

Adaptive Materialbereitstellung – ein neuartiges Konzept für die Materialbereitstellungsplanung in veränderungsfähigen Produktionssystemen

Adaptive line feeding – a new planning approach for line feeding processes in changeable production systems

*Prof. Dr.-Ing. Nina Vojdani
Dipl.-Wirt.-Ing. Mathias Knop*

*Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Universität Rostock*

Bedingt durch eine zunehmende Produktindividualisierung unterliegen Montageprozesse einem rasanten Wandel. So unterlag die deutsche Automobilindustrie von 1991 bis 2007 Volumenschwankungen von mehr als 50 Prozent. Dies erfordert eine adäquate Veränderungsfähigkeit der installierten Produktionssysteme. Die Veränderungsfähigkeit solcher Systeme beschreibt ihre Eigenschaft, interne und externe Veränderungen zu antizipieren, vorbeugend Maßnahmen zu ergreifen bzw. auf unvorhersehbare oder zufällige Ereignisse zu reagieren. Zur Sicherstellung einer erforderlichen Veränderungsfähigkeit eines Produktionssystems sowie zugehöriger produktionslogistischer Prozesse ist es erforderlich, regelmäßig die Notwendigkeit etwaiger Veränderungsmaßnahmen zu prüfen.

Zu diesem Zweck wurde am Lehrstuhl für Produktionsorganisation und Logistik das Konzept der adaptiven Materialbereitstellung entwickelt. Ziel der adaptiven Materialbereitstellung ist die Anpassung von Materialbereitstellungsprozessen aufgrund wahrgenommener oder antizipierter Veränderungen innerhalb eines Produktionssystems.

[Schlüsselwörter: Adaptive Materialbereitstellung, Veränderungsfähigkeit]

Due to the increasing importance of individualised production processes, assembly processes are subject of rapid change. The German automotive industry, for instance, perceived variations in volume of about 50 percent between 1991 and 2007. In order to cope with such challenges, production systems require adequate changeability. Changeability characterises the ability of a system to anticipate internal as well as external changes, to take preventive measures and to react to unforeseen or random events, respectively. To guarantee the required

changeability of a production system as well of its corresponding logistics subsystems it appears necessary to regularly evaluate required change measures.

For this purpose, the Chair of Production Organisation and Logistics developed an approach for adaptive line feeding which is geared to adjust line feeding processes based on perceived or anticipated changes within production systems.

[Keywords: adaptive line feeding, changeability]

1 EINFÜHRUNG

Bedingt durch eine zunehmende Produktindividualisierung unterliegen Montageprozesse einem rasanten Wandel. So unterlag die deutsche Automobilindustrie von 1991 bis 2007 Volumenschwankungen von mehr als 50 Prozent. Mit der Verschiebung des Order Penetration Points in immer frühere Phasen der Wertschöpfungskette, beispielsweise in Make-to-Order- oder Engineer-to-Order-Supply Chains, sind Montageprozesse zunehmend individueller auszurichten. Neben einer Individualisierung der Produkte zeichnet sich auch eine Verkürzung der Produktlebenszyklen ab. Zwischen 2002 und 2011 nahm die durchschnittliche Lebenszyklusdauer bei BMW um 19 Prozent ab, im gleichen Zeitraum nahm die Anzahl angebotener Modelle um 83 Prozent zu. Dies erfordert eine hohe Veränderungsfähigkeit der installierten Produktionssysteme.

Die Veränderungsfähigkeit eines Produktionssystems charakterisiert seine Fähigkeit, interne und externe Veränderungen zu antizipieren, vorbeugend Maßnahmen zu ergreifen bzw. auf unvorhersehbare oder zufällige Ereignisse zu reagieren. Eine hohe Veränderungsfähigkeit der Produktionsressourcen setzt eine abgestimmte Ausrichtung

unterstützender logistischer Prozesse und Ressourcen voraus. Materialbereitstellungsprozesse sind daher hinsichtlich der Notwendigkeit etwaiger Veränderungsmaßnahmen regelmäßig zu prüfen.

Zu diesem Zweck wurde am Lehrstuhl für Produktionsorganisation und Logistik an der Universität Rostock das Konzept der adaptiven Materialbereitstellung entwickelt. Ziel der adaptiven Materialbereitstellung ist die Anpassung von Materialbereitstellungsprozessen aufgrund wahrgenommener oder antizipierter Veränderungen innerhalb eines Produktionssystems.

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein Konzept zur Auswahl adäquater Materialbereitstellungsstrategien in veränderungsfähigen Produktionssystemen vorgestellt. Zunächst sollen Anforderungen an die Auswahl von Materialbereitstellungsstrategien in veränderungsfähigen Produktionssystemen aufgezeigt werden. Im Anschluss wird das Modell der adaptiven Materialbereitstellungsplanung skizziert. Dieses umfasst eine reaktive und eine antizipative Planungskomponente, wobei im Rahmen dieses Beitrags der Schwerpunkt auf die antizipative Veränderungsplanung gelegt werden soll. Im Anschluss wird ein mehrstufiges Verfahren zur antizipativen Veränderungsplanung im Kontext der Materialbereitstellung präsentiert. Dabei gilt es, geeignete Materialbereitstellungsstrategien in Abhängigkeit antizipierter Veränderungsbedarfe zu identifizieren. Hierfür wird ein Fuzzy-Axiomatic-Design-basierter Ansatz herangezogen. In einem nächsten Schritt wird ein dynamisches Optimierungsmodell präsentiert, das eine periodenübergreifende Auswahl von Materialbereitstellungsstrategien erlaubt.

2 VERÄNDERUNGSFÄHIGE PRODUKTIONSSYSTEME

Die Planung von Produktionssystemen sowie zugehöriger -prozesse orientiert sich unter anderem an sogenannten Megatrends und abgeleiteten Veränderungstreibern. Hierzu zählen beispielsweise die zunehmende Individualisierung, die wachsende Bedeutung von Wissen in Unternehmen, die Globalisierung oder die fortschreitende Alterung der Gesellschaft [Wes13].

Nach Eversheim und Schuh [ES96] bezeichnet ein Produktionssystem eine Leistungseinheit, in der organisatorisch-technische Tätigkeiten subsumiert werden, die zur Realisierung einer Produktionsaufgabe erforderlich sind. Abhängig vom Betrachtungskontext können hinsichtlich eines Produktionssystems verschiedene Hierarchieebenen abgegrenzt werden: Netzwerk-, Fabrik-, Bereichs- und Arbeitsstationsebene. Jede dieser Hierarchieebenen wird in einer turbulenten Produktionsumwelt durch spezifische, externe Veränderungstreiber beeinflusst. Marktseitige Entwicklungen, veränderte Lohnkosten und Wechselkurse beeinflussen beispielsweise vor allem die Produktionsnetzwerkebene, Veränderungen hinsichtlich des Produktmix

oder -designs die Fabrikebene, Nachfrageschwankungen oder Änderungen des Komponentenmix die Bereichsebene und veränderte Prozessplanungen oder Materialengpässe die Arbeitsstationsebene [WENZWDB07].

Um der Verschiedenartigkeit dieser Veränderungstreiber auf den unterschiedlichen Hierarchieebenen eines Produktionssystems zu begegnen, wurden unterschiedliche Konzepte im Umgang mit Veränderungen entwickelt. Determinieren Veränderungen maßgeblich die Arbeitsstationsebene, ist eine Umrüstbarkeit oder Rekonfigurierbarkeit der Produktionssysteme erforderlich; wird die Bereichsebene hingegen tangiert, wird von Flexibilität gesprochen. Hinsichtlich Veränderungen auf Fabrikebene hat sich der Begriff der Wandlungsfähigkeit etabliert. Liegen darüber hinaus Veränderungen auf Fabriknetzwerkebene vor, ist von Agilität die Rede. Derartige Entwicklungen im Bereich der Produktionsforschung werden vom College International pour la Recherche en Productique (CIRP) unter dem Begriff „Changeable Manufacturing“ zusammengefasst, weshalb nachfolgend lediglich von der Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems gesprochen werden soll.

Auf eine detaillierte Abgrenzung und vertiefte Beschreibung der genannten Veränderungsformen werde hier verzichtet und auf die Fachliteratur verwiesen. Lediglich aufgrund der besonderen Bedeutung von „Flexibilität“ sowie „Wandlungsfähigkeit“ im Kontext der Materialbereitstellungsplanung werde eine Unterscheidung hinsichtlich dieser Veränderungsformen vorgenommen.

Wandlungsfähigkeit bezeichnet eine Erweiterung des Flexibilitätsbegriffs. Im Rahmen der Planung der erforderlichen Flexibilität eines Systems ist im Vorfeld festzulegen, innerhalb welcher Grenzen das System in der Lage sein soll, definierte Aufgaben wahrzunehmen. Diese Grenzen beziehen sich dabei auf ein Intervall, das nach unten durch eine Mindest- und nach oben durch eine zu bewerkstellende Höchstanforderung begrenzt wird. Dieses Intervall wird als Flexibilitätspuffer bezeichnet. Wandlungsfähigkeit liegt dann vor, wenn das Produktionssystem darüber hinaus befähigt wird, zusätzlich zur geplanten Aufgabenerfüllung eine Neuausrichtung der Produktionsprozesse zu ermöglichen [Neu14]. Die Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems wird bereits im Rahmen der Planung des Produktionssystems determiniert. Zu den Wandlungsbefähigern gehören Voraussetzungen wie Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität.

Exemplarisch wurde dieser Zusammenhang anhand der Produktionskapazität eines Systems über verschiedene Perioden in Abbildung 1 veranschaulicht. So weist das Produktionssystem in den ersten zwei Perioden eine definierte Flexibilität auf und kann innerhalb dieses Flexibilitätspuffers unterschiedliche Kapazitätsbedarfe bedienen. Steigt der Kapazitätsbedarf innerhalb dieser Perioden hingegen sehr stark an (wie beispielsweise in der dritten Periode),

kann dieser Bedarf nicht durch den vorhandenen Flexibilitätspuffer gedeckt werden. Da das System jedoch bereits im Rahmen der Planung wandlungsfähig ausgerichtet wurde, kann das Produktionssystem mit verhältnismäßig geringen Aufwand modifiziert werden und durch eine Investition einen neuen Flexibilitätspuffer erlangen.

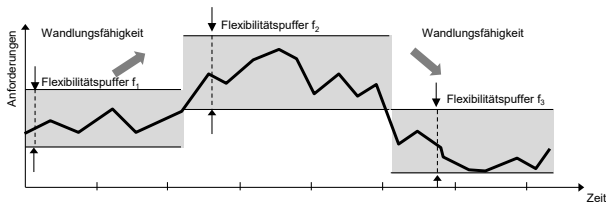


Abbildung 1. Flexibilität und Wandlungsfähigkeit ([NKW10] zitiert nach [ZMV05])

3 ANFORDERUNGEN AN DIE AUSWAHL VON MATERIALBEREITSTELLUNGSSTRATEGIEN IM KONTEXT VERÄNDERUNGSFÄHIGER PRODUKTIONSSYSTEME

Die Leistung eines Montagesystems wird durch die Effizienz und Effektivität der Materialbereitstellungsprozesse beeinflusst. Richter stellt beispielsweise fest, dass die Mehrzahl aller Störungen in der Montage auf Materialmängel zurückzuführen sei, mehrheitlich zählen hierzu Mängel bei der Materialbereitstellung [Ric10].

Untersuchungen zur veränderungsfähigen Ausrichtung logistischer Prozesse wurden bereits umfänglich von Schedlbauer [Sch08] unternommen. Schedlbauer liefert mit seiner Arbeit die Grundlagen zur wandlungsfähigen Ausrichtung logistischer Prozesse. Die Bereitstellung eines bestimmten Grads an Wandlungsfähigkeit ist jedoch per se nicht nur mit Vorteilen verbunden, sondern kann ebenfalls negative ökonomische Konsequenzen aufweisen (z.B. sind äußerst flexible Systeme häufig durch einen vergleichsweise geringeren Durchsatz gegenüber weniger flexiblen Systemen gekennzeichnet). Es bedarf daher Planungskonzepte, die Entscheidungsträger dazu befähigen, die Notwendigkeit einer Anpassung einer vorhandenen Materialbereitstellungsstrategie zu prüfen.

Die Auswahl einer Materialbereitstellungsstrategie erfolgt in der Literatur häufig unter Annahme eines deterministischen Planungsumfelds [CP11] und wird damit den Anforderungen heutiger Produktionsumgebungen nur bedingt gerecht. Aufgrund der wachsenden Bedeutung veränderungsfähiger Produktionssysteme bedarf die Bewertung einer Materialbereitstellungsstrategie ebenfalls der Berücksichtigung zukünftig erwarteter Ereignisse. Nyhuis et al. konstatieren in diesem Zusammenhang existierende Unsicherheiten hinsichtlich des Eintrittszeitpunkts und der Intensität etwaiger Veränderungen [NKW10].

In einem sich kontinuierlich verändernden Produktionsumfeld gewinnt die Bewertung von Materialbereitstellungsstrategien unter Berücksichtigung der Adaptionfähigkeit eine wachsende Bedeutung. Ein adaptionfähiges System ist durch die Fähigkeit gekennzeichnet, internen und externen Einflüssen durch eine Anpassung zu begegnen. Sie erweitern reaktiv operierende Systeme um eine antizipative Komponente.

Auf diesem Grunde wurden folgende Anforderungen an die Auswahl von Materialbereitstellungsstrategien im Konzept veränderungsfähiger Produktionssysteme identifiziert:

- Veränderungsfähigkeit intralogistischer Systeme: Die Untersuchungen Schedlbauers geben einen umfassenden Überblick über Möglichkeiten einer veränderungsfähigen Ausrichtung der intralogistischen Systeme der Materialbereitstellung. Eingesetzte intralogistische Systeme sollten bei Änderung der Einsatzvoraussetzungen möglichst weiterverwendet werden können.
- Leistungsorientierung des Bewertungsverfahrens: Vorteile einer hohen Veränderungsfähigkeit in einem dynamischen Produktionsumfeld können nur dann erschlossen werden, wenn eine Prüfung hinsichtlich der Erfüllung erforderlicher Leistungsanforderungen an die Materialbereitstellung erfolgt. Diese Anforderung findet u.a. Berücksichtigung bei: [BFPS09], [BM92], [BL94], [CP11], [Fac14], [LLG15], [Ric10], [VLK10].
- Dynamischer Charakter der Planung: Konventionelle Ansätze zur Auswahl von Materialbereitstellungsstrategien vernachlässigen etwaige Veränderungen in der Zukunft. Die Veränderungsfähigkeit des Produktionssystems und die damit einhergehende dynamische Struktur eines solchen Auswahlproblems werden in der Regel im Rahmen der Planung vernachlässigt, vgl. [Ric10]. Ein periodenspezifischer Abgleich von Veränderungsbedarf und -angebot sollte inhärenter Planungsbestandteil sein.
- Berücksichtigung von Unsicherheiten im Rahmen der Planung: Die Berücksichtigung von Unsicherheiten ist im Kontext der Planung veränderungsfähiger Produktionssysteme elementar, finden in der Literatur jedoch eher selten Berücksichtigung, vgl. z.B. [Fac14]. Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Vorhersagbarkeit bezüglich Zeitpunkt und Intensität potentieller Veränderungen nur eingeschränkt möglich ist. Ein Planungsansatz sollte damit zusammenhängende Unsicherheiten berücksichtigen können.

Diese Anforderungen finden Eingang in das am Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik entwickelte Konzept der adaptiven Materialbereitstellungsplanung.

4 KONZEPT DER ADAPTIVEN MATERIALBEREITSTELLUNG

Ausgehend von der Annahme, dass ein Materialbereitstellungssystem im Laufe seiner Nutzungszeit veränderten Anforderungen an die Systemleistung unterliegt, können verschiedene Strategien im Umgang mit veränderlichen Anforderungen abgeleitet werden. Hierzu zählen unterschiedliche Anpassungs- und Präventionsstrategien. Während Anpassungsstrategien einen reaktiven Charakter besitzen, weisen Präventionsstrategien einen antizipativen Charakter auf.

Haben sich die Anforderungen an einen Materialbereitstellungsprozess verändert und ist eine vorhandene Materialbereitstellungsstrategie nicht mehr bzw. nur unzureichend in der Lage, den veränderten Anforderungen gerecht zu werden, kann eine Materialbereitstellungsstrategie aufgrund einer beobachteten Veränderung *ex post* modifiziert werden (Anpassungsstrategie). Wird hingegen mit einer Veränderung in der Zukunft gerechnet, kann eine erwartete künftige Veränderung bereits zum Planungszeitpunkt berücksichtigt werden (Präventionsstrategie).

Aus der Vielzahl verschiedener Ausgestaltungen obiger Strategien, z.B. in Hinblick auf die Regelmäßigkeit der Prüfung hinsichtlich der Erfüllung von Anforderungen, kann ein Konzept für die adaptive Materialbereitstellung abgeleitet werden. Grundsätzlich weist dieses eine reaktive und eine antizipative Planungskomponente auf. Für eine nähere Beschreibung der reaktiven Planungskomponente sei auf [VK14] oder [VK15] verwiesen. Die reaktive Planungskomponente kann beispielsweise durch ein agentenbasiertes System realisiert werden, das auf Basis identifizierter Veränderungen innerhalb des Materialbereitstellungsprozesses operative Anpassungen identifiziert. Im Mittelpunkt dieses Beitrags steht jedoch die vertiefte Beschreibung der antizipativen Planungskomponente.

Die antizipative Planungskomponente bzw. antizipative Veränderungsplanung weist mehrere Stufen auf, die folgend näher charakterisiert werden.

1. Stufe: Definition von Flexibilitätspuffern

Wie in Abschnitt 3 skizziert, ermangeln bestehende Planungsansätze eines dynamischen Charakters. Dies schließt zwar nicht aus, dass ein Materialbereitstellungssystem in Hinblick auf einen antizipierten Bereitstellungsbedarf dimensioniert wird, jedoch wird die etwaige Veränderung des Bereitstellungsbedarfs im Zeitablauf nicht explizit im Rahmen der Planung berücksichtigt.

Um diesem Umstand Genüge zu leisten, werde hier eine Mehrperiodenbetrachtung herangezogen. Jede Periode innerhalb eines festzulegenden Planungshorizonts sei durch spezifische Anforderungen an die Materialbereitstellung charakterisiert. Wie im Zusammenhang mit der Dis-

kussion der Anforderungen an den Auswahlprozess im Abschnitt 3 thematisiert, sollte die Auswahl leistungsbasiert / anforderungsgerecht erfolgen. Insofern ist eine periodenspezifische Auswahl anforderungsgerechter Materialbereitstellungsstrategien erforderlich.

In einem ersten Schritt sind ausgehend vom Planungszeitpunkt Einschätzungen hinsichtlich zukünftiger Veränderungen bzw. Anforderungen an den Materialbereitstellungsprozess durch ein Expertenteam vorzunehmen. Diese Einschätzungen sollten hinsichtlich unterschiedlicher Leistungsparameter der Materialbereitstellung (z.B. Flächenbedarf für die Materialbereitstellung in der Produktion, mengenmäßiger Bereitstellungsbedarf usw.) vorgenommen werden. Im Ergebnis liegt eine Einschätzung der erforderlichen Flexibilitätspuffer im Zeitablauf vor (jeweils begrenzt durch die Mindest- und die Höchstanforderung in Bezug auf einen Leistungsparameter, z.B. Mindest- und Höchstbereitstellungsmenge, die durch eine bestimmte Strategie zu sichern ist).

2. Stufe: Ermittlung anforderungsgerechter Materialbereitstellungsstrategien

Auf Basis der identifizierten Anforderungen und dem jeweiligen Eignungsprofil einer Materialbereitstellungsstrategie ist in einem zweiten Schritt ein Abgleich wahrzunehmen, um die Eignung einer Materialbereitstellungsstrategie zur Erfüllung einer Bereitstellungsanforderung zu bewerten. Hierfür wurde am Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik ein Fuzzy-Axiomatic-Design-basierter Ansatz entwickelt [VK16], welcher:

- eine multikriterielle Auswahl von Materialbereitstellungsstrategien ermöglicht.
- Leistungsanforderungen an den Materialbereitstellungsprozess zugehörigen Leistungsangeboten unterschiedlicher Materialbereitstellungsstrategien gegenüberstellt.
- sowohl qualitative als auch quantitative Leistungsparameter berücksichtigen kann.
- weitgehend nicht-kompensatorischen Charakter besitzt, d.h., die Nicht-Erfüllung eines Leistungskriteriums wird nicht durch eine besonders gute Erfüllung eines anderen Leistungskriteriums kompensiert.

Zur Modellierung der Anforderungen an die Materialbereitstellung sowie der Leistungsangebote verschiedener Materialbereitstellungsstrategien werden hierbei unscharfe Mengen (Fuzzy Sets) herangezogen. Die Anforderung an den Bereitstellungsprozess hinsichtlich eines Leistungsparameters der Materialbereitstellung wird dabei durch die sogenannte Design Range abgebildet, während das Leistungsangebot einer Materialbereitstellungsstrategie durch die System Range beschrieben wird. Die Überdeckung von Design Range und System Range – die sogenannte Common Area – ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass die gestellten Anforderungen an einen Materialbereitstel-

lungsprozess durch eine bestimmte Materialbereitstellungsstrategie hinsichtlich eines Leistungsparameters erfüllt werden, vgl. Abbildung 2.

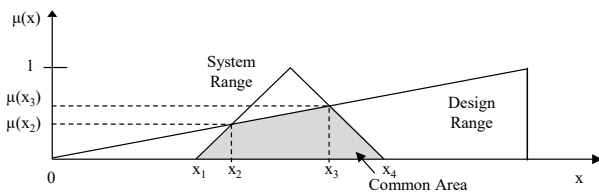


Abbildung 2. System Range, Design Range und Common Area für unscharfe Mengen [KÇ09]

Bei Verwendung dieses Verfahrens gilt es, verschiedene Leistungsparameter der Materialbereitstellung zu berücksichtigen. Zur Aggregation wird eine Kennzahl verwendet, die als Informationsinhalt bezeichnet wird. Ein Informationsinhalt nahe Null kennzeichnet eine hohe Übereinstimmung der Anforderungen an den Materialbereitstellungsprozess und der Fähigkeit einer Materialbereitstellungsstrategie, diesen Anforderungen gerecht zu werden.

Die Verwendung des beschriebenen Fuzzy-Axiomatic-Design-basierten Ansatzes erlaubt es, sofern vorhanden, mehrere gut geeignete Materialbereitstellungsstrategien mit geringem Informationsinhalt zu identifizieren.

3. Stufe: Dynamische Optimierung

Die vorausgehenden Planungsstufen ermöglichen die Identifizierung möglicher Materialbereitstellungsstrategien je Periode. Im Anschluss ist eine Auswahlentscheidung vorzunehmen, welche Materialbereitstellungsstrategie in welcher Periode zu implementieren ist.

Dazu wurde ein dynamisches Optimierungsmodell entwickelt, das eine periodenübergreifende Auswahl einer optimalen Materialbereitstellungspolitik (optimale Folge von Materialbereitstellungsstrategien über alle Planungsperioden) ermöglicht [VK15]:

$$K_t(l_t) = \min_{\substack{x_{p,t} \geq 0 \\ l_t + \sum_{p \in P} x_{p,t} \geq 1 \\ \sum_{p \in P} \sigma(x_{p,t}) \leq 1}} \left(\sum_{p \in P} \sigma(x_{p,t}) K_{p,t}^I + K_{p_t^*}^B + K_{t+1}(l_{t+1}) \right)$$

Das Modell erlaubt es, eine Vielzahl von Leistungsparametern der Materialbereitstellung simultan zu berücksichtigen. Vereinfacht seien hier jedoch nur Betriebs- und Investitionskosten von Materialbereitstellungsstrategien berücksichtigt.

Der Term $K_t(l_t)$ charakterisiert die aufgrund gewählter Materialbereitstellungsstrategien resultierenden Kosten in

einer Periode t bis zum Ende des Planungshorizonts: insofern gilt es, die Kosten $K_1(\cdot)$ zu minimieren, um ein gesamtkostenoptimales Ergebnis zu erzielen. $K_1(\cdot)$ beschreibt die Kosten, die aus der Implementierung der Materialbereitstellungsstrategien ausgehend von Periode 1 bis zum Ende des Planungshorizonts resultieren. Der Term l_t beschreibt dabei die Restlaufdauer einer Materialbereitstellungsstrategie für die Periode t , d.h. die Anzahl Perioden, die eine installierte Materialbereitstellungsstrategie noch zu verwenden ist.

Im Rahmen der Ermittlung von $K_t(l_t)$ sind sämtliche Investitions- und Betriebskosten zukünftiger Perioden zu minimieren. Dabei bezeichnet $K_{p,t}^I$ die Investitionskosten einer Materialbereitstellungsstrategie $p \in P$ in der Periode t , die mit der Installation der Materialbereitstellungsstrategie p verbunden sind. Die Menge P umfasst die in der zweiten Planungsstufe identifizierten Materialbereitstellungsstrategien, die grundsätzlich geeignet erschienen, die zukünftigen Anforderungen an den Materialbereitstellungsprozess zu erfüllen. Die Investitionskosten wurden in obigem Modell zusätzlich mit einer Schaltervariable $\sigma(\cdot)$ versehen. Die Schaltervariable weist den Wert 1 auf, wenn in der Periode t eine neue Materialbereitstellungsstrategie gewählt werden soll. Sie hat den Wert 0, wenn kein Wechsel der Materialbereitstellungsstrategie in der Periode t erfolgt. Der Term $\sum_{p \in P} \sigma(x_{p,t}) \leq 1$ stellt hierbei sicher, dass eine Auswahl mehrerer Materialbereitstellungsstrategien innerhalb einer Periode t unterbunden wird. Die Variable $x_{p,t}$ beschreibt, ob in der Periode t eine neue Materialbereitstellungsstrategie p gewählt werden und wie viele Perioden sie ggf. bestehen soll. Es ist daher stets sicherzustellen, dass $x_{p,t} \geq 0$ gilt. Schließlich bezeichnet $K_{p_t^*}^B$ die in der Periode t entstehenden Betriebskosten, die von der in der Periode t gewählten Materialbereitstellungsstrategie p_t^* abhängen (wenn in Periode t ein Wechsel der Materialbereitstellungsstrategie erfolgt, nimmt p_t^* den gleichen Wert wie p in $K_{p,t}^I$ an, erfolgt kein Wechsel, gelte $p_t^* = p_{t-1}^*$). Durch die Nebenbedingung $l_t + \sum_{p \in P} x_{p,t} \geq 1$ wird ferner gesichert, dass in jeder Periode eine Materialbereitstellungsstrategie installiert wurde: entweder weist die Restlaufdauer einen Wert größer 0 auf ($l_t \geq 1$) oder eine neue Strategie ist in Periode t zu wählen ($\sum_{p \in P} x_{p,t} \geq 1$).

Die Nutzung obigen Modells erlaubt die Ableitung einer optimalen Bereitstellungspolitik innerhalb des Planungshorizonts. Es sei darauf hingewiesen, dass der beschriebene Ansatz ein deterministisches Planungsumfeld voraussetzt. Wie jedoch von Nyhuis et al. konstatiert, sind der Zeitpunkt und der Umfang einer Veränderung in einer turbulenten Produktionsumwelt nicht genau prognostizierbar [NKW10]. Deshalb wurde obiges Modell dahingehend modifiziert, dass auch imperfekte Informationen berücksichtigt werden können.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Im Beitrag wurden Anforderungen an die Planung von Materialbereitstellungsprozessen in veränderungsfähigen Produktionssystemen definiert. Dazu wurde der Stand der Forschung hinsichtlich dieser Anforderungen geprüft. Es konnte festgestellt werden, dass die vorhandene Fachliteratur mehrheitlich der Anforderung nach einer leistungsorientierten Auswahl gerecht wird, jedoch spezifische Aspekte veränderungsfähiger Produktionssysteme bislang nicht in Auswahlverfahren für Materialbereitstellungsstrategien berücksichtigt wurden. Es wurde deshalb ein Modell für die adaptive Materialbereitstellung vorgestellt, das sowohl eine reaktive als auch antizipative Planungskomponente aufweist.

6 QUELLEN

- [BFPS09] Battini D, Faccio M, Persona A; Sgarbossa F (2009) *Design of the optimal feeding policy in an assembly system*, International Journal of Production Economics, Vol. 121, No. 1, pp. 233-254
- [BM92] Bozer Y A, McGinnis L F (1992) *Kitting versus line stocking: A conceptual framework and a descriptive model*, International Journal of Production Economics, Vol. 28, No. 1, pp. 1-19
- [BL94] Bullinger H-J, Lung M M (1994) *Planung der Materialbereitstellung in der Montage*, Teubner, Stuttgart
- [CP11] Caputo A C, Pelagagge P M (2011) *A methodology for selecting assembly system feeding policy*, Industrial Management & Data Systems, Vol. 111, No. 1, pp. 84-112
- [ES96] Eversheim W, Schuh G (1996) *Produktion und Management*, Springer, Berlin
- [Fac14] Faccio M (2014) *The impact of production mix variations and models varieties on the parts-feeding policy selection in a JIT assembly system*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 72, No. 1, pp. 543-560
- [KÇ09] Kahraman C, Kaya İ, Çebi S (2009) *A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process*, Energy, Vol. 34, No. 10, pp. 1603-1616
- [LLG15] Limère V; van Landeghem H, Goetschalckx M (2015) *A decision model for kitting and line stocking with variable operator walking distances*, Assembly Automation, Vol. 35, No. 1, pp. 47-56
- [Neu14] Neumann M (2014) *Methode für eine situationsbasierte Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit in der Serienmontage*, Stuttgarter Beiträge zu Produktionsforschung, Dissertation, Fraunhofer Verlag, Stuttgart
- [NKW10] Nyhuis P, Klemke T, Wagner C (2010) *Wandlungsfähigkeit – ein systemischer Ansatz*, S. 3-21, in: Nyhuis P (2010) *Wandlungsfähige Produktionssysteme*, GITO-Verlag, Berlin
- [Ric10] Richter M (2010) *Adaptive Liefer- und Bereitstellungs-konzepte für wandlungsfähige Montagesysteme zur Ausschöpfung der logistischen Leistungsfähigkeit*, Schlussbericht der Forschungsstelle Institut für Integrierte Produktion gGmbH (IPH)
- [Sch08] Schedlbauer M J (2008) *Adaptive Logistikplanung auf Basis eines standardisierten, prozessorientierten Baustein-konzepts*, Dissertation, TU München
- [VK14] Vojdani N, Knop M (2014) *Adaptive Materialbereitstellung in flexiblen Produktionssystemen auf Grundlage einer agentenbasierten Transportsteuerung*, in: Günthner W A (2014) *Tagungsband, 10. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik*, Garching bei München, 8.-9. Oktober 2014, S. 97-106
- [VK15] Vojdani, N, Knop M (2015) *Agent-based Approach for Adaptive Line Feeding*, in: Kartnig G, Zrnić N, Bošnjak S: *MHCL '15, XXI International Conference on "Material Handling, Constructions and Logistics"*, 23rd - 25th September, 2015, Vienna
- [VK16] Vojdani N, Knop M (2016) *Leistungsorientierte Bewertung und Auswahl von Materialbereitstellungsstrategien mittels Fuzzy Axiomatic Design*, Logistics Journal: Proceedings

- [VLK10] Vojdani N, Lootz F, Kirwitzke D (2010) *Lean Logistics - Innovative Bewertungsmethodik zur Auswahl schlanker Materialbereitstellungsstrategien*, Logistics Journal: Proceedings, Vol. 06
- [Wes13] Westkämper E (2013) *Struktureller Wandel durch Megatrends*, S. 7-9, in: Westkämper E, Spath D, Constantinescu C, Lentjes J (2013) *Digitale Produktion*, Berlin et al., Springer
- [WENZWDB07] Wiendahl H-P, ElMaraghy H A, Nyhuis P, Zäh M F, Wiendahl H-H, Duffie N, Bricke M (2007) *Changeable Manufacturing – Classification, Design and Operation*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 56, No. 2, pp. 783-809
- [ZMV05] Zäh M F, Moeller N, Vogl W (2005) *Symbiosis of Changeable and Virtual Production – The Emperor’s New Clothes or Key Factor for Future Success?*, pp. 3-10, in: Zäh M F; Reinhart G (2005) *1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005)*, Herbert Utz Verlag, München

Prof. Dr.-Ing. Nina Vojdani ist Professor am Lehrstuhl für Produktionsorganisation und Logistik an der Universität Rostock.

Dipl.-Wirt.-Ing. Mathias Knop ist Doktorand am Lehrstuhl für Produktionsorganisation und Logistik an der 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: lpj@uni-rostock.de