufträge bzw. die Minimierung der dafür erforderlichen Zeit. [Tem18]

Mit Hilfe eines Tourenplanungsalgorithmus lassen sich optimale Abfahrreihenfolgen auf Grundlage der definierten Parameter bestimmen. Bedingt durch die Komplexität des Problems zählt dieses zur Klasse der NP-schweren Probleme. [Pie18] Die Größe realer Planungsprobleme erfordert daher die Anwendung geeigneter Approximationsverfahren, welche in vertretbarer Zeit hinreichend gute, aber nicht optimale Lösungen bereitstellen. Neben Konstruktionsverfahren wie dem Winkelgruppierungsverfahren und unterschiedlichen Ausprägungen des Savings-Verfahrens wird auf Metaheuristiken zurückgegriffen. [Pre14]

In der Praxis liegen zumeist nicht alle relevanten Informationen bereits zum Planungszeitpunkt vor. Während der Ausführung bestehender Transportaufträge können neue hinzukommen oder sich bestehende Aufträge ändern. Darüber hinaus ist es möglich, dass Kunden ihre Bestellungen stornieren und somit Haltepunkte entlang der Route entfallen. Zudem können Störungen der Fahrzeuge, auch entlang der Strecke, den Planungsprozess beeinflussen.

Unterliegt ein Tourenplanungsproblem derartigen externen Einflüssen, wird von einem dynamischen Planungsproblem gesprochen. Für die Beurteilung der Durchführbarkeit einer Routenänderung gilt es, die Auswirkungen auf die Termintreue der bereits eingeplanten Haltepunkte zu betrachten. Des Weiteren müssen die kapazitiven Limitierungen der Fahrzeuge und deren maximale Reichweite berücksichtigt werden. [Kry09]

Beim PDP handelt es sich um eine Sonderform des „Vehicle Routing Problems with Backhauls“. Neben einer Auslieferung von Bestellungen an die Kunden besteht hier die Möglichkeit, Güter von einem Kunden abzuholen. An einem Haltepunkt können demnach Güter abgegeben und neue Waren für nachfolgende Kunden aufgenommen werden. Bei der Planung eines PDP ist kein definiertes Ende des Auftragsaufkommens vorgegeben. In einem solchen Szenario kann der Planungshorizont als eine zeitliche Spanne definiert werden. Ein derartiges dynamisches Planungsproblem kann nicht vollständig optimal gelöst werden, da die Informationen nur bis zu dem jeweiligen Betrachtungszeitpunkt sicher vorliegen. Daher wird das Gesamtproblem in mehrere Teilprobleme zerlegt, welche sich mit Hilfe der vorhandenen Informationen lösen lassen. Sollte bei der Planung festgestellt werden, dass unter der Nutzung der bisher erstellten Routenpläne nicht alle Aufträge innerhalb der vorgegebenen Fristen durchführbar sind, kann eine Revidierung bestehender Routen erforderlich sein. Für kurzfristige Änderungen müssen entsprechende Informations- und Kommunikationstechnologien in das System implementiert werden. [Ric05]

3 MULTI-AGENTEN-SYSTEME

Die Entwicklungen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie bringen neue Möglichkeiten für die Gestaltung von Produktionssystemen mit sich. Das Ziel eines produzierenden Unternehmens muss es daher sein, die Vorteile einer vernetzten und automatisierten Produktion auf die eigenen Arbeitsabläufe anzuwenden. [Sod17] Cyber-physische-Systeme helfen dabei, die geplanten Herstellungsprozesse kontinuierlich zu überwachen und in angemessener Zeit auf sich ändernde Umstände oder Zielstellungen zu reagieren. Darauf aufbauend kann eine intelligente Fertigung mit autonom handelnden Produktionskomponenten konzipiert werden, welche in der Lage sind, im Bedarfsfall Korrekturen vorzunehmen, ohne dass ein menschliches Eingreifen erforderlich ist. [GSB+17]

Die NP-Vollständigkeit der zugrundeliegenden Planungsprobleme sowie die Möglichkeiten auftretender Störungen erschweren die Verwendung zentraler Planungs- und Steuerungssysteme. Das Gesamtproblem ist daher in mehrere kleinere Teilprobleme zu zerlegen, welche an verschiedene Entscheidungseinheiten übergeben werden. Eine Sonderform derartiger verteilter Systeme stellen MAS dar. [Mön06] Agenten kennzeichnen sich durch ihre Fähigkeit zum autonomen Handeln. Darüber hinaus sind sie in der Lage, untereinander sowie mit dem Anwender zu kommunizieren. Sie können Veränderungen in ihrer Umgebung erkennen und auf angemessene Weise auf diese reagieren. Zudem besitzen sie die Fähigkeit, Initiative zu zeigen und unter Berücksichtigung konkreter Zielvorgaben eigenständig Entscheidungen zu treffen. [Woo95]

Erst durch die Kommunikation und die Kooperation der Agenten können komplexe Problemstellungen gelöst werden. Die Zielsetzung liegt dabei in der effizienten Steuerung der Produktionsanlagen unter Berücksichtigung limitierter Ressourcen. Für eine erfolgreiche Umsetzung gilt es, eine geeignete Kommunikationsform für den Informationsaustausch zwischen den Agenten zu wählen. Mit Hilfe einer direkten Nachrichtenübermittlung zwischen solchen Agenten, die unmittelbar an der Lösung des betrachteten Teilproblems beteiligt sind, können irrelevante Inhalte vermieden und das Auftreten von fehlerhaften Interpretationen reduziert werden. Der Informationsaustausch kann dabei auch über mehrere Ebenen des zugrundeliegenden Systems erfolgen. [Lib11]

Die Einsatzmöglichkeiten von MAS sind sehr vielfältig. Zheng et al. [ZPP+20] kombinieren den MAS-Ansatz mit dem Konzept eines Digitalen Zwillings. Die Autoren konzentrieren sich in ihren Untersuchungen auf die Qualitätsüberwachung im Produktionsprozess. Durch die Integration von physischen Objekten, virtuellen Modellen, Daten des Digitalen Zwillings sowie Services und Verbin-

dungen zwischen den einzelnen Elementen wird die Möglichkeit zur Qualitätssicherung, Fehlerdiagnose und vorsorglichen Wartung geschaffen.

Im Rahmen einer kundenauftragsorientierten Fertigung stellt die Termintreue einen wesentlichen Wettbewerbsfaktor dar. Vojdani et al. [VEL17] nutzen ein MAS zur Feinplanung von Fertigungsaufträgen. Die mit Hilfe von klassischen PPS-Systemen erstellten Plandaten berücksichtigen die aktuelle Produktionssituation zumeist nicht hinreichend. Die Autoren nutzen daher mittels Simulation die Produktionsechtzeitdaten, um verlässliche Liefertermine zu bestimmen.

Chen et al. [CCD+21] untersuchen die Nutzungsmöglichkeiten von neuesten drahtlosen Technologien wie dem 6G-Mobilfunkstandard im Rahmen einer intelligenten Fabrik. Ihr Ansatz sieht dabei die kollaborative Zusammenarbeit von Multi-Roboter-Systemen in Produktion und Transport vor. Neben einer dynamischen Auftragszuweisung soll mit Hilfe des MAS-Ansatzes die Möglichkeit zum sozialen Lernen geschaffen werden. Die Autoren berücksichtigen dabei zudem Sicherheitsaspekte einer vernetzten Fertigung.

4 KONZEPT

4.1 RAHMENBEDINGUNGEN

Ausgangspunkt für die Untersuchungen im Rahmen dieses Beitrags stellt eine beispielhafte Getriebefertigung dar. Der Aufbau des Produktionssystems entspricht dem einer Werkstattfertigung, Abbildung 1. Je nach Produktvariante werden unterschiedliche Werkstätten angefahren. Somit ergeben sich für die verschiedenen Konfigurationen unterschiedliche Routen durch die Produktionsanlage. Die Herausforderung liegt schließlich im Transport der Materialien und Halbfabrikate. Bedingt durch die räumliche Distanz zwischen den Werkstätten ist der Einsatz von Transportfahrzeugen erforderlich. Es gilt, jedes der Bauteile zunächst an einem Pickup-Point aufzunehmen und anschließend an den Bedarfsort, den Delivery-Point, zu transportieren. Die Materialversorgung erfolgt nach dem einstufigen Supermarktprinzip.

Das zugrundeliegende PDP kann um zusätzliche Restriktionen erweitert werden, vgl. Abschnitt 2. Im gewählten Produktionsszenario stellt die Fahrzeuganzahl einen limitierenden Faktor dar. Jedes Fahrzeug ist für alle aufkommenden Transportaufträge geeignet. Die Kapazität der Fahrzeuge ist in Hinblick auf die maximale Anzahl gleichzeitig durchzuführender Aufträge begrenzt. Jedes Transportmittel kann bei der Auftragsallokation somit maximal zwei Aufträge erhalten. Vor diesem Hintergrund wird von einem Less-Than-Truckload-Problem gesprochen.

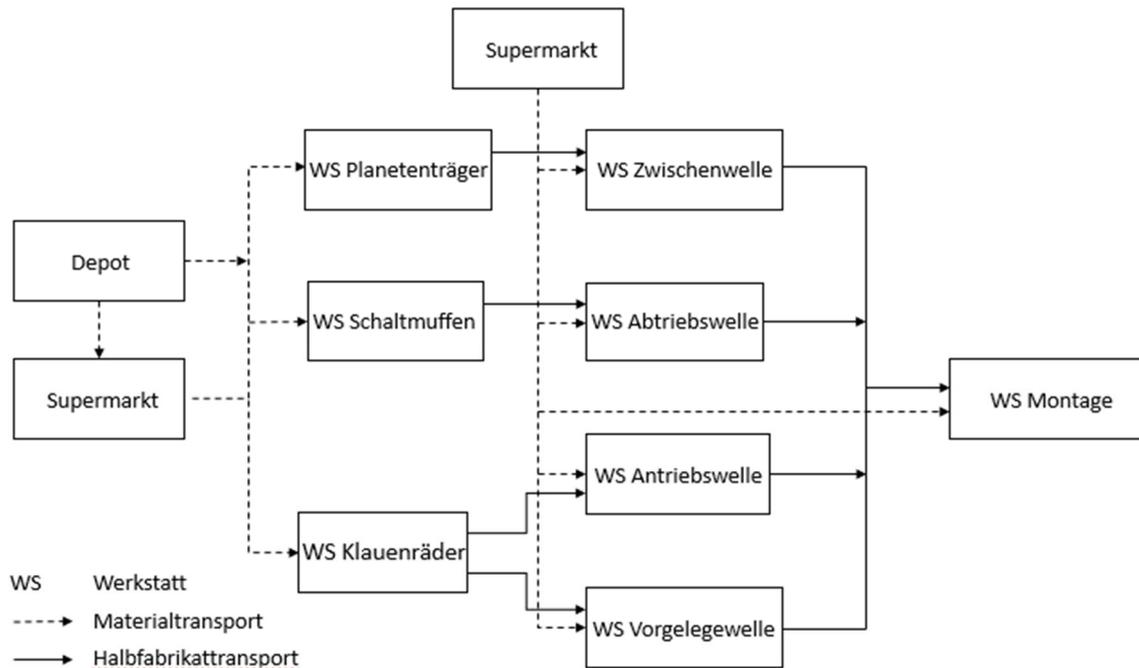


Abbildung 1: Konzeptioneller Aufbau der Getriebefertigung

Ausgangspunkt einer jeden Route stellt ein zentrales Depot dar, an dem eine Fahrt beginnt und auch endet. Je nach Auftragsituation können einzelne sowie eine Kombination mehrerer Abhol- und Bereitstellungsprozesse auftreten. Eine Priorisierung der Aufträge ergibt sich aus dem Zeitpunkt der Auftragsbekanntgabe. Ausgehend von diesem definieren sich zudem die Zeitfenster für die Bearbeitung an den einzelnen Stationen. Die Frist für die Bereitstellung basiert auf dem frühesten Zeitpunkt, zu dem eine der Stationen aufnahmebereit ist. Kann ein solches Zeitfenster nicht eingehalten werden, resultiert dies in einer Verlängerung der Durchlaufzeit.

Die Kundenbestellungen beziehen sich auf einzelne Getriebe unterschiedlicher Konfiguration. Zudem unterliegen die Eintrittszeitpunkte der Bestellungen Schwankungen. Das kontinuierliche Eintreffen neuer Aufträge erfordert die stetige Aktualisierung der Tourenplanung. Vor dem Hintergrund dieser Restriktionen kann das vorliegende Planungsproblem als PDP betrachtet werden.

4.2 AUFBAU DES MULTI-AGENTEN-SYSTEMS

Grundlage eines MAS ist die Abgrenzung und Definition der einzelnen Agententypen. Für das hier betrachtete Produktionsszenario lassen sich vier Arten von Agenten unterscheiden. Den Ausgangspunkt bildet der Auftragsagent (AA). Dieser tritt mit den Agenten der einzelnen Stationen (SA), der fahrerlosen Transportfahrzeuge (FTFA) und den Lageragenten (LA) in Form der Supermärkte und Depot in Verhandlung. Dem Standard der Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) folgend zeigt Abbildung 2 den Kommunikationsablauf innerhalb

des entwickelten MAS in Form eines Agent Unified Modeling Language (AUML)-Sequenzdiagramms. Nach Auftragsingang identifiziert der AA die Werkstätten, auf denen laut Konfiguration Fertigungs- bzw. Montageprozesse ausstehen. Die Stationen werden durch den AA um ein Angebot in Form eines Zeitpunktes gebeten, zu welchem sie in der Lage sind, den Auftrag zu bearbeiten.

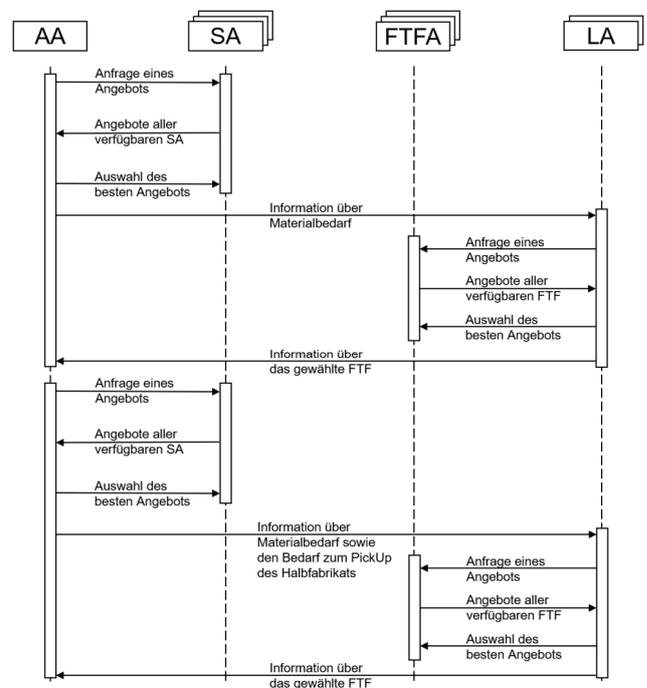


Abbildung 2: AUML-Sequenzdiagramm des Multi-Agenten-Systems

Alle in Frage kommenden Stationen erstellen daraufhin ein Angebot und übermitteln dieses an den AA. Entsprechend der Autonomie eines Agenten kann dieser anschließend eigenständig entscheiden, welches der vorgelegten Angebote ausgewählt wird. Die entsprechende Station wird über die Wahl informiert, wobei die Angebotszeit das Zeitfenster für die Materialbereitstellung definiert. Der AA informiert den LA über den Materialbedarf. Dieser tritt mit allen verfügbaren FTFA in Verhandlung. Der LA berücksichtigt bei der Wahl des optimalen FTFA das zuvor definierte Zeitfenster. Neben der Materialversorgung ausgehend von den festgelegten Supermärkten wird nach diesem Prinzip der Transport von Halbfabrikaten zwischen den Stationen geplant. Das zuvor hergestellte Halbfabrikat wird von der vorausgegangenen Station abgeholt (Pickup) und an die laut Konfiguration nachfolgende Station transportiert (Delivery). Mit der Vergabe des Auftrags erhält das gewählte FTFA eine Route durch das Materialflusssystem, auf welcher eine Materialaufnahme sowie eine -abgabe erfolgen muss. Gemäß dieser Route werden anschließend die Bauteile an den Bedarfsorten bereitgestellt und es erfolgt die Montage auf der Station. Den Annahmen aus Abschnitt 4.1 folgend werden bei den Verhandlungen nur Transportmittel berücksichtigt, welche nicht bereits zwei Aufträge ausführen.

5 IMPLEMENTIERUNG

Das beschriebene Konzept wird innerhalb der Simulationsumgebung Plant Simulation in einem experimentierbaren Modell implementiert. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, besteht das Anwendungsszenario aus einer beispielhaften Produktionsanlage zur Fertigung verschiedener Getriebearten. Der Ablauf der Fertigungs- bzw. Montageprozesse stellt dabei eine starke Vereinfachung

der realen Produktionsprozesse dar, beinhaltet aber die wesentlichen Wertschöpfungsschritte.

Mit Hilfe des Simulationsmodells sollen die Vorteile des Pickup & Delivery-Ansatzes aufgezeigt werden. Dafür werden zwei Modellvarianten unterschieden. Der Prozessablauf im ersten Modell entspricht dem Prinzip der Materialbereitstellung mit Einzeltransporten zwischen Supermarkt und Station sowie zwischen den Stationen. Für jeden neu aufkommenden Auftrag ist hier ein freies FTF erforderlich. Im zweiten Modell wird der beschriebene Pickup & Delivery-Ansatz umgesetzt. Es wird die Möglichkeit geschaffen, mit jedem Fahrzeug zwei Aufträge gleichzeitig durchzuführen. Auf diese Weise werden bei den Verhandlungen zwischen den Agenten auch bereits belegte, aber möglicherweise dennoch besser positionierte Fahrzeuge berücksichtigt. Es besteht somit die Möglichkeit, Materialien zu einer Station zu transportieren und von dort aus fertige Halbfabrikate direkt an die nachfolgende Station zu liefern. Beiden Modellen liegt das in Abschnitt 4.2 näher beschriebene MAS zugrunde. Die Auftragsituation sowie das Layout der Produktionsanlage ist in beiden Modellen identisch.

Abbildung 3 ist der strukturelle Aufbau des Simulationsmodells zu entnehmen. Die einzelnen Werkstätten umfassen jeweils drei Bearbeitungsstationen. Für die Entkopplung der Produktionsbereiche ist jede von ihnen außerdem mit einem Eingangs- und einem Ausgangspuffer ausgestattet. Die FTF starten und beenden ihre Route an einem Depot bzw. dem FTF-Pool. Die Materialbereitstellung erfolgt gemäß dem beschriebenen Konzept, ausgehend von zwei räumlich verteilten Supermärkten. Die Verbindung der Materialflussobjekte wird mit Hilfe eines Wegenetzes realisiert. Dabei handelt es sich um zweispurige Wege, mit deren Hilfe eine Staubildung vermieden werden soll. Für



Abbildung 3: Simulationsmodell – Getriebefertigung

den Transport der Materialien und Halbfabrikate werden drei in ihrem Funktionsumfang gleiche FTF verwendet.

6 ERGEBNISSE

Ziel des entwickelten Ansatzes ist die bedarfsgerechte Versorgung der Montagestationen mit den erforderlichen Materialien und Halbfabrikaten. Die Auftragsreihenfolge ist in beiden implementierten Systemen identisch. Mögliche Störungen der Stationen oder der Fahrzeuge sowie Ausfallzeiten werden nicht betrachtet. Bei den Verhandlungen zur Vergabe der Transportaufträge steht in beiden Systemen die Minimierung der Durchlaufzeit im Vordergrund. Es erhält demnach das Fahrzeug mit der schnellsten Abwicklungszeit den Auftrag. Auf diese Weise sollen Verzögerungen aufgrund von Materialengpässen vermieden werden. Die Simulationszeit beträgt 16 Stunden und bildet somit die Montageprozesse innerhalb eines Zweischichtbetriebes ab.

Abbildung 4 zeigt die Auslastungsgrade der einzelnen Fahrzeuge. Es ist ersichtlich, dass die FTF im System ohne Pickup & Delivery deutlich mehr ausgelastet sind. Dieser Umstand begründet sich in der höheren Wegstrecke der Fahrzeuge, welche zurückgelegt werden muss, um den Materialbedarf an den einzelnen Stationen zu decken. Dies resultiert aus der fehlenden Möglichkeit zur Kombination mehrerer Transportaufträge. Besteht zu einem konkreten Betrachtungszeitpunkt innerhalb des Systems die Notwendigkeit mehrere Transporte durchzuführen, werden zwangsläufig mehrere Fahrzeuge benötigt.



Abbildung 4: Auslastung je Fahrzeug

Demgegenüber besteht im zweiten System unter Verwendung des Pickup & Delivery-Ansatzes die Möglichkeit in einer solchen Situation mehrere Transportaufträge zu kombinieren und an ein FTF zu vergeben. Auf diese Weise kann die zurückgelegte Strecke der einzelnen Fahrzeuge um bis zu 22,28 % reduziert werden.

Abbildung 5 zeigt eine Übersicht der Gesamtfahrzeit der im System genutzten FTF. Durch die Reduktion der erforderlichen Wegstrecken kann auch die Einsatzzeit der Fahrzeuge entsprechend minimiert werden. Das entwickelte Konzept zur Nutzung des Pickup & Delivery-Ansatzes ermöglicht eine Einsparung von 18,66 % der Fahrzeit.

Somit können neben einer Reduktion des Wartungsaufwands für die eingesetzten Fahrzeuge zudem eine Senkung der Energiekosten für den Betrieb der FTF sowie eine Steigerung des Leistungspotentials erreicht werden. An den Stationen tritt trotz der reduzierten Fahrzeiten kein Materialengpass auf. In beiden Modellvarianten werden innerhalb des betrachteten Simulationszeitraumes 90 Getriebe gefertigt.

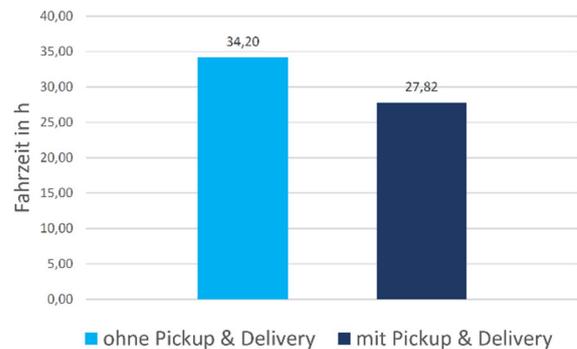


Abbildung 5: Gesamtfahrzeit der Fahrzeuge

7 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieses Beitrags wurde ein Konzept zur Implementierung des Pickup & Delivery-Ansatzes in einer intelligenten Produktion erarbeitet. Die Steuerung der Materialflüsse innerhalb der Fertigung erfolgt dabei unter Nutzung des entwickelten MAS. Mittels Simulation konnten die Vorteile einer Materialversorgung nach dem Pickup & Delivery-Prinzip aufgezeigt werden. Durch die Möglichkeit zur Kombination mehrerer Transportaufträge zu einer Route konnte die Gesamtfahrzeit der fahrerlosen Transportfahrzeuge bei gleichbleibendem Durchsatz um 18,66 % reduziert werden. Eine solche Einsparung resultiert in geringeren Transportkosten und erhöht durch die Senkung der Auslastungsgrade das Leistungspotential der eingesetzten Transportfahrzeuge. Weitere Untersuchungen in diesem Bereich können das Konzept um die Berücksichtigung von potentiellen Störungen und Ausfallzeiten erweitern.

LITERATUR

- [BMQ+22] Baiou, M.; Mombelli, A.; Quilliot, A.; Adouane, L.; Zhu, Z.: Algorithms for the Safe Management of Autonomous Vehicles, 16th Conference on Computer Science and Intelligence Systems, 2022
- [Bra09] van Brackel, T.: Adaptive Steuerung flexibler Werkstattfertigungssysteme, Wiesbaden: GWV Fachverlage GmbH, 2009
- [CAB+21] Chen, Z.; Alonso-Mora, J.; Bai, X.; Harabor, D. D.; Stuckey, P. J.: Integrated Task Assignment and Path Planning for Capacitated Multi-Agent Pickup and Delivery, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 6 No. 3, 2021
- [CCD+21] Chen, Z.; Chen, K. C.; Dong, C.; Nie, Z.: 6G Mobile Communications for Multi-Robot Smart Factory, Journal of ICT Standardization Vol. 9 Iss 3, 2021
- [Fle05] Fleisch, E.; Mattern, F.: Das Internet der Dinge, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [GSB+17] Geissbauer, R.; Schrauf, S.; Berttram, P.; Cheraghi, F.: Digital Factories 2020 – Shaping the future of manufacturing, PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, 2017
- [KMO+12] Kiener, S.; Maier-Scheubeck, N.; Obermaier, R.; Weiß, M.: Produktions-Management: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. 10. Auflage. München: Oldenbourg, 2012
- [Kry09] Krypczyk, V.: Nachbarschaftssucheverfahren für dynamische Pickup und Delivery-Probleme, Inauguraldissertation FernUniversität Gesamthochschule Hagen, 2009
- [Lib11] Libert, S.: Beitrag zur agentenbasierten Gestaltung von Materialflusssteuerungen, Dortmund: Verlag Praxiswissen, 2011
- [Mön06] Mönch, L.: Autonome und kooperative Steuerung komplexer Produktionsprozesse mit Multi-Agenten-Systemen. In Wirtschaftsinformatik Volume 48, Nummer 2, S. 107-119, Heidelberg: dpunkt.verlag GmbH, 2006
- [Nie16] Niehues, M. R.: Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung, Dissertation Technische Universität München, 2016
- [PKS+18] Pakpahan, E. K. A.; Kristina, S.; Setiawan, A.; Merlians, E.: Job shop scheduling considering material handling process, IMIEC – MATEC Web of Conferences 204, 07008, 2018
- [Pie18] Pieper, S.; Sauer, P.: Tourenplanung in Wiesche, M.; Sauer, P.; Krimmling, J.; Krcmar, H.: Management digitaler Plattformen, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2018
- [Pre14] Preis, H.; Frank, S.; Nachtigall, K.: Tourenplanung für den Einsatz von Elektrofahrzeugen in städtischen Liefersystemen. In Proff, H. (Hrsg.): Radikale Innovationen in der Mobilität, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014
- [Ric05] Richter, A.: Dynamische Tourenplanung, Dissertation Technische Universität Dresden, 2005
- [Sch20] Schulte, J.; Römer, M.; Tierney, K.: Cyclical Inventory Routing with Unsplittable Pick-Up and Deliveries. In Lalla Ruiz, E.; Mes, M.; Voß, S. (Hrsg.): Computational Logistics, Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020
- [Sod17] Soder, J.: Use Case Production – Von CIM über Lean Production zu Industrie 4.0. In Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1 – Produktion, 2. erweiterte und bearbeitete Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2017
- [Tem18] Tempelmeier, H.: Planung logistischer Systeme, Berlin: Springer Verlag GmbH Deutschland, 2018
- [VEL17] Vojdani, N.; Erichsen, B.; Lück, T.: Nutzung von Produktionsechtzeitdaten – Eine agentenbasierte Feinplanung mittels Simulation, Logistics Journal – Proceedings, 2017
- [WLT+21] Wu, X.; Liu, Y.; Tang, X.; Cai, W.; Bai, F.; Khonstantine, G.; Zhao, G.: Multi-Agent Pickup and Delivery with Task

Deadlines, WI-IAT 2021, Essendon,
2021

- [ZPP+20] Zheng, X.; Psarommatis, F.; Petrali, P.;
Turrin, C.; Lu, J.; Kirtisis, D.: A Quality-
Oriented Digital Twin Modelling
Method for Manufacturing Process
Based on A Multi-Agent Architecture,
Athen: 30th International Conference on
Flexible Automation and Intelligent
Manufacturing, 2020
-

Prof. Dr.-Ing. Nina Vojdani Universität Rostock

Axel Zahn, M. Sc. Universität Rostock

Adresse: Universität Rostock, Deutschland, E-Mail:
vojdan@uni-rostock.de