

## **Effizienzsteigerung für Routenzüge – Untersuchung des Einflusses der Routenführung auf die Auslastung und Prozessstabilität**

### ***Efficiency in in-plant milk-run systems – the influence of routing strategies on system utilization and process stability***

Tobias Staab, Stefan Galka, Eva Klenk, Willibald A. Günthner, TU München,  
Garching (Germany), staab@fml.mw.tum.de, galka@fml.mw.tum.de,  
klenk@fml.mw.tum.de, guenthner@fml.mw.tum.de

**Abstract:** Planning in-plant milk-run systems is a complex task because these systems are dynamic and a high number of different dependencies, e.g. blockages, occur. Using a discrete event simulation model, these dependencies can be modelled and analyzed accurately. We present a generic model to simulate different milk-run systems focusing on the physical handling steps. The resulting traffic situation and service level are measured and used to identify critical situations. We applied the model to a large planning project from industrial practice and were able to derive recommendations to improve system performance.

## **1 Routenzüge zur Produktionsversorgung**

In der Automobilindustrie lässt sich der zunehmende Einsatz von Routenzügen für den innerbetrieblichen Materialtransport beobachten (Günthner et al. 2012). Zahlreiche Unternehmen arbeiten derzeit an der Neu-Einführung, Überplanung oder Standardisierung ihrer Routenzugsysteme, denn diese gelten als effizient, sicher und stabil, insbesondere wenn Materialien in hoher Frequenz und kleinen Losgrößen Just-in-time bereitgestellt werden müssen.

Bei derartigen Routenzugsystemen handelt es sich um komplexe und dynamische Systeme. Auf mehreren, meist festgelegten Routen müssen von mehreren Routenzügen in kurzen Zyklen diverse Ladungsträger an verschiedene Verbauorte verteilt werden. I.d.R. schwanken die Transportbedarfe und sind erst recht kurzfristig exakt bekannt, dennoch muss eine sichere, stabile und gleichzeitig effiziente Versorgung gewährleistet werden. Die verschiedenen Routenzüge nutzen Ressourcen wie z.B. Beladebahnhöfe und Wege gemeinsam, wodurch zusätzlich Abhängigkeiten zwischen den Routen sowie gegenseitige Behinderungen und Behinderungen mit anderen Fahrzeugen auftreten können, mit Staus und Verspätungen der Züge als Folge. Die Verkehrssituation hat damit entscheidenden

Einfluss auf die Stabilität im System und die Versorgungssicherheit, d.h. die rechtzeitige Bereitstellung der Materialien durch das Routenzugsystem. Hierauf kann wiederum über die Routenführung, die Reihenfolge, in der Routen gestartet werden, oder den Einsatz von Sonderfahrten für besonders zeitkritische Materialien Einfluss genommen werden. Aufgrund dieser Abhängigkeiten sowie der Dynamik und Unsicherheit der Bedarfe kann das Systemverhalten in der Planungsphase mit statischen Betrachtungen nur unzureichend abgeschätzt werden. Die ereignisdiskrete Simulation ist hierfür besser geeignet, da sich sowohl Behinderungen zwischen Objekten, also auch die Stochastik im System detailliert abbilden lassen und Rückschlüsse auf die Versorgungssicherheit und Auslastung der Routenzüge gezogen werden können. Im vorliegenden Beitrag werden anhand eines Praxisbeispiels durchgeführte Experimente zur Untersuchung des Einflusses der Routenführung, der Routenreihenfolge, der sonstigen Fahrzeuge etc. auf die Verkehrssituation und damit auf die Versorgungssicherheit vorgestellt. Der Fokus der Betrachtungen liegt auf der Nachbildung der Prozesse auf dem Shop Floor (Beladung, Bereitstellung, Fahren, Überholen, etc.), da diese die Verkehrssituation maßgeblich beeinflussen.

## 2 Wissenschaftliche Abgrenzung

In einigen Unternehmen, insbesondere wenn größere Routenzugsysteme umgesetzt werden sollen, wird zur Absicherung der Planung die Ablaufsimulation eingesetzt (Günthner et al. 2012). Entsprechende Modelle sind i.d.R. projektspezifisch und bilden den jeweils geplanten Prozess und das jeweilige Wegenetz ab, sind jedoch nicht ohne weiteres auf verwandte Fragestellungen übertragbar.

Ein generischer Ansatz wird hingegen im VDA Automotive Bausteinkasten (Mayer und Pöge 2010) für die Ablaufsimulation in Plant Simulation verfolgt. Dieser bietet zahlreiche Bausteine zur Abbildung der Prozesse in Automobilfabriken in großem Umfang an, unter anderem kann auch ein Routenzug als Fahrzeug eingesetzt werden. Blockierungen können zwar abgebildet werden, jedoch können für Routenzüge ohne zusätzliche Erweiterungen durch den Nutzer keine festen Routen vorgegeben werden. Zudem ist dieser Bausteinkasten nicht öffentlich zugänglich.

In Digitaler-Fabrik-Software wie bspw. MALAGA (Roth 2013) können feste Routen für Routenzüge basierend auf einem Knoten-Kanten-Modell und einem CAD-Layout festgelegt und hinsichtlich des minimalen Weges optimiert werden. Im Modell sind jedoch keine Behinderungen zwischen Routenzügen abbildbar, der Schwerpunkt liegt auf der Planung und 3D-Visualisierung. Außerdem wird mit mittleren Bedarfen, Fahrzeiten etc. gerechnet und Schwankungen im Betrieb nicht berücksichtigt.

Die Verkehrssituation mit Behinderungen steht hingegen im Mittelpunkt bei Softwarepaketen zur Straßenverkehrssimulation wie bspw. SUMO (Krejzewicz und Behrisch 2013). Hier sind andererseits keine logistischen Objekte, wie bspw. Behälter, Routenzüge usw. mit ihren spezifischen Eigenschaften vorgesehen. Diese müssten durch Omnibusse, Fußgänger etc. nachgebildet werden, welche im Detail ein anderes Verhalten zeigen.

### 3 Aufbau Simulationsmodell

Auf Grund des komplexen und dynamischen Charakters der vorliegenden Problemstellung bietet sich eine Simulationsstudie an, um zu hinreichend genauen Aussagen zu gelangen (Schenk et al. 2008). Das ereignisdiskrete Simulationsmodell, das den Experimenten in dieser Arbeit zu Grunde liegt, erlaubt es, Routenzugsysteme bereits in der Planungsphase abzubilden. Der Fokus liegt dabei auf den physischen Teilprozessen, die in einem solchen System ablaufen, beispielsweise Fahrten, Beladung und Bereitstellung. Aus dieser Zielsetzung ergeben sich drei Anforderungen, die bei der Modellierung und Implementierung beachtet werden müssen. Durch einen einfachen und adaptiven Aufbau können verschiedene Systeme und verschiedene Varianten der Routenplanung schnell modelliert und miteinander verglichen werden. Weiterhin sollen alle wichtigen Wechselwirkungen zwischen Fahrzeugen abgebildet werden, um problematische Verkehrssituationen identifizieren und analysieren zu können. Zuletzt muss die Simulation dem Planer ermöglichen, Materialbedarfe so abzubilden, dass auch Schwankungen und Bedarfsspitzen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf das Routenzugsystem untersucht werden können.

Die Modellierung beruht auf der Analyse bestehender Routenzugsysteme, wie sie in Unternehmen zur Anwendung kommen. Durch die Vielzahl an unterschiedlichen Steuerungsprinzipien und Be- und Entladeprozessen (Günthner et al. 2012) wurde eine Unterteilung der Systemelemente in zwei Gruppen vorgenommen. Die erste Gruppe umfasst solche Bestandteile eines Routenzugsystems, die zur Abbildung des Wegenetzes und der Routenzüge benötigt werden und in vielen Anwendungsfällen in ähnlicher oder gleicher Weise vorkommen, beispielsweise Wege, Kreuzungen, Haltestellen und Routenzüge. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die gewählten Beladeprozesse und Bedarfssteuerungen oft stark, abhängig von den Randbedingungen des jeweiligen Anwendungsfalls. Diese systemspezifischen Module können über schlanke, definierte Schnittstellen mit dem Wegenetz kombiniert werden. Die modulare Struktur gewährleistet, dass verschiedene Systemausprägungen und Varianten der Routenplanung schnell modelliert werden können.

Durch die vorgegebenen Fahrtrouten, häufig in Kombination mit einem festen Fahrplan, verfügt ein Routenzugsystem nicht über den benötigten Flexibilitätsgrad, um auf kritische Verkehrssituationen passend zu reagieren. Der Fokus des vorliegenden Simulationsmodells liegt daher auf den physischen Teilprozessen, welche derartige kritische Verkehrssituation verursachen und die die Stabilität der Materialversorgung potenziell gefährden, wie der Bereitstellung von Material oder dem Abbiegen an Kreuzungen.

Kreuzungen verfügen über einen Steuerungsmechanismus, der Vorfahrt und gleichzeitiges Abbiegen regelt. Dabei gilt, dass maximal zwei Routenzüge zugleich eine Kreuzung durchfahren können. Zusätzlich ermittelt eine Kollisionsabfrage, ob die Abbiegewünsche der beiden Züge kompatibel sind. Falls nicht, durchfahren die Züge in der Reihenfolge ihrer Ankunft die Kreuzung nacheinander. Die Bedeutung dieser Steuerung wird vor allem in Wegenetzen mit kurzen Distanzen zwischen Bereitstellorten und Kreuzungen deutlich. In diesen Fällen treten häufig während der Bereitstellung Stauungen auf, die sich in die Kreuzung erstrecken. So können bei ungünstiger Routenführung nachfolgende Züge die Kreuzung nicht durchfahren und

müssen ebenfalls warten, während bei günstiger Routenführung nachfolgende Züge nicht betroffen sind.

Die Bereitstellung stellt den Teilprozess mit dem größten Zeitverbrauch dar und birgt großes Potenzial für Stauungen oder Blockaden, da der Zug solange auf dem Weg steht und diesen blockiert. Ein Vergleich der Laufwege des Fahrers zwischen Anhänger und Bereitstellregal zeigt, dass die zurückzulegende Distanz je Ladeinheit im ungünstigsten Fall bis auf das Doppelte ansteigen kann, wenn der Routenzug umrundet und der Weg überquert werden muss.

Der Überholvorgang birgt besondere Komplexität, da er durch eine Vielzahl an Faktoren fehlschlagen kann. In einem solchen Fall würden im realen System die Fahrer kommunizieren und versuchen, die Situation beispielsweise durch Anpassung der Geschwindigkeit oder kurzes Anhalten zu lösen. Diese Möglichkeit des verteilten Problemlösens besteht jedoch in der diskreten Ereignissimulation nicht. Der Überholvorgang wurde daher so gestaltet, dass vor Beginn die momentane Verkehrssituation im betroffenen Bereich des Wegenetzes analysiert und über die Dauer des Überholens extrapoliert wird. Bei garantiertem Erfolg wird der Überholvorgang gestartet.

Zusätzlich können Hindernisse wie Ladungsträger auf den Wegen oder weitere Fahrzeuge, die den Fertigungsbereich durchfahren, als Störungen modelliert werden. Auch die Gestaltung der Beladebahnhöfe birgt Potenzial für gegenseitige Behinderung, beispielsweise wenn verspätete Routenzüge den Bahnhof für nachfolgende Züge blockieren oder Routenzüge in der falschen Reihenfolge im Bereitstellbereich ankommen. In diesem Fall müssen geeignete Gegenmaßnahmen, beispielsweise ein Ersatzzug oder Parkplätze eingeplant werden.

Zur Unterstützung der Planung muss das Simulationsmodell in der Lage sein, aussagekräftige Kennzahlen zu generieren. Um die Fahrplaneinhaltung und Stabilität der Versorgung beurteilen zu können, werden fahrzeugbezogen folgende Kennzahlen ermittelt:

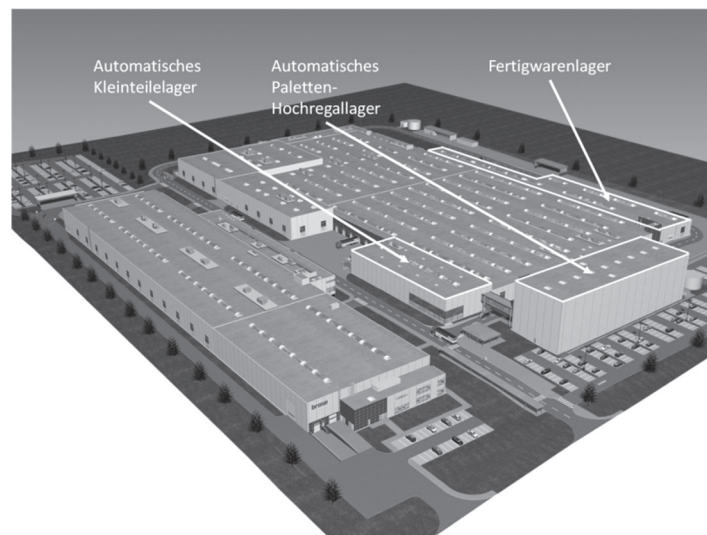
- Der Servicegrad ist definiert als das Verhältnis der Ladeeinheiten, die innerhalb einer vorgegebenen Zeit am Zielort bereitgestellt wurden, und der Gesamtzahl beförderter Ladeeinheiten einer Tour.
- Die Kapazitätsauslastung gibt den durch Ladeeinheiten belegten Anteil an der Gesamtkapazität des Routenzugs je Tour an.
- Die Zykluszeit ist definiert als Zeitspanne zwischen Abfahrt und Ankunft in der Beladezone. Sie setzt sich zusammen aus der konstanten Fahrzeit sowie den variablen Bereitstell- und Wartezeiten.
- Basierend darauf wird die zeitliche Auslastung als Verhältnis von Zykluszeit und Taktzeit berechnet. Hierbei gibt die Taktzeit die geplante Zeitspanne zwischen zwei Abfahrtszeitpunkten in der Beladezone an.
- Um die Routenführung beurteilen zu können, werden für jeden Routenzug die Zeiten bestimmter Aktivitäten wie Fahren, Warten und Bereitstellung protokolliert.

Zur Beurteilung der Routenführung und Identifikation möglicher kritischer Stellen im Verkehrsnetz werden layoutbezogen für jedes Wegstück die Anzahl an wartenden Fahrzeugen und an Überholvorgängen während des gesamten Simulationslaufs ermittelt. Werden fahrzeug- und layoutbezogene Kennzahlen zusammengeführt, gelingt es, Handlungsempfehlungen abzuleiten, die sowohl

Fahrplan und Stabilität des Prozesses als auch die Routenführung berücksichtigen und verbessern lassen.

#### 4 Anwendungsbeispiel

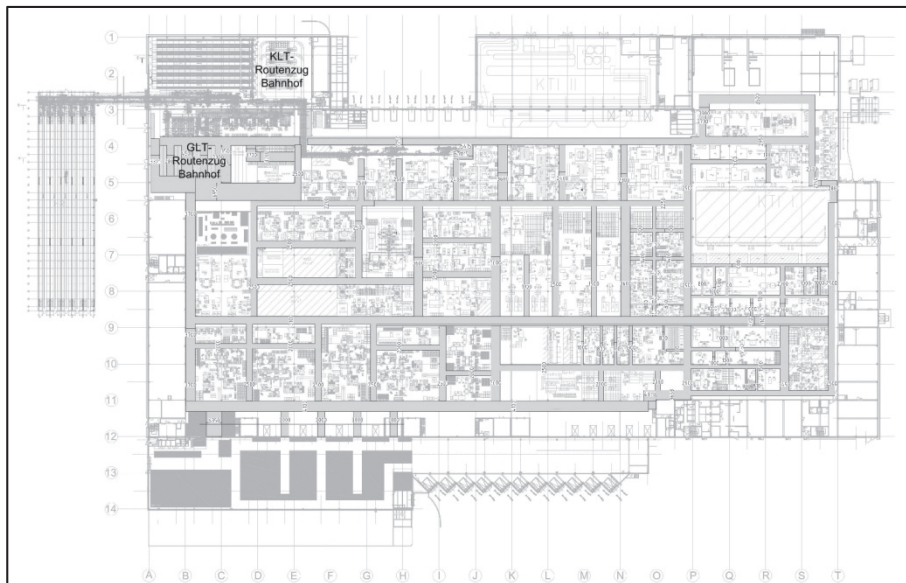
Das entwickelte generische Simulationsmodell wurde im Rahmen eines Industrieprojektes eingesetzt. Im Zuge dieses Projektes wurde ein neues Logistikkonzept (NLK) für ein Produktionswerk eines Automobilzulieferers entwickelt. Basis des NLK ist der flächendeckende Einsatz von Routenzügen für alle Materialtransporte im Werk. Dies umfasst sowohl die Materialbereitstellung in der Produktion, den Transport von Baugruppen innerhalb der Produktion als auch den Abtransport von Fertigwaren in den Versandbereich. Im Zuge dieser Umstellung wurden ein neues Lager für Fertigware und zwei Automatiklager für Kaufteile – ein Paletten-Hochregallager (HRL) und ein Automatisches Kleinteilelager (AKL) – gebaut. In Abbildung 1 ist das Werk mit den drei neuen Lagerbereichen zu sehen.



*Abbildung 1: Werksansicht mit den drei neuen Lagerbereichen*

Die für den Transport von Baugruppen und Fertigwaren eingesetzten Routenzüge fahren permanent auf festgelegten Routen und werden nicht durch ein IT-System gesteuert. Die Versorgung der Produktion mit Kaufmaterialien in Großladungsträgern (GLT) und Kleinladungsträgern (KLT) erfolgt mit unterschiedlichen Routenzügen, die unabhängig voneinander operieren. Aufgrund der vorgelagerten Prozessschritte für die Materialbereitstellung aus den Automatiklagern ist eine Steuerung der Routenzüge für die Produktionsversorgung notwendig. Die Herausforderung dabei ist es, die Prozesse an den sogenannten Beladebahnhöfen so aufeinander abzustimmen, dass sowohl die Fördertechnik kontinuierlich arbeiten kann als auch die Routenzüge sich nicht gegenseitig behindern, da sie auf gleiche Ressourcen (Flächen, Beladetechnik) zugreifen müssen. Die Steuerung muss somit die Abläufe der Routenzüge und der Technik

synchronisieren. Dies ist nur dann handhabbar, wenn die Routenzüge zu festgelegten Zeitpunkten beladen werden und ihre Ausliefertour starten. Aus diesem Grund operieren die Züge nach einem festen Fahrplan in immer gleichen Takten auf fixen Routen. Alle GLT-Routen fahren in einem 20 Minuten-Takt und die KLT-Routen in einem 45 minütigen Takt. Die Abfahrtszeiten an den Materialquellen werden gestaffelt, so dass nicht alle Züge zur gleichen Zeit am Bahnhof starten. Damit kann die Belastung der automatischen Lager nivelliert werden. Um die gestaffelte Abfahrt der Routenzüge sicherzustellen, ist es essenziell, dass der Routenzug innerhalb der geplanten Zykluszeit seine Tour abschließt, damit er die nächste Tour pünktlich am Bahnhof starten kann. Dies ist aber nur möglich, wenn er störungsfrei das Material ausliefern kann. Bei der Planung der Routen und Fahrpläne ist es nur schwer möglich, die Wechselwirkungen zwischen den Routenzügen zu berücksichtigen. Aus diesem Grund soll mit Hilfe des Simulationsmodells die Planung der Routen und des Fahrplans abgesichert werden. Da im Betrieb trotzdem mit Verzögerungen zu rechnen ist, sind Notfallprozesse für den Fall definiert, dass ein Routenzug nicht pünktlich zum Start der nächsten Tour am Bahnhof ist. In diesem Fall alarmiert das Leitsystem den Leitstand und ein Ersatzzug übernimmt die Tour. Somit kann die Materialversorgung sichergestellt werden. Die strikte Einhaltung des Versorgungstaktes ermöglicht eine starke Reduzierung der Sicherheitsbestände in der Produktion und gibt den Produktionsmitarbeitern die Sicherheit, dass sie sich auf die Materialversorgung verlassen können.



**Abbildung 2:** *Layout der Produktion mit den Fahrwegen für Routenzüge*

Im Gegensatz zu einem Werk, in dem Fahrzeuge montiert werden, ist die Wegeführung in diesem Produktionswerk viel verzweigter und die Wege zum Teil viel enger (s. Abb. 2). Dadurch gestaltet sich die Planung der Routen schwieriger, da die Anzahl an Kreuzungen und alternativen Fahrwegen wesentlich höher ist.

Aufgabe der Routenplanung ist es, die Routen so festzulegen, dass die Routen möglichst gleichmäßig zeitlich ausgelastet sind, die Transportkapazität nicht überschritten wird und möglichst wenig Züge benötigt werden. Weiterhin ist in der Routenplanung auch die Belastung der einzelnen Wege zu berücksichtigen. Die Fahrwege der Routenzüge sind so festzulegen, dass es zu möglichst wenigen Behinderungen zwischen den Zügen kommen kann.

## 5 Untersuchungsszenarien

Zunächst wird der aktuelle Planungsstand des Projektes im Simulationsmodell abgebildet. Die Routen für die KLT- und GLT-Routenzüge werden mit einer Sweep-Heuristik bestimmt. Dabei wird in der statischen Planung jede Route auf eine zeitliche Auslastung von 75% ausgelegt. Zusätzlich wird ein Ersatzzug zur Verfügung gestellt, der, falls ein Zug auf seiner Route mehr als fünf Minuten zu spät am Bahnhof eintrifft, dessen Tour übernimmt. In Experimenten werden die Einhaltung des Fahrplans sowie die Verkehrsbelastung auf Wegen und Kreuzungen (Anzahl Durchfahrten, Anzahl Wartevorgänge, Anzahl Überholvorgänge) analysiert. Insbesondere wird geprüft, ob die Materialverfügbarkeit an den Bereitstellorten als vorrangiges Ziel im Routenzugsystem gewährleistet ist.

Im zweiten Szenario wird überprüft, ob Fahrplaneinhaltung und Materialverfügbarkeit auch ohne den Ersatzzug eingehalten werden können. In diesem Fall könnte auf den Ersatzzug verzichtet und das System mit einem Zug weniger stabil betrieben werden.

Im dritten Szenario wird der Einfluss von weiteren Fahrzeugen, welche auch im Praxisbeispiel im Werk verkehren, untersucht. Dazu werden zusätzlich zu den bereits eingepplanten Routenzügen weitere Routen hinzugefügt, die jedoch Material aus anderen Quellen an andere Pufferflächen liefern. Wiederum werden Fahrplaneinhaltung, Verkehrsbelastung und Materialverfügbarkeit überprüft.

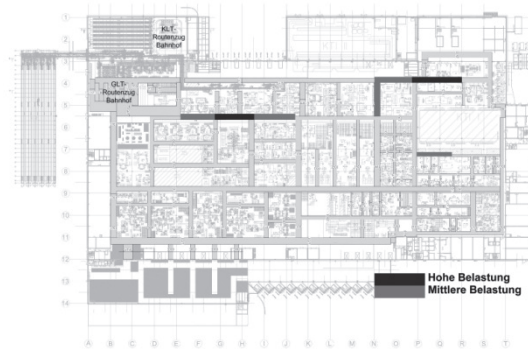
Im letzten Szenario wird die bisher zufällige Reihenfolge der Routen verändert. Nun wird die Reihenfolge so variiert, dass Routen, welche ähnliche oder gleiche Bereitstellorte versorgen und daher gleiche Fahrwege verwenden, in möglichst großem Abstand zueinander am Lager abfahren. Dadurch soll sichergestellt werden, dass Züge, die die gleichen Wege nutzen, nicht direkt aufeinander folgen und sich dadurch seltener behindern.

## 6 Wesentliche Erkenntnisse

Durch die Simulationsergebnisse konnten erste Erkenntnisse hinsichtlich der Layoutgestaltung, Routenplanung und Fahrplangestaltung gewonnen werden.

Allgemein konnte festgestellt werden, dass sich Behinderungen durch andere Routenzüge bei GLT-Routen stärker auf die Einhaltung des Fahrplans (Takt) auswirken als bei den KLT-Routen. Dies ist bedingt durch die kürzeren Zykluszeiten und den damit verbundenen höheren Takt auf den Routen, so dass es auch bei kleineren Störungen schwierig wird, den Abfahrtszeitpunkt der nächsten Tour einzuhalten. Bei einer GLT-Route wird ein hoher Anteil der Zykluszeit für das Fahren aufgewendet, durch Blockierungen steigt dieser Anteil im Vergleich zur Zeit für das Handhaben der Ladungsträger. Dieses Verhältnis ist bei den KLT-Routen

anders, denn dort wird ein hoher Zeitanteil für das Handhaben der Kleinladungsträger benötigt. Da oft mehrere KLTs an einer Haltestelle bereitgestellt werden, halten diese Züge auch länger an. Befindet sich ein GLT-Routenzug hinter einem KLT-Routenzug und kann an einer Haltestelle nicht den vor ihm befindlichen KLT-Zug überholen, überschreitet er mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit seine Zykluszeit. Für die Planung der Routen ist es wichtig, dass sich zeitliche Puffer für solche Blockierungen nicht prozentual von der Zykluszeit ableiten, z.B. +20% von der „Netto-Zykluszeit“. Zeitliche Zuschläge für Störungen sollten sich vielmehr an der Wegstrecke und der Verkehrsbelastung der zu befahrenden Bereiche orientieren.



**Abbildung 3:** Häufigkeit von Wartevorgängen dargestellt im Wegenetz

In Abbildung 3 ist das Wegenetz dargestellt. In den markierten Bereichen kommt es zu häufigen Wartevorgängen. Routen die durch diese Bereiche geführt werden, sollten eine höhere Reservezeit aufweisen, damit die Einhaltung der Taktzeiten gewährleistet ist. Weiterhin sollten Routen diesen Bereich meiden, wenn dort kein Material bereitgestellt werden muss (Transit). Allein ein hohes Verkehrsaufkommen ist noch nicht ausschlaggebend um einen Bereich als störanfällig zu klassifizieren. Erst in Kombination mit Haltepunkten an Stellen, an denen nicht überholt werden kann, verschärft die Situation und führt zu einer Häufung an Wartevorgängen.

Die Simulation hat gezeigt, dass es trotz einiger Überschreitungen der geplanten Abfahrtszeiten zu keinen Materialengpässen in der Produktion gekommen ist. Die maximal zulässige Wiederbeschaffungszeit von 4 Stunden, auf dessen Basis die Produktionsbestände ausgelegt sind, konnte immer eingehalten werden.

Die Einhaltung der Wiederbeschaffungszeiten wird auch durch das Vorhalten eines Ersatzfahrzeuges sichergestellt, welches bei einer Überschreitung der geplanten Abfahrtszeit einspringt und die Tour übernimmt. In separaten Simulationsläufen wurden überprüft, welche Auswirkung der Wegfall dieses Ersatzzuges hat. Auch ohne den Ersatzzug konnte die zulässige Wiederbeschaffungszeit immer eingehalten werden. Nennenswerte Auswirkungen auf die Einhaltung der Abfahrtszeiten waren ebenfalls nicht erkennbar, dies liegt auch daran, dass der Ersatzzug erst zum Einsatz kommt, wenn der geplante Abfahrtszeitpunkt bereits überschritten ist. Der Ersatzzug hilft vielmehr beim Aufholen der Verzögerungen. Die durchschnittliche Zykluszeit je Tour stieg für KLT-Routen durch die fehlende Unterstützung des Ersatzzuges je



nach Tour um Werte zwischen fast 30 Sekunden und über 90 Sekunden an. Die genaue Einhaltung der Abfahrtszeiten kann Tabelle 1 entnommen werden.

**Tabelle 1:** Einfluss von Ersatzzug und Routenreihenfolge auf die mittlere Zykluszeit der KLT-Routen

Route	Mittlere Zykluszeit (Referenz)	Mittlere Zykluszeit ohne Ersatzzug	Mittlere Zykluszeit mit neuer Routenreihenfolge
Rot	38,0 min	39,7 min	41,1 min
Blau	39,7 min	40,1 min	35,4 min
Grün	47,3 min	47,8 min	41,8 min
Lila	33,2 min	33,9 min	32,8 min
Gelb	33,3 min	34,7 min	35,2 min
Schwarz	26,5 min	27,1 min	27,5 min

Neben den im Fokus stehenden KLT- und GLT-Routenzügen gibt es weitere Verkehre im Werk. In einem weiteren Simulationslauf wurden auch diese abgebildet. Es kommt zu keiner wesentlichen Verschlechterung der Kennzahlen. Die mittlere Zykluszeit über alle GLT-Routen erhöht sich um 3 % auf 18,8 min/Tour. Ein ähnliches Bild zeichnet sich auch für die KLT-Routen ab, die mittlere Zykluszeit bleibt fast unverändert bei 36,2 min/Tour. Der zusätzliche Verkehr wirkt sich auch deshalb kaum auf die betrachteten Routenzüge aus, da diese Routenzüge nicht auf den Fahrwegen anhalten müssen, da es für sie separate Halteflächen gibt. Andernfalls wäre der Effekt auf die KLT- und GLT-Routen merklich größer.

Die Behinderungen zwischen den Routenzügen hängen von der Reihenfolge der einzelnen Züge zueinander ab. Für die vorangegangenen Aussagen, wurde die Reihenfolge der Routen zufällig gewählt. Die blaue, grüne und lila KLT-Route wurden nacheinander gestartet. Diese drei Routen haben einen ähnlichen Auslieferungsbereich und nutzen dadurch bestimmte Fahrwege gemeinsam. Bei diesen Routen kam es oft zu Überschreitungen der geplanten Abfahrtszeiten, so dass alleine für die grüne KLT-Route auf jeder fünften Tour der Ersatzzug einspringen musste. Wird die Abfahrtsreihenfolge der Routen so gewählt, dass diese drei Routen nicht nacheinander abfahren, so verbessert sich die Einhaltung der Abfahrtszeit deutlich (s. Tab. 1). Allerdings führt die veränderte Reihenfolge bei den anderen Routen zu einer Verschlechterung der Termintreue. Es bleibt damit festzuhalten, dass die Abfahrtsreihenfolge die Behinderung zwischen den Routen beeinflusst. Da es sich aber um ein komplexes und dynamisches System handelt, können die gesamtheitlichen Auswirkungen von Veränderungen durch alleiniges Abwägen und Überlegen nicht erkannt werden. Für die Fahrplangestaltung empfiehlt es sich allerdings, einfache Regeln zu definieren, die die Reihenfolge der Routen festlegen. Eine gemeinsame Betrachtung von KLT- und GLT-Routen ist aufgrund der unterschiedlichen Taktzeiten schwierig. Dieser Ansatz wird für diesen Anwendungsfall nicht weiter in Betracht gezogen.

## 7 Fazit

Die Planung und Steuerung von Routenzügen in Produktionssystemen ist eine komplexe Aufgabe, bei der viele Wechselwirkungen berücksichtigt werden müssen. Durch eine reine analytische Betrachtung sind diese Wechselwirkungen nicht vollends abzubilden. Es empfiehlt sich bei größeren Änderungen oder der Einführung die Planungsergebnisse mit Hilfe einer Ablaufsimulation abzusichern. Durch das erstellte generische Simulationsmodell lassen sich mit geringem Aufwand unterschiedliche Wegenetze und Layouts abbilden. Die dortige Verkehrssituation und ihre Auswirkung auf die Materialverfügbarkeit und Prozessstabilität können analysiert werden. Somit können Planungsstände überprüft, Handlungsempfehlungen abgeleitet und Verbesserungsmaßnahmen vor der Umsetzung erkannt werden. Im dargestellten Anwendungsfall sind die Simulationsergebnisse in die weitere Planung eingeflossen. Weiterhin wird das erstellte Simulationsmodell auch zur Untersuchung anderer Routenzugsysteme eingesetzt.

## Literatur

- Dewitz, M.; Galka, S., Günthner W.A.: Drive-Thru Loading Concept for In-Plant Milk Runs. In: Proceedings of the XX International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics. Belgrad: University of Belgrade Faculty of Mechanical Engineering 2012, S. 237-242.
- Günthner, W.A.; Galka, S.; Klenk, E.; Knössl, T.; Dewitz, M.: Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport. Garching bei München: Lehrstuhl fml 2012.
- Mayer, G.; Pöge, C.: Auf dem Weg zum Standard – Von der Idee zur Umsetzung des VDA Automotive Bausteinkastens. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 29-36.
- Roth, S.: Virtuelle Logistik- und Materialflussplanung in der digitalen Fabrik. München: Forum Automobillogistik 2013.
- Schenk, M; Tolujew J.; Reggelin, T.: A Mesoscopic Approach to Modeling and Simulation of Logistics Networks. In: Logistics and Supply Chain Management: Trends in Germany and Russia. Moskau: Publishing House of the Saint Petersburg State Polytechnical University 2008, S. 58-67.
- Krejzewicz, D; Erdmann, J., Behrisch M., Bieker, L.: Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. International Journal On Advances in Systems and Measurements, 5 (2012) 3&4, S.128-138.