

Modellierung und Analyse von Bedarfsschwankungen in Routenzugsystemen zur Versorgung von getakteten Variantenproduktionen

Modelling and analysis of the demand volatility in in-plant milkruns serving scheduled mixed-model production facilities

Christian Lieb, M. Sc.
Fabian Hormes, M. Sc.
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner
Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Fakultät für Maschinenwesen
Technische Universität München

Routenzugsysteme ermöglichen eine effiziente Bereitstellung von Material in der Produktion. Für ihre Auslegung werden zumeist statische Transportbedarfe verwendet. Zum Ausgleich von Schwankungen wird das Einplanen eines ausreichenden Sicherheitspuffers empfohlen. Dessen optimale Dimensionierung erfordert jedoch die Kenntnis der Transportbedarfsschwankungen bereits bei der Systemauslegung. In diesem Beitrag wird daher eine ereignisdiskrete Modellierung von Transportbedarfsschwankungen vorgestellt, die es ermöglicht nicht-deterministische Schwankungen in Routenzugsystemen zur Versorgung getakteter Variantenproduktionen bereits frühzeitig simulativ zu berücksichtigen. Zudem wird anhand von Simulationsexperimenten gezeigt, dass die Dynamik der Schwankungen die Systemauslegung beeinflusst.

[Schlüsselwörter: Routenzugsystem, Bedarfsschwankungen, Modellbildung, Ereignisdiskrete Simulation, Materialflusssimulation]

In-plant milkruns efficiently provide material to production facilities. In order to design such systems static transport demands are most commonly used. It is recommended to consider an adequate safety buffer as a cushion against demand volatility. Therefore, good knowledge about the demand volatility is crucial. This paper introduces an event based modelling approach, which aims to consider non-deterministic demand volatility in in-plant milkruns serving scheduled mixed-model production facilities even in early stages by means of simulation. Moreover, results of simulation experiments are presented, which prove the relevance of considering demand volatility.

[Keywords: In-plant milkrun, Demand volatility, Modelling, Event based simulation, Material flow simulation]

1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Innerbetriebliche Routenzugsysteme ermöglichen eine zyklische, hochfrequente Materialbereitstellung in kleinen Losgrößen nach dem Milkrun-Prinzip [VDI-5586a]. Dabei wird im Gegensatz zum Einzeltransport, z. B. mittels Stapler, Material auf einer Tour gebündelt zu verschiedenen Bereitstellorten transportiert [Kle-2014]. Gerade bei der Versorgung getakteter Produktionslinien aus Puffer- und Lagerbereichen hat sich der Transport mittels Routenzug etabliert [Lie-2017]. Routenzugsysteme verkehren heute meist auf fest definierten Routen in einem vorgegebenen Takt [Emd-2012]. Somit eignen sie sich besonders für den Einsatz bei einer hohen Anzahl an Bereitstellorten, die eine große Entfernungen untereinander aufweisen sowie bei einem gleichmäßigen, konstanten Materialverbrauch [VDI-5586b]. Die zunehmende Nachfrage nach individualisierten Produkten führt jedoch immer mehr zu einer steigenden Variantenvielfalt in Produktion und Logistik. In der Folge ist die Produktionslogistik zur Versorgung variantenreicher Produktionen mit teilweise stark schwankenden Transportbedarfen konfrontiert [Lie-2017]. Um Bedarfsspitzen abzudecken und Fehlmen gen zu vermeiden, werden in der Regel Puffer in Form von Beständen oder Zeit in der Planung vorgesehen [VDI-5586b]. Daneben werden auch zusätzliche Kapazitäten in Form von Springern oder Sonderfahrten eingesetzt [Lie-2017]. Andere Strategien beschäftigen sich mit dem Verschieben von Transportaufträgen auf frühere oder spätere Touren [Aln-2014; Boz-2013; Emd-2012] oder mit einer Anpassung der Ladungsträgerfüllmengen [Däu-2017; Ple-2010]. Neben diesen Strategien wird außerdem der Einsatz von dynamischen Steuerungsstrategien diskutiert. Dabei werden Touren und Routen auf Basis von Echtzeitdaten aus dem Prozess laufend neu berechnet und auf die im System vorhandenen Routenzüge und Mitarbeiter verteilt [Hor-2017; Kle-2015; Lie-2017].

* Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – GU 427/30-1

Um geeignete Lösungsstrategien für den Umgang mit Transportbedarfsschwankungen in Routenzugsystemen zu entwickeln, bedarf es zunächst Methoden, die eine Abbildung von Bedarfsschwankungen ermöglichen. Klenk verwendet ein analytisches Modell zur Leistungsbewertung von Routenzugsystemen bei schwankenden Transportbedarfen. Dieses ermöglicht eine aufwandsarme Leistungsbewertung, ist jedoch hinsichtlich der abbildbaren Komplexität begrenzt [Kle-2017]. Mittels simulativer Analysen können auch komplexe Abhängigkeiten in den Prozessen untersucht werden. Im Vergleich zu analytischen Modellen sind diese jedoch oft mit einem größeren Aufwand für die Durchführung verbunden [VDI-3633].

Ziel dieses Beitrags ist daher, die Entwicklung eines Modellierungsansatzes auf Basis der ereignisdiskreten Simulation, der es ermöglicht, die komplexen Abrufprozesse sowie das dynamische Verhalten der Transportbedarfe in Routenzugsystemen zur Versorgung getakteter Produktionen abzubilden. Der Ansatz soll in ein generisches Simulationsmodell eingebettet werden, das es dem Anwender ermöglicht, bei der Modellerstellung auf standardisierte Prozess- und Technikbausteine zurückzugreifen.

Der weitere Aufbau des Beitrags gestaltet sich wie folgt: In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen zu Bedarfsschwankungen in Wertschöpfungsnetzwerken mit Fokus auf Routenzugsysteme thematisiert. Kapitel 3 behandelt die Modellierung der Prozesse und Bedarfsschwankungen. Anschließend wird die Relevanz der Bedarfsschwankungen in Kapitel 4 durch die Ergebnisse einer Simulationsstudie verdeutlicht. Die Zusammenfassung der vorgestellten Inhalte sowie ein Ausblick werden in Kapitel 5 vorgestellt.

2 BEDARFSSCHWANKUNGEN IN WERTSCHÖPFUNGSNETZWERKEN

Dieses Kapitel erläutert die theoretischen Grundlagen zu Bedarfsschwankungen in Wertschöpfungsnetzwerken. Dazu wird sowohl auf externe Bedarfsschwankungen zwischen den Beteiligten im Netzwerk (Abschnitt 2.1) als auch auf innerbetriebliche Bedarfsschwankungen (Abschnitt 2.2) eingegangen, bevor in Abschnitt 2.3 speziell die Bedarfsschwankungen innerhalb von Prozessen des Routenzugsystems (intraprozessuale Schwankungen) analysiert werden.

2.1 EXTERNE BEDARFSSCHWANKUNGEN

Schwankende Bestände und Transportzeiten in Wertschöpfungsnetzwerken sowie deren Ursachen und Auswirkungen werden in der Forschung schon seit den 1950er Jahren intensiv untersucht. Burbidge definiert in diesem Zusammenhang den Begriff der natürlichen Nachfrageschwankungen, die sich direkt aus dem Kundenbedarf ableiten. Er stellt fest, dass diese natürlichen Bedarfsschwankungen um ein Vielfaches verstärkt werden, bis sie über

das Versorgungsnetz zur Produktion gelangen [Bur-1961]. Lee et al. verwenden dafür den Begriff des Bullwhip-Effekts. Dieser beschreibt das Phänomen, dass sich Bedarfsschwankungen entlang den Wertschöpfungsstufen vom Endkunden (Senke) bis zum Lieferanten (Quelle) peitschenartig aufschaukeln [Lee-1997]. Dieser Effekt entsteht durch ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Akteure und Faktoren im Wertschöpfungsnetzwerk [Tow-1992]. Lee et al. fassen die folgenden vier wesentlichen Ursachen für den Bullwhip-Effekt zusammen [Lee-1997]:

- Verzögerungen in Bedarfsprognosen und bei der Bedarfsmeldung,
- Zusammenfassung von Bedarfen (Losbildung),
- Spekulationen auf mögliche Lieferengpässe und
- Preisschwankungen.

2.2 INTERNE BEDARFSSCHWANKUNGEN

Bedarfsschwankungen entstehen jedoch nicht nur extern zwischen den verschiedenen Wertschöpfungsstufen, sondern auch innerhalb der einzelnen Wertschöpfungsstufen, z. B. innerhalb einer Produktionsstätte sowie innerhalb einzelner Prozesse (siehe Abbildung 1), wie z. B. in der Belieferung einer Montagelinie [Klu-2013]. Im Folgenden wird ein Überblick über die Faktoren gegeben, die zur Entstehung von internen sowie von intraprozessualen Bedarfsschwankungen speziell in Routenzugsystemen zur Versorgung von Variantenproduktionen führen. Klug beschäftigt sich mit der Frage, ob dort ähnliche Schwankungsmuster zu erkennen sind, wie in externen Wertschöpfungsnetzwerken. Er kommt zum Ergebnis, dass auch in internen Wertschöpfungsnetzwerken eine deutliche Verstärkung der Bedarfsschwankungen von der Montage bis zum Wareneingang festzustellen ist. Außerdem werden Ursachen und Maßnahmen zur Vermeidung interner Bedarfsschwankungen untersucht. Die Ursachen interner Bedarfsschwankungen können nach Klug in fünf Kategorien unterteilt werden [Klu-2013]:

- Kapazitätsmanagement,
- Auftragsbündelung/ Losbildung,
- Programmplanung/ Nachschubsteuerung,
- Materialfluss-/ Bestandssteuerung und
- Layout.

Das Kapazitätsmanagement beschreibt die Verteilung und die Einplanung von Transportkapazitäten für den innerbetrieblichen Transport von Material. Schwankungen in den Transportbedarfen führen dazu, dass der Bedarf das Angebot an Transportkapazität kurzfristig übersteigen kann. Um diese Bedarfsspitzen abzudecken, werden häufig Zusatzkapazitäten vorgehalten [VDI-5586a].

* Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – GU 427/30-1

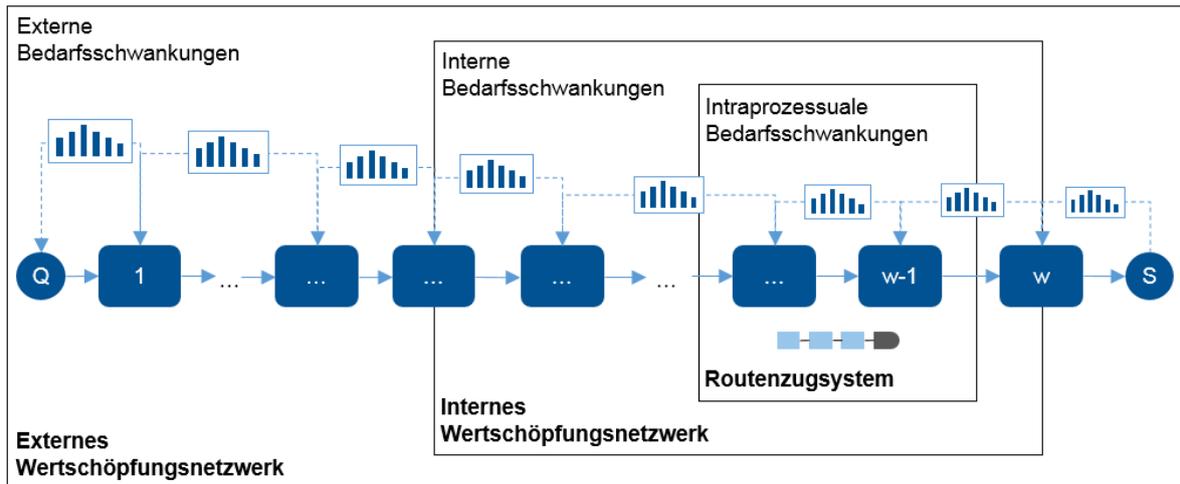


Abbildung 1. Externe, interne und intraprozessuale Bedarfsschwankungen in Wertschöpfungsnetzwerken

Um den Schwankungen entgegenzuwirken, sollte daher eine flexible Anpassung der Kapazitäten an die vorliegenden Bedarfe gewährleistet werden [Har-1995]. Die Bündelung von Material zu Bestell- oder Transportlosen zielt auf die Nutzung von Skaleneffekten entlang der Prozesskette ab. Gleichzeitig führt das sich wiederholende Zusammenfassen von Aufträgen jedoch zu einer weiteren Verstärkung der natürlichen Bedarfsschwankungen. Burbidge empfiehlt daher häufige Nachlieferungen in kleinen Losgrößen [Bur-1961]. Auch die Programmplanung und die Nachschubsteuerung wirken sich auf die Entstehung und Verstärkung interner Bedarfsschwankungen aus. So tragen eine frühzeitige Fixierung des Produktionsprogramms und die Vermeidung kurzfristiger Planänderungen zu einer Stabilisierung der Nachschubprozesse bei [Har-1997]. Weitere Ursachen für interne Bedarfsschwankungen liegen in der Steuerung von Materialflüssen und Beständen im Wertschöpfungsnetzwerk. Wird Material zwischen verschiedenen Prozessstufen bestandsgesteuert abgerufen (z. B. bei Erreichen eines Mindestbestands), verstärken sich die Bedarfsschwankungen von jeder Stufe zur nächsten aufgrund von Verzögerungen in den Abrufen [Bur-1984]. Bei der Gestaltung von Materialflusssystemen sollten daher die Anzahl an bestandsgesteuerten Prozessstufen mit fixen Bestellpunkten minimiert sowie Verzögerungen im Informationsfluss vermieden werden [Tow-1997]. Weiterhin trägt die Gestaltung des Produktionslayouts zur Entstehung von schwankenden Bedarfen und Transportzeiten bei. Während Material im Lager- und Pufferbereich meist in Materialgruppen segmentiert wird, werden beim internen Transport und bei der Warenvereinbarung Ressourcen für unterschiedliche Materialgruppen verwendet, um Kapazitätseinsparungen zu erzielen. Eine Segmentierung des Layouts und der Prozesse kann somit der Entstehung von Schwankungen entgegenwirken, was jedoch zu einem Zielkonflikt bezüglich der Kapazitätseinsparungen führt [Klu-2013].

2.3 BEDARFSSCHWANKUNGEN IN ROUTENZUGSYSTEMEN

Als Grundlage für die Modellierung von Bedarfsschwankungen in Routenzugsystemen werden in diesem Abschnitt zunächst deren Entstehungsursachen hergeleitet (Unterabschnitt 2.3.1). Anschließend wird anhand eines Praxisbeispiels die Beschreibung der Bedarfsschwankungen erläutert (Unterabschnitt 2.3.2).

2.3.1 ENTSTEHUNG VON BEDARFSSCHWANKUNGEN IN ROUTENZUGSYSTEMEN

Als etablierter Bestandteil interner Wertschöpfungsnetzwerke sind Routenzugsysteme erheblichen Transportbedarfsschwankungen ausgesetzt. Wie in Kapitel 1 erläutert, werden in diesem Beitrag Routenzugsysteme zur Versorgung von getakteten Variantenproduktionen aus vorgelagerten Puffer- bzw. Lagerbereichen untersucht. Die Ermittlung von Transportbedarfen kann dabei sowohl durch verbrauchs- als auch bedarfsorientierte Verfahren erfolgen [VDI-5586a]. Im Gegensatz zu bedarfsgesteuerten Systemen entstehen Transportbedarfe bei verbrauchsgesteuerten Systemen erst mit dem tatsächlichen Materialverbrauch in der Montage (Senke) und mit dem Unterschreiten eines Mindestbestands. Bei der Unterschreitung des Mindestbestands wird ein Materialabruf erzeugt, der den Transportbedarf an den Puffer- bzw. Lagerbereich (Quelle) übermittelt. Die Transportbedarfe entstehen somit kurzfristig und sind nicht wie bei bedarfsorientierten Verfahren im Vorhinein bekannt. Dort werden Bedarfszeitpunkte auf Basis des bekannten Produktionsprogramms und auf Basis theoretischer Verbräuche deterministisch berechnet. Die berechneten Bedarfe werden direkt an die Quelle des Routenzugsystems übermittelt [Kle-2014].

In Abbildung 2 ist der Nachschubzyklus in Routenzugsystemen schematisch dargestellt. Bei verbrauchsorientierten Verfahren beginnt der Nachschub mit der Entnahme des letzten Teils im Ladungsträger oder bei Erreichen des

* Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – GU 427/30-1

Mindestbestands in der Produktion. Die Entnahme bzw. der Verbrauch des Materials erfolgt nach dem entsprechenden Produktionsprogramm. Ob der festgelegte Mindestbestand im Ladungsträger erreicht ist und damit ein Nachschubbedarf besteht, muss zunächst wahrgenommen werden. Je nach organisatorischer Gestaltung des Routenzugsystems kann dies direkt durch den Produktionsmitarbeiter, durch den Routenzugfahrer, durch einen Line-Runner oder durch ein technisches Hilfsmittel (z. B. einen Sensor) erfolgen [VDI-5586a]. Ist der Bedarf wahrgenommen, erfolgt die Nachfrage des Materials an der Quelle. Auch hier ist die organisatorische und technische Gestaltung des Routenzugsystems zu berücksichtigen. Die Nachfrage kann analog durch ein physisches Signal (z. B. eine Kanban-Karte oder einen leeren Ladungsträger) oder digital in elektronischer Form (z. B. durch einen Handscanner) übermittelt werden. Ist die Materialnachfrage an der Quelle angekommen, wird diese dort verarbeitet, das Material ausgelagert und für den Transport mittels Routenzug bereitgestellt.

In bedarfsgesteuerten Routenzugsystemen beginnt der Nachschubzyklus mit der Ermittlung des theoretischen Bedarfs und des Bedarfszeitpunkts in Abhängigkeit des Produktionsprogramms. Die Ermittlung erfolgt in der Regel durch ein IT-System [VDI-5586a]. Anschließend werden die errechneten Bedarfe digital an die Quelle übermittelt, in welcher die Auslagerung und Bereitstellung des Materials erfolgt.

Wie in Abbildung 2 dargestellt können entlang des Nachschubprozesses verschiedene Arten von Schwankungen identifiziert werden, die zu den beschriebenen Transportbedarfsschwankungen im Routenzugsystem führen:

- (1) Schwankender Nachschubbedarf in der Produktion,
- (2) Schwankende Zeitspanne bis zur Wahrnehmung des Nachschubbedarfs,
- (3) Schwankende Zeitspanne bis zur Nachfrage des Nachschubbedarfs,
- (4) Schwankende Prozesszeit bis zur Auslagerung und Bereitstellung des Materials sowie
- (5) Schwankende Zykluszeit der Routenzüge.

Der Nachschubbedarf in der Produktion unterscheidet sich je Teil und ist abhängig vom Produktionsprogramm [Kle-2017]. „Gleichteile“ werden in jeder Variante verbaut. Variantenspezifische „Mussteile“ unterscheiden sich je Variante im Produktionsprogramm, werden jedoch in jeder Variante benötigt (z. B. verschiedenfarbige Außenspiegel bei PKW). „Kanteile“ hingegen werden nur in bestimmten Produktvarianten verbaut (z. B. Navigationsgeräte in verschiedenen Ausführungen bei PKW) [Gol-2013]. Einen großen Einfluss auf die Produktvariantenreihenfolge im Produktionsprogramm haben Reihenfolgerestriktionen [Mei-2009]. Neben den Produktvarianten und dem Produktionsprogramm führen unterschiedliche Ladungsträgerfüllmengen sowie Ausschuss zu schwankenden Ladungsträgerreichweiten [Däu-2017; Ple-2010]. Außerdem wirken sich Produktionsstillstände auf den Nachschubbedarf aus [Tow-1997].

Ist in der Produktion der Mindestbestand eines Ladungsträgers erreicht, beginnt der Nachschubzyklus. Bei verbrauchsorientierten Verfahren muss dafür zunächst der Nachschubbedarf wahrgenommen werden [Kle-2014]. Dabei sind die Schwankungen in der Zeitspanne zwischen Bedarfsauftritt und Wahrnehmung abhängig von der technischen und organisatorischen Gestaltung des betrachteten Routenzugsystems (siehe Kapitel 4).

Bei bedarfsorientierten Verfahren erfolgt die Auslösung des Transportbedarfs auf Basis theoretischer, berechneter Verbräuche. Die Zeitspanne zur Wahrnehmung der tatsächlichen verbrauchsbasierten Nachschubbedarfe kann daher vernachlässigt werden.

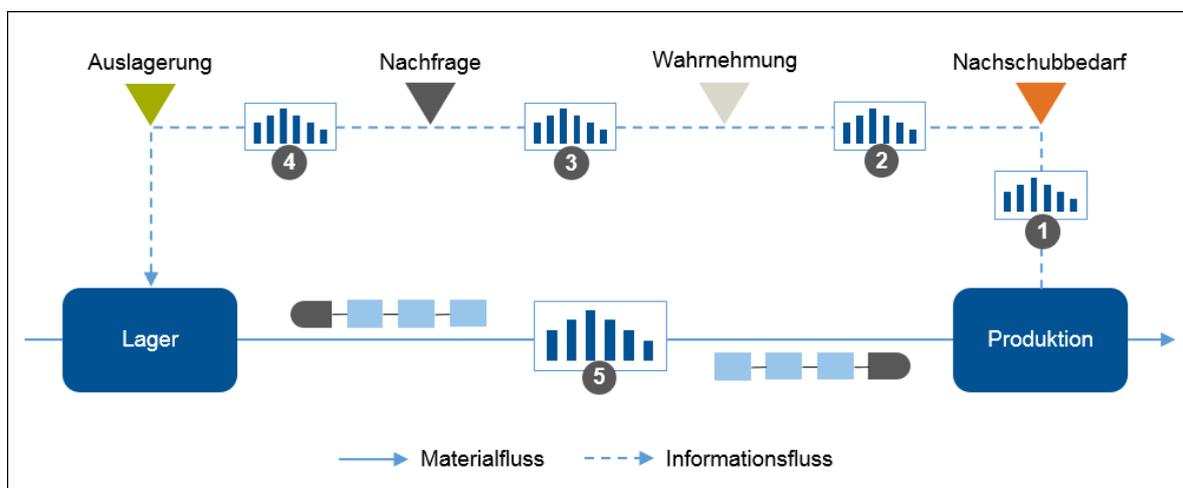


Abbildung 2. Nachschubzyklus in verbrauchs- bzw. bedarfsorientierten Routenzugsystemen

* Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – GU 427/30-1

Nach der Wahrnehmung des Nachschubbedarfs wird dieser an die Quelle übermittelt [Kle-2014]. Auch hier ist die Zeitspanne zur Nachfrage abhängig von der gewählten Technik und Organisationsform. Bei verbrauchsorientierten Verfahren mit digitaler Bedarfsübermittlung (z. B. e-Kanban) sowie bei bedarfsorientierten Verfahren mit Hilfe von IT-Systemen sind die betrachtete Zeitspanne und der zu erwartende Einfluss auf die Bedarfsschwankungen im Gegensatz zu analogen Übermittlungen vernachlässigbar gering.

Im Anschluss erfolgt die Auslagerung und die Bereitstellung des Materials an der Quelle sowie der Transport zur Senke. In beiden Fällen wirken sich Störungen und Blockierungen auf die Prozesszeiten aus [Gal-2015; Kle-2014]. Die Prozesszeiten werden zudem durch die gewählten Auslagerstrategien beeinflusst. Ebenso unterliegen Prozess- sowie Zykluszeiten Einflüssen der menschlichen Arbeitsweise, z. B. der Selbstoptimierung der Mitarbeiter. Tabelle 1 fasst die Ursachen und Einflussfaktoren der Schwankungsarten zusammen.

Tabelle 1. Ursachen für und Einflussfaktoren auf Transportbedarfsschwankungen in Routenzugsystemen

Nr.	Schwankungsart	Ursachen/ Einflussfaktoren
1	Schwankender Nachschubbedarf	Produktvarianten Produktionsprogramm Ladungsträgerfüllmengen Produktionsstillstände Ausschuss
2	Schwankende Zeitspanne bis zur Wahrnehmung	Bedarfsermittlungsverfahren Technische Umsetzung Organisatorische Zuständigkeiten
3	Schwankende Zeitspanne bis zur Nachfrage	Bedarfsermittlungsverfahren Technische Umsetzung
4	Schwankende Prozesszeit bis zur Auslagerung und Bereitstellung	Prozessstörungen/ Auslastung Auftragsbearbeitungsstrategien
5	Schwankende Zykluszeit	Prozessstörungen/ Auslastung Menschliche Arbeitsweise

2.3.2 BESCHREIBUNG VON BEDARFSSCHWANKUNGEN IN ROUTENZUGSYSTEMEN

Im Folgenden wird erläutert wie Transportbedarfsschwankungen formal beschrieben werden können. Zudem wird anhand einer exemplarischen Analyse eines Routenzugsystems aus der Nutzfahrzeugindustrie eine Verteilung real auftretender Transportbedarfsschwankungen gegeben.

Das betrachtete Routenzugsystem wird für die Versorgung einer variantenreichen Nutzfahrzeugmontagelinie eingesetzt. Es umfasst vier fest definierte Routen (1-4), auf denen Standard-Großladungsträger (GLT) transportiert werden. Jeder Route sind sowohl ein Fahrer (1:1) als auch zwei Routenzüge (1:2) fest zugeteilt, wobei sich immer ein Zug zur Beladung in der Quelle befindet. Bei der Quelle handelt es sich um ein manuelles Hochregallager für GLT. Die Transportbedarfsermittlung erfolgt verbrauchsorientiert. Hat der Routenzugfahrer auf seiner Tour einen leeren Ladungsträger wahrgenommen, löst er mittels Handscanner eine Nachfrage an der Quelle aus. Dort werden die Auslageraufträge nach dem FIFO (First-in-First-out) - Prinzip durch den Lagermitarbeiter abgearbeitet. Die Auslagerung erfolgt auf eine Pufferfläche. Ein weiterer Logistikmitarbeiter ist für die Beladung der Routenzüge auf der Pufferfläche zuständig.

Für die Analyse der Transportbedarfsschwankungen wird im Folgenden die Verteilung der Zwischenauslagerzeiten ZAZ je Material i und Bedarfsort j betrachtet. Dabei ist die ZAZ_{ij} zwischen zwei Auslagerungen eines Materials i für den Bedarfsort j definiert als

$$ZAZ_{ij,n,n-1} = t_{ij,n} - t_{ij,n-1}$$

mit

$$t_{ij,n} \geq t_{ij,n-1}$$

$$n > 1$$

und

$t_{ij,n}$: Zeitpunkt der n -ten Auslagerung

In Abbildung 3 ist eine exemplarische Verteilung der schwankenden ZAZ einer Materialnummer eines Bedarfsorts in Abhängigkeit des Produktionstakts der Nutzfahrzeugmontagelinie dargestellt.

Tabelle 2 zeigt die Verteilung der ZAZ für alle Material- und Bedarfsortkombinationen je Route aus dem Praxisbeispiel. Insgesamt wurden über einen Zeitraum von drei Monaten 43.453 Auslagerungen mit den zugehörigen Zeitstempeln analysiert. Anschließend wurden die Daten um Produktionsausfälle, Doppelbestellungen oder Sonderauslagerungen bereinigt. Nach der Bereinigung konnten in Summe 40.297 Auslagerungen für die Berechnung der Verteilungsparameter herangezogen werden. Die Anzahl

* Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – GU 427/30-1

m_{ij} beschreibt die Anzahl an Material- und Anlieferortkombinationen je Route. Während auf den ersten drei Routen über einhundert verschiedene Ziele angefahren werden, sind es bei Route 4 nur 71 verschiedene Material-/Bedarfsortkombinationen. Im Durchschnitt entsteht an den verschiedenen Zielen auf den verschiedenen Routen alle 27 bis 45 Stunden eine Nachfrage nach einem neuen Ladungsträger. Dabei kann festgestellt werden, dass sich die mittleren Zwischenauslagerzeiten je Material-/Bedarfsortkombination stark unterscheiden. Während die häufig benötigten Materialien alle zwei bis drei Stunden im Lager nachgefragt werden, liegen die durchschnittlichen Zwischenauslagerzeiten bei den seltener benötigten „Kannteilen“ teilweise im Bereich mehrerer Wochen. Die Schwankungen der Zwischenauslagerzeiten werden durch den Variationskoeffizienten c beschrieben und betragen durchschnittlich zwischen 50 und 70 Prozent vom Mittelwert. Für einzelne Material-/Bedarfsortkombinationen können die Schwankungen jedoch durchschnittlich über 150 Prozent des Mittelwerts betragen.

Die Analyse der Zwischenauslagerzeiten zeigt, dass der Transportbedarf im betrachteten Routenzugsystem je nach Material und Bedarfsort teilweise starken Schwankungen unterliegt. Mögliche Ursachen und Einflussfaktoren wurden in Unterabschnitt 2.3.1 beschrieben. Um die Auswirkungen der Transportbedarfsschwankungen auf Routenzugsysteme untersuchen zu können, wird im Folgenden ein Ansatz zur Modellierung von Transportbedarfsschwankungen in Routenzugsystemen vorgestellt, der eine simulative Analyse von Routenzugsystemen unter Berücksichtigung der beschriebenen Einflussfaktoren (siehe Tabelle 1) ermöglichen soll.

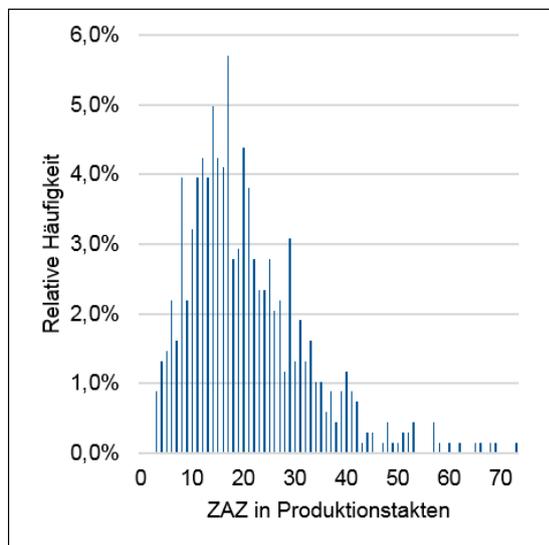


Abbildung 3. Exemplarischer Verteilung der ZAZ für eine Materialnummer eines Bedarfsorts auf einer Route

Tabelle 2. Verteilung der mittleren Zwischenauslagerzeiten über alle Kombinationen von Materialien i und Bedarfsorten j auf den Routen 1 bis 4

Route	1	2	3	4
Anzahl m_{ij}	153	116	139	71
\overline{ZAZ}_{ij} (μ) in h	45,8	27,0	31,8	37,7
\overline{ZAZ}_{ij} (σ) in h	30,8	17,9	16,4	21,6
\overline{ZAZ}_{ij} (c)	0,7	0,7	0,5	0,6
\overline{ZAZ}_{ij} (min.) in h	2,7	1,9	2,3	1,7
\overline{ZAZ}_{ij} (max.) in h	394,5	120,9	252,6	182,9

3 MODELLIERUNG DER BEDARFSSCHWANKUNGEN

Auf Basis der in Kapitel 2 ermittelten Einflussfaktoren wird nachfolgend die Modellierung der Transportbedarfsschwankungen in Routenzugsystemen vorgestellt. Zunächst werden die aus der Theorie abgeleiteten Anforderungen definiert (Abschnitt 3.1) und die Art der Modellierung begründet (Abschnitt 3.2). Anschließend werden die Umgebung für (Abschnitt 3.3) sowie die Modellierung der Einflussfaktoren (Abschnitt 3.4) erläutert.

3.1 ANFORDERUNGEN AN DIE MODELLIERUNG

Materialabrufe sind der Motor von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung. Die Grundlage für ihre Modellierung bildet die Annahme einer getakteten Variantenproduktion mit einem einheitlichen Produktionstakt für alle Bedarfsorte des Systems. Da Bedarfsorte der Auslöser der Nachfrage in Routenzugsystemen sind, werden sie in der Modellierung als Klienten bezeichnet. Der einheitliche Produktionstakt führt dazu, dass Materialverbräuche zeitdiskret in Abhängigkeit des Takts auftreten. Außerdem entstehen durch unterschiedliche Verbraurate (Anteil der Produktvarianten im Produktionsprogramm) und Verbrauchzahlen (Materialmenge bei einem Verbrauch) ungleichmäßige Verbräuche einzelner Sachnummern. Dieser Effekt wird durch die Berücksichtigung von Reihenfolgerestriktionen im Produktionsprogramm verstärkt. Dabei sollen zum einen Distanz- und zum anderen Blockrestriktionen abgebildet werden. Distanzrestriktion bedeutet, dass bestimmte Produktvarianten nicht in zwei aufeinanderfolgenden Produktionstakten am selben Klienten bedient werden dürfen. Sie müssen eine vorgegebene Distanz an Produktionstakten im Produktionsprogramm einhalten. Im Gegensatz dazu legt die Blockrestriktion fest, dass dieselbe Produktvariante mehrmals direkt aufeinanderfolgend am Klienten gefertigt werden muss. Trotz der Berücksichtigung dieser Einflüsse soll das exakte Produktionsprogramm nicht deterministisch bekannt sein, sondern kurzfristigen Verwirbelungen und Schwankungen im Rahmen der vorhandenen Restriktionen unterliegen. Dadurch kann

* Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – GU 427/30-1

keine exakte Auflösung des Produktionsprogramms in Nachschubbedarfe erfolgen.

Die Materialverbräuche führen erst dann zu Materialabrufen, wenn eine tatsächliche bzw. theoretische Mindestmenge an Material im Ladungsträger erreicht ist. Je Sachnummer ist daher ein Ladungsträgertyp sowie eine zugehörige Ladungsträgerkapazität zu definieren. Die tatsächliche Ladungsträgerfüllmenge kann jedoch für bestimmte Materialien, z. B. aufgrund von Umschüttvorgängen beim Kommissionieren, von der vordefinierten Ladungsträgerkapazität abweichen. Zudem kann eine hohe Ausschussrate zu einer schnelleren Leerung des Ladungsträgers führen.

Neben dem Materialfluss hat die Gestaltung der Informationsflussprozesse einen Einfluss auf die Schwankungen des Materialabrufs. Je nachdem wer welche Tätigkeiten auf welche Art durchführt, werden Informationen verzögert und schwankend übermittelt.

Ziel der folgenden Modellierung ist es, sowohl die Einflüsse der unterschiedlichen Informationsflussprozesse als auch der Materialflüsse auf die Schwankungen des Transportbedarfs zu berücksichtigen. Dazu gehört auch die Modellierung variabler Auslager- und Bereitstellzeiten in der Quelle des Routenzugsystems. Die Einflüsse unterschiedlicher Auslagerstrategien werden dadurch implizit berücksichtigt. Eine explizite Modellierung soll in diesem Beitrag nicht betrachtet werden. Auch mögliche Abweichungen in den Prozesszeiten durch menschliches Verhalten sollen nicht abgebildet werden.

Im folgenden Abschnitt werden die definierten Anforderungen hinsichtlich ihrer Abbildbarkeit Modellierungsarten gegenübergestellt (siehe auch Tabelle 3).

3.2 ART DER MODELLIERUNG

Die Schwankungen des Transportbedarfs je Klient können über eine Verteilung von Zwischenzeiten erzeugt werden. Ausgangspunkt dafür sind die Nachschubbedarfszwischenzeiten. Die Modellierung der Zwischenzeiten kann deterministisch oder stochastisch mit unabhängigen Wahrscheinlichkeiten sowie stochastisch mit bedingten Wahrscheinlichkeiten erfolgen. Jedoch können je nach Art der Modellierung bestimmte Anforderungen (siehe Abschnitt 3.1) nur bedingt berücksichtigt werden. Tabelle 3 gibt einen Überblick darüber, welche Anforderungen durch welche Art der Modellierung abgebildet werden können.

Die verbrauchs- und bedarfsorientierte Steuerung zur Initialisierung des Nachschubbedarfs (1) sowie ein einheitlicher Produktionstakt (2) können durch alle drei Arten der Modellierung abgebildet werden. Variantenproduktionen können deterministisch nur durch die Kenntnis eines deterministischen Produktionsprogramms modelliert werden. Um kurzfristige Schwankungen abzubilden, ist dies nach Anforderung (3) jedoch explizit ausgeschlossen. Bei der stochastischen Modellierung besteht die Möglichkeit, die Variantenproduktion durch Verbrauraten, Verbauzahlen sowie Ladungsträgerreichweiten abzubilden (siehe [Kle-2017]). Eine Modellierung von Reihenfolgerestriktionen, welche starke Auswirkungen auf das Produktionsprogramm haben, ist aufgrund der notwendigen Kenntnis vorhergehender Zufallsexperimente jedoch nur mit bedingten Wahrscheinlichkeiten realisierbar (4). Modellierungen durch eine modifizierte Binomialverteilung (siehe [Kle-2017]) können diese Restriktionen nicht berücksichtigen, da sie auf unabhängigen Bernoulli-Experimenten beruhen. Schwankende Ladungsträgerfüllmengen, variabler Ausschuss sowie schwankende Verzögerungen im Abrufprozess aufgrund der Prozessgestaltung (5 – 7) können ebenso nur stochastisch abgebildet werden.

Tabelle 3. Zuordnung von Modellierungsarten zu den definierten Anforderungen

	Anforderungen	Deterministisch	Stochastisch unabhängig	Stochastisch bedingt
(1)	Verbrauchs-/ bedarfsorientierte Verfahren	✓	✓	✓
(2)	Einheitlicher Produktionstakt	✓	✓	✓
(3)	Unbekannte Programmreihenfolge	✗	✓	✓
(4)	Schwankender Nachschubbedarf	✗	✗	✓
(5)	Bedarfswahrnehmung	✗	✓	✓
(6)	Bedarfsnachfrage	✗	✓	✓
(7)	Auslagerungs-/ Bereitstellprozess	✗	✓	✓

* Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – GU 427/30-1

Einfache stochastische Prozesse lassen sich analytisch untersuchen. Durch die Komplexität und die gegenseitigen Abhängigkeiten im Abrufprozess von Routenzugsystemen ist eine analytische Untersuchung des Systems nur bedingt möglich. Zur Beherrschung der Komplexität realer Systeme empfiehlt der VDI simulative Untersuchungen. Dazu müssen die Prozesse unter Berücksichtigung der definierten Anforderungen zunächst modelliert und anschließend in ein ablauffähiges Modell überführt werden [VDI-3633]. Daher dient die folgende Modellierung als Grundlage für die simulative Analyse der Transportbedarfsschwankungen.

3.3 MODELLIERUNGSUMGEBUNG

Die Modellierung der Bedarfsschwankungen erfolgt für die Verwendung in einem generischen Simulationsmodell für Routenzugsysteme. Abbildung 4 zeigt eine Übersicht über wesentliche Bestandteile der Modellierungsumgebung.

Durch die Materialnachfrage eines Klienten (*client*) des Routenzugsystems wird ein Transportauftrag erzeugt, welcher gemeinsam mit weiteren Transportaufträgen für andere Klienten auf einer Tour ausgehend von einer Materialquelle (*source*) bedient wird. Die Klienten sind über Haltestellen (*stops*) in einem Wegenetz (*network*) mit der zugehörigen Quelle verbunden. In jedem Produktionstakt kann an einem Klienten Material verbraucht werden, dass durch Routenzüge nachversorgt wird.

Neben dem Materialflussprozess unterliegen auch die Informationsflussprozesse Rahmenbedingungen. Durch das Erreichen der theoretischen bzw. praktischen Mindest-

menge an Material in einem Ladungsträger entsteht im modellierten System zunächst der Nachschubbedarf. Bis dieser Bedarf durch die zuständige Instanz im Routenzugsystem am Klienten wahrgenommen wird, entsteht ein Zeitverzug. Die Nachfrage des Nachschubs bei der Quelle unterliegt einem weiteren Zeitverzug. Abbildung 5 stellt diesem prinzipiellen Ablauf möglichen Prozessalternativen im Routenzugsystem gegenüber und definiert die Größenordnung der Zeitverzüge.

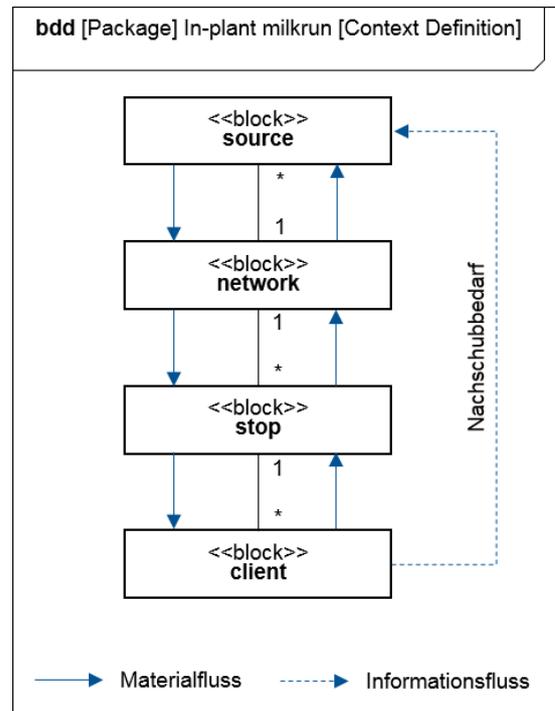


Abbildung 4. Bestandteile der Modellierungsumgebung

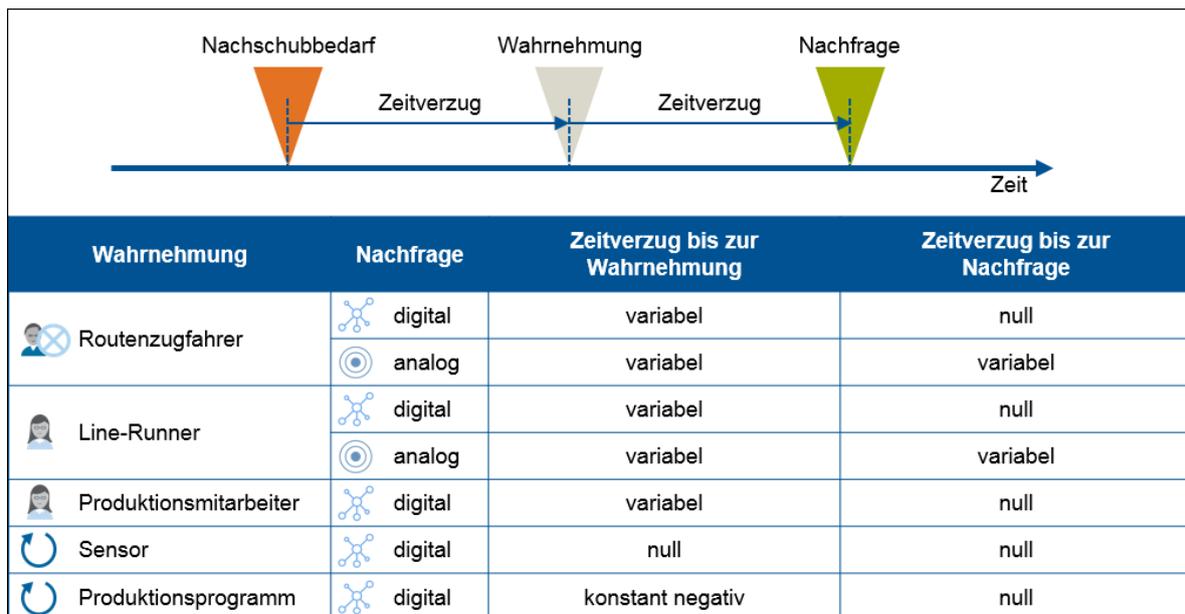


Abbildung 5. Zeitverzüge im Informationsflussprozess in Abhängigkeit verschiedener Prozessalternativen

* Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – GU 427/30-1

Je nach Gesamtprozess des modellierten Systems sind unterschiedliche Instanzen für die Wahrnehmung des Nachschubbedarfs zuständig. Diese lassen sich in Routenzugfahrer, Line-Runner, Produktionsmitarbeiter, Sensor und Produktionsprogramm unterteilen. Die Nachfrage des Transportbedarfs an der Systemquelle erfolgt schließlich entweder analog, zum Beispiel durch die Übergabe einer Kanban-Karte, oder digital durch einen Scan bzw. durch die automatische Auslösung der IT-Steuerung im Falle eines bedarfsorientierten Abrufs. Insofern ein Mensch an der Wahrnehmung des Nachschubbedarfs beteiligt ist, unterliegt der Zeitverzug Schwankungen variabler Größenordnung. Bei einem Sensor ist der Zeitverzug vernachlässigbar klein. Nimmt ein IT-System den Nachschubbedarf auf Basis des Produktionsprogramms wahr, ist der Zeitverzug konstant negativ in Abhängigkeit der zeitlich eingestellten Bedarfsvorschau. Der Zeitverzug bis zur Nachfrage des Transportbedarfs an der Quelle unterliegt einer variablen Zeitspanne, insofern die Nachfrage analog, z. B. durch den Transport eines leeren Ladungsträgers, erfolgt. Bei einer digitalen Nachfrage, z. B. einem Scan, ist der Zeitverzug wiederum vernachlässigbar gering.

Im Anschluss an die Nachfrage des Transportbedarfs, folgt eine weitere Zeitspanne für die Auslagerung und Bereitstellung. Diese unterliegt ebenfalls Schwankungen, welche im Rahmen dieses Beitrags jedoch nur vereinfacht behandelt werden.

3.4 MODELLIERUNG DER EINFLUSSFAKTOREN

In diesem Abschnitt wird die Modellierung der Einflussfaktoren erläutert. Zunächst werden schwankende Nachschubbedarfe behandelt (Unterabschnitt 3.4.1). Anschließend wird die Modellierung der Zeitverzögerungen aufgrund der Prozessvarianten vorgestellt (Unterabschnitt 3.4.2).

3.4.1 MODELLIERUNG DER SCHWANKENDEN NACHSCHUBBEDARFE

Die Ausprägung eines schwankenden Nachschubbedarfs hängt von folgenden sechs Systemattributen und ihren Werten an den Klienten ab:

- Verbraurate (*take rate*)
- Verbauzahl (*take amount*)
- Blockrestriktion (*block restriction*)
- Distanzrestriktion (*distance restriction*)
- Ladungsträgerkapazität (*carrier capacity*)
- Füllmengenabweichung (*filling deviation*)
- Qualitätsrate (*quality rate*)

Abbildung 6 stellt die detaillierte Modellierung des Klienten mit den zugehörigen Systemattributen vor. Die

Kombination aus Sachnummer (*material*) und Klient ist im Routenzugsystem eindeutig. Einem Klienten können jedoch mehrere Sachnummern und mehrere Verbraucher (*consum*) zugeordnet sein. Diese Modellierung entspricht z. B. einem Regal an einer Montagelinie mit einem zugehörigen Montagetakt. In jedem Takt wird eine Produktvariante im Taktabschnitt produziert. In Abhängigkeit der Produktvariante wird eine definierte Sachnummer in das Produkt verbaut. Dadurch wird pro Produktionstakt stets nur auf eine Sachnummer gleichzeitig zugegriffen. Sobald ein Ladungsträger einer Sachnummer im Regal leer ist, entsteht mit einer prozessualen Zeitverzögerung ein Materialabruf im Routenzugsystem. Der Klient repräsentiert das Regal, die einzelnen Verbraucher stellen die sachnummernreinen Kanäle des Regals dar. Die Sachnummer hat eine im Gesamtsystem fest definierte Ladungsträgerkapazität. Über das Attribut der Füllmengenabweichung wird eine prozentuale Abweichung zur Ladungsträgerkapazität eingestellt. Die Materialqualität wird durch eine Qualitätsrate angegeben. Neben einer eindeutigen Sachnummer sind einem Verbraucher ein oder mehrere Verbaubaustein(e) (*take*) zugeordnet. Dadurch werden Produktvarianten mit unterschiedlichen Verbauzahlen und -raten sowie Reihenfolgebeschränkungen modelliert.

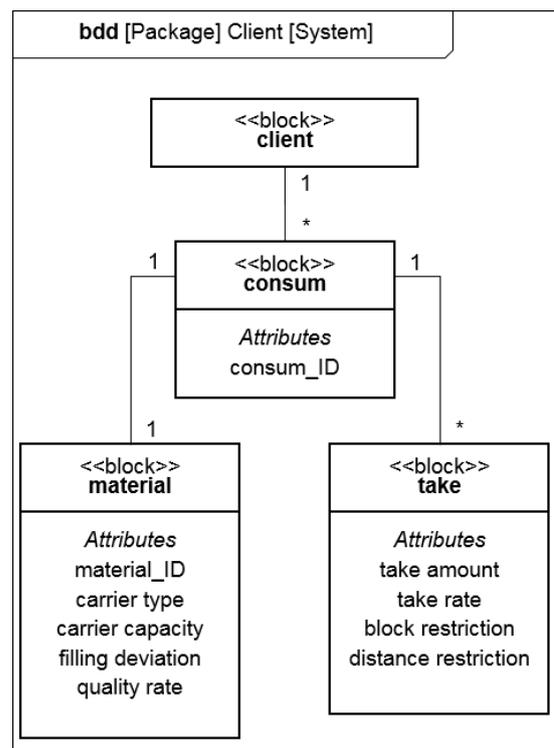


Abbildung 6. Modellierung des Klienten

Im Folgenden wird der prinzipielle Ablauf zur Entstehung eines Nachschubbedarfs anhand eines Klienten skizziert. Die Ausprägungen der Systemattribute stellen dabei lediglich ein Beispiel dar, um alle möglichen Varianten zu verdeutlichen. Das zugrundeliegende Setup ist in Abbildung 7 dargestellt.

* Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – GU 427/30-1

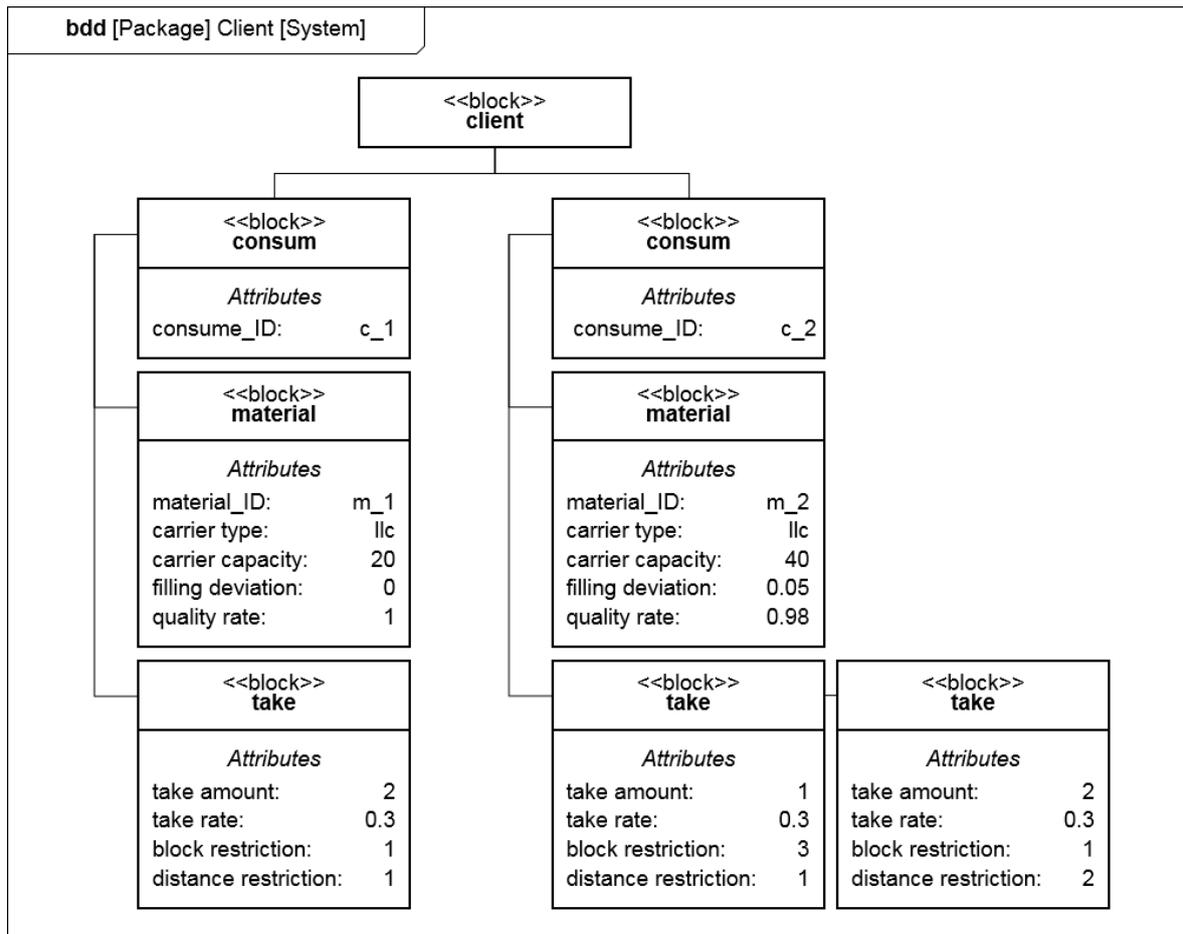


Abbildung 7. Exemplarisches Setup eines Klienten

Einem Klienten sind exemplarisch zwei Verbraucher c_1 und c_2 mit den Sachnummern m_1 und m_2 zugeordnet. Unter der Annahme, dass beide Verbraucher zu Beginn einen vollen Behälter im Zugriff haben, beträgt die Ladungsträgerfüllmenge der Sachnummer m_1 20 Einheiten ($carrier\ capacity = 20$ und $filling\ deviation = 0$). Die initiale Ladungsträgerfüllmenge der Sachnummer m_2 bestimmt sich durch das Ziehen einer Zufallszahl aus einer Dreiecksverteilung mit folgenden Parametern:

- Modus: cc_{m_2}
- Minimum: $cc_{m_2}(1 - fd_{m_2})$
- Maximum: $cc_{m_2}(1 + fd_{m_2})$

mit

cc_{m_2} : Ladungsträgerkapazität der Sachnummer m_2

fd_{m_2} : Füllmengenabweichung der Sachnummer m_2

Zu jedem Produktionstakt wird entschieden, welche Sachnummer mit welcher Verbauzahl verbaut wird. Dazu wird für den Klienten eine diskrete empirische Verteilung erzeugt. Im Beispiel kann zum einen die Sachnummer m_1

mit der Verbauzahl 2 ohne zugehörige Reihenfolgerestriktionen verbaut werden. Die unabhängige Wahrscheinlichkeit für dieses Ereignis entspricht der Verbraurate von 30 %. Zum anderen kann die Sachnummer m_2 mit Verbauzahl 1 sowie 2 oder keine der beiden Sachnummern (\emptyset) verbaut werden. Im Allgemeinen gilt, dass die Summe der Verbrauchsraten aller Ereignisse eines Klienten stets gleich eins ist:

$$\sum_{client} take\ rate = 1$$

Eine Blockrestriktion von 3 bedeutet, dass sobald ein Verbau dieser Variante erfolgt ist, ebenfalls ein Verbau in den beiden darauffolgenden Takten derselben Variante stattfindet. Die unabhängige Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Ereignisses bestimmt sich daher zunächst zu:

$$P_{m_2,1} = \frac{1}{1 - block\ restriction + \frac{block\ restriction}{take\ rate}}$$

Für die nachfolgenden Takte innerhalb der Blockrestriktion gilt eine Ereigniswahrscheinlichkeit von eins.

* Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – GU 427/30-1

Eine Distanzrestriktion verhindert hingegen, dass die gleiche Produktvariante auf zwei aufeinanderfolgenden Takten am selben Klienten gefertigt wird. Eine Distanzrestriktion von 2 bedeutet, dass mindestens ein Produktionstakt zwischen zwei aufeinanderfolgenden Verbauereignissen liegt. Für die Verbaurrate dieses Ereignisses gilt stets, dass sie nicht größer als der Kehrwert der Distanzrestriktion sein darf:

$$take\ rate \leq \frac{1}{distance\ restriction}$$

Die unabhängige Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Ereignisses wird folgendermaßen berechnet:

$$P_{m_{2,2}} = \frac{1}{1 - distance\ restriction + \frac{1}{take\ rate}}$$

Für die nachfolgenden Takte innerhalb der Distanzrestriktion ist die Verbaurwahrscheinlichkeit des Ereignisses dann null.

Die Reihenfolgerestriktionen führen dazu, dass die tatsächliche Wahrscheinlichkeit der anderen Ereignisse eines Klienten beeinflusst werden. Für alle Ereignisse entstehen damit bedingte Wahrscheinlichkeiten. Die Abweichung der unabhängigen Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses von dessen Verbaurrate muss deshalb gewichtet mit den relativen Verbauraten der restlichen Einzelereignisse auf alle anderen Ereignisse verteilt werden, so dass für die zusätzliche bedingte Wahrscheinlichkeit ΔP_{ij} eines Ereignisses i aufgrund des Ereignisses j unter der Bedingung $i \neq j$ gilt:

$$\Delta P_{ij} = (take\ rate_j - P_{unabhängig,j}) \frac{take\ rate_i}{1 - take\ rate_j}$$

Tabelle 4 zeigt die Entstehung der diskreten empirischen Verteilung des exemplarischen Klienten für den Fall, dass weder eine Block- noch eine Distanzrestriktion aktiv ist. Für jedes Ereignis i muss die eigene unabhängige Wahrscheinlichkeit sowie der Einfluss anderer Ereignisse j

betrachtet werden. Durch die Summe aller Einflüsse ergibt sich schließlich die bedingte Wahrscheinlichkeit des Ereignisses i .

Aus der erzeugten empirischen Verteilung wird zum Produktionstakt ein Ereignis bestimmt. Unter der Annahme, dass das Ereignis $m_{2,2}$ mit der Wahrscheinlichkeit 50,5 % gezogen wurde, tritt dieses Ereignis beim nächsten Produktionstakt aufgrund der Distanzrestriktion mit Sicherheit nicht ein. Die Wahrscheinlichkeiten der anderen Ereignisse verändern sich dann dementsprechend. Aufgrund der Verbauzahl 2 werden mindestens zwei Einheiten aus dem Ladungsträger einzeln entnommen. Für jede Entnahme wird mit der Wahrscheinlichkeit der Qualitätsrate bestimmt, ob ein Materialfehler vorliegt. Falls ja, werden aus dem Ladungsträger Ersatzteile solange entnommen, bis die benötigte Verbauzahl in ausreichender Qualität vorhanden ist.

3.4.2 MODELLIERUNG DER SCHWANKENDEN ZEITVERZÖGERUNGEN

Durch die kontinuierlichen zeitdiskreten Entnahmen von Einheiten aus den Ladungsträgern sinkt die Ladungsträgerfüllmenge. Ab Erreichen des definierten Mindestbestands beginnen die Zeitverzögerungen im Informationsflussprozess durch das Wahrnehmen und die Nachfrage des Nachschubbedarfs. Ebenso beeinflusst die anschließende Auslagerung und Bereitstellung des nachgefragten Materials die Transportbedarfsschwankungen. Analog Abbildung 5 werden diese Zeitverzögerungen durch stochastische Prozesse modelliert.

Die Zeitspanne zur Wahrnehmung des Bedarfs durch den Routenzugfahrer ist in Abhängigkeit der im Simulationsmodell stattfindenden Prozesse modelliert, d. h. der Bedarf wird erst dann wahrgenommen, wenn der Routenzug auf seiner Route den Klienten mit einem leeren Ladungsträger passiert. Ebenso erfolgt die Modellierung der analogen Nachfrageübermittlung durch den Routenzugfahrer, indem die Auslagerung des Materials erst startet, sobald der Routenzug die Quelle im System erreicht hat.

Tabelle 4. Schrittweise Entstehung der diskreten empirischen Verteilung des exemplarischen Klienten für ein Szenario

Ereignis i	take rate	$P_{unabhängig}$	$P_{bedingt}$				Gesamt
			Ereignis j				
			m_1	m_2,1	m_2,2	\emptyset	
m_1	0,3	0,3	0,3	0,075	-0,056	0	0,319
m_2,1	0,3	0,125	0	0,125	-0,056	0	0,069
m_2,2	0,3	0,43	0	0,075	0,43	0	0,505
\emptyset	0,1	0,1	0	0,025	-0,019	0,1	0,106

* Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – GU 427/30-1

Die anderen Prozessalternativen werden durch unabhängige Zufallsexperimente modelliert, sofern sie zeitlich nicht komplett vernachlässigt werden können. Basierend auf einer diskreten Gleichverteilung wird jeweils ein Zeitverzug aus einem vorgegebenen Intervall für die jeweilige Prozessalternative bestimmt. Tabelle 5 zeigt die voreingestellten Intervallgrenzen der modellierten Prozesse, welche durch den Simulationsanwender beliebig für das zu untersuchende System angepasst werden können. Der Transportauftrag wird erst dann auf eine Tour des Routenzugs verplant, sobald alle Zeitverzögerungen abgeschlossen sind. Bei der Bereitstellung wird das dem Nachschubbedarf entsprechende Material dann mit einer initialen Ladungsträgerfüllmenge erstellt.

Tabelle 5. Zeitverzugsintervalle der Prozessalternativen

Prozess	Zeitverzugsintervall in s
Wahrnehmung durch Produktionsmitarbeiter	[0, 60]
Wahrnehmung durch Line-Runner	[0, 600]
Analoge Nachfrage durch Line-Runner	[0, 1200]
Auslagerung und Bereitstellung je Auftrag	[600, 1200]

4 SIMULATIVE ANALYSE DER AUSWIRKUNGEN DER TRANSPORTBEDARFSSCHWANKUNGEN AUF EIN ROUTENZUGSYSTEM

Um die Auswirkungen der Transportbedarfsschwankungen auf Routenzugsysteme beurteilen zu können, wurden Simulationsexperimente durchgeführt. Das untersuchte System entspricht dem Beispielsystem aus der VDI-Richtlinie 5586 zu Routenzugsystemen [VDI-5586b]. Der Aufbau des Routenzugsystems ist in Tabelle 6 dargestellt. Im generischen Simulationsmodell wurden die Systemparameter und Prozessvarianten über Standardbausteine modifiziert. Die Zykluszeitparameter wurden analog der VDI-Richtlinie eingestellt, ebenso wurde ein Routenzug mit einem getakteten Tourenstart eingesetzt und als einheitlicher Produktionstakt wurde eine Minute gewählt. Die Systemattribute der Klienten (siehe Abbildung 6) wurden so eingestellt, dass die durchschnittlichen Ladungsträgerreichweiten ebenfalls den Angaben der VDI-Richtlinie entsprechen.

In einer ersten Simulationsstudie wurde die Verteilung der Auslagerzwischenzeiten zum einen für statische Zwischenzeiten und zum anderen für dynamisch schwankende Zwischenzeiten verifiziert. Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse beispielhaft für Klient 1 und 3. Wie erwartet sind die

Zwischenauslagerzeiten der Aufträge eines Klienten bei statischen Transportbedarfen in beiden Experimenten konstant und für den dynamischen Fall ergeben sich deutliche Schwankungen. Zur Erzeugung der Transportbedarfsschwankungen wurden die Ladungsträgerkapazität sowie die Verbrauchsrate entsprechend eingestellt.

Tabelle 6. Spezifikation des untersuchten Routenzugsystems nach [VDI-5586b]

Sachnummer	Haltestelle	Klient	Ladungsträgerreichweite in min
A_01	H_1	1	120
A_02	H_2	2	200
A_03	H_2	3	80
A_04	H_2	4	150
A_05	H_3	5	100
A_06	H_4	6	50
A_07	H_5	7	20
A_08	H_5	8	48
A_09	H_6	9	240
A_10	H_6	10	48

Um die Auswirkungen der schwankenden Transportbedarfe im Vergleich zu den statischen Transportbedarfen zu evaluieren, wurden in Abhängigkeit der Tourenstartabstände weitere Simulationsläufe durchgeführt. Die VDI-Richtlinie 5586 berechnet statisch für das Beispielsystem, dass ein getakteter Tourenstart zwischen 14 und 30 Minuten für ein stabiles System gewählt werden kann, weist allerdings auch darauf hin, dass durch schwankende Transportbedarfe bei einem hohen Tourenstartabstand eventuell ein höherer Umlaufbestand (WIP) im untersuchten System notwendig sei [VDI-5586b]. Der WIP dient in den durchgeführten Simulationsexperimenten als Kennzahl für die Bewertung der Systemeffizienz. Jede Erhöhung des WIP bedeutet, dass Zusatzkapazität in Form von Ladungsträgern vorgehalten werden muss. Dadurch sinkt die Effizienz des Systems (siehe auch Abschnitt 2.2)

Als Eingangsparameter für die Simulationsexperimente wurde der Tourenstartabstand bei dynamischen Transportbedarfen in einminütigen Schritten von 30 auf 14 Minuten gesenkt und der jeweils notwendige WIP so bestimmt, dass keine Materialengpässe in der Produktion entstehen. Verzögerungen durch die Informationsübermittlung sowie Auslagerzeiten wurden in beiden Fällen vernachlässigt.

* Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – GU 427/30-1

Abbildung 9 stellt die Ergebnisse der Simulationsexperimente dar. Gezeigt wird jeweils der Mittelwert des WIP aus zehn Beobachtungen je Experiment. Die simulierte Zeit einer Beobachtung betrug jeweils 240 Stunden und die initialen Ladungsträgerfüllstände wurden je Beobachtung zufällig variiert. Im Vergleich dazu wurden die analogen Experimente mit statischen Transportbedarfen und ohne Zeitverzüge simuliert und der daraus resultierende WIP ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass in allen Fällen der benötigte durchschnittliche WIP bei dynamischen Transportbedarfen über dem WIP bei statischen Transportbedarfen liegt. Bei Tourenstartabständen unter 20 Minuten ist der Effekt allerdings gering, da sich der Tourenstartabstand der laut VDI-Richtlinie 5586 statisch bestimmten durchschnittlichen Zykluszeit einer Tour von 16,5 Minuten annähert und damit die zeitliche Auslastung des Routenzugs optimiert wird.

Bei Tourenstartabständen, die geringer als die durchschnittliche Zykluszeit sind, können Leertakte entstehen. In diesen Fällen sollte der Routenzug laut Taktauslegung

seine Tour beginnen, jedoch stehen keine Transportaufträge an. Statt einer Leerfahrt startet die nächste Tour dann erst einen Takt später. Dadurch ist der Tourenstartabstand vereinzelt doppelt so hoch, wie in der Auslegung bestimmt. Dies wirkt sich besonders dann negativ auf den WIP aus, falls der doppelte Tourenstartabstand über dem maximal zulässigen Tourenstartabstand von 30 Minuten liegt, also bei einem Takt von 16 Minuten. Abbildung 9 zeigt, dass dieses Phänomen sowohl bei statischen als auch bei dynamischen Transportaufträgen auftritt. Bei hohen Tourenstartabständen wird die kapazitive Auslastung der Touren maximiert. Sobald die Anzahl der gleichzeitig zur Verfügung stehenden Aufträge jedoch die Kapazität des Routenzugs übersteigt, werden die überschüssigen Aufträge mit dem Zeitverzug eines weiteren Takts ausgeliefert. Dadurch ist wiederum ein erhöhter WIP im Routenzugsystem notwendig. Dies gilt analog für statisch und dynamisch anfallende Transportaufträge. Dadurch ist der durchschnittliche WIP im System höher als der in der VDI-Richtlinie 5586 analytisch bestimmte WIP von 21 Ladungsträgern (siehe Abbildung 9).

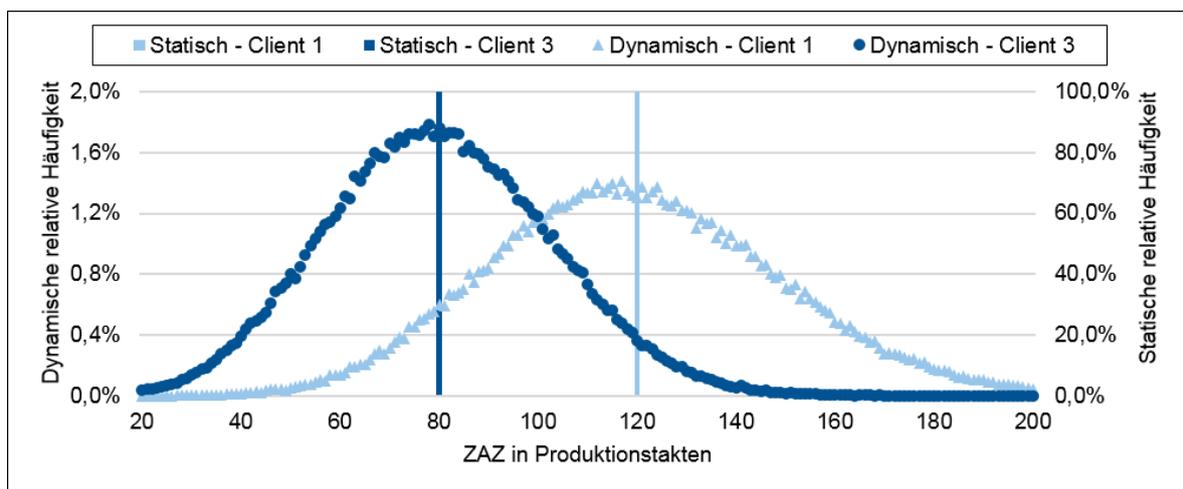


Abbildung 8. Verifizierung der statischen und dynamischen Auslagerzwischenzeiten für Klient 1 (carrier capacity = 20, take rate = 0,1667, $n_{\text{Abrufe}} = 120.050$) und für Klient 3 (carrier capacity = 20, take rate = 0,25, $n_{\text{Abrufe}} = 177.448$)

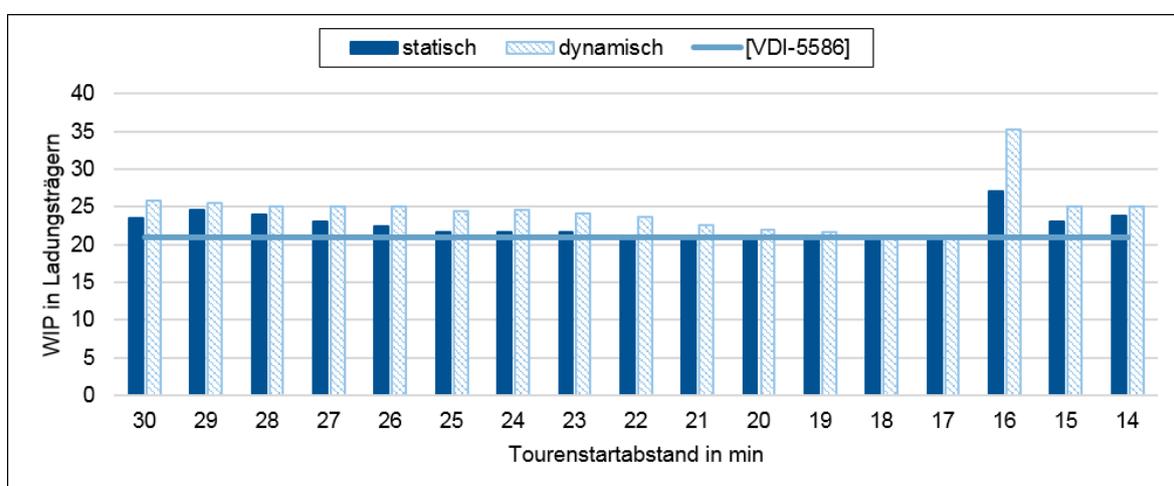


Abbildung 9. Zusätzlicher Bedarf an Umlaufbestand (WIP) bei der dynamischen Modellierung der Transportbedarfe im Vergleich zum statischen Referenzszenario

* Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – GU 427/30-1

Neben der grundsätzlichen Auswirkung von dynamischen Transportaufträgen auf die Kennzahlen von Routenzugsystemen wurde die Auswirkung einzelner Prozessvarianten für die Wahrnehmung und die Nachfrage des Nachschubbedarfs mittels Simulation evaluiert. Dazu wurden mit dynamischen Transportbedarfen die in Abbildung 5 aufgeführten Prozesse mit Ausnahme des Produktionsprogramms experimentell untersucht. Da ein bedarfsgesteuerter Abruf auf Basis des Produktionsprogramms keine positiven variablen Zeitverzögerungen enthält, gelten die gleichen Voraussetzungen wie für den verbrauchsgesteuerten digitalen Abruf mittels Sensor. Schwankende Auslagerzeiten wurden in diesen Experimenten berücksichtigt. Abbildung 10 zeigt die Auswertung des daraus resultierenden WIP über alle oben angeführten Tourenstartabstände je Prozessalternative. Die simulierten Daten wurden um die Ausreißer bei einem Tourenstartabstand von 16 min bereinigt. Es zeigt sich, dass sowohl die Wahl des Wahrnehmungs- als auch des Nachfrageprozesses einen Einfluss auf den WIP im Routenzugsystem haben und dass beide Prozesse in Kombination betrachtet werden müssen, um eine Aussage über den Prozess mit dem geringsten WIP treffen zu können.

Bei der Betrachtung des Wahrnehmungsprozesses entspricht die Reihenfolge der Höhe des WIP tendenziell der Reihenfolge der Höhe der Zeitspannen, die für den jeweiligen Prozess eingestellt sind, sofern der Übermittlungsprozess identisch ist. Die Wahrnehmung durch einen Sensor bzw. durch einen Produktionsmitarbeiter erzeugen dabei den gleich WIP im System. Die Wahrnehmung durch einen Line-Runner führt zu einem höheren WIP. Der höchste WIP ist im betrachteten System notwendig, falls Nachschubbedarfe durch den Routenzugfahrer wahrgenommen werden, da Auslieferungen dann häufig um einen zusätzlichen Takt verschoben werden und die Taktzeit zumeist

größer ist als die durchschnittliche Zeitspanne zur Wahrnehmung des Nachschubbedarfs durch den Line-Runner.

Für den Nachfrageprozess gilt, dass eine digitale Informationsübertragung ohne Zeitverzögerung tendenziell einen geringeren WIP im Routenzugsystem verursacht als die analoge Nachfrage mit Zeitverzug. Bei der Betrachtung der Kombination der beiden Prozessvarianten fällt auf, dass die analoge Nachfrage durch einen Line-Runner zu weniger WIP führen kann als die digitale Nachfrage durch den Routenzugfahrer. Der für das untersuchte System beste Prozess ist somit die digitale Informationsübermittlung bei der Wahrnehmung durch einen Sensor bzw. bei der Wahrnehmung durch einen Produktionsmitarbeiter. Hingegen stellt der analoge Abruf durch einen Routenzugfahrer die schlechteste Prozesskombination im Hinblick auf den WIP dar. Dies liegt daran, dass der Bedarf erst dann wahrgenommen wird, sobald der Routenzugfahrer den Klienten auf seiner Route passiert, und dass die Nachfrage erst ausgelöst wird, wenn der Routenzugfahrer zur Quelle zurückgekehrt ist. Je nach Auslagerzeit wird die Bedienung des Transportauftrags mit Sicherheit um mindestens einen Routenzugtakt verzögert.

Im Allgemeinen gilt, dass der Einfluss einer Prozessalternative zum einen vom individuellen Routenzugsystem und zum anderen von den eingestellten Abrufparametern abhängt. Eine pauschale Aussage welcher Prozess in jedem Fall der Optimale ist, kann daher nicht getroffen werden. Allerdings zeigt sich, dass höhere Zeitverzögerungen im Abrufprozess einen tendenziell negativen Einfluss auf die Effizienz eines Systems haben und dass dynamische Transportbedarfe bei der Auslegung von Routenzugsystemen unabhängig vom Prozess berücksichtigt werden sollten.

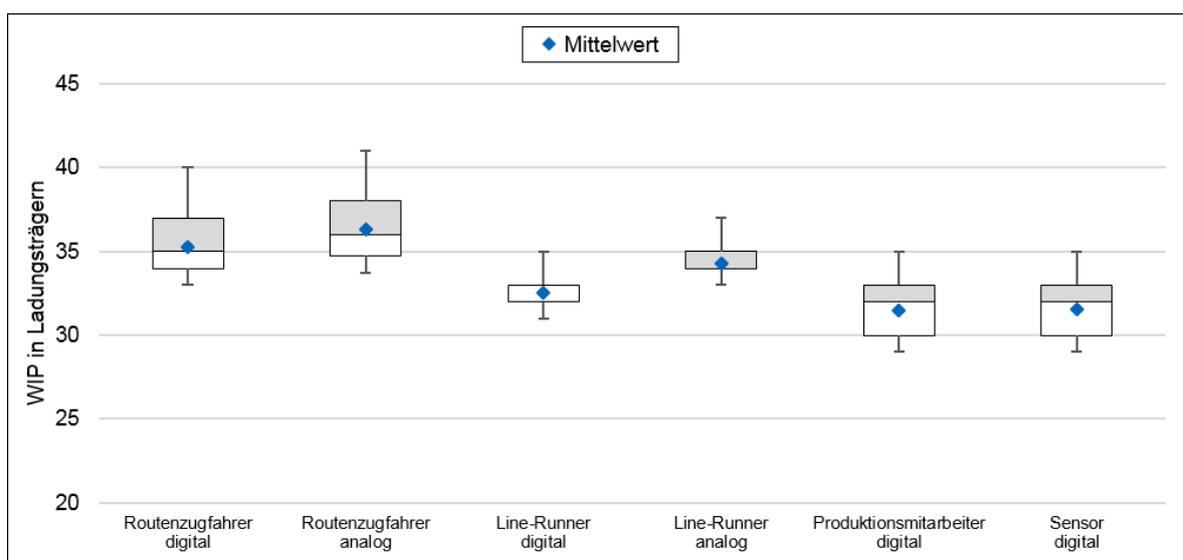


Abbildung 10. Einfluss verschiedener Prozessalternativen auf den Umlaufbestand (WIP) im Routenzugsystem (Darstellung als Box-Plot mit Median, Quartil 2, Quartil 3, Minimum und Maximum)

* Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – GU 427/30-1

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Heutige Routenzugsysteme ermöglichen eine effiziente Produktionsversorgung aufgrund gebündelter Transporte, sofern nur geringe Transportbedarfsschwankungen im System anfallen. Aufgrund der häufigen statischen Auslegung der Routenzugsysteme stellen volatile Transportbedarfe eine Herausforderung für die Effizienz des Systems dar. In diesem Beitrag wurde eine detaillierte stochastische Modellierung von Transportbedarfsschwankungen in Routenzugsystemen für den Einsatz in einer ereignisdiskreten Simulationsumgebung vorgestellt, welche als Grundlage für die Entwicklung von Strategien zum Umgang mit Bedarfsschwankungen verwendet werden kann. Es können komplexe Prozesse und Abläufe analysiert werden. Zudem wurde gezeigt, dass sich unterschiedliche Routenzugprozesse in unterschiedlichem Maß auf die Bedarfsschwankungen und damit auf die Systemstabilität auswirken. Die Dynamik von Transportbedarfen sollte bei der Auslegung von Routenzugsystemen prozessunabhängig berücksichtigt werden.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen können im nächsten Schritt dynamische Steuerungsstrategien entwickelt und hinsichtlich ihrer Fähigkeit, die Transportbedarfsschwankungen robust zu bewältigen, simulativ evaluiert werden. Dabei können sowohl dynamische Scheduling- als auch Tourenbildungsalgorithmen getestet werden.

Des Weiteren ermöglicht die Integration der Modellierung in ein generisches Simulationsmodell für Routenzugsysteme bereits in der Planungsphase eine realitätsnahe Untersuchung der Systeme. Um weitere Routenzugprozesse außerhalb des Materialabrufs realitätsnah in die Simulation einzubeziehen, ist das generische Modell um typische Bereitstell- sowie Beladeszenarien zu erweitern. Ebenfalls sind detaillierte Untersuchungen verschiedener Auslagerungsstrategien denkbar.

LITERATUR

- [Aln-2014] Alnahhal, M.; Noche, B.: Capacity planning in in-plant milk run system. In: International Journal of Service and Computing Oriented Manufacturing, Jg. 1 (2014) Nr. 3, S. 197–210.
- [Boz-2013] Bozer, Y. A.; Ciemnoczolowski, D. D.: Performance evaluation of small-batch container delivery systems used in lean manufacturing – Part 1: system stability and distribution of container starts. In: International Journal of Production Research, Jg. 51 (2013) Nr. 2, S. 555–567.
- [Bur-1961] Burbidge, J. L.: The new approach to production. In: Production Engineer, 40 (1961) Nr. 12, S. 769–784.
- [Bur-1984] Burbidge, J. L.: Automated production control with a simulation capability. In: Proceedings IPSP conference, WG 5-7 (1984) Copenhagen.
- [Däu-2017] Däuschinger, K.: Abrufsteuerung bei Bedarfsschwankungen in der automobilen Beschaffungs- und Produktionslogistik. Dissertation, Technische Universität München, Garching, 2017.
- [Emd-2012] Emde, S.; Fliedner, M.; Boysen, N.: Optimally loading tow trains for just-in-time supply of mixed-model assembly lines. In: IIE Transactions, Jg. 44 (2012) Nr. 2, S. 121–135.
- [Gal-2015] Galka, S.; Klenk, E.; Günthner, W. A.; Trautzsch, D.; Vogel-Daniel, C.: Exakt im Takt – Optimales Zusammenspiel von Automatiklagern und Routenzügen. In: Industrie 4.0 Management, Jg. 31 (2015) Nr. 2, S. 57–60.
- [Gol-2013] Golz, J.: Materialbereitstellung bei Variantenfließlinien in der Automobilendmontage. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2013.
- [Har-1995] Harrison, A.: Themes for facilitating material flow in manufacturing systems. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Jg. 25 (1995) Nr.10, S. 3–25.
- [Har-1997] Harrison, A.: Investigating the sources and causes of schedule instability. The International Journal of Logistics Management, Jg. 8 (1995) Nr. 2, S. 75–82.

- [Kle-2014] Klenk, E.; Galka, S.; Günthner, W. A.: Analysis Of Parameters Influencing In-Plant Milk Run Design For Production Supply. In: Montreuil, B.; Carrano, A.; Gue, K.; de Koster, R.; Ogle, M.; Smith, J., 12th International Material Handling Research Colloquium, College Industry Council on Material Handling Education, Charlotte, NC, 2014, S. 251-267, ISBN 978-1-882780-17-5.
- [Kle-2015] Klenk, E.; Galka, S.; Günthner, W. A.: Potenziale einer flexiblen Routenzugsteuerung - Strategien zum besseren Umgang mit schwankenden Transportbedarfen. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 110 (2015), 12, S. 805-809.
- [Kle-2017] Klenk, E.: Ein analytisches Modell zur Bewertung der Leistung von Routenzugsystemen bei schwankenden Transportbedarfen.. Dissertation, Technische Universität München, Garching, 2017.
- [Klu-2013] Klug, F.: The internal bullwhip effect in car manufacturing. International Journal of Production Research, Jg. 51 (2013) Nr. 1, S. 303-322.
- [Lee-1997] Lee, H. L.; Padmanabhan, V.; Whang, S.: Information distortion in the supply chain: the bullwhip effect. Management Science, Jg. 43 (2017) Nr. 4, S. 546–558.
- [Lie-2017] Lieb, C.; Klenk, E.; Galka, S.; Keuntje, C.: Einsatz von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung - Studie zu Planung, Steuerung und Betrieb, Lehrstuhl fml, Garching, 2017, ISBN 978-3-941702-79-0.
- [Mei-2009] Meißner, S.: Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung. Dissertation, Technische Universität München, Garching, 2009.
- [Ple-2010] Plehn, J.; Schneider, O.: Schwankungen im Materialfluss verhindern. Productivity management, (2010) Nr. 1, S. 39-41.
- [Tow-1992] Towill, D. R.; Naim, M. M.; Wikner, J.: Industrial dynamics simulation models in the design of supply chains. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Jg. 22 (1992) Nr. 5, S. 3–13.
- [Tow-1997] Towill, D. R.: Forridge – Principles of good practice in material flow. Production Planning & Control, Jg. 8 (1997) Nr. 7, S. 622–632.
- [VDI-3633] VDI Verein deutscher Ingenieure: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen. VDI Richtlinie Nr. 3633 Blatt1, 2014.
- [VDI-5586a] VDI Verein deutscher Ingenieure: Routenzugsysteme - Grundlagen, Gestaltung und Praxisbeispiele. VDI-Richtlinie Nr. 5586 Blatt 1, 2016.
- [VDI-5586b] VDI Verein deutscher Ingenieure: Routenzugsysteme - Planung und Dimensionierung. VDI-Richtlinie Nr. 5586 Blatt 2, 2016.
-
- Christian Lieb, M. Sc.**, Research assistant at the Chair for Materials Handling Material Flow Logistics at the Technical University of Munich.
- Fabian Hormes, M. Sc.**, Research assistant at the Chair for Materials Handling Material Flow Logistics at the Technical University of Munich.
- Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner**, Professor and former head of the Chair for Materials Handling Material Flow Logistics at the Technical University of Munich.
- Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner**, Professor and head of the Chair for Materials Handling Material Flow Logistics at the Technical University of Munich.
- Address:
Technische Universität München, Lehrstuhl fml,
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching, Germany,
Phone: +49 89 289 15947
- E-Mail: christian.lieb@tum.de