

Konfiguration von Materialbereitstellungssystemen auf Basis imperfekten Wissens

Configuring line feeding systems based on imperfect knowledge

Nina Vojdani
Mathias Knop

Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Universität Rostock

Agilen Planungskonzepten im Kontext der Materialbereitstellung obliegt eine immer größere Bedeutung. Konventionelle Planungsmodelle, die auf der Annahme einer weitgehenden Konstanz der Produktionsbedingungen basieren, werden den Anforderungen heutiger Produktionssysteme nicht hinreichend gerecht. Zu diesem Zweck wurde das Konzept der adaptiven Materialbereitstellung entwickelt, das u. a. antizipierte Veränderungen im Rahmen der Konfiguration eines Materialbereitstellungssystems berücksichtigt. Die antizipative Veränderungsplanung steht im Mittelpunkt dieses Beitrags. Hierbei wird aufgrund der eingeschränkten Prognostizierbarkeit innerhalb dynamischer Umgebungen ein Ansatz vorgestellt, der die Nutzung imperfekten Wissens ermöglicht.

[Schlüsselwörter: Materialbereitstellung, antizipative Planung, Veränderungsfähigkeit, Theorie unscharfer Mengen, Möglichkeitstheorie, imperfektes Wissen]

Agile planning of line feeding processes increasingly becomes important. Traditional planning approaches that prerequisite a stable production setting do no longer fulfil requirements of today's production. In order to meet these requirements, the concept of adaptive line feeding has been introduced which considers anticipated changes when configuring line feeding systems. This paper focusses on the anticipatory planning of changes within line feeding. Due to limited forecasting capabilities in dynamic environments an approach is outlined using imperfect knowledge.

[Keywords: assembly line feeding, anticipatory planning, changeability, Fuzzy Set Theory, Possibility Theory, imperfect knowledge]

1 EINLEITUNG

Die Corona-Pandemie oder das Reaktorunglück von Fukushima stellen nicht nur markante gesellschaftliche Zäsuren dar, sie konfrontieren das produzierende Gewerbe

auch mit außerordentlichen Herausforderungen. Sie sind ein Beleg dafür, dass Konzepten der agilen Planung eine immer größere Notwendigkeit obliegt. Die Zukunftssicherheit eines Unternehmens ist davon abhängig, inwiefern dieses auf Turbulenzen reagieren, aber auch antizipieren kann. Die nötige Wandlungsfähigkeit wird im Kontext der Produktion u. a. durch eine antizipative Materialbereitstellungsplanung unterstützt, für die der Umgang mit imperfekten Wissen charakteristisch ist.

Es existieren unterschiedliche Ansätze, einem Wissensmangel zu begegnen. So abstrahieren einige Planer von imperfektem Wissen. Es wird dabei vorausgesetzt, dass die Bereitstellungsplanung in einem deterministischen Umfeld erfolgt [BL94]. Andere Autoren weisen auf die Notwendigkeit hin, antizipierte Veränderungen bereits zum Planungszeitpunkt zu berücksichtigen (z. B. Veränderungen des Produktmix) [Han12], [VK18]. Solche Ansätze fußen häufig auf stochastischen Modellen und setzen die Existenz von Vergangenheitsdaten voraus, deren statistisch abgesicherter Einsatz die Erhebung großer Datenmengen bedarf. Die Stärke solcher Modelle liegt vor allem in Produktionsumgebungen, die nur mäßigen Schwankungen unterworfen sind, nicht jedoch in einer hoch dynamischen Umgebung. Solche erfordern die Antizipation zukünftiger Ereignisse, wohingegen wahrscheinlichkeitsbezogene Aussagen vor allem auf Daten basieren, die in der Vergangenheit gesammelt wurden. In stärker dynamischen Systemen wird dem Mangel exakter Planungsdaten durch die Vorhaltung einer hohen Wandlungsfähigkeit eingesetzter Systeme begegnet. Im Rahmen der Bereitstellungsplanung ist allerdings zu prüfen, welcher Grad an Wandlungsfähigkeit zukünftig erforderlich ist.

Ziel dieses Beitrags ist die Vorstellung eines Planungsmodells für die Materialbereitstellung, das eine antizipative Planung in dynamischen Umgebungen unter Nutzung imperfekten Wissens erlaubt und explizit Nutzen und Kosten einer hohen Wandlungsfähigkeit berücksichtigt.

In diesem Beitrag sollen Stärken und Schwächen existierender Planungsmodelle im Kontext dynamischer Umgebungen diskutiert werden, woraufhin Anforderungen an die antizipative Materialbereitstellungsplanung abgeleitet werden. Hierbei liegt der Fokus auf dem Umgang mit imperfektem Wissen. Ein entsprechendes Modellierungskonzept wird skizziert. Um den für dynamische Umgebungen charakteristischen Mangel an Vergangenheitsdaten zu kompensieren, sollen Informationen hier nicht probabilistisch, sondern possibilistisch modelliert werden. In Ergänzung zu Modellierungsansätzen, die auf vergangenheitsbezogenen Daten beruhen, weist eine possibilistische Modellierung verschiedene Vorteile auf: (1) So wird dem Planer die unzureichende Informationsgüte bestimmter Planungsinformationen explizit aufgezeigt, der daraufhin entscheiden kann, hinsichtlich welcher Informationen eine verbesserte Datenbeschaffung entscheidungsrelevant und zielführend erscheint. (2) Ferner besitzt dieser Modellierungsansatz den Vorteil, dass Überschreitungen sogenannter Flexibilitätspuffer abgebildet werden können. Damit unterstützt dieser Planungsansatz die Dimensionierung erforderlicher Flexibilitätspuffer, die ein zu planendes Materialbereitstellungssystem aufweisen muss.

2 VERÄNDERUNGSFÄHIGE PRODUKTIONSSYSTEME

Mit dem schrittweisen Übergang vom Verkäufer- zum Käufermarkt wandelte sich nicht nur das Kaufverhalten der Abnehmer, auch die Anforderungen an Produktions- und Logistiksysteme änderten sich bedingt durch einhergehend verkürzte Zykluszeiten und individualisierte Bedarfe. Während Produktions- und zugehörige Logistikprozesse früher auf eine hohe Stabilität und eine damit zusammenhängende Automatisierung ausgelegt waren, nimmt heute die Bedeutung veränderungsfähiger Produktionssysteme immer weiter zu. Veränderungsfähigkeit subsumiert hierbei Konzepte wie Flexibilität, Wandlungsfähigkeit oder Agilität.

Flexibilität umfasst die taktische Fähigkeit eines Produktionssystems, sich mit geringem Aufwand auf neue Teilfamilien einzustellen [WEN+07]. Flexibilität bezieht sich auf die Veränderungsfähigkeit, die innerhalb eines festen Korridors abgerufen werden kann (z. B. bezogen auf die Stückzahl, Zeit, logistisch beherrschte Variantenanzahl, Kostenstruktur) [BN12]. Wandlungsfähigkeit stellt eine Erweiterung des Flexibilitätsbegriffs dar. Wiendahl et al. verstehen unter Wandlungsfähigkeit die Fähigkeit einer Fabrik, einen Wechsel zu einer anderen Produktfamilie zu ermöglichen, was strukturelle Veränderungen des Produktions- und Logistiksystems, der Organisationsstrukturen und Prozesse erfordert [WEN+07]. Agilität besitzt einen noch größeren Veränderungsumfang: Agilität bezeichnet die strategische Fähigkeit, sich auf neuen Märkten zu positionieren, neue Produkte und Dienstleistungen anzubieten und erforderliche Produktionskapazitäten aufzubauen [WEN+07].

Der Zusammenhang zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit wurde in Abbildung 1 skizziert. Innerhalb eines definierten Korridors, des sogenannten Flexibilitätspuffers, ist ein Produktionssystem in der Lage, bestimmten Anforderungen gerecht zu werden und Schwankungen zu kompensieren. Ändern sich die Anforderungen an das Produktionssystem jedoch gravierend, sind die Flexibilitätspuffer entsprechend zu modifizieren und neue Flexibilitätspuffer einzurichten. Die Fähigkeit hierzu wird als Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems bezeichnet.

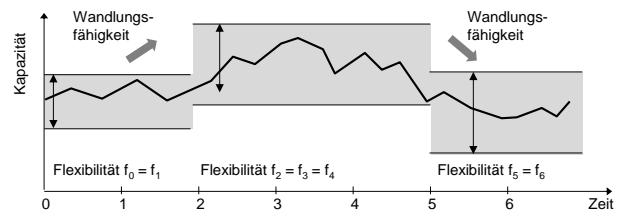


Abbildung 1. Flexibilität und Wandlungsfähigkeit [ZMV05]

3 ANTIZIPATIVE MATERIALBEREITSTELLUNGSPLANUNG

Das Konzept der adaptiven Materialbereitstellungsplanung umfasst eine reaktive und eine antizipative Planungskomponente [VK18], die unterschiedliche Funktionen erfüllen. Während die reaktive Planungskomponente vor allem auf beobachtete Änderungen beispielsweise in Hinblick auf veränderte Anforderungen an den Materialbereitstellungsprozess oder Störungen reagiert, dient die antizipative Planungskomponente einer Vorbereitung auf erwartete zukünftige Veränderungen.

Das Vorgehen bei der antizipativen Veränderungsplanung wurde umfassend in [VK18] erläutert. Dabei wurde ein mehrstufiges Verfahren vorgestellt, wonach zunächst anforderungsgerechte Materialbereitstellungsstrategien ermittelt werden. Dazu wurde ein Fuzzy-Axiomatic-Design-basierter Ansatz verwendet [VK16]. Im Anschluss werden durch ein Expertenteam zukünftige Änderungen von Anforderungen an den Materialbereitstellungsprozess sowie etwaige Änderungen von Leistungsparametern der Materialbereitstellung antizipiert. Diese Daten fließen in ein dynamisches Optimierungsmodell, das die Auswahl einer optimalen Materialbereitstellungspolitik erlaubt. Dabei werden ausschließlich Materialbereitstellungsstrategien gewählt, die den Anforderungen an den Materialbereitstellungsprozess genügen. Das verwendete Verfahren erlaubt es somit, dass Über- bzw. Unterschreitungen der Flexibilitätspuffer (vgl. Abbildung 1) durch Auswahl jeweils geeigneter Materialbereitstellungsstrategien vermieden werden können.

Das in [VK18] vorgestellte Konzept zur antizipativen Veränderungsplanung im Rahmen der Auswahl von Materialbereitstellungsstrategien abstrahiert von Unsicherheit in

Bezug auf Planungsdaten, weist aber auf die Notwendigkeit hin, auch imperfektes Wissen zu berücksichtigen.

Imperfektes Wissen ist ein Sammelbegriff für Wissen, das unsicher, unpräzise oder unvollständig ist [GTG11]. [GTG11] und [DP88] definieren die drei Konzepte wie folgt:

- Unsicherheit liegt dann vor, wenn nicht entschieden werden kann, ob eine Aussage definitiv wahr oder falsch ist (z. B. unsicher: es ist wahrscheinlich, dass ein bestimmtes Brett eine Länge von 1 m hat).
- Unpräzises Wissen liegt dann vor, wenn es unmöglich ist, einer Aussage mit Sicherheit einen eindeutigen, scharfen Wert zuzuordnen (z. B. präzises Wissen: ein Brett ist 1 m lang, unpräzise: ein Brett ist ca. 1 m lang).
- Unvollständiges Wissen liegt dann vor, wenn eine Informationsquelle nicht alle Informationen über die Werte der Attribute zur Verfügung stellt, über die eine Aussage getroffen wird.

4 MODELLIERUNGSKONZEPT

Die Konfiguration eines Materialbereitstellungssystems orientiert sich an den zugrunde gelegten Anforderungen an den zukünftigen Materialbereitstellungsprozess. Exemplarisch wird eine Vielzahl möglicher Anforderungen bzw. Einflussfaktoren auf die Performance eines Materialbereitstellungssystems in VDI 3639 benannt, die folgend als Leistungsparameter der Materialbereitstellung bezeichnet werden. Im Kontext veränderungsfähiger Produktionssysteme sowie der adaptiven Materialbereitstellung wird im Zeitablauf von der Veränderung der Leistungsparametern, beispielsweise aufgrund von Störungen, sowie von der Änderung von Anforderungen an den Materialbereitstellungsprozess ausgegangen. Es erscheint insofern sinnvoll, etwaige Änderungsbedarfe und -befähiger im Rahmen der Konfiguration eines Materialbereitstellungssystems zu berücksichtigen.

Eine Prognostizierbarkeit der Entwicklung von Anforderungen sowie der Leistungsparameter ist in einem dynamischen Produktionsumfeld jedoch nur bedingt gegeben. So weisen [NKW10] auf eine begrenzte Vorhersagbarkeit des Zeitpunkts sowie der Intensität etwaiger Änderungen hin.

Sollen im Rahmen der Planung mögliche Änderungen im Zeitablauf berücksichtigt werden, gilt es, Unsicherheiten hinsichtlich der Leistungsparameter zu modellieren, um sie in den Entscheidungsprozess entsprechend zu integrieren. Hierzu stehen unterschiedliche Modellierungskonzepte für Unsicherheiten zur Verfügung, um beispielsweise den Zeitpunkt sowie die Intensität einer Änderung abzubilden.

In einfachster Form wird im zugrunde gelegten Planungskonzept von der Unsicherheit verwendeter Daten abstrahiert (1). Ebenfalls ist die Konfiguration hochwandlungsfähiger Materialbereitstellungssysteme möglich (2), bei denen auf eine explizite Berücksichtigung von Unsicherheiten im Rahmen der Planung aufgrund vorhandener Flexibilitätsreserven verzichtet werden kann. Ferner können prognosebasierte Ansätze verwendet werden, die auf z. B. probabilistischen (3) oder possibilistischen (4) Modellierungskonzepten beruhen.

Die Einfachheit von Planungskonzepten, die von der Unsicherheit verwendeter Daten abstrahieren, stellt einen wesentlichen Vorteil solcher Konzepte dar, jedoch ist ihre Eignung im Kontext wandlungsfähiger Produktionssysteme, die dynamischen und nicht deterministischen Einflüssen unterliegen, anzuzweifeln. Vorrangige Einsatzumgebung solcher Planungskonzepte sind daher weitgehend stabile Systeme, die wenigen Änderungen im Zeitablauf unterliegen.

Wird ein Materialbereitstellungssystem hochflexibel konfiguriert, kann dieses in einer Vielzahl von Einsatzbedingungen verwendet werden und wird daher den Anforderungen eines veränderungsfähigen Produktionssystems gerecht. Allerdings werden zum Planungszeitpunkt Flexibilitätsreserven geschaffen, die mit Zusatzkosten verbunden sind. Nachteilig zu bewerten ist, dass die geschaffenen Flexibilitätsreserven gegebenenfalls zu keinem Zeitpunkt in Anspruch genommen werden.

Die Verwendung prognosebasierter Planungskonzepte weist den Vorteil auf, dass ein Materialbereitstellungssystem den prognostizierten Flexibilitätsbedarfen jeweils angepasst werden kann. Probabilistische und possibilistische Planungskonzepte können den prognosebasierten Planungskonzepten zugeordnet werden. Probabilistische Modelle erfordern das Vorliegen von Vergangenheitsdaten, die in die Zukunft extrapoliert werden können. Die Gültigkeit der allgemeinen Stabilitätshypothese kann in hoch dynamischen Produktionsumgebungen jedoch nicht vorausgesetzt werden. Aufgrund nicht verfügbarer oder unzureichender Vergangenheitsdaten sind deshalb in hoch dynamischen Produktionsumgebungen andere Planungskonzepte heranzuziehen. In solchen Umgebungen gilt es, Modellierungskonzepte einzusetzen, die ergänzend auch eine Verwendung imperfekten Wissens über ein vorliegendes System erlauben. Possibilistische Methoden stellen ein entsprechendes Modellierungskonzept zur Verfügung, das es erlaubt auf Basis von Expertenwissen, imperfektes Wissen in den Planungsprozess zu integrieren.

4.1 GRUNDLAGEN DER MODELLIERUNG UNSCHARFER LEISTUNGSPARAMETER

Possibilistische Planungskonzepte greifen auf Methoden aus dem Bereich der Möglichkeitstheorie (Possibility Theory) [Zad78] zurück, die maßgeblich auf der Theorie unscharfer Mengen (Fuzzy Set Theory) basiert. Folgend

wird zunächst das possibilistische Modellierungskonzept in seinen Grundlagen erläutert, die Notwendigkeit der Ermittlung eines zugehörigen possibilistischen Erwartungswerts herausgestellt, die possibilistische Modellierung von Leistungsparametern der Materialbereitstellung sowie Flexibilitätspufferverletzungen erläutert und das Credibility-Maß eingeführt, das eine Ermittlung possibilistischer Erwartungswerte erlaubt. Auf dieser Grundlage ist die Ableitung einer optimalen Materialbereitstellungspolitik auf Basis imperfekten Wissens möglich.

Um beispielsweise zu antizipierende Leistungsparameteränderungen zu modellieren, werden hier trianguläre unscharfe Zahlen verwendet. Dabei bezeichnet eine unscharfe Zahl eine unscharfe Menge, die auf der Menge der reellen Zahlen definiert, normalisiert, konvex sowie stückweise stetig ist und deren Support beschränkt ist [Lee05].

Eine trianguläre unscharfe Zahl $\tilde{i} = (\underline{i}, \hat{i}, \bar{i})$ ist auf dem Intervall $[\underline{i}, \bar{i}]$ definiert und ordnet den reellen Zahlen innerhalb des Intervalls $[\underline{i}, \bar{i}]$ je nach zugrunde gelegter Interpretation verschiedene Zugehörigkeitswerte bzw. Möglichkeiten zu [Zad78]. Die zugehörige charakteristische Funktion wird als Möglichkeitsverteilung bezeichnet. Möglichkeiten können als Plausibilitäten interpretiert werden, d. h., eine Möglichkeitsverteilung charakterisiert, wie plausibel eine zugrunde gelegte Aussage erscheint [Dub06]. Die Plausibilität beschreibt die Möglichkeit, dass eine Variable einen (scharfen) Wert innerhalb des Intervalls $[\underline{i}, \bar{i}]$ aufweist. Ist die Plausibilität für einen scharfen Wert innerhalb von $[\underline{i}, \bar{i}]$ null, so ist der Wert für die betrachtete Variable ausgeschlossen. Ist die Plausibilität für einen scharfen Wert hingegen eins, so ist die Aussage, dass die betrachtete Variable diesen scharfen Wert besitzt, nicht überraschend, normal oder wird als gewöhnlich erachtet [Dub06].

Vojdani und Knop (2018) präsentierten ein dynamisches Optimierungsmodell, das die Auswahl einer optimalen Materialbereitstellungspolitik im Kontext veränderungsfähiger Produktionssysteme ermöglicht [VK18]. Dem vorgestellten Modell lag die Annahme zugrunde, dass zukünftige Leistungsparameteränderungen zum Planungszeitpunkt mit Bestimmtheit vorhergesagt werden können. Dieses Optimierungsmodell kann im Kontext veränderungsfähiger Produktionssysteme als deterministisches Ersatzmodell verwendet werden. Zur Berücksichtigung der Unsicherheiten werden zunächst anstelle deterministischer Größen entsprechende Erwartungswerte herangezogen. Die Ermittlung der Erwartungswerte ist bei probabilistischer Modellierung vom jeweiligen Einsatzszenario und dessen Eintrittswahrscheinlichkeit abhängig. Im Kontext der possibilistischen Modellierung wurde analog ein Erwartungswert definiert, der ebenfalls von möglichen Einsatzszenarien abhängig ist.

Die Notwendigkeit des Wechsels einer Materialbereitstellungsstrategie kennzeichnet den Übergang eines Einsatzszenarios zu einem anderen Szenario. Ein neues Einsatzszenario liegt somit dann vor, wenn eine Materialbereitstellungsstrategie nicht mehr in der Lage ist, den Anforderungen an den Materialbereitstellungsprozess gerecht zu werden. In diesem Fall ist eine Materialbereitstellungsstrategie zu modifizieren bzw. zu wechseln. Dies ist immer dann der Fall, wenn ein Flexibilitätspuffer bezogen auf einen bestimmten Leistungsparameter der Materialbereitstellung über- bzw. unterschritten wird (vgl. Abbildung 1 den Übergang von Periode 2 zu Periode 3 oder von Periode 5 zu Periode 6). Somit stellt eine Flexibilitätspufferverletzung einen Szenarowechsel dar. Die untere Grenze eines Flexibilitätspuffers bezogen auf einen Leistungsparameter der Materialbereitstellung (z. B. Bestellmenge) kennzeichnet innerhalb des Fähigkeitsprofils einer Materialbereitstellungsstrategie [VK16] eine Mindestanforderung (z. B. Mindestbestellmenge für einen wirtschaftlichen Betrieb einer Materialbereitstellungsstrategie). Die obere Grenze eines Flexibilitätspuffers kennzeichnet die Höchstgrenze, z. B. die maximale Bestellmenge, die durch eine gewählte Materialbereitstellungsstrategie bedient werden kann.

Der Wert eines Leistungsparameters wird durch die trianguläre unscharfe Zahl $\tilde{i} = (\underline{i}, \hat{i}, \bar{i})$ abgebildet. Wird beispielsweise antizipiert, dass in einer zukünftigen Periode ein Bestellbedarf von mehr als \underline{i} , aber weniger als \bar{i} Einheiten sicherzustellen ist, und ist davon auszugehen, dass die Bestellmenge von \hat{i} am plausibelsten erscheint, so kann der Leistungsparameter „Bestellmenge“ durch die unscharfe Zahl $\tilde{i} = (\underline{i}, \hat{i}, \bar{i})$ modelliert werden.

Eine Flexibilitätspufferverletzung liegt vor, wenn der entsprechende Leistungsparameter die untere Flexibilitätspuffergrenze F_l einer Materialbereitstellungsstrategie unter- oder die obere Flexibilitätspuffergrenze F_u überschreitet. Die Flexibilitätspuffergrenzen werden somit durch die (potenziellen) Materialbereitstellungsstrategien determiniert. Das Fähigkeitsprofil der jeweiligen Materialbereitstellungsstrategie weist beispielsweise – bezogen auf den Leistungsparameter „Bestellmenge“ – eine Menge F_l auf, die z. B. für einen wirtschaftlichen Betrieb dieser Materialbereitstellungsstrategie mindestens sicherzustellen ist, und eine Menge F_u auf, die maximal durch diese Materialbereitstellungsstrategie bedient werden kann. Die zugehörige Möglichkeit $\Pi(\tilde{i} \leq F_l)$, dass der Leistungsparameter die untere Flexibilitätspuffergrenze unterschreitet, kann formal wie folgt beschrieben werden:

$$\Pi(\tilde{i} \leq F_l) = \begin{cases} 0 & \text{für } F_l \leq \underline{i} \\ \frac{F_l - \underline{i}}{\hat{i} - \underline{i}} & \text{für } \underline{i} < F_l \leq \hat{i} \\ 1 & \text{für } \hat{i} < F_l \end{cases}$$

Die Möglichkeit einer Überschreitung der oberen Flexibilitätspuffergrenze durch einen Leistungsparameter kann mittels

$$\Pi(\bar{i} \geq F_u) = \begin{cases} 1 & \text{für } F_u \leq \hat{i} \\ \frac{\bar{i} - F_u}{\bar{i} - \hat{i}} & \text{für } \hat{i} < F_u \leq \bar{i} \\ 0 & \text{für } \bar{i} < F_u \end{cases}$$

beschrieben werden.

Das verwendete Möglichkeitsmaß Π stellt in der Possibility Theorie ein äußerst „optimistisches“ Maß dar, weil eine Aussage als „plausibel“, aber nicht als „notwendig“ bewertet wird. Durch dieses Maß wird daher ein verhältnismäßig hoher Wert im Wertebereich zwischen 0 und 1 ausgewiesen, der angibt wie plausibel eine Flexibilitätspufferverletzung durch einen bestimmten Leistungsparameter erscheint. Darüber hinaus wird in der Possibility-Theorie ebenfalls ein Notwendigkeitsmaß verwendet, das ein eher „pessimistisches“ Maß darstellt. Einen Kompromiss zwischen optimistischen und pessimistischen Maß stellt die Verwendung des Glaubwürdigkeitsmaßes (Credibility-Maß) dar.

Die Ableitung eines Erwartungswertes bei possibilistischer Modellierung ist unter Verwendung des Credibility-Maßes möglich. Die Glaubwürdigkeit einer Überschreitung der oberen Flexibilitätspuffergrenze kann gemäß folgender Gleichung bestimmt werden (in Anlehnung an [Sán12]):

$$Cr(\bar{i} \geq F_u) = \frac{1}{2} \left(\sup_{x \geq F_u} \mu_{\bar{i}}(x) + 1 - \sup_{x < F_u} \mu_{\bar{i}}(x) \right).$$

Entsprechend kann die Glaubwürdigkeit der Unterschreitung der unteren Flexibilitätspuffergrenze mittels folgender Beziehung ermittelt werden:

$$Cr(\bar{i} \leq F_l) = \frac{1}{2} \left(\sup_{x \leq F_l} \mu_{\bar{i}}(x) + 1 - \sup_{x > F_l} \mu_{\bar{i}}(x) \right)$$

Hierbei bezeichnet $\mu_{\bar{i}}(x)$ die Zugehörigkeitsfunktion, die zur Modellierung der Leistungsparameter herangezogen wird.

Auf Basis obiger Beziehungen kann nun der Erwartungswert einer Flexibilitätspufferverletzung anhand nachfolgender Gleichung ermittelt werden (in Anlehnung an [LL02]).

$$E(\bar{i}) = \int_0^{+\infty} Cr(\bar{i} \geq x) dx - \int_{-\infty}^0 Cr(\bar{i} \leq x) dx$$

Im Kontext der Materialbereitstellungsplanung kann in aller Regel auf die Verwendung des zweiten Integrals

verzichtet werden, da für Leistungsparameter der Materialbereitstellung meist nur positive Werte verwendet werden. Werden als Leistungsparameter ausschließlich trianguläre unscharfe Zahlen verwendet, kann die Ermittlung des Erwartungswerts vereinfachend entsprechend folgender Gleichung vorgenommen werden:

$$E(\bar{i}) = \frac{1}{4} \underline{\hat{i}} + \frac{1}{2} \hat{i} + \frac{1}{4} \bar{\hat{i}}$$

Die Verwendung des Erwartungswertes und damit die Bestimmung eines möglichst glaubwürdigen Werts für eine Flexibilitätspufferverletzung auf Basis imperfekten Wissens erlaubt es, unscharfe Daten in scharfe Daten zu überführen. Die Kenntnis der Erwartungswerte wiederum ermöglicht die Anwendung obigen dynamischen Optimierungsmodells und damit die Ableitung einer „optimalen“ Bereitstellungspolitik.

4.2 ALLGEMEINE MODELLIERUNG VON FLEXIBILITÄTSPUFFERVERLETZUNGEN

Das Fehlen belastbarer Vergangenheitswerte im Rahmen der Ermittlung einer optimalen Materialbereitstellungspolitik erfordert die Einschätzung zukünftiger Entwicklungen von Leistungsparametern der Materialbereitstellung. Einen möglichen Ansatz zur Ermittlung dieser Entwicklungen stellt eine Expertenbefragung dar. Durch ein Team von Experten sind Bewertungen hinsichtlich der Plausibilität zukünftiger Flexibilitätspufferverletzungen vorzunehmen.

Zur Sicherstellung einer angemessenen Aussagekraft der Ergebnisse sollte das Expertenteam utopische, unrealistische Szenarien möglichst frühzeitig bei der Auswahl von Materialbereitstellungsstrategien ausschließen. Die Berücksichtigung utopischer Szenarien bedingt ein Verhalten einer höheren und damit kostenintensiveren Flexibilitätspufferreserve.

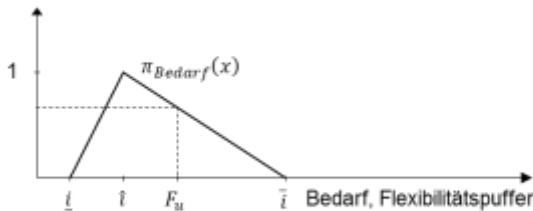
Wie von [NKW10] konstatiert, ist sowohl die Einschätzung des Zeitpunkts als auch der Intensität einer Änderung innerhalb veränderungsfähiger Produktionssysteme problematisch, d. h. mit Unsicherheit behaftet. In diesem Kontext ist eine Änderung, die gegebenenfalls einen Eingriff durch den Planer eines Materialbereitstellungssystems erfordert, die Verletzung eines Flexibilitätspuffers. Die Modellierung einer Flexibilitätspufferverletzung erfordert sowohl die Modellierung des Zeitpunkts als auch der Intensität der Flexibilitätspufferverletzung. Zur Zuordnung einer Flexibilitätspufferverletzung zu einer Periode können ein periodenbezogener und ein periodenunabhängiger Modellierungsansatz verwendet werden.

Bei einer periodenbezogenen Modellierung wird die Möglichkeitsverteilung für eine Flexibilitätspufferverletzung innerhalb einer bestimmten Periode ermittelt, während der Zeitpunkt einer Flexibilitätspufferverletzung bei einer periodenunabhängigen Modellierung nicht eindeutig

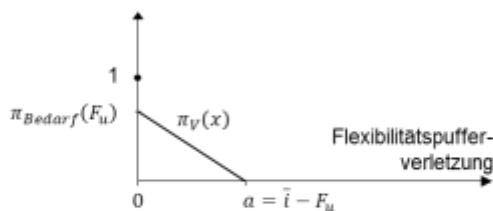
einer Periode zuordnet wird. Die Entscheidung für einen der beiden Modellierungsansätze ist vom konkreten Anwendungsfall abhängig. Letztlich wird eine periodenunabhängige Modellierung jedoch immer in eine periodenabhängige Modellierung überführt.

Das Vorgehen wird folgend anhand der periodenbezogenen Modellierung erläutert. Durch einen Experten bzw. ein Expertenteam ist einzuschätzen, wie realistisch bzw. plausibel eine Flexibilitätspufferverletzung eines Leistungsparameters in der Zukunft erscheint. Die zugehörige Möglichkeitsverteilung kann sowohl direkt als auch indirekt ermittelt werden. Bei direkter Ermittlung wird durch die Experten die Plausibilität einer Flexibilitätspufferverletzung um einen bestimmten Betrag unmittelbar eingeschätzt. Dies bietet sich insbesondere dann an, wenn beispielsweise ein prognostizierter Leistungsparameter \tilde{i} eindeutig größer als die obere Grenze des Flexibilitätspuffers ist. Wenn diese Eindeutigkeit nicht vorliegt, so kann ein indirekter Ansatz gewählt werden. Dabei wird durch die Experten in einem ersten Schritt die Möglichkeitsverteilung eines Leistungsparameters ermittelt, d. h., die Plausibilität bestimmter Werte eines Leistungsparameters wird vorab durch Experten bewertet. In einem zweiten Schritt erfolgt die Ableitung der Möglichkeitsverteilung für die zugehörige Flexibilitätspufferverletzung, vgl. Abbildung 2.

1. Ermittlung einer Möglichkeitsverteilung eines Leistungsparameters der Materialbereitstellung (z.B. Bereitstellbedarf)



2. Ableitung einer Möglichkeitsverteilung für die Überschreitung des zugehörigen Flexibilitätspuffers (Verletzung des Flexibilitätspuffers)



$$\pi_V(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x = 0 \\ \frac{-\pi_{\text{Bedarf}}(F_u)}{a} \cdot x + \pi_{\text{Bedarf}}(F_u) & \text{für } a \geq x > 0 \\ 0 & \text{für } x \geq a \end{cases}$$

$x \in \mathbb{N}$

Abbildung 2. Indirekter Modellierungsansatz einer Flexibilitätspufferverletzung

Es ist möglich, dass Möglichkeitsverläufe aus mehreren unscharfen Mengen bestehen. Folgendes Beispiel illustriert einen Fall, in dem die resultierende Möglichkeitsverteilung für eine Flexibilitätspufferverletzung aus mindestens zwei unscharfen Mengen besteht (vgl. Abbildung 3): für eine künftige Planungsperiode erscheint eine Flexibilitätspufferverletzung plausibel (z. B. in Bezug auf eine antizipierte Bereitstellmenge), gleichzeitig sei es aber nicht unrealistisch, dass sich z. B. aufgrund des Wegfalls eines Großauftrags der Bereitstellungsbedarf in der Montage reduziert, wodurch keine Flexibilitätspufferverletzung resultieren würde.

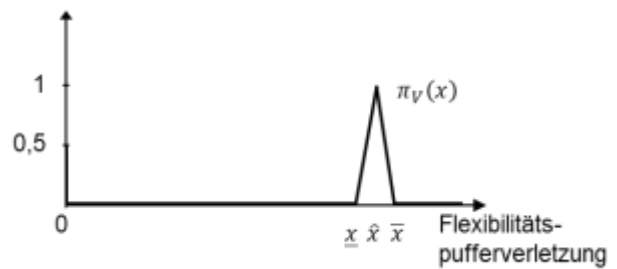


Abbildung 3. Möglichkeitsverteilung einer Flexibilitätspufferverletzung mit mehreren unscharfen Mengen

Die Verwendung mehrerer unscharfer Mengen im Rahmen der Modellierung von Flexibilitätspufferverletzungen erlaubt es daher, mehrere Szenarien gleichzeitig zu berücksichtigen. Allerdings ist zu beachten, dass eine Berücksichtigung von Szenarien mit geringer Plausibilität zu einer Überdimensionierung der Flexibilitätspuffer führen kann. Es ist daher sinnvoll, nur solche Szenarien abzubilden, die eine vorab definierte Mindestplausibilität aufweisen. Die Ermittlung einer solchen Mindestplausibilität muss iterativ erfolgen, indem schrittweise eine höhere Informationsgüte in Bezug auf die verwendeten Planungsinformationen verlangt wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Aufwand einer höheren Informationsqualität dem Nutzen im angemessenen Verhältnis gegenübersteht. Werden beispielsweise äußerst utopische Szenarien berücksichtigt, so werden entsprechend flexible Materialbereitstellungsstrategien gewählt, die auch utopische Szenarien bedienen. Ein Vorhalten damit zusammenhängender hoher Flexibilitätspuffer ist mit Zusatzkosten verbunden, die durch eine Beschränkung auf realistische Szenarien reduziert werden können.

4.3 MODELLIERUNG DER INTENSITÄT EINER FLEXIBILITÄTSPUFFERVERLETZUNG

Abbildung 3 zeigt, dass das Expertenteam dem Wegfall eines Großauftrags bzw. einer Flexibilitätspufferverletzung von null eine Plausibilität von 0,5 zuordnet. Plausibler erscheint im Beispiel hingegen das Szenario, dass der Flexibilitätspuffer um den Betrag $\tilde{x} = (x, \hat{x}, \bar{x})$ überschritten wird. Die Abbildung bringt somit zum Ausdruck, in welchem Umfang der Flexibilitätspuffer voraussichtlich verletzt werden wird. Dabei können sowohl scharfe als auch

unscharfe Ereignisse abgebildet werden (keine Verletzung oder Verletzung um etwa $\tilde{x} = (\underline{x}, \hat{x}, \bar{x})$).

4.4 MODELLIERUNG DES ZEITPUNKTS EINER FLEXIBILITÄTSPUFFERVERLETZUNG

Bei der Wahl eines periodenunabhängigen Modellierungsansatzes ist neben der Intensität einer Flexibilitäts-pufferverletzung ebenfalls der Zeitpunkt der Verletzung zu abzubilden. Der Zeitpunkt einer Flexibilitäts-pufferverletzung gibt jenen Zeitpunkt an, ab dem das Fähigkeitsprofil einer Materialbereitstellungsstrategie nicht mehr den Anforderungen an den Materialbereitstellungsprozess genügt.

Der Zeitpunkt einer Flexibilitäts-pufferverletzung kann ebenfalls unter Verwendung mehrerer unscharfer Mengen erfolgen, vgl. Abbildung 4.

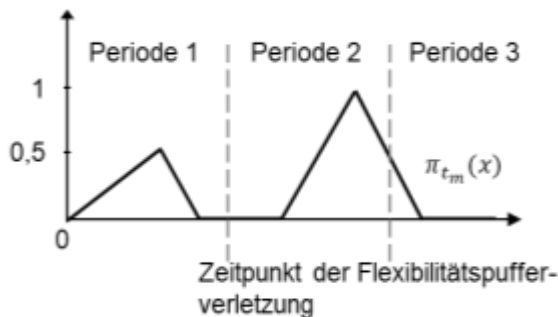


Abbildung 4. Modellierung des Zeitpunkts einer Flexibilitäts-pufferverletzung

Die Menge möglicher Perioden, in denen sich ein Leistungsparameter so signifikant ändert, dass eine Flexibilitäts-pufferverletzung resultiert, sei $T = \{t_l, \dots, t_u\}$, wobei t_l die früheste und t_u die spätestmögliche Periode für den Eintritt dieser Änderung darstellt. Ein beliebiges Element dieser Menge sei t_b und t_m bezeichne den tatsächlichen Eintrittszeitpunkt einer Änderung innerhalb der Periode t_b . Die Elemente der Menge T sind ausschließlich ganze Zahlen, die die Periode angeben, in der eine Änderung möglich ist. Wie aus der Möglichkeitsverteilung π_{t_m} für den Zeitpunkt einer Flexibilitäts-pufferverletzung in Abbildung 4 ersichtlich, ist der Definitionsbereich nicht auf diskrete Elemente beschränkt. Daher bezeichnet t_m einen beliebigen Zeitpunkt (keine Periodennummer, sondern ein konkretes Datum) innerhalb einer Periode t_b , $t_b \in T$.

4.5 ZUSAMMENFÜHRUNG DER MODELLIERUNGS-ANSÄTZE FÜR INTENSITÄT UND ZEITPUNKT EINER FLEXIBILITÄTSPUFFERVERLETZUNG

Die Modellierung des Zeitpunkts einer Flexibilitäts-pufferverletzung erlaubt die Ermittlung der Möglichkeit $\Pi(t_m \in t_b)$. Diese Möglichkeit gibt Auskunft darüber, wie plausibel die Verletzung eines Flexibilitäts-puffers aufgrund der Änderung eines Leistungsparameters innerhalb

einer bestimmten Periode ist. Die Ermittlung beruht auf folgender Beziehung:

$$\Pi(t_m \in t_b) = \sup_{t \in t_b} \pi_{t_m}(t)$$

Die Kenntnis von $\Pi(t_m \in t_b)$ bildet die Grundlage für die Überführung des periodenunabhängigen Modellierungsansatzes für die Intensität einer Flexibilitäts-pufferverletzung in den periodenbezogenen Modellierungsansatz. Die Überführung des periodenunabhängigen in den periodenbezogenen Modellierungsansatz werde als Periodisierung bezeichnet. Im Rahmen der Periodisierung ist für jede Periode eine Möglichkeitsverteilung anzugeben, die angibt, wie plausibel die (Intensität einer) Flexibilitäts-pufferverletzung innerhalb der betreffenden Periode ist.

Im Anschluss an die Periodisierung ist damit bekannt, in welcher Periode und in welchem Umfang mit einer Flexibilitäts-pufferverletzung zu rechnen ist. Unter Verwendung obiger Beziehung für den Erwartungswert liegen nun hinreichend viele scharfe Planungsdaten vor, um obiges dynamisches Optimierungsmodell für die Auswahl einer geeigneten Materialbereitstellungspolitik heranzuziehen.

Im Rahmen der hierbei erforderlichen Ermittlung des Erwartungswerts sind mögliche Szenarien zu berücksichtigen. Die Anzahl möglicher Szenarien ergibt sich als Produkt aus der Anzahl unscharfer Mengen der Möglichkeitsverteilung für die Intensität einer Flexibilitäts-pufferverletzung sowie der Anzahl Perioden, in denen es zu einer Flexibilitäts-pufferverletzung kommen kann. Abbildung 5 zeigt hierzu ein Beispiel, in dem die Modellierung der Intensität einer Flexibilitäts-pufferverletzung unter Verwendung zweier unscharfer Mengen (links: trapezförmige unscharfe Menge, rechts: trianguläre unscharfe Menge) vorgenommen wurde und in dem der Eintritt der Flexibilitäts-pufferverletzungen in zwei Perioden liegen kann. Hieraus resultieren vier Szenarien.

Im ersten Szenario wird von einer Flexibilitäts-pufferverletzung entsprechend der trapezförmigen unscharfen Menge gerechnet, deren Eintritt in Periode 1 äußerst plausibel erscheint, jedoch besteht, wenn auch mit geringer Plausibilität (0,7), die Möglichkeit, dass es in Periode 1 doch nicht zu einer Flexibilitäts-pufferverletzung kommt.

Im zweiten Szenario wird davon ausgegangen, dass die Flexibilitäts-pufferverletzung mit der trapezförmigen unscharfen Menge in die Periode 2 fällt. Da eine Flexibilitäts-pufferverletzung in der Periode 2 grundsätzlich nur die Möglichkeit von 0,7 aufweist, wurde die Höhe der trapezförmigen unscharfen Menge entsprechend angepasst. Es besteht auch grundsätzlich die Möglichkeit, dass es nicht zu einer Flexibilitäts-pufferverletzung in Periode 2 kommt. Dieser Fall ist sogar äußerst plausibel, weshalb der Flexibilitäts-pufferverletzung von null ein Wert von eins zugeordnet wird.

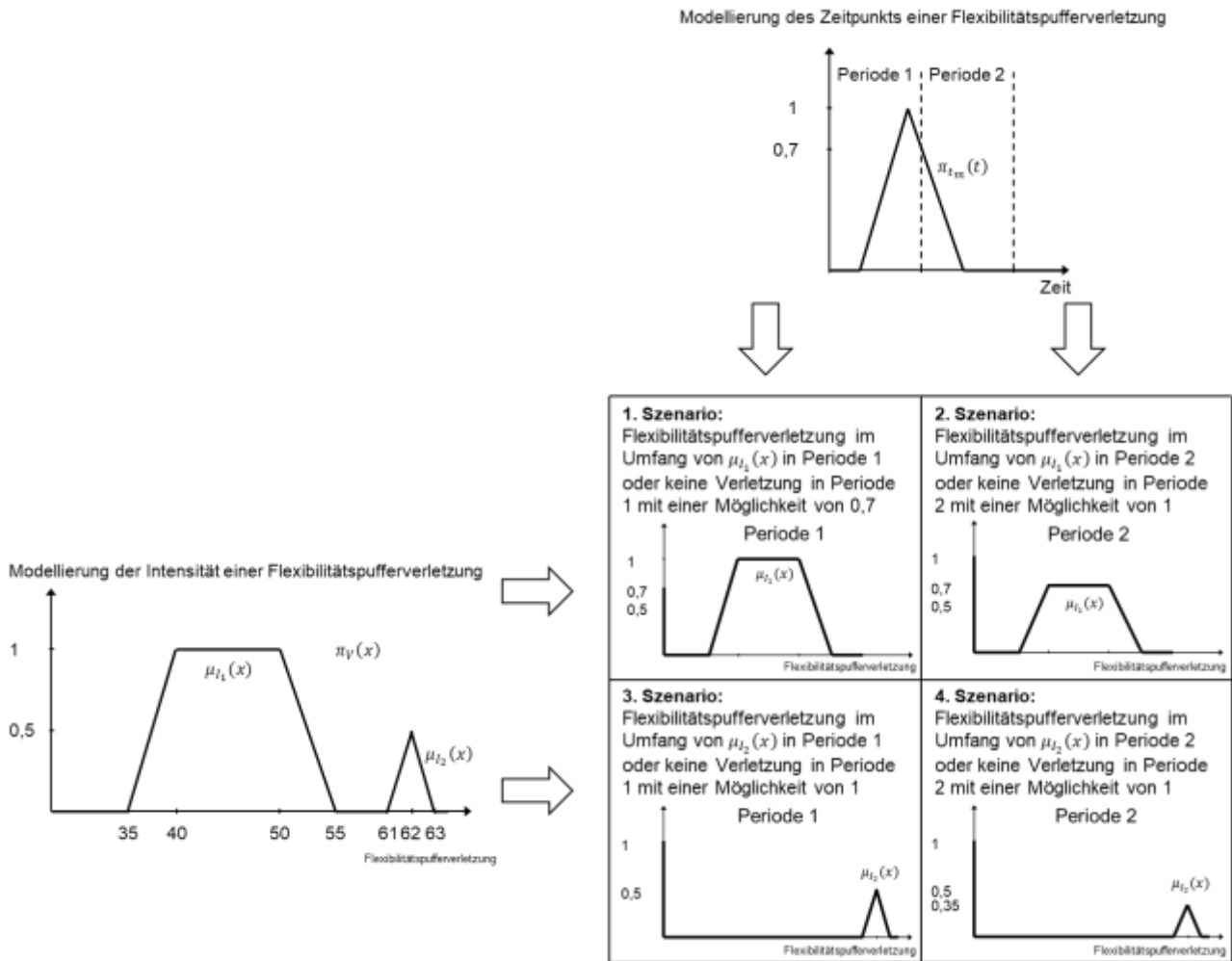


Abbildung 5. Zusammenführung von Intensität und Zeitpunkt antizipierter Änderungen

Im dritten Szenario wird der Eintritt der weniger realistischen Flexibilitätspufferverletzung entsprechend der triangulären unscharfen Menge in Periode 1 berücksichtigt. Es besteht jedoch auch hier die Möglichkeit, dass es zu keiner Flexibilitätspufferverletzung aufgrund dieser unscharfen Menge kommt, da die Plausibilität der trapezförmigen unscharfen Menge größer ist.

Der vierte Fall beschreibt die Möglichkeit einer Flexibilitätspufferverletzung in Periode 2 entsprechend der triangulären unscharfen Menge. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Plausibilität einer Flexibilitätspufferverletzung in Periode 2 nur 0,7 beträgt und dass die Plausibilität der Intensität der triangulären unscharfen Menge ohnehin nur 0,5 beträgt, daraus resultiert eine Gesamtplausibilität von $0,7 \cdot 0,5 = 0,35$.

Im Rahmen der Periodisierung ist die Zugehörigkeitsfunktion der verwendeten unscharfen Mengen für die Intensität einer Flexibilitätspufferverletzung anzupassen: für eine Periode t_b ist die Zugehörigkeitsfunktion mit $\Pi(t_m \in t_b)$ zu multiplizieren. Aufgrund dieser Skalierung ist es möglich, dass Möglichkeitsverteilungen resultieren,

deren Werte kleiner als eins sind, weshalb eine anschließende Normalisierung erforderlich ist. Überstreicht beispielsweise eine unscharfe Menge bei der Modellierung des Zeitpunkts einer Flexibilitätspufferverletzung mindestens zwei Perioden, so besteht die Möglichkeit, dass es in der jeweils betrachteten Periode t_b zu keiner Flexibilitätspufferverletzung kommt, da diese ebenso in anderen Perioden auftreten kann. Folglich ist einer Flexibilitätspufferverletzung von null der Wert $\Pi(t_m \notin t_b)$ zuzuordnen. Falls das Produkt aus $\Pi(t_m \in t_b)$ und der Höhe der unscharfen Menge für die Intensität kleiner als eins ist, so ist der Flexibilitätspufferverletzung von null der Zugehörigkeitswert eins zuzuordnen.

Wenn die Möglichkeitsverteilung bei einem periodenunabhängigen Modellierungsansatz insgesamt m unscharfe Mengen aufweist, liegen nach der Periodisierung insgesamt m Möglichkeitsverteilungen für die periodisierte Intensität vor. Diese gilt es nun zusammenzuführen. Es ist denkbar, eine vorab definierte Mindestplausibilität festzulegen, um utopische Szenarien auszuschließen. Die Zusammenführung erfolgt unter Verwendung einer „Mantelfunktion“, die sich auf die unscharfen Mengen legt, vgl.

Abbildung 6. Die Verwendung der Mantelfunktion ermöglicht die Bestimmung des Credibility-Maßes und somit die Ermittlung eines possibilistischen Erwartungswerts.

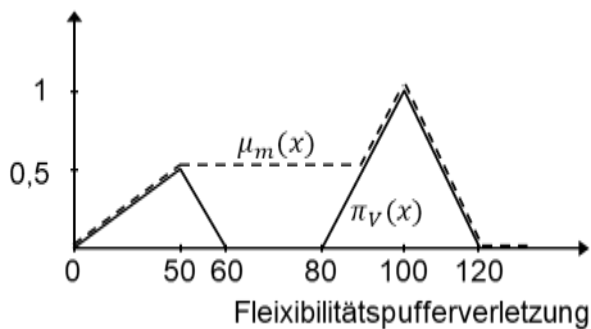


Abbildung 6. Mantelfunktion

5 ZUSAMMENFASSUNG

Eine adaptive Ausrichtung von Materialbereitstellungsprozessen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Echtzeitbasierende Systeme oder Materialflusssimulation sind wichtige Hilfsmittel, die die Planung von Materialbereitstellungsprozessen unterstützen können. Fehlen jedoch belastbare Vergangenheitsdaten, die eine Prognose oder Simulation ermöglichen, müssen andere Methoden eingesetzt werden, um auch imperfektes Wissen nutzbar machen zu können. Die Possibility Theory stellt hierzu Ansätze bereit, die eine Modellierung imperfekten Wissens ermöglichen und damit eine Grundlage schaffen, dieses im Rahmen der antizipativen Planung von Materialbereitstellungsprozessen zur Konfiguration geeigneter Materialbereitstellungssysteme zu nutzen.

LITERATUR

- [BL94] Bullinger, Hans-Jörg; Lung, Martin M.: *Planung der Materialbereitstellung in der Montage*, Teubner, Stuttgart, 1994
- [BN12] Bertsch, Sebastian; Nyhuis, Peter: *Gestaltung und Nutzung produktionslogistischer Wandlungsfähigkeit*, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Heft 6/2012
- [DB88] Dubois, Didier; Prade, Henri: *Possibility Theory. An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*, Plenum Press, New York & London, 1988
- [Dub06] Dubois, Didier: *Possibility Theory and Statistical Reasoning*, Computational Statistics & Data Analysis, Vol. 51, No. 1, pp. 47-69, 2006
- [GTG11] Guillaume, Romain; Thierry, Caroline; Grabot, Bernard: *Modelling of ill-known requirements and integration in production planning*, Production Planning & Control, Vol. 22, No. 4, pp. 336-352, 2011
- [Han12] Hanson, Robin: *In-plant material supply: Supporting the choice between kitting and continuous supply*, Dissertation, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2012
- [Lee05] Lee, Kwang H.: *First Course on Fuzzy Theory and Application*. Advances in Soft Computing, vol 27. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005
- [LL02] Liu, Boading; Liu, Yian-Kui: *Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 10, No. 4, pp. 445-450, 2002
- [NKW10] Nyhuis, Peter; Klemke, Tim; Wagner, Carsten, *Wandlungsfähigkeit – ein systemischer Ansatz*, S. 3-21, in: Nyhuis, Peter (2010) *Wandlungsfähige Produktionssysteme*, GITO-Verlag, Berlin, 2010
- [Sán12] Sánta, Katalin: *Portfolio Optimization with Fuzzy Constraints*, Eötvös Loránd University, 2012
- [VK16] Vojdani, Nina; Knop, Mathias: *Leistungsorientierte Bewertung und Aus-*

wahl von Materialbereitstellungsstrategien mittels Fuzzy Axiomatic Design, Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2016

- [VK18] Vojdani, Nina; Knop, Mathias: *Adaptive Materialbereitstellung – ein neuartiges Konzept für die Materialbereitstellungsplanung in veränderungsfähigen Produktionssystemen*, Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2018
- [WEN+07] Wiendahl, Hans-Peter; ElMaraghy, Hoda A.; Nyhuis, Peter; Zäh, Michael F.; Wiendahl, Hans-Hermann; Duffie, Neil; Brieke, Michael: *Changeable Manufacturing – Classification, Design and Operation*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 56, No. 2, pp. 783-809, 2007
- [Zad78] Zadeh, Lotfi A.: *Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility*, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 3-28, 1978
- [ZMV05] Zäh, Michael; Möller, Niklas; Vogl, Walt (2005) *Symbiosis of Changeable and Virtual Production – The Emperor’s New Clothes or Key Factor for Future Success?* pp. 3-10, in: Zäh, Michael; Reinhart, Gunther (Hrsg.) *1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005)*, Herbert Utz Verlag, München, 2005

Prof. Dr.-Ing. Nina Vojdani, Professor and Head of the Chair of Production Organisation and Logistics, University of Rostock.

Dipl.-Wirt.-Ing. Mathias Knop, PhD candidate at the Chair of Production Organisation and Logistics, University of Rostock.

Address: Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik, Universität Rostock, Richard-Wagner-Str. 31, 18119 Rostock, Germany,

Phone: +49 381 498-9250, Fax: +49 381 498-9252, E-Mail: lpl@uni-rostock.de