

Adaptive Materialbereitstellung in flexiblen Produktionssystemen auf Grundlage einer agentenbasierten Transportsteuerung

Adaptive part-feeding in flexible production systems using an agent-based transport control concept

Nina Vojdani
Mathias Knop

Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Universität Rostock

Zur Sicherstellung einer schnellen und flexiblen Anpassung an sich ändernde Anforderungen sind innerbetriebliche Materialbereitstellungskonzepte in immer stärkerem Maße zu flexibilisieren. Hierdurch kann die Erreichung logistischer Ziele in einem dynamischen Produktionsumfeld gesteigert werden. Der Beitrag stellt ein Konzept für eine adaptive Materialbereitstellung in flexiblen Produktionssystemen auf Grundlage einer agentenbasierten Transportplanung und -steuerung vor. Der Fokus liegt hierbei auf der Planung und Steuerung der auf Basis von Materialbedarfsmeldungen ausgelösten innerbetrieblichen Transporte. Neben Pendeltouren zur Versorgung des Produktionssystems findet auch das dynamische Pickup-and-Delivery-Problem Berücksichtigung. Das vorgestellte Konzept ist an den Anforderungen selbstorganisierender Produktionsprozesse ausgerichtet.

[Schlüsselwörter: Adaptive Materialbereitstellung, Agententechnologie, Transportplanung]

To ensure a fast and flexible adaptation in terms of changing requirements, the part-feeding in production processes has to be organized more flexible. This allows an improvement of logistic goals in dynamic production environments. The paper presents a concept for adaptive part-feeding in flexible production systems using an agent-based transport control system. Planning and control of internal transport processes is brought into focus. In addition to direct transport relations to supply production systems with material, the dynamic pickup and delivery problem is considered. The concept is adjusted to requirements of self-organizing production processes.

[Keywords: adaptive part-feeding, agent technology, transport planning]

1 EINFÜHRUNG

Die Fähigkeit, Produkte passgenau an den individuellen Anforderungen der Kunden auszurichten, zählt zu den entscheidenden Wettbewerbsdeterminanten heutiger Unternehmen. Die zunehmende Individualisierung der Produktion erfordert dynamische und wandlungsfähige Produktions- und Logistiksysteme. Gegenwärtige Planungs- und Steuerungssysteme für den innerbetrieblichen Materialfluss erfüllen die Anforderungen an Individualisierung, Robustheit und Wandlungsfähigkeit nur bedingt.

Die Versorgung von Produktionskapazitäten mit erforderlichen Teilen im Rahmen der Materialbereitstellung entsprechend den aufgeführten Anforderungen an moderne Logistiksysteme erfordert die Entwicklung neuartiger Konzepte für die Materialbereitstellung. Um eine schnelle und flexible Anpassung an sich ändernde Kundenanforderungen sicherzustellen, müssen starre Materialbereitstellungskonzepte einer adaptiven Materialbereitstellung weichen. Hierdurch kann die Erreichung logistischer Ziele in einem dynamischen Produktionsumfeld gesteigert werden. Dies erfordert ein permanentes Monitoring der Materialbereitstellungsprozesse, die kontinuierliche Analyse von Materialbedarfsmeldungen sowie die Implementierung dezentraler Entscheidungsinstanzen, die über eine situativ bestgeeignete Form der Materialbereitstellung entscheiden.

Dieser Beitrag stellt ein am Lehrstuhl für Produktionsorganisation und Logistik der Universität Rostock entwickeltes Konzept für eine adaptive Materialbereitstellung in flexiblen Produktionssystemen auf Grundlage einer agentenbasierten Transportplanung und -steuerung

vor. Das Konzept bezieht sich auf zellulare Transportsysteme. Die Materialbereitstellung wird mittels Software-Agenten dezentral organisiert. Ein besonderer Fokus liegt auf der Planung und Steuerung der auf Basis von Materialbedarfsmeldungen auszulösenden innerbetrieblichen Transporte.

Neben Pendeltouren zur Versorgung des Produktionssystems findet auch das dynamische Pickup-and-Delivery-Problem im Rahmen der Materialbereitstellung Berücksichtigung. Hierbei werden Touren zwischen dem Lager und den Betriebsmitteln unter Berücksichtigung mehrerer potentieller Aufnahme- und Abgabeorte, Zeitfenstern sowie unter Berücksichtigung von Kapazitätsrestriktionen für die zellularen Transportsysteme gebildet. Dabei können eintreffende Materialbereitstellungsaufträge in bestehende Tourenpläne integriert werden.

2 FLEXIBLE PRODUKTIONSSYSTEME

Eine adaptive Gestaltung der Materialbereitstellung ist abhängig von Gegebenheiten innerhalb des vorliegenden Produktions- und Logistiksystems sowie von Anforderungen an das Produktionssystem. Hierbei bezeichnet ein Produktionssystem den Teil des Leistungserstellungssystems, in dem „die physischen Prozesse der Kombination und Konversion der Produktionsfaktoren“ ablaufen [Zäp00, S. 2]. Das Produktionssystem ist somit nicht auf Betriebsmittel beschränkt, sondern kann eine Menge heterogener und verteilter Betriebsmittel umfassen [Chi09].

Wenn ein Produktionssystem Änderungen unterworfen ist, ist eine adaptive Gestaltung der Materialbereitstellung sicherzustellen. Im Beitrag werden deshalb flexible Produktionssysteme thematisiert. Flexible Produktionssysteme sind in der Lage, auf wechselnde Produktionsaufgaben und schwankende Produktionsmengen schnell und kostengünstig zu reagieren [See13]. Nach Seebacher [See13] sind flexible Produktionssysteme durch folgende Merkmale gekennzeichnet: Flexible Produktionssysteme können unerwartete Aufgabenspektren im Unterschied zu agilen Produktionssystemen nicht realisieren. Flexible Produktionssysteme sind in der Lage, mit einer dynamischen Entwicklung der Anforderungen an das Produktionssystem umzugehen. Die Veränderungsimpulse können sowohl interner als auch externer Art sein. Das Leistungsspektrum ist durch die vorhandenen Betriebsmittel limitiert. Flexible Produktionssysteme sind reaktiv, können jedoch auch antizipativ agieren. Eine noch stärkere Flexibilisierung liegt in agilen Produktionssystemen vor. Darüber hinaus werden in der Literatur weitere „flexible“ Produktionssysteme diskutiert: rekonfigurierbare, holonische, balanced-automation Produktionssysteme, bioanalogue und weise Produktionssysteme [Chi09].

3 MATERIALBEREITSTELLUNG

Die Materialbereitstellung dient der Sicherstellung eines optimalen Materialflusses in der Produktion und umfasst alle intralogistischen Abläufe vom Wareneingang bis zur Übergabe des Materials am Verbauort in Fertigung bzw. Montage. Die Materialbereitstellung ist dabei primär auf die Versorgung von Betriebsmitteln mit Teilen und Materialien ausgerichtet. Sie kann jedoch auch Entsorgungsaufgaben übernehmen, wenn Werkstücke von einem Arbeitsplatz zum Folgearbeitsplatz zu transportieren sind.

Eine Materialbereitstellungsstrategie umfasst alle materialbezogenen Festlegungen zum innerbetrieblichen Transport, zur Lagerung, Kommissionierung und Verpackung bis zum Abgriff am Produktionsarbeitsplatz [Voj14].

Die Auswahl einer Materialbereitstellungsstrategie wird durch physikalische (z.B. Größe, Volumen), logistische (z.B. Losgröße, Regelmäßigkeit des Bedarfs) und handhabungsrelevante (z.B. Ordnungszustand des Materials) Merkmale bestimmt [Nyh06]. Des Weiteren wird die Auswahl durch den Beschaffungs- und den Produktionsprozess beeinflusst. Beispielsweise wird der Umfang einer Materialbereitstellungsstrategie hinsichtlich zu realisierender intralogistischer Aufgaben durch den Beschaffungsprozess bestimmt: bei einer produktionssynchronen Beschaffung sind innerbetrieblich vorrangig transportbezogene Aufgaben abzuwickeln, wobei bei einer Vorratsbeschaffung, Lager-, Kommissionier- und Transportaufgaben im Rahmen der Materialbereitstellungsplanung zu berücksichtigen sind.

Eine am Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik der Universität Rostock entwickelte Bewertungsmethodik führt die unterschiedlichen Einflussfaktoren zusammen und unterscheidet eine Bewertung aus Produkt- und Prozesssicht [Voj10]. Die Materialbereitstellungsstrategien werden in der Prozesssicht anhand von Kriterien bewertet, die aus den Grundsätzen des Lean Management abgeleitet werden. Darüber hinaus können auch andere Kriterien zugrunde gelegt werden. Durch Vereinigung beider Sichten können für jede Teilefamilie geeignete Materialbereitstellungsstrategien identifiziert und hinsichtlich ihrer Eignung in eine Rangfolge gebracht werden.

Im Kontext der Materialbereitstellung lassen sich lang- und kurzfristige Planungsprobleme unterscheiden. Eine exemplarische Zuordnung ausgewählter Probleme der Materialbereitstellung zu den Gruppen der kurz- und langfristigen Planungsprobleme der Materialbereitstellung zeigt Abbildung 1. Eine Abgrenzung kann jedoch nicht trennscharf vorgenommen werden, da ausgewählte Planungsprobleme in der Fachliteratur auch simultan gelöst werden (z.B. Location-Routing Problem [Pro14] oder das Inventory-Routing Problem [Li14]).

Langfristige Planungsprobleme der Materialbereitstellung	Kurzfristige Planungsprobleme der Materialbereitstellung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Festlegung der Anzahl Lagerstufen ▪ Festlegung eines Lagerkonzepts bzw. der Bereitstellquellen (zentrale oder dezentrale Lager, Supermärkte) ▪ Festlegung der Kommissionierbehälter bzw. Transportbehälter oder anderer Ladehilfsmittel (Behälter, Pickbox, Kommissioniertürl) ▪ Transportnetzwerkplanung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Definition der Quellen und Senken ▪ Definition der Transportmittel und Transportmittellanzahl ▪ Definition möglicher Transportrelationen ▪ Festlegung der Art der Auslösung und Durchführung der Bereitstellung ▪ ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tourenplanung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Clustering ▪ Routing ▪ Ablaufplanung (Scheduling) ▪ Bin Packing ▪ Festlegung der Form der Bereitstellung (Teilauftrag, Gesamtauftrag usw.) ▪ Ruhepositionierung ▪ Transportsteuerung ▪ ...

Abbildung 1. Lang- und kurzfristige Planungsprobleme der Materialbereitstellung

Während die am Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik entwickelte Bewertungsmethodik [Voj10] vorrangig auf die Festlegung der Materialbereitstellungsstrategie sowie zugehöriger Kommissionierbehälter fokussiert, konzentriert sich dieser Beitrag auf ausgewählte kurzfristige Planungsprobleme, wie die Transportplanung und die damit zusammenhängende Festlegung der Form der Bereitstellung.

Entsprechend der von Bullinger und Lung [Bul94] vorgenommenen Einteilung von Materialbereitstellungsstrategien werden in diesem Beitrag solche Strategien fokussiert, bei denen die Bereitstellung nach Bedarf und stückzahlgenau erfolgt (vgl. Abbildung 2). Hinsichtlich der Form der Bereitstellung werden verschiedene Ausprägungen berücksichtigt.

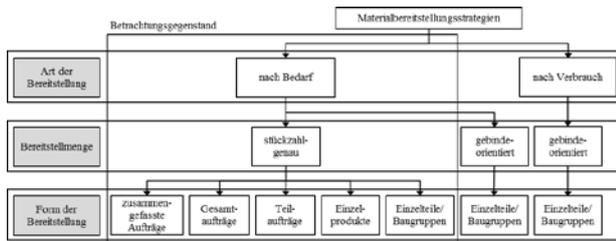


Abbildung 2. Berücksichtigte Materialbereitstellungsprinzipien [Bul94]

4 ADAPTIVE MATERIALBEREITSTELLUNG

Aus der Festlegung einer Materialbereitstellungsstrategie resultieren Investitions- und Betriebskosten. Investitionskosten umfassen dabei Kosten für den Aufbau einer technischen Infrastruktur (Transportmittelbeschaffung, Transporthilfsmittelbeschaffung usw.), einer informationstechnischen Infrastruktur (Soft- und Hardwarebeschaffung, Customizing, Administration usw.) sowie planungsbezogene Kosten [Ric10].

Die Eignung einer Materialbereitstellungsstrategie wird durch interne und externe Veränderungen beein-

flusst, die einen Wechsel zwischen verschiedenen Materialbereitstellungsstrategien erfordern können. Mögliche Auslöser eines Wechsels sind Änderungen: des räumlichen oder zeitlichen Organisationsprinzips, des Automatisierungsgrads, des Verkettungsgrads, der kinematischen Verhaltensweise der Elementarfaktoren, der Verfügbarkeit technischer Hilfsmittel, der Transportwege, des Platzangebots, der ERP/PPS-Systemanwendungen, der Teilwerte, des Teilverbrauchs, der Regelmäßigkeit des Teilverbrauchs oder der Verwendungshäufigkeit, der Produkteigenschaften, der nachgefragten Produktmenge, der Einkaufsstrategie, des Einkaufsvolumens je Lieferant usw. [Ric10]. Grundsätzlich können zwei Arten des Wechsels einer Materialbereitstellungsstrategie unterschieden werden: Materialbereitstellungsstrategiewechsel mit Infrastrukturveränderungen und Materialbereitstellungsstrategiewechsel ohne Infrastrukturveränderung (vgl. Abbildung 3).

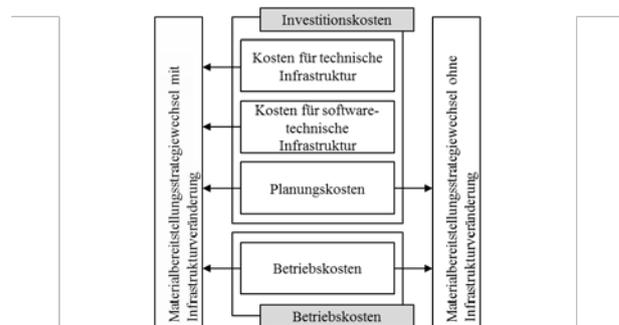


Abbildung 3. Kostenwirksamkeit des Wechsels von Materialbereitstellungsstrategien

Bleiben bei Entscheidungen hinsichtlich des Wechsels einer Materialbereitstellungsstrategie laufende Betriebskosten unberücksichtigt oder werden diese nicht laufend erfasst, erscheinen bestehende Materialbereitstellungsstrategien häufig vergleichsweise vorteilhaft gegenüber neuen Materialbereitstellungsstrategien, weil der Effekt der Fixkostendegression ausgenutzt werden kann. Fixkostendegression bezeichnet den Effekt sinkender fixer Stückkosten mit steigender Ausbringungsmenge. Im Kontext der Materialbereitstellung ist unter einer Fixkostendegression die Verringerung der Investitionskosten pro Materialbereitstellungsauftrag im Zeitablauf der Nutzung dieser Materialbereitstellungsstrategie zu verstehen. Die Implementierung einer anderen Materialbereitstellungsstrategie, die mit Investitionen in eine technische oder softwaretechnische Infrastruktur verbunden ist, kann mit höheren Fixkosten pro Materialbereitstellungsauftrag in der Anfangsphase verbunden sein. Damit kann diese unvorteilhaft erscheinen.

Sollten die Betriebskosten, die durch eine neue Materialbereitstellungsstrategie bedingt sind, geringer sein, kann ein Wechsel der Materialbereitstellungsstrategie von Vorteil sein. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass die Häufigkeit einer Bewertung der Materialbereitstellungsstrategie die Investitionskosten erhöht, da Planungskosten Be-

standteil der Investitionskosten sind [Ric10]. Eine Bewertung ist deshalb nur nach größeren Zeitabschnitten sinnvoll oder müsste bei häufiger Bewertung nahezu kostenneutral erfolgen.

Sollte ein Wechsel der Materialbereitstellungsstrategie keine Investitionsaufwendungen in die technische oder softwaretechnische Infrastruktur bedingen, kann ein situationsspezifischer Wechsel der Materialbereitstellungsstrategie realisiert werden, z.B. bei Änderung der Regelmäßigkeit des Teilebedarfs, bei Produktmengenänderungen oder beim Vorliegen von Bündelungsmöglichkeiten intralogistischer Aufgaben. Dies setzt jedoch voraus, dass die Kosten für erforderliche Umplanungen gering sind.

Durch einen Wechsel zwischen verschiedenen Materialbereitstellungsstrategien, die keine Infrastrukturveränderungen erfordern, kann eine kontinuierliche Anpassung an situationsspezifische Erfordernisse und damit die Auswahl einer situationsspezifisch optimalen Materialbereitstellungsstrategie ermöglicht werden. Dies setzt voraus, dass die Planungskosten vernachlässigbar sind. Planungskosten werden vorrangig durch Personalkosten bestimmt. Durch eine automatisierte Bewertung der aktuellen Materialbereitstellungsstrategie und eine Umplanung können die Planungskosten reduziert und eine adaptive Materialbereitstellung ermöglicht werden.

Zur Senkung der personalkostenintensiven Planung können Monitoringaufgaben zur Erfassung und Bewertung einer momentan angewendeten Materialbereitstellungsstrategie und die Aufgabe einer Umplanung der Materialbereitstellung an Software-Agenten übertragen werden. Gleichzeitig kann durch eine verteilte Problemlösung der Koordinationsaufwand reduziert werden. Eine dezentrale Planung und Steuerung der Materialbereitstellung liefert somit die Grundlage für eine adaptive Materialbereitstellung in kurzfristigen Planungszeiträumen. Des Weiteren wird durch den Einsatz von Software-Agenten die Grundlage gelegt, flexibel auf Störungen innerhalb des Produktions- und Logistiksystems zu reagieren. Der Grundgedanke der adaptiven Materialbereitstellung ist in Form eines kybernetischen Regelkreises in Abbildung 4 veranschaulicht. Da im Rahmen der Materialbereitstellung unterschiedliche Ziele verfolgt werden, handelt es sich hierbei um einen Regler für Mehrgrößensysteme.

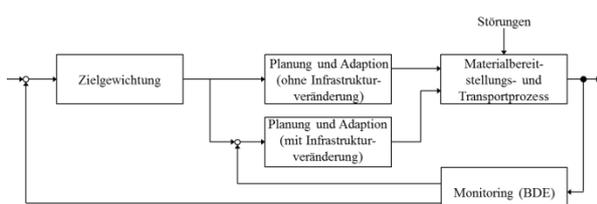


Abbildung 4. Kybernetischer Regelkreis der adaptiven Materialbereitstellung

Der kybernetische Regelkreis besteht aus fünf Blöcken. Der Materialbereitstellungsprozess ist das Planungs-

und Regelungsobjekt. Dieser ist in einem dynamischen Produktionsumfeld Störungen bzw. Veränderungen unterworfen. Die zeitabhängige Regelgröße stellt die Zielerreichung zuvor festgelegter Ziele der Materialbereitstellung dar (z.B. Gesamtstrecke der Transportfahrzeuge, Servicegrad).

Im Rahmen des Monitorings erfolgt eine Erfassung und Aufbereitung von Kennzahlen. Das Sammeln von Daten ermöglicht den Aufbau lernender Systeme. Beispielsweise kann unter Verwendung von Lernalgorithmen die Erfassung der Bedarfsorte in der Produktion dazu genutzt werden, einen geeigneten Aufenthaltsort für Transportfahrzeuge zu ermitteln, denen zu einem bestimmten Zeitpunkt kein Auftrag zugeordnet ist.

Bei einer multikriteriellen Transport- und Bereitstellungsplanung sind Gewichtungsfaktoren für verschiedene Ziele festzulegen. Auch hier bietet sich der Einsatz von Lernalgorithmen an, um situationsspezifisch geeignete Gewichtungsfaktoren zu ermitteln. Auf Grundlage der Monitoringergebnisse können die Gewichtungsfaktoren für einzelne Ziele modifiziert werden. Es wird angestrebt, die Regelabweichung, die aus der Differenz zwischen dem Vektor der Zielwerte und dem der Regelgröße resultiert, zu eliminieren.

Auf Basis der Zielgewichtung erfolgt eine gegebenenfalls erforderliche Adaption der Materialbereitstellungsstrategie (ohne Infrastrukturveränderung). Im Rahmen dieser Planung wird ein Scheduling (Zeitablaufsteuerung) vorgenommen. Beispielsweise wird festgelegt, welches Material wann in welchen Behälter kommt oder welchem Transportmittel welche Transportaufträge zuzuordnen sind. Der Zeitablaufplan bildet eine Stellgröße der Regelstrecke „Materialbereitstellungsprozess“. Unterstützend können Optimierungsroutinen eingesetzt werden, die eine situationsspezifisch geeignete Materialbereitstellung, z.B. in Bezug auf die Transportplanung oder die Festlegung der Form der Materialbereitstellung, sicherstellen.

Des Weiteren kann auf Basis der gewichteten Ziele und den Ergebnissen des Monitoringblocks eine Adaption mit Infrastrukturveränderungen vorgenommen werden.

Kurzfristige Planungsprobleme der Materialbereitstellung werden vorrangig im Planungs- und Adaptionsblock ohne Infrastrukturveränderungen fokussiert, während die Lösung langfristiger Probleme und damit eine langfristig ausgerichtete Anpassung der Materialbereitstellungsstrategien Bestandteil des Planungs- und Adaptionsblocks mit Infrastrukturveränderungen ist.

Im Rahmen dieses Beitrags liegt der Fokus auf solchen Formen der adaptiven Materialbereitstellung, die keine infrastrukturellen Maßnahmen erfordern.

5 KONZEPT EINER AGENTENBASIERTEN ADAPTIVEN MATERIALBEREITSTELLUNG

5.1 KONZEPTIONELLE RAHMENBEDINGUNGEN

Zentralistische Organisationsstrukturen weisen eine geringe Flexibilität auf und sind in einer dynamischen Umgebung ungeeignet [Ble04]. Durch Selbststeuerung und Selbstorganisation sollen Prozesse kostengünstiger, schneller und flexibler gestaltet werden können [Ble04]. Selbstorganisierende Produktionsprozesse erfordern ein abgestimmtes Materialbereitstellungskonzept. Transport- und Kommissionierprozesse als Teil des Materialbereitstellungsprozesses müssen in flexiblen oder agilen Produktionssystemen an den Anforderungen des Produktionsprozesses ausgerichtet werden. Zur Sicherstellung flexibler Transporte werden hier zellulare Förderer angenommen. Die Transportplanung und ausgewählte Aufgaben der Kommissionierungsplanung (Festlegung der Form der Bereitstellung, vgl. Abbildung 2) werden im Rahmen des Beitrags durch Software-Agenten realisiert. Eine agentenbasierte Realisierung erlaubt eine dezentrale Entscheidungsfindung, ermöglicht aufgrund implementierter Routinen eine kostengünstige Bewertung vorhandener Materialbereitstellungsstrategien und schafft damit eine Voraussetzung für eine adaptive Materialbereitstellung.

Anforderungen an das Konzept sollen folgend hinsichtlich Auftrags-, Lager-, Transportmittel-, Transportwege- und Zielsystemstruktur in Anlehnung an Wenger [Wen10] dargestellt werden.

Auftragsstruktur: Materialbereitstellungsaufträge können in Transport- und Kommissionieraufträge überführt werden. Aufgrund der ver- und entsorgenden Aufgaben der Materialbereitstellung liegt im Rahmen der Materialbereitstellung ein Pickup-and-Delivery Problem vor. Auslieferungs- und Sammelaufträge können dabei innerhalb einer Tour kombiniert vorliegen. Bei Auslieferungen werden Materialien ausgehend von Lagern an die zugehörigen Betriebsmittel transportiert (Delivery-Fall). Des Weiteren können Werkstücke von einem Betriebsmittel ausgehend an einem anderen Betriebsmittel bereitgestellt werden, was die Aufnahme von Material an einem Betriebsmittel erfordert (Pickup-Fall). Eine eindeutige Kennzeichnung der Materialien oder Teilesets ermöglicht eine Zusammenfassung von Teilen mehrerer Aufträge in einem Behälter. Materialien sind entsprechend dem zugrunde liegenden Materialbereitstellungsauftrag in voller Höhe bereitzustellen. Teillieferungen können nur durch eine Splittung des Auftrags in Teilaufträge realisiert werden. Für eine Belieferung werden zulässige Zeitfenster definiert.

Lagerstruktur: Es werden mehrere Lager im Rahmen der Materialbereitstellung berücksichtigt. Nicht jedes Lager muss über einen eigenen Fuhrpark verfügen. An den Lagern sind Abstellplätze vorgesehen, an denen sich die Fahrzeuge aufhalten, wenn ihnen kein Transportauf-

trag zugeordnet ist. Das Lager bildet sowohl Ausgangs- als auch Endpunkt einer Tour. Sollte dem Transportfahrzeug während einer Tour ein weiterer Transportauftrag zugeordnet werden (dynamische Tourenplanung), stellt die aktuelle Position den Ausgangspunkt seiner Tour dar. Endpunkt ist nach wie vor das Lager.

Transportmittelstruktur: Es werden zellulare Transportfahrzeuge angenommen. Technische Anforderungen im Hinblick auf die Gutaufnahme und -abgabe werden vernachlässigt. Es wird unterstellt, dass die Transportfahrzeuge bzw. zugehörige Software-Agenten permanent in der Lage sind, mit anderen Agenten in Beziehung zu treten. Entsprechende Anforderungen an einen RFID-Einsatz oder eine Indoor-Navigation bleiben unberücksichtigt. Die zellularen Transportfahrzeuge besitzen gleiche kapazitive Beschränkungen. Die Übergabe an den Bedarfsorten erfolgt nach einem modifizierten Top-up-Verfahren. Dabei wird am Verbrauchsort nicht der Ladungsträger ausgetauscht, sondern Material dem Ladungsträger entnommen und auf ein Materialbereitstellungssystem (z.B. Bereitstellregal) umgeladen [Bic11].

Transportwegestruktur: Die Transportwegeplanung kann auf Basis verschiedener Algorithmen realisiert werden, z.B. Dijkstra-Algorithmus oder A*-Algorithmus. Eine Abschätzung der Transportzeiten erfolgt auf Grundlage der euklidischen Distanz zwischen zwei Punkten.

Zielsystemstruktur: Im Rahmen der Transportplanung können mehrere Ziele berücksichtigt werden, deren Gewichtung fallspezifisch durch einen menschlichen Entscheidungsträger über eine GUI modifiziert werden kann. Die Festlegung der Gewichtungsfaktoren erfolgt zunächst nicht automatisiert und nicht wissensbasiert.

5.2 AGENTENMODELL

Für eine agentenorientierte Softwareentwicklung stehen verschiedene Entwicklungsmethoden (z.B. Gaia, PASSI, MaSE) zur Verfügung. Hier wurde die PASSI-Methode verwendet. Die PASSI-Methode weist fünf Blöcke auf, die bedarfsweise auch iterativ durchlaufen werden können.

Nach Definition wesentlicher Anforderungen (vgl. Kapitel 5.1) wird ein sogenanntes System Requirement Model (Systemanforderungsmodell) erstellt. Es schließen sich folgende Blöcke an: Agent Society Model, Agent Implementation Model, Code Model und Deployment Model. Diese werden jedoch im Rahmen des Beitrags nicht thematisiert.

Innerhalb des ersten Blocks werden zunächst anhand von Anwendungsfällen sogenannte Domänenbeschreibungsdiagramme generiert, die eine funktionsbezogene Analyse des Systems ermöglichen. Vorbereitend wurde das in Abbildung 5 dargestellte Kontextdiagramm entworfen.

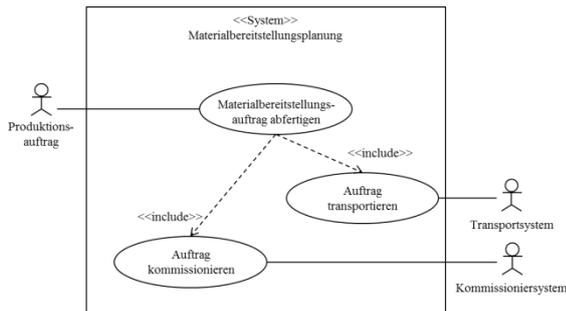


Abbildung 5. Kontextdiagramm

Das Kontextdiagramm wurde anschließend in dem in Abbildung 6 dargestellten (vereinfachten) Domänenbeschreibungsdigramm konkretisiert.

Des Weiteren sind innerhalb des Systemanforderungsmodells Agenten zu identifizieren. Nachfolgende Systementitäten können durch Software-Agenten erfasst werden: Produktionsauftrags-Agent, Materialbereitstellungs-Agent, Transportmittelplanungs-Agent. Darüber hinaus wurden Betriebsmittel-Agenten berücksichtigt, auf deren Darstellung im Domänenbeschreibungsdigramm verzichtet wurde.

Die Rollenidentifikation als weiterer Bestandteil des Systemanforderungsmodells wird in sogenannten Rollenidentifikationsdiagrammen spezifiziert. Dabei werden die Rollen als kommunizierende Objekte abgebildet. Nachfolgend wird ein vereinfachtes Rollenidentifikationsdiagramm für die Ausschreibung eines Materialbereitstellungsauftrags dargestellt (Abbildung 7). Auf eine Berücksichtigung von Fehlermeldungen, Wartungstätigkeiten oder Ähnlichem wurde vereinfachend verzichtet. Eine weitere Präzisierung des Agentenmodells soll durch die Darstellung zugrundeliegender Abläufe erfolgen.

Durch den Produktionsauftrags-Agenten werden Produktionsaufträge ausgeschrieben. Den Spezifikationen des Produktionsauftrags entsprechende Betriebsmittel-Agenten reagieren durch die Unterbreitung von Angeboten. Das Betriebsmittel mit dem günstigsten Angebot erhält einen Zuschlag.

Nach Zuordnung eines Produktionsauftrags zu einem Betriebsmittel schreibt der Produktionsauftrags-Agent seine Materialbedarfe aus. Die Ausschreibung wird auf Grundlage eines Kontraktnetzes auktionenbasiert realisiert. Der Materialbereitstellungs-Agent fungiert hierbei als Koordinator. Der Koordinator sammelt alle Materialbereitstellungsaufträge, die durch die Produktionsauftrags-Agenten ausgeschrieben werden. Die Transportmittelplanungs-Agenten werden durch den Koordinator über entsprechende Transportaufträge informiert. Ein Transportauftrag kann in einen Liefer- und einen Sammelauftrag zerlegt werden. Es liegt in diesem Falle eine Pickup-and-Delivery Problem vor. Die Transportmittelplanungs-Agenten erarbeiten Angebote und übermitteln diese dem Koordinator.

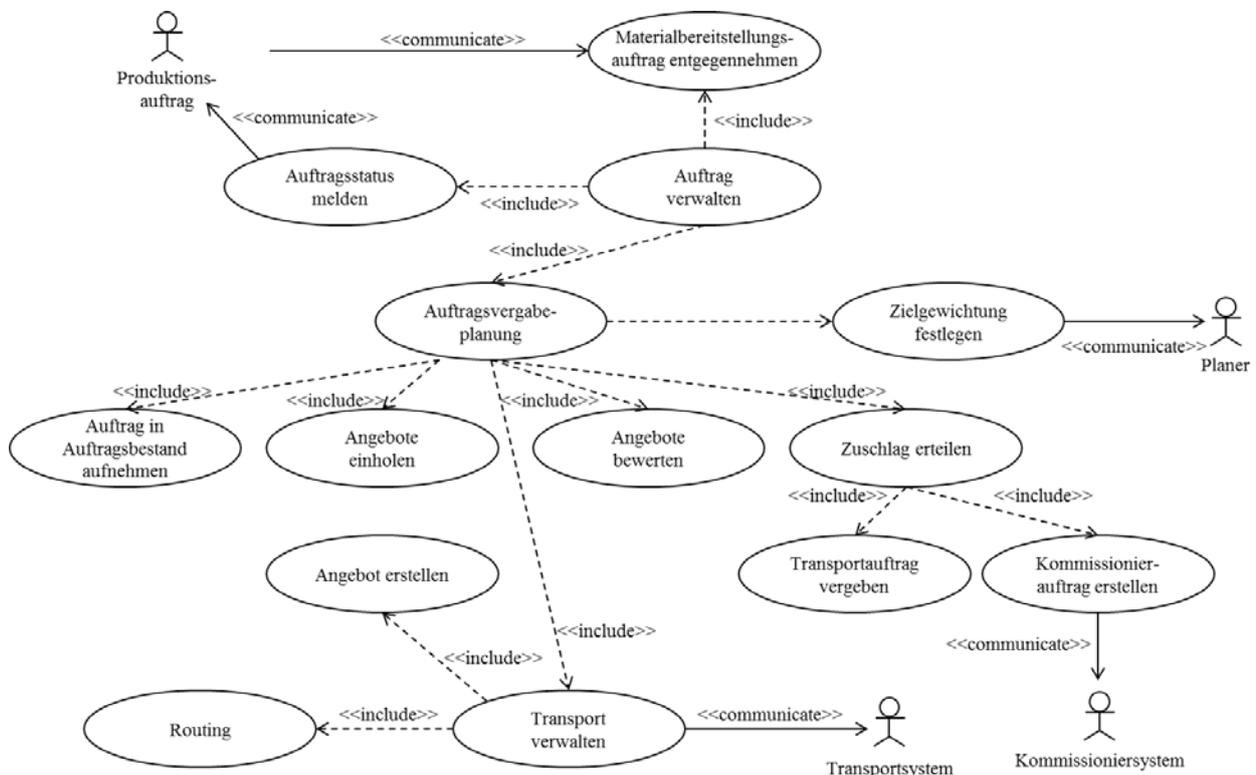


Abbildung 6. Domänenbeschreibungsdigramm

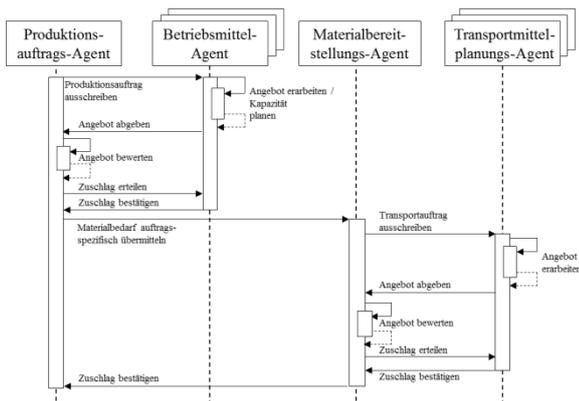


Abbildung 7. Rollenidentifikationsdiagramm für die Ausschreibung eines Materialbereitstellungsauftrags

Die Erarbeitung der Angebote basiert auf einer sukzessiven Einbeziehung der Transportaufträge in die vorhandene Tour unter Berücksichtigung kapazitiver Restriktionen des zellularen Förderers. Mit der Einbeziehung eines weiteren Transportauftrags in den Tourenplan des Transportmittels verschlechtert sich globale Minimierungsziele: Minimierung der Gesamteinsatzzeit der Transportfahrzeuge, Minimierung der Gesamtstreckenlänge des Tourenplans, Minimierung der Anzahl eingesetzter Fahrzeuge, Minimierung der Gesamtzeit der Verspätungen, Minimierung der maximal auftretenden Verspätung, Minimierung der Anzahl zu spät bedienter Aufträge [Wen10], Minimierung des gesamten Energieverbrauchs.

Die Beiträge zur Verschlechterung der globalen Ziele werden durch die Transportmittelplanungs-Agenten ermittelt, normiert und mit den Zielgewichtungsfaktoren gewichtet. Dabei wird das Ziel „Minimierung der Anzahl eingesetzter Fahrzeuge“ und „Minimierung der maximal auftretenden Verspätung“ ausgeklammert, da das erste Ziel unabhängig von der Routenplanung ist und das zweite Ziel nicht durch einen Transportmittelplanungs-Agenten lokal bewertet werden kann. Da es sich hier ausschließlich um Minimierungsziele handelt, kann die Angebotsermittlung der Transportmittelplanungs-Agenten entsprechend folgender Gleichung erfolgen:

$$\Delta K = \sum_{n=1}^m g_n \cdot \Delta z_n$$

Hierbei bezeichnet Δz_n die normierte Verschlechterung des Ziels n , g_n repräsentiert die jeweilige Zielgewichtung. Die aggregierte Verschlechterung der Ziele wird mit ΔK bezeichnet. Dabei wird die normierte Verschlechterung in Anlehnung an Wenger [Wen10] wie folgt ermittelt:

$$\Delta z_n = \left| \frac{z'_n - z_n}{UB_n - LB_n} \right|$$

Mit z_n wird der Zielwert der derzeitigen Tour bezeichnet. Mit z'_n wird der neue Zielwert bezeichnet, der durch Einplanung des ausgeschriebenen Transportauftrags in die bestehende Route resultiert. Die obere (UB_n) bzw. untere (LB_n) Grenze der möglichen Zielwerte ist zielspezifisch zu ermitteln. Exemplarisch sei die Grenzbestimmung für das Ziel Minimierung der Streckenlänge der Tour erläutert. Die untere Grenze kann durch Lösung des Traveling Salesman Problems bestimmt werden. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass Kapazitätsrestriktionen des zellularen Förderers und Zeitfenster für die Bereitstellung der Materialien an den jeweiligen Betriebsmitteln vernachlässigt werden. Hier wurde ein heuristischer Ansatz (Nearest Neighbor Heuristik) verfolgt. Die obere Grenze ergibt sich durch die Zerlegung der Tour in Pendeltouren. Die Summe aller Hin- und Rückwege zu bzw. von den jeweiligen Betriebsmitteln ergibt die maximale Tourenlänge. Auch hier wurde auf die Berücksichtigung kapazitiver Restriktionen sowie von Zeitfenstern verzichtet.

Die Bestimmung der unteren und oberen Grenzen ist abhängig von der zeitlichen Verfügbarkeit der Planungsinformationen, entsprechend wird zwischen statischen und dynamischen Problemen unterschieden. Unter der Annahme, dass Materialbereitstellungsaufträge bei der Tourenplanung rollierend berücksichtigt werden, liegt ein statisches Problem vor. Werden Materialbereitstellungsaufträge jedoch unmittelbar nach ihrem Eintreffen berücksichtigt, wird von einem dynamischen Tourenplanungsproblem gesprochen. Insbesondere bei dynamischen Problemen kann bei der Ermittlung der Grenzen der Fall auftreten, dass Ausgangs- und Endpunkt der Tour nicht mit dem Lager übereinstimmen. In diesem Fall wird der aktuelle Standort als Ausgangspunkt der Tour herangezogen.

Bei der Erarbeitung der Angebote durch die Transportmittelplanungs-Agenten ist stets zu berücksichtigen, dass kapazitive Restriktionen nicht verletzt und dass die spezifischen Anforderungen von Sammel- und Lieferaufträgen berücksichtigt werden, d.h., im Rahmen der Tourenplanung eines Transportfahrzeug ist sicherzustellen, dass ein Sammelauftrag stets zeitlich vor einem Lieferauftrag desselben Materials erfolgt.

Nach Abgabe des Angebots durch die Transportmittelplanungs-Agenten erteilt der Materialbereitstellungs-Agent in seiner Funktion als Koordinator einem Transportmittelplanungs-Agenten einen Zuschlag. Auch der Kommissionierbereich ist über den Zuschlag zu informieren, damit die Materialien auftragspezifisch kommissioniert werden können.

5.3 LOKALE VERBESSERUNG

Nach Erhalt eines Zuschlags nimmt ein Transportmittelplanungs-Agent eine lokale Verbesserung seiner Tour vor. Grundsätzlich ist dies bereits im Rahmen der Angebotsermittlung möglich, jedoch wurde hierauf zur Redu-

zierung des Rechenaufwands verzichtet. Im Rahmen der Tourenplanung können neben exakten Verfahren und Metaheuristiken zwei Gruppen von Heuristiken unterschieden werden: konstruierende und verbessernde Verfahren. Bei der Angebotsermittlung wurde ein konstruierendes Verfahren eingesetzt (sukzessive Einbeziehung). Konstruierende Verfahren dienen der Ermittlung einer zulässigen Lösung. Zur Verbesserung dieser Lösung können Verbesserungsverfahren eingesetzt werden. Hierbei sind zwei Gruppen zu unterscheiden: Intra-Tour- und Inter-Tour-Verbesserungsverfahren.

Die Transportmittelplanungs-Agenten führen eine Verbesserung innerhalb ihrer Tour durch. Dies kann unter anderem durch die Verwendung von Inter-Tour-Operatoren (Adjacent Pairwise Exchange, Exchange, Inversion, Forward Shift, Backward Shift, Double Shift, vgl. [Ree99]) realisiert werden. Der Nachbarschaftsoperator Adjacent Pairwise Exchange vertauscht einen beliebigen Auftrag einer Tour mit einem anderen Auftrag der Tour. Der Exchange-Operator vertauscht hingegen mehrere Aufträge einer Tour. Bei einer Inversion wird ein Teil der Auftragsfolge vollständig in Bezug auf die Reihenfolge der Abarbeitung invertiert. Beim Forward Shift wird ein beliebiger Auftrag aus der Abarbeitungsfolge herausgelöst und an einer im Zeitablauf späteren Position eingefügt. Beim Backward Shift wird ein Auftrag an einer Position zu einem früheren Zeitpunkt der Route eingefügt. Beim Double Shift handelt es sich um eine Kombination aus Forward und Backward Shift. Da es sich im vorliegenden Fall um ein Pickup-and-Delivery-Problem handelt, ist jedoch stets zu berücksichtigen, dass eine Abgabe von Material nicht vor Aufnahme erfolgen kann und dass Kapazitätsrestriktionen nicht verletzt werden dürfen.

Die Nachbarschaftsoperatoren werden wiederholt eingesetzt. Eine verbesserte Lösung bildet jeweils einen Ausgangspunkt für eine erneute Verwendung eines zufällig ausgewählten Nachbarschaftsoperators. Dieses als variable Nachbarschaftssuche bezeichnete Verfahren ist den Metaheuristiken zuzuordnen.

Nach Anwendung eines Nachbarschaftsoperators wird jeweils geprüft, ob eine Bündelung von Sammelaufträgen möglich ist. Eine Bündelung ist nur dann denkbar, wenn gleiche Sammelorte vorliegen. Hierzu ein Beispiel: Einem zellularen Förderer wird ein Materialbereitstellungsauftrag zugeordnet. Dieser lässt sich in einen Sammel- (S1) und einen Lieferauftrag (L1) aufteilen, die Sammel- und Lieferorte seien ebenfalls so bezeichnet. Es ergibt sich damit die Route S1-L1-S1. Es kann angenommen werden, dass der zellulare Förderer einen weiteren Materialbereitstellungsauftrag akquirieren kann. Auch dieser sei in einen Sammel- (S1) und einen Lieferauftrag (L2) aufgeteilt. Die Sammelorte der beiden Materialbereitstellungsaufträge seien gleich. Es lassen sich folgende Routen unter Verwendung der Nachbarschaftsoperatoren

identifizieren: S1-L1-S1-L2-S1, S1-L2-S1-L1-S1, S1-L1-L2-S1 und S1-L2-L1-S1. Es ist ersichtlich, dass die erste und zweite Variante durch Zusammenfassen von Sammelaufträgen verbessert werden können, sofern kapazitive Restriktionen dies zulassen.

Im vorgestellten Vorgehen erfolgen die Cluster- und Routing-Entscheidungen simultan. Entscheidungen hinsichtlich des Clustering (Zuordnung von Transportaufträgen) werden durch den Materialbereitstellungs-Agenten vorgenommen. Die Routing-Entscheidung obliegt den Transportmittelplanungs-Agenten. Neben einer lokalen Verbesserung ist auch der Einsatz von Inter-Tour-Verbesserungsverfahren möglich. Auf eine vertiefende Darstellung sei hier jedoch verzichtet.

6 SIMULATIONSSTUDIEN

Mittels Simulation sollte zum einen ein Funktionsnachweis für das erarbeitete Agentenmodell erbracht werden, zum anderen sollten die eingesetzten Heuristiken bzw. Metaheuristiken hinsichtlich ihrer Qualität bewertet werden. Dazu wurde das Agentenmodell mithilfe eines Simulationswerkzeugs (Tecnomatix Plant Simulation) implementiert.

Insgesamt wurden drei Simulationsstudien mit jeweils 462 Simulationsexperimenten durchgeführt: die Gewichtungsfaktoren von sieben Zielen der Materialbereitstellung wurden dazu jeweils in 20er Schritten von 0 bis 100 Prozent verändert. Die Anzahl der Simulationsexperimente ergibt sich für $k = 5$ Elemente (ein Element entspricht 20 Prozent Zielgewicht) und $n = 7$ Fächer (ein Fach entspricht einem Ziel der Materialbereitstellung), wobei ein Fach beliebig viele Elemente aufnehmen kann, wie folgt:

$$\binom{k+n-1}{k} = 462.$$

In der ersten Simulationsstudie wurde keine lokale Verbesserung oder Inter-Tour-Verbesserung durchgeführt. Die Lösungen wurden ausschließlich auktionenbasiert ermittelt. In der zweiten Simulationsstudie wurde eine lokale Verbesserung durch die Transportmittelplanungs-Agenten vorgenommen und in der dritten Studie wurde darüber hinaus auch eine Inter-Tour-Verbesserung realisiert.

Der Einsatz der lokalen Verbesserung führte in einzelnen Experimenten zu Verschlechterungen einzelner Ziele. Diese Veränderung ist jedoch auf die veränderten Gewichtungsfaktoren in den verschiedenen Simulationsexperimenten zurückzuführen. In allen Simulationsexperimenten wurde jedoch eine Verbesserung hinsichtlich des aggregierten Ziels ΔK erzielt.

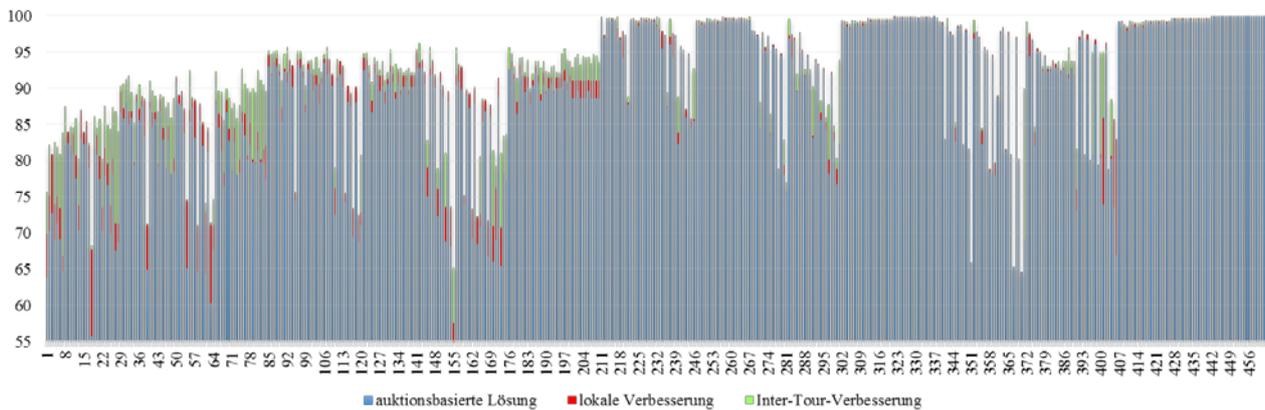


Abbildung 8. Zielerreichungsgrads (in Prozent) ohne Einsatz von Verbesserungsverfahren, mit lokaler Verbesserung und Inter-Tour-Verbesserung [Fah14]

Neben einem Intra-Tour-Verbesserungsverfahren wurde im Simulationsmodell ebenfalls ein Inter-Tour-Verbesserungsverfahren implementiert. Auch hinsichtlich dieses Verfahrens ergaben sich keine Verschlechterungen gegenüber den auktionenbasierten Lösungen, die auf Basis der Angebotsermittlung durch die Transportmittelplanungs-Agenten ermittelt wurden. In circa fünf Prozent der Experimente konnte keine Verbesserung erzielt werden.

Abbildung 8 zeigt den Zielerreichungsgrad für die Simulationsstudien. Ein Zielerreichungsgrad in Höhe von durchschnittlich 89,67 Prozent konnte ohne den Einsatz eines Verbesserungsverfahrens realisiert werden (Konfidenzintervall: [88,77;90,57] bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von fünf Prozent). Unter Einsatz der lokalen Verbesserung konnte die durchschnittliche Zielerreichung auf 90,81 Prozent gesteigert werden (Konfidenzintervall: [90,10;91,69]). Durch eine Inter-Tour-Verbesserung wurde ein mittlerer Zielerreichungsgrad in Höhe von 92,57 Prozent realisiert (Konfidenzintervall: [91,90;93,25]). Es wird ersichtlich, dass die Verwendung eines Verbesserungsverfahrens insbesondere in den ersten Simulationsexperimenten zu erheblichen Verbesserungen der Lösungen führte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Gewichtungsfaktor für das Ziel „Minimierung der Gesamtstreckenlänge des Tourenplans“ in diesen Simulationsexperimenten verhältnismäßig hoch war. Dieses Ziel der Materialbereitstellung wird maßgeblich durch die Tourenplanung beeinflusst, weshalb hier die höchsten Verbesserungspotentiale zu verzeichnen sind.

Die Festlegung der Zielgewichtungsfaktoren in obigem Regelkreis kann wissenschaftlich erfolgen. Im Rahmen des entwickelten Agentenmodells wurden die Gewichtungsfaktoren über eine GUI durch einen menschlichen Entscheidungsträger festgelegt. Sollten die Gewichtungsfaktoren wissenschaftlich bestimmt werden, bietet sich die Möglichkeit, die lokale Verbesserung sowie die Inter-Tour-Verbesserung jeweils ein- und abzustellen, wodurch Rechenzeiten des Systems verbessert werden können.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Beitrags wurde das Modell der adaptiven Materialbereitstellung vorgestellt. Grundsätzlich wurde hinsichtlich des Wechsels zwischen Materialbereitstellungsstrategien unterschieden, die Infrastrukturveränderungen erfordern und solchen, die keine Infrastrukturveränderungen erfordern. Letztere wurden im Rahmen des Beitrags fokussiert. Es wurde herausgestellt, dass dies in der Regel solche Wechsel von Materialbereitstellungsstrategien sind, die kurzfristige Planungsprobleme, z.B. die Tourenplanung oder die Festlegung der Form der Bereitstellung, berühren. Mithilfe einer Simulation wurde die Funktionsfähigkeit des Agentenmodells nachgewiesen. Die verwendeten Heuristiken bzw. Metaheuristiken wurden in Simulationsexperimenten geprüft.

Perspektivisch sollen Lernalgorithmen in das Agentenmodell implementiert werden, die die Auswahl einer geeigneten Materialbereitstellungsstrategie unterstützen. Des Weiteren wird derzeit eine agentenbasierte Planungsmethodik entwickelt, die auch Bewertungen hinsichtlich des Wechsels von Materialbereitstellungsstrategien berücksichtigt, die Infrastrukturveränderungen erfordern.

8 QUELLEN

- [Bic11] Bichler K, Krohn R, Philippi P (2011) *Gabler Kompaktlexikon Logistik*, 2. Aufl., Gabler, Wiesbaden
- [Ble04] Blecker T, Kaluza B (2004). *Heterarchische Hierarchie: Ein Organisationsprinzip flexibler Produktionssysteme*, Diskussionsbeiträge des Instituts für Wirtschaftswissenschaften der Universität Klagenfurt

- [Bul94] Bullinger H-J, Lung M (1994). *Planung der Materialbereitstellung in der Montage*, Teubner, Stuttgart
- [Chi09] Chituc C-M, Restivo F J (2009). *Challenges and Trends in Distributed Manufacturing Systems: Are wise engineering systems the ultimate answer?*, In: Second International Symposium on Engineering Systems, MIT, Cambridge, June 15-17
- [Fah14] Fahl M (2014). *Entwicklung eines Konzepts zur simulationsbasierten Leistungsbewertung intelligent organisierter Produktions- und Transportprozesse*, Master-Arbeit am Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik, Universität Rostock
- [Li14] Li K, Chen B, Sivakumar A I, Wu Y (2014) *An inventory-routing problem with the objective of travel time minimization*, In: European Journal of Operations Research, Vol. 236, S. 936-945
- [Nyh06] Nyhuis P, Wiendahl H-P, Fiege T, Mühlenbruch H (2006). *Materialbereitstellung in der Montage*, In: Lotter B, Wiendahl H-P (2006). *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis*, Springer, Berlin, S. 323-348
- [Pro14] Prodhon C, Prins C (2014). *A survey of recent research on location-routing problems*, In: European Journal of Operations Research, Vol. 238, S. 1-17
- [Ric10] Richter M (2010). *Adaptive Liefer- und Bereitstellungskonzepte für wandlungsfähige Montagesysteme zur Ausschöpfung der logistischen Leistungsfähigkeit*, Projekt-Abschlussbericht, Hannover
- [See13] Seebacher G (2013). *Ansätze zur Beurteilung der produktionswirtschaftlichen Flexibilität*, Dissertation, Logos-Verlag, Berlin
- [Ree99] Reeves C R (1999). *Landscapes, operators and heuristic search*, In: Annals of Operations Research, Vol. 86, S. 473-490
- [Voj10] Vojdani N, Lootz F, Kirwitzke D (2010). *Lean Logistics - Innovative Bewertungsmethodik zur Auswahl schlanker Materialbereitstellungsstrategien*, In: Logistics Journal: Proceedings, Vol. 06
- [Voj14] Vojdani N, Knop M (2014). *Intelligente Materialbereitstellung für selbstorganisierende Produktionsprozesse*, In: Jahrbuch Logistik 2014, free beratung GmbH, Korschenbroich, S. 58-62
- [Wen10] Wenger W (2010). *Multikriterielle Tourenplanung*, Gabler, Wiesbaden
- [Zäp00] Zäpfel G (2000): *Strategisches Produktions-Management*, 2. Aufl., Oldenbourg, München [u.a.]

Prof. Dr.-Ing. Nina Vojdani, Professor am Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik, Universität Rostock.

Dipl.-Wirt.-Ing. Mathias Knop, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik, Universität Rostock.

Adresse: Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik, Universität Rostock, Richard-Wagner-Str. 31, 18119 Rostock, Deutschland, Tel: +49 381 498-9250, Fax: +49 381 498-9252, E-Mail: logistik@uni-rostock.de