

Fahrplanoptimierung für innerbetriebliche Routenverkehre

Timetable Optimization for In-Plant Milk-Run Systems

Marco Dewitz¹
Willibald A. Günthner¹
Thomas Arit²

¹ Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Technische Universität München

² BMW Group

Innerbetriebliche Routenverkehre finden in der Praxis eine immer breitere Anwendung zur hochzyklischen Bereitstellung kleinerer Losgrößen. Die Auslegung solcher Systeme stellt jedoch aufgrund der zahlreichen Randbedingungen eine komplexe Aufgabe dar. In einer Forschungskoooperation mit der BMW Group wurde am Lehrstuhl fml eine Fahrplanlogik für getaktete Routenzüge entwickelt, welche zur Auslegung und Steuerung von Kleinteile-Routenzügen in mehreren Fahrzeugwerken eingesetzt wird.

[Schlüsselwörter: Logistikplanung, Routenzug, Fahrplanerstellung]

For achieving a highly frequent material supply in smaller lot sizes in-plant milk-run systems are widely used. Due to many restrictions planning of such systems becomes a complex task. As part of a research cooperation project between the BMW Group and the Institute for Materials Handling, Material Flow, Logistics a method for generating timetables for clocked in-plant milk-runs was developed which is currently used for planning and controlling milk-runs in several production plants.

[Keywords: Logistics Planning, in-plant milk-run, timetable generation]

1 EINLEITUNG

Moderne Logistikkonzepte zur Fertigungs- und Montageversorgung basieren im zunehmenden Maße auf „just in time“ Ansätzen für die Bereitstellung von Material. Das Vorhalten geringer Bestände am Arbeitsplatz bietet aus Unternehmenssicht zahlreiche Vorteile, da sich das in der Produktion gebundene Kapital (in Form von Fläche und Material) reduzieren lässt. Weiterhin können durch eine Reduzierung des Flächenbedarfs je Material eine höhere Anzahl unterschiedlicher Materialien sortenrein am Arbeitsplatz bereitgestellt werden, was die Integration neuer

Produktvarianten in bestehende Produktionsstrukturen unterstützt.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, etablieren sich innerbetriebliche Routenverkehre mehr und mehr für eine hochzyklische Materialbereitstellung mit kleineren Losgrößen und Behältern. In diesem Beitrag werden verbreitete Dimensionierungsmethoden für getaktete Routenverkehre beschrieben und darauf aufbauend ein Modell beschrieben, mit dessen Hilfe geglättete Routenzugfahrpläne erzeugt werden können. Darüber hinaus wird das Potenzial einer Fahrplanoptimierung bezüglich Wartezeiten durch eine Staffelung von Einzelfahrten aufgezeigt.

2 BEGRIFFSDEFINITIONEN

In einschlägiger Fachliteratur werden die Begriffe Routenzug, Logistikbus und Schleppzug, im englischsprachigen Raum auch in-plant milk-run, tow train oder tugger train, synonymisch für innerbetriebliche Routenverkehre verwendet. Eine einheitliche Definition dieser Begriffe auf Basis der Fachliteratur erweist sich als schwierig. *Droste, Günthner et al.* und *Kilic et al.* definieren einen innerbetrieblichen Routenverkehr vornehmlich über die Eigenschaft einer hochfrequente Materialbereitstellung nach einem festen Takt und fixen Fahrplan [*Dro-2013*] [*Gün-2013*] [*Kil-2012*]. Es sind auch Ansätze denkbar, bei denen die Routenführung und Abfahrtszeiten entsprechend der aktuellen Auftragslage flexibel festgelegt werden. In diesem Beitrag sollen jedoch nur statische Ansätze, d. h. mit fixen Routen und vordefinierten Abfahrtszeiten betrachtet werden, welche derzeit auch eine höhere Verbreitung in der Praxis finden [*Gün-2012*]. *Emde et al.*, *Günthner et al.*, und *Klug* nennen die gebündelte Versorgung mehrerer Verbrauchsorte (Senken) aus einer oder mehrerer Quellen mit unterschiedlichen Materialien als grundlegende Eigenschaft eines innerbetrieblichen Routenverkehrs [*Emd-2010*] [*Gün-2012*] [*Klu-2010*]. *Klug* schließt darüber hinaus die technische Ausgestaltung

der Transportmittel und Transporthilfsmittel in seine Definition ein [Klu-2010].

Aufgrund der zahlreichen organisatorischen und technischen Gestaltungsmöglichkeiten wird an dieser Stelle auf eine allgemeingültige Begriffsdefinition verzichtet. Für einen umfassenden Überblick hierzu sei auf [Gün-2012] verwiesen. Im Rahmen dieses Beitrags werden folgenden Einschränkungen und Definitionen zugrunde gelegt:

Ein **innerbetrieblicher Routenverkehr** beschreibt ein Konzept zur gebündelten Versorgung mehrerer Senken aus einer Quelle (1:n-Beziehung) mit unterschiedlichen Artikeln. Die Fahrwege zwischen Quelle und Senken sowie die Belieferungsreihenfolge der Senken sind durch **Routen** definiert. Dabei ist jede Senke genau einer Route zugewiesen. Auf einer Route werden **Touren** in gleichmäßigen Zeitabständen an der Quelle gestartet. Der zeitliche Abstand zwischen zwei direkt aufeinanderfolgenden Touren der gleichen Route wird **Taktzeit** der Route genannt. Werden Schicht- und Pausenzeiten berücksichtigt, kann ein **Fahrplan** mit den genauen Abfahrtszeitpunkten je Tour an der Quelle erzeugt werden.

Physisch wird eine Tour durch ein manuell bedientes Flurförderfahrzeug, einen s. g. **Routenzug**, ausgeführt. Der Ablauf einer Tour setzt sich wie folgt zusammen: Beladung des Routenzuges an der Quelle – Anfahrt zum Versorgungsbereich – Durchfahung des Versorgungsbereiches, dabei Bereitstellung im 1:1-Tausch Voll- gegen Leergut und ggf. Setzen von Kanban-Abrufen – Rückfahrt zur Quelle – Leergutentladung. Die Dauer zur Durchführung aller zuvor genannten Tätigkeiten wird **Umlaufzeit** genannt. Nach Abschluss Tour wird dem Routenzug eine neue Tour zugewiesen, welche nicht zwangsweise auf derselben Route stattfinden muss.

3 DIMENSIONIERUNG GETAKTETER ROUTENVERKEHRE

In diesem Kapitel werden aufbauend auf grundlegenden Berechnungsvorschriften zwei bestehende Methoden zur Dimensionierung innerbetrieblicher Routenverkehre mit fixen Routen und fixen Taktzeiten eingeführt, welche die Grundlage für die nachfolgende Dimensionierung eines exemplarischen Systems bilden.

3.1 GRUNDLEGENDE BERECHNUNGSVORSCHRIFTEN ZUR ROUTENPLANUNG

Hinweis: Die im folgenden genannten Formeln und Methoden nehmen Bezug auf [Dro-2013] und [Gün-2013], werden jedoch um spezifische Zusammenhänge erweitert und auf die Problemstellung angepasst. Weiterhin wird die folgende Nomenklatur verwendet:

- *Ungestrichene Werte* beziehen sich auf einen Artikel

- *Einfach überstrichene Werte* beziehen sich auf eine Senke
- *Zweifach überstrichene Werte* beziehen sich auf eine Route
- Weder artikel-, noch senken- oder routenbezogene Werte sind *einfach unterstrichen* gekennzeichnet

Der gemittelte Volumendurchsatz (\overline{DurVol}) der einzelnen Senken ergibt sich über Summierung der mittleren Ladungsträgerdurchsatzes ($DurLT$) nach Formel 3.1:

$$\overline{DurVol} = \sum_{i=1}^{\overline{AnzArt}} DurLT_i * (\overline{LängeLT_i} * \overline{BreiteLT_i} * \overline{HöheLT_i}) \quad (3.1)$$

Im Falle einer getakteten Variantenfließproduktion ist in der Praxis die Berechnung des Ladungsträgerdurchsatzes durch den Produktionstakt ($ProdTakt$) und den artikelbezogenen Größen Verbraurate ($VerRat$), Teile pro Produkt ($TeileProProd$) und Ladungsträgerfüllmenge ($FüllmengeLT$) gebräuchlich [Dre-2009] [Klu-2010]. Die Verbraurate beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Artikel für eine Produktvariante verbaut wird. Findet ein Verbau statt, dann wird der Artikel in der Stückmenge $TeileProProdukt$ benötigt. Demnach lässt sich der Ladungsträgerdurchsatz eines Artikels j berechnen aus:

$$Dur_{LT_i} = \frac{VerRat_i * TeileProProd_i}{ProdTakt * FüllmengeLT_i} \quad (3.2)$$

Allgemein ergibt sich die mittlere Transportvolumen pro Tour ($\overline{TransVolProTour}$) und damit die kapazitive Auslastung ($\overline{KapaAusl}$) einer Route in Abhängigkeit der Taktzeit der Route ($\overline{RouteTakt}$), der Volumenkapazität eines Routenzuges ($\overline{KapaVol}$) und den zugeordneten Senken entsprechend der folgenden Formeln:

$$\overline{TransVolProTour} = \overline{RouteTakt} * \sum_{k=1}^{\overline{AnzSenken}} \overline{DurVol}_k \quad (3.3)$$

$$\overline{KapaAusl} = \frac{\overline{TransVolProTour}}{\overline{KapaVol}} \quad (3.4)$$

Neben der kapazitiven Auslastung müssen die Routen auch zeitlich hinsichtlich der anfallenden Tätigkeiten bewertet werden. Die mittlere Umlaufzeit ($\overline{RouteUmlauf}$) beschreibt die Dauer aller Tätigkeiten im Rahmen einer Tour und lässt sich aus den folgenden Zeitanteilen berechnen:

$$\overline{RouteUmlauf} = \overline{t_{Beladung}} + \overline{t_{Fahren}} + \overline{t_{Bahältertausch}} + \overline{t_{Abrufe_setzen}} + \overline{t_{Halten}} + \overline{t_{Leergut_entladen}} + \overline{t_{Sonstige_Tätigkeiten}} \quad (3.5)$$

Wird davon ausgegangen, dass der Routenzugfahrer die Ladungsträger für seine Tour nicht selbst zusammenstel-

len muss, sondern lediglich für ihn vorbereitete Transporthilfsmittel auf den Routenzug verladen muss, kann die Beladezeit als Fixzeit angesehen werden, welche unabhängig vom Transportvolumen und der Route ist. Die Fahrzeit kann über die zurückzulegende Wegstrecke \overline{Weg} und der mittleren Fahrgeschwindigkeit $\overline{DurchGeschw}$ berechnet werden. Die Behältertauschzeit ist direkt proportional zum Ladungsträgerdurchsatz je Tour, wohingegen die Zeit zum Setzen von Kanban-Abrufen abhängig vom Durchsatz an mittels Kanban gesteuerten Ladungsträgern $\overline{DurLTKanban}$ ist.

Zeitanteile für das Halten an den Senken beinhalten Zeitverbräuche für Abbremsen, Ab- und Aufsteigen auf die Zugmaschine sowie Beschleunigung je Haltestelle. Müssen an einer Senke mehrere Ladungsträger je Fahrt bereitgestellt werden, ist lediglich ein Start-Stop-Vorgang zu berücksichtigen. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ladungsträger an einer Senke bereitgestellt werden muss, ergibt sich zu:

$$\overline{p_{Behältertausch}} = \begin{cases} 1 & \text{falls } p \geq 1 \\ p & \text{falls } p < 1 \end{cases} \quad (3.6)$$

mit $p = (\overline{DurLT} * \overline{RouteTakt})$

Zusätzliche Start-Stop-Vorgänge können anfallen, falls Kanban-Abrufe an Senken erfasst werden müssen, wo kein Ladungsträger bereitgestellt werden muss. Analog zu Formel 3.6 lässt sich die Wahrscheinlichkeit hierfür unter Berücksichtigung des Durchsatzes aller mittels Kanban gesteuerten Ladungsträger berechnen zu:

$$\overline{p_{Abruf_setzen}} = \begin{cases} 1 & \text{falls } q \geq 1 \\ q & \text{falls } q < 1 \end{cases} \quad (3.7)$$

mit $q = (\overline{DurLTKanban} * \overline{RouteTakt})$

Die Wahrscheinlichkeit eines Haltevorgangs an einer Senke ergibt sich aus der Addition der unabhängigen Einzelwahrscheinlichkeiten zu:

$$\overline{p_{Halten}} = \overline{p_{Behältertausch}} + \overline{p_{Abruf_setzen}} - (\overline{p_{Behältertausch}} * \overline{p_{Abruf_setzen}}) \quad (3.8)$$

Wird von einem strikten 1:1-Behältertauschprinzip ausgegangen, ist die Anzahl an eingesammelten Leergut gleich dem Ladungsträgerdurchsatz je Tour. Somit ergibt sich die mittlere Umlaufzeit zu:

$$\begin{aligned} \overline{RouteUmlauf} &= \overline{Weg} \\ &= \overline{t_{Beladung}} + \frac{\overline{Weg}}{\overline{DurchGeschw}} \\ &+ \left(\overline{RouteTakt} * \sum_{k=1}^{\overline{AnzSenken}} \overline{DurLT_k} \right) * \overline{t_{Einzeltausch}} \\ &+ \left(\overline{RouteTakt} * \sum_{k=1}^{\overline{AnzSenken}} \overline{DurLTKanban_k} \right) * \overline{t_{Einzelabruf}} \quad (3.9) \\ &+ \left(\sum_{k=1}^{\overline{AnzSenken}} \overline{p_{Halten_k}} \right) * \overline{t_{Start_Stop}} \\ &+ \left(\overline{RouteTakt} * \sum_{k=1}^{\overline{AnzSenken}} \overline{DurLT_k} \right) * \overline{t_{Einzelentladung}} \\ &+ \overline{t_{sonstige_Tätigkeiten}} \end{aligned}$$

3.2 ANALYTISCHE DIMENSIONIERUNGSVERFAHREN

Aufgabe des Planers ist es nun, die Senken zu Routen zu gruppieren und die Taktzeiten der Routen derart auszu-legen, dass sowohl kapazitive als auch zeitliche Restriktionen eingehalten werden, und alle betrieblichen Regelungen (bspw. Verkehrswege, Einbahnstraßenregelungen etc.) erfüllt sind.

Günthner et al. beschreiben hierzu zwei unterschiedliche analytische Planungsansätze zur Routenplanung, mit denen Takt- und Umlaufzeiten berechnet werden können [*Gün-2013*]. *Droste* schlägt ein ähnliches Vorgehen zur Berechnung der idealen Zykluszeit vor, wobei sein Modell um ergonomische Restriktionen erweitert wurde [*Dro-2013*].

Beim Ansatz „**einheitliche Taktung**“ werden die Routenverläufe unter der Prämisse geplant, dass auf allen Routen mit der gleichen Taktzeit gefahren werden kann. Im Vorfeld der konkreten Routenplanung wird eine „repräsentative Route“ festgelegt [*Gün-2013*] und für diese die Umlaufzeit entsprechend der o.g. Formeln berechnet. Zum Ausgleich von Transportvolumenschwankungen und zufälligen Störeinflüssen sollten kapazitive Sicherheiten bei der Berechnung der Umlaufzeit der repräsentativen Route berücksichtigt werden. Die verbindliche Taktzeit über alle Routen ergibt sich dann aus der Umlaufzeit der repräsentativen Route zzgl. einer zu definierenden zeitlichen Sicherheit. Im Anschluss daran werden die Routen iterativ durch Sammeln von Senken derart festgelegt, dass die folgenden Restriktionen erfüllt werden:

- Die Umlaufzeit der Route zzgl. einer (routenspezifischen) zeitlichen Reserve ist kleiner oder gleich der Taktzeit, d.h. eine Route kann von genau einem Routenzug bedient werden
- Die Kapazitive Auslastung der Route ist kleiner oder gleich einer definierten Maximalauslastung

Beim s.g. „**Layoutbasierten Verfahren**“ werden die Routen vornehmlich aufgrund betrieblicher Regelungen

und Layoutrestriktionen unabhängig von einer zu erfüllenden Taktzeit festgelegt. Dadurch sind Senkenanzahl und Fahrwege definiert und es kann die Takt- und Umlaufzeit gemäß Formel 3.3 und Formel 3.9 routenspezifisch berechnet werden. Kapazitive Sicherheiten können

durch eine verringerte Routenzugkapazität berücksichtigt werden, zeitliche Sicherheiten durch Aufschläge zur mittleren Umlaufzeit.

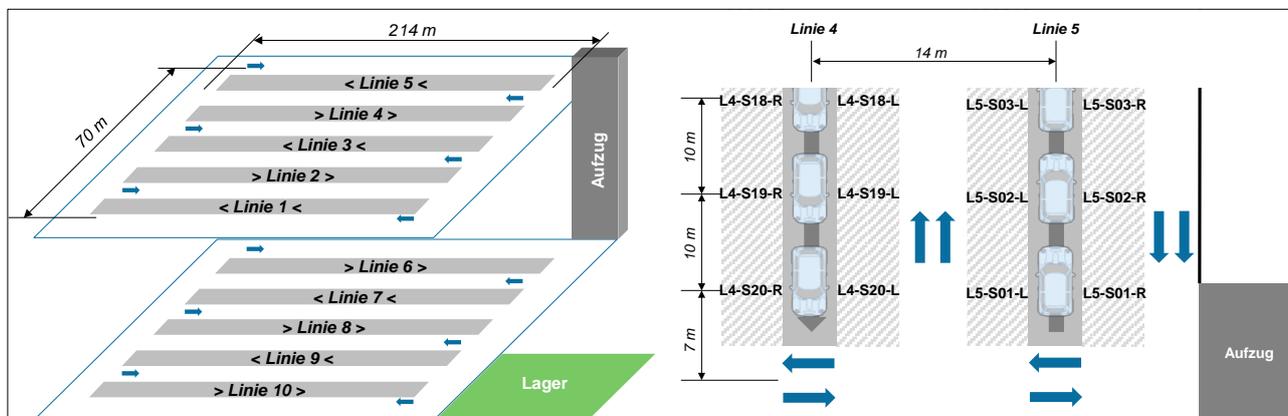


Abbildung 1. Schematische Darstellung des Fallbeispiels

3.3 HERAUSFORDERUNGEN BEI DIMENSIONIERUNG UND STEUERUNG

In diesem Abschnitt wird eine Fahrplanerstellung anhand eines Fallbeispiels durchgeführt, deren Ergebnisse vergleichend gegenübergestellt und auf die daraus resultierenden Problemstellungen hingewiesen.

Betrachtet wird das in Abb. 1 dargestellte Fallbeispiel, welches sich an einem Anwendungsfall aus der Automobilindustrie anlehnt. In einem Montagewerk werden Fahrzeuge nach dem Prinzip einer getakteten Variantenfließproduktion endmontiert. Dies erfolgt auf zwei Ebenen, wobei Fahrzeuge die komplette aus 10 Linien bestehende Produktion durchlaufen müssen. Die Bereitstellung von Kleinladungsträgern soll in Zukunft ausschließlich durch einen innerbetrieblichen Routenverkehr erfolgen. Routenzüge werden in einem zentralen Lager beladen. Weiterhin wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Eine Linie ist 210m lang und inkl. Bereitstellungsflächen 10m breit, zwischen 2 Linien und an den Stirnseiten sind Fahrstraßen zu je 4m Breite vorgesehen.
- Entlang jeder Linie und Seite sind jeweils 20 Senken im gleichen Abstand angeordnet.
- Aus Sicherheitsgründen soll zwischen den Linien im Einbahnverkehr gefahren werden.
- Aufgrund der technischen Ausprägung der Routenzüge ist lediglich eine einseitige Entladung möglich.
- Es wird ein bedarfsorientiertes Abrufverfahren verwendet.

In einem vorangegangenen Planungsschritt wurden bereits die Durchsätze je Senke, Vorgangszeiten und technische Parameter bestimmt (vgl. Tabelle 1). Bedingt durch die Montagereihenfolge und Bauteilabmessungen

unterscheiden sich die Durchsätze an Kleinladungsträgern zwischen den Linien. Es wird davon ausgegangen, dass alle Senken einer Linie den gleichen Durchsatz an Kleinladungsträgern besitzen. Zum Ausgleich von Schwankungen sollen die Touren weiterhin zu max. 80% kapazitiv und zu 85% zeitlich ausgelastet werden.

Ladungsträgerdurchsätze		
Linie	Je Linie	Je Senke
1	20 KLT / h	0,5 KLT / h
2	30 KLT / h	0,75 KLT / h
3	40 KLT / h	1 KLT / h
4	50 KLT / h	1,25 KLT / h
5	80 KLT / h	2 KLT / h
6	100 KLT / h	2,5 KLT / h
7	60 KLT / h	1,5 KLT / h
8	40 KLT / h	1 KLT / h
9	20 KLT / h	0,5 KLT / h
10	10 KLT / h	0,25 KLT / h
Technische Parameter		
Lademeterkapazität je Routenzug	20 m	
Durchschnittsgeschwindigkeit	2,8 m / s	
Sonstige Parameter		
kapazitive Auslastung SOLL	80%	
Durchsch. Lademeter je KLT	0,4 m / KLT	
Vorgangszeiten		
Beladezeit	180 s	
Behältertauschzeit je KLT	25 s	
Zuschlag je Start-Stopp Vorgang	10 s	
Entladezeit je Leergutbehälter	10 s	
Zuschlag je Ebenwechsel	10 s	

Tabelle 1. Eingangsdaten der Routendimensionierung

Für die Dimensionierung nach einheitlicher Taktung ist zunächst eine repräsentative Route zu bestimmen, für

welche Behältertausch- und Fahrzeiten anhand von Durchschnittswerten berechnet werden. Entsprechend der o.g. Vorgaben ergibt sich der Ladungsträgerdurchsatz pro Tour zu $40 \frac{LT}{Tour}$. Basierend auf dem mittleren Ladungsträgerdurchsatz je Senke von $1,125 \frac{LT}{h}$ ergeben sich daraus 36 Start-Stopp Vorgänge je Tour, wodurch jeweils zwei Seiten einer Linie auf einer Tour versorgt werden.

Der Fahrweg der repräsentativen Route wird unter der worst-case-Annahme der weitest entfernten Linie bestimmt. Andernfalls müssten Aufzugszeiten und längere Fahrstrecken durch eine verringerte Behältertauschzeit und damit schlechtere Kapazitätsauslastung kompensiert werden. Mit diesen Annahmen ergibt sich die Umlaufzeit der repräsentativen Route entsprechend Formeln 2.10 zu $42,5 \frac{min}{Tour}$ und unter Berücksichtigung einer zeitlichen Reserve der Routentakt zu $50 \frac{min}{Tour}$. Darauf

basierend wurden die Routen iterativ festgelegt. Hierzu wurden Senken unter Berücksichtigung der Verkehrs- und Entladerestriktionen so lange zu einer bestehenden Route hinzugefügt, bis wahlweise die Kapazitätsschranke von $40 \frac{LT}{Tour}$ oder die Umlaufzeitschranke $42,5 \frac{min}{Tour}$ erreicht wurde. Nach Erreichung einer dieser Schranken wurde für die nachfolgende Senke eine neue Route eröffnet.

Bei der layoutbasierten Auslegung wurden die Routen unabhängig von kapazitiven oder zeitlichen Restriktionen jeweils um eine Linie gelegt und anschließend die daraus resultierende Takt- und Umlaufzeit berechnet. Da an den Senken nur ein begrenzter Bestand vorgehalten werden soll, muss eine Nachversorgung min. aller 120min erfolgen. Die Ergebnisse der jeweiligen Routenplanung sind in Abb. 2 vergleichend gegenüber gestellt.

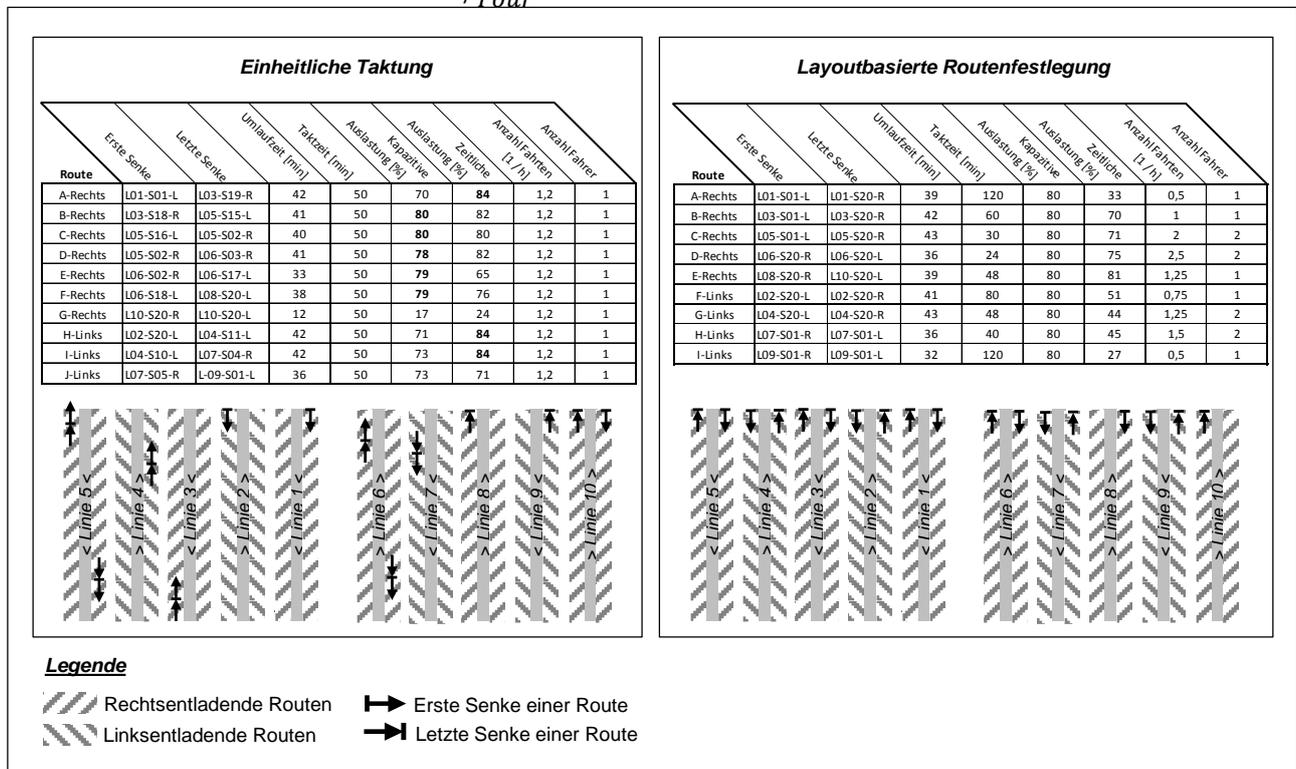


Abbildung 2. Ergebnisse der Dimensionierung nach einheitlicher Taktung und layoutbasierter Routenfestlegung im Vergleich

Bei einer Auslegung nach einheitlicher Taktung werden die Routen in Abhängigkeit der Tätigkeitszeiten der Routenzugfahrer festgelegt. Dadurch ist im Vergleich zur layoutbasierten Auslegung eine deutliche bessere Mitarbeiterauslastung zu erzielen, welche im vorliegenden Fallbeispiel in einer Differenz von 3 zusätzlichen Mitarbeitern bei Layoutbasierter Routenfestlegung mündet. Es ist jedoch ersichtlich, dass sich bei einheitlicher Taktung i.d.R. Routenverläufe ergeben, welche entlang einer Linie unterbrochen sind oder 2 Seiten einer Linie durch unterschiedliche Routen bedient werden, da an einer Senke entlang der Linie die Kapazitäts- oder Zeitschranke er-

reicht wird. Demnach würden Durchsatzänderungen – bspw. hervorgerufen durch geänderte Produkte, Änderungen im Produktmix oder der Verlagerung von Verbauorten einzelner Artikel – dazu führen, dass durch Kürzung oder Verlängerung einzelner Routen die komplette Routendefinition angepasst werden muss.

Bei einer layoutbasierten Routenplanung führen Durchsatzveränderungen lediglich zu einer Anpassung der Taktzeit der betroffenen Route, welche jeweils so eingestellt ist, dass sich eine ideale kapazitive Auslastung der Route ergibt. Allerdings ergeben sich durch die unter-

schiedlichen Taktzeiten Überschneidungen bzgl. der untertägigen Abfahrtszeiten, welche schwankende Auslastungen der Quelle verursachen bzw. unter Betrachtung von Kapazitätsrestriktionen der Quelle zu Wartezeiten der Routenzüge führen. Die fehlende Austaktung in Abhängigkeit der resultierenden Umlaufzeiten führt dazu, dass die Routen bei einer fixen Mitarbeiterzuordnung schlechter ausgelastet sind und sich die zeitliche Auslastung zwischen den Routen deutlich unterscheidet.

4 PROBLEMSPEZIFIKATION UND STAND DER TECHNIK

Auf Basis der in Kapitel 3.3 dargestellten Problemstellung lassen sich die Aufgaben bei der Dimensionierung eines getakteten Routenverkehrs in zwei Teilbereiche gliedern. Einerseits gilt es im Rahmen der **Routenplanung**, Routen und Taktzeiten derart zu definieren, dass die an den einer Route zugewiesenen Senken anfallende Transportvolumen zeit- und mengengerecht abgewickelt werden können.

Während der **Fahrplanerstellung** werden konkrete Abfahrtszeiten für die einzelnen Touren festgelegt, so dass die im Zuge der Routenplanung bestimmten Routen und Taktzeiten eingehalten werden. Zusätzliche Restriktionen, welche im Rahmen der Fahrplanerstellung berücksichtigt werden sollten, sind u.A.:

- Verfügbarkeit von Ressourcen zum Abfahrtszeitpunkt (Routenzug, Fahrer, Beladespuren im Bahnhof...)
- Verfügbarkeit von Stellplätzen zwischen Touren
- Schicht- und Pausenzeiten

Im Folgenden wird ein Überblick über verbreitete Modelle und Methoden zur Lösung des Routenplanungs- und Fahrplanstellungsproblems gegeben.

4.1 VEHICLE ROUTING PROBLEME (VRP)

Vehicle Routing Probleme (VRP) beschreiben ein Zuordnungsproblem zwischen einer Flotte an Fahrzeugen und Transportaufträgen zwischen Knoten innerhalb eines Netzwerks. Im Standardfall wurde das VRP durch *Dantzig et al.* 1959 formuliert und betrachtet die Zuweisung von Transportaufträgen zwischen einem Depot und mehreren Knoten unter einer Kapazitätsbeschränkung der Fahrzeuge. Das Problem wurde hinsichtlich der Minimierung des Fahrwegs mittels linearer Programmierung gelöst [*Dan-1959*]. Es stellt somit eine Erweiterung des traveling salesman Problems bzw. multiple traveling salesman Problems dar, in denen keine Kapazitätsbeschränkungen betrachtet werden [*Flo-1956*] [*Bek-2006*].

Aufbauend auf dem Standard-VRP existieren eine Vielzahl von Erweiterungen der Problemformulierung und Zielfunktionen. Heterogene Fahrzeugflotten mit unter-

schiedlichen Kapazitäten werden als s.g. capacity restricted VRP (CVRP) modelliert, bei Multi-Depot VRP (MDVRP) können Transportaufträge aus mehreren Depots bedient werden. VRP with Pickup and Delivery (VRPPD) betrachten neben Transporten vom Depot zu Knoten auch Transporte zwischen Knoten. VRP with Time Windows (VRPTW) berücksichtigen Zeitfenster, in denen die Transportaufträge an den Knoten bedient werden müssen. Für einen Überblick über verbreitete Modelle und Lösungsansätze sei an dieser Stelle auf [*Käm-2006*], [*Lap-1993*] und [*Lap-2009*] verwiesen.

4.2 VEHICLE SCHEDULING PROBLEME (VSP)

Vehicle Scheduling Probleme (VSP) beschreiben in Zuordnungsproblem zwischen Fahrzeugen und einer gegebenen Anzahl an vorgegeben Einzelfahrten derart, dass jede Einzelfahrt durch genau ein Fahrzeug bedient wird und jedes Fahrzeug eine zulässige Abfolge an Einzelfahrten ausführt. Ziel ist die Minimierung von Flottengröße und Betriebskosten. Es wird davon ausgegangen, dass sowohl Zeitpunkte als auch Orte der Abfahrt und Rückkehr der Einzelfahrten bekannt sind. Im Gegensatz zu VRP betrachten diese nicht die Zuordnung von Knoten zu Touren und keine Kapazitätsbeschränkungen.

Während VSP im einfachsten Fall von einer homogenen Fahrzeugflotte und einem zentralen Depot ausgehen, existieren (analog zu den erweiterten VRP) erweiterte Formulierungen zur Betrachtung heterogener Fahrzeugflotten (VSP containing multiple vehicle types, VSPMVT), mehrerer Depots (MDVSP), oder für die Begrenzung der maximalen Strecke oder Zeit, welche ein Fahrzeug außerhalb des Depots verweilen darf (VSP with length of path restrictions, VSPLPR). VSP with time windows (VSPTW) lassen Abweichungen der vordefinierten Abfahrtszeit innerhalb eines definierten Zeitfensters zu. Für einen umfassenden Überblick über verbreitete Modelle und Lösungsansätze sei an dieser Stelle auf [*Bun-2009*], [*Fre-1995*] und [*Raf-1983*] verwiesen.

4.3 SPEZIFISCHE PROBLEMFORMULIERUNGEN FÜR INNERBETRIEBLICHE ROUTENVERKEHRE

Dreher et al. beschreiben einen heuristischen Ansatz, welcher aus einer Erstdefinition von Routen und deren anschließender Optimierung besteht. Zielgröße ist hier die Minimierung der Anzahl an Routenzügen, welche sich aus den Fahr- und Handhabungszeiten bei der jeweiligen Routenführung ergibt. Aufbauend aus den daraus berechneten Takt- und Umlaufzeiten der Einzelfahrten kann ein Fahrplan manuell erstellt werden. Eingebettet ist der Algorithmus in das kommerzielle Softwareprodukt MALAGA der Firma ZIP [*Dre-2009*].

Vaidyanathan et al. widmet sich der Lösung eines Routenplanungsproblems unter Kapazitätsrestriktionen. Ein durch sie formuliertes just-in-time CVRP (JITCVRP) wird mittels einer Heuristik gelöst, wobei Wartezeiten

von Routenzügen sowie Bestände an den Senken minimiert werden [Vai-1999].

Gyulai et al. stellen ebenfalls eine heuristische Lösung für ein Routenplanungsproblem bei innerbetrieblichen Transporten unter Kapazitätsrestriktionen vor. Zielgröße der Optimierung ist die Gesamtdauer aller Routenzugtouren bei der jeweiligen Routenführung zu minimieren. Dabei gehen beide von einer vordefinierten Taktzeit aus, welche über alle Routen eingehalten werden muss [Gyu-2013].

Emde et al. lösen das Routenplanungs- und Fahrplanerstellungsproblem kombiniert. Mittels dynamischer Programmierung wird in einem ersten Optimierungsschritt die Anzahl an Routenzügen im Rahmen der Routenplanung minimiert und darauf folgend der Fahrplan hinsichtlich der resultierenden Anzahl an Routenzügen sowie Bestandskosten optimiert [Emd-2011].

Golz et al. widmen sich ebenfalls der integrierten Lösung eines Routenplanungs- und Fahrplanerstellungsproblems. Unter Berücksichtigung der Kapazitätsbeschränkungen der Fahrzeuge und Ziel-Bereitstellungszeiten von Transportaufträgen werden diese zu Touren zusammengefasst, welche anschließend mittels eines angepassten VSP with time window derart eingeplant werden, dass die Anzahl an gleichzeitig aktiven Touren minimiert wird, ohne Ziel-Bereitstellungszeiten zu verletzen [Gol-2012].

4.4 FAZIT UND HANDLUNGSBEDARF

In Abb. 3 sind die beschriebenen Modelle und Methoden nochmals übersichtlich dargestellt inkl. der darin behandelten Problemstellungen und der getroffenen Restriktionen und Annahmen. Insb. im Bereich der Routenplanung sind eine Vielzahl an Modellen verbreitet. Lediglich die spezifischen Modelle zur Dimensionierung innerbetrieblicher Routenverkehre legen jedoch eine zyklische Belieferung nach einem festen Takt zugrunde bzw. berechnen diesen. Da das anfallende Transportvolumen jedoch von der Taktzeit der Nachversorgung abhängig ist, sind die VRP für die Problemstellung nur eingeschränkt anwendbar [Vai-1999].

Dreher et al., Vaidyanathan et al., Gyulai et al., Emde et al., Golz et al. und das Verfahren Einheitlicher Takt nach Günthner et al. betrachten insbesondere die Routenplanung als ein entscheidendes Optimierungskriterium, was dazu führen kann, dass leicht veränderte Eingangsdaten eine andere Routendefinition ergeben bzw. sich diese aufgrund der z.T. heuristischen Verfahren zwischen mehreren Lösungen unterscheidet. Die Anwendung dieser Verfahren würde demnach voraussetzen, dass Routenverläufe flexibel angepasst werden können und die Senkenzuordnung aufwandsarm an die neuen Routenverläufe angepasst werden kann. Weiterhin erfordert eine senken-

bezogene Planung der Routenverläufe genaue Kenntnisse über die zu erwartenden Transportvolumina je Senke. In vielen Anwendungsfällen ist dies jedoch durch zahlreiche Einschränkungen nur bedingt möglich. U.a. sind hierzu zu nennen:

- Ständig wechselnde Transportvolumina verbunden mit einer komplexen Datenbasis
- Wiederkehrender Einweisungsaufwand für Mitarbeiter bei geänderten Routenverläufen
- Hoher Datenpflegeaufwand in Produktivsystemen bei geänderter Senkenzuordnung (insb. Routenzugsteuerung, Abrufsysteme)
- Rollierende Anpassung von Visualisierungen notwendig (Fahrplan, Routenverläufe, Senkenbeschriftungen, Behälterlabel etc.)

Demnach kann es aus betrieblichen Gesichtspunkten von Vorteil sein, vordefinierte Routenverläufe nicht rollierend zu überplanen, sondern auf Veränderungen primär über Anpassungen des Fahrplans im Rahmen der Fahrplanerstellung zu reagieren. So können Transportvolumenänderungen über eine Veränderung des Routentaktes abgefangen werden. Änderungen des Streckennetzes oder geänderte Senken führen dann auch nur zu Anpassungen der dadurch betroffenen Route(n) anstatt zu Änderungen des Gesamtsystems.

Wird der Routenverlauf und -takt jedoch nicht bezogen auf die notwendige Ausführungszeit bestimmt, sind – wie bereits in Kap. 3.3 beschrieben – schlechte zeitliche Fahrzeug- und Mitarbeiterauslastungen zu erwarten. Dies kann mit einer flexiblen Fahrzeug- und Mitarbeiterdisposition abgefangen werden. Die entsprechenden Einsatzpläne (Tourenabfolgen je Fahrzeug/ Mitarbeiter) können durch Lösung von VSP erzeugt werden. Diese gehen jedoch von vordefinierten Abfahrtszeiten aus. Eine Glättung bzgl. Anzahl gleichzeitig aktiver Touren und Kapazitätsrestriktionen im Depot ist i.d.R. nicht möglich. Einzige Ausnahme bilden hierzu VSPTW, bei denen Touren mit Ziel einer optimalen Fahrzeugdisposition verschoben werden können. Deren Ergebnis verletzt allerdings die Prämisse einer fixen, routenbezogenen Taktung. Zudem führt eine Verschiebung einer Tour i.d.R. zu einem geänderten Transportvolumina der vorhergehenden- und darauffolgenden Tour, was in VSPTW nicht betrachtet wird.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass keine der beschriebenen Methoden die betrieblichen Vorteile einer layoutbezogenen Routenfestlegung gewährleistet und gleichzeitig die daraus entstehenden Abfahrts- und Umlaufüberschneidungen betrachtet. Es fehlt eine Methode mit derer ausgehend von einer fixen Routenfestlegung Taktzeiten und Fahrpläne derart berechnet werden, dass möglichst geringe Wartezeiten resultieren.

	Routenplanung					Fahrplanerstellung			Lösungsweg					
	Bestimmung der Senken- Tourenzuordnung	Kapazitive Restriktionen von Fahrzeugen	Zeitliche Restriktionen von Transportaufträgen	mit fixem Takt je Route (bzgl. Kapazität)	Zyklische Belieferung heterogener Flotte	Flexibler Takt zwischen Routes	Bestimmung der Touren- Fahrzeugzuordnung	Bestimmung der Touren- Umlaufzeiten	Heterogene Flotte (bzgl. Fahrzeugart)	Kapazitive Restriktionen im Depot	Heuristik	Exakt	Entscheidungsproblem	Formelgestützte Entscheidungsfindung
VRP	x	x					x				x	x		
CVRP	x	x		x			x				x	x		
MDVRP	x	x					x				x	x		
VRPPD	x	x					x				x	x		
VRPTW	x	x	x				x							x
VSP						x	x				x	x		
VSPMVT						x	x	x	x		x	x		
MDVSP						x	x	x			x	x		
VSPLPR						x	x	x			x	x		
VSPTW								x						x
[Gün-2013] - Layoutbasiert	x	x		x	x	x	x							x
[Gün-2013] - Einheitl. Takt	x	x		x	x	x	x							x
[Dre-2009]	x	x	x	x	x	x	x							
[Vai-1999]	x	x	x	x	x	x	x				x			
[Gyu-2013]	x	x		x	x	x	x				x			
[Emd-2011]	x	x	x	x	x	x	x	x				x		
[Gol-2012]	x	x	x	x			x	x			x			

Abbildung 3. Vergleich bestehender Methoden zur Routenplanung und Fahrplanerstellung

5 MODELL ZUR FAHRPLANERSTELLUNG FÜR INNERBETRIEBLICHE ROUTENVERKEHRE

Aufbauend auf den in Kap. 3.3 beschriebenen Herausforderungen bei der Auslegung und Steuerung innerbetrieblicher Routenverkehre und den in Kap. 4.2 aufgezählten Schwachstellen bestehender Arbeiten wurden die Anforderungen eine Fahrplanlogik wie folgt definiert:

Ausgehend von vordefinierten Routenverläufen soll ein gültiger und bzgl. Mitarbeiterinsatz möglichst optimaler Fahrplan erstellt werden, welcher die folgenden Anforderungen erfüllt:

- Bedienung jeder Route in definierten Zeitintervallen nach einem festen Takt
- Gleicher Routentakt auch über Schichtwechsel
- Gleicher Fahrplan je Schicht sofern mittleres Transportvolumen und Schichtmodell unverändert
- Gute kapazitive Auslastung durch Anpassung der Taktzeiten an mittleres Transportvolumen
- Geglättete Auslastung von Lager und vorgelagerten Prozessen durch überschneidungsfreie Abfahrtszeiten an der Quelle
- Gute zeitliche Auslastung der Fahrzeuge / Mitarbeiter bei flexibler Disposition unter Berücksichtigung heterogener Mitarbeiterpools (nicht jeder Mitarbeiter kann jede Route bedienen)
- Berücksichtigung von Kapazitätsrestriktionen seitens der Fahrzeuge bei homogener Flotte
- Berücksichtigung von zeitlichen Restriktionen seitens der Transportaufträge (maximale Wiederanstellzeit)

Im Rahmen der Forschungskoooperation wurde entsprechend dieser Anforderungen eine Fahrplanlogik entwi-

ckelt und in ein Modell überführt. Durch dieses können auf Basis definierter Eingangsdaten gültige, d. h. an der Quelle kollisionsfreie Fahrpläne berechnet und optimiert werden. In diesem Kapitel wird zunächst das Modell vorgestellt und anschließend dessen Potenzial anhand der Ergebnisse eines konkreten Anwendungsfalls diskutiert.

5.1 AUFBAU DES MODELLS

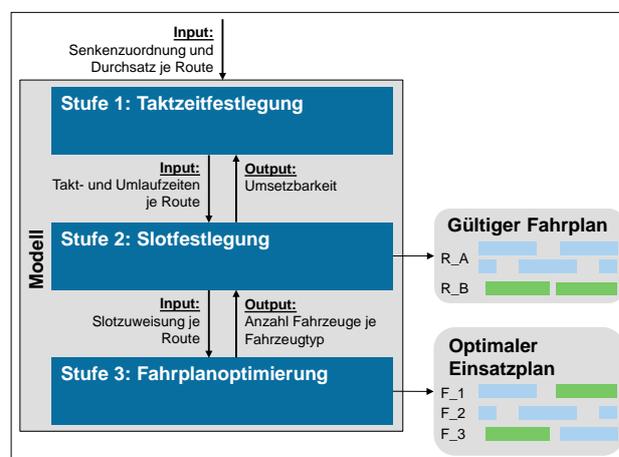


Abbildung 4. Prinzipieller Aufbau des Modells

In Abb. 4 ist der Aufbau des Modells schematisch dargestellt. Die Berechnung eines Fahrplans erfolgt dabei in 3 Stufen. Innerhalb der ersten beiden Stufen werden auf Basis der im Rahmen der Routenplanung definierten Routen Taktzeiten festgelegt und Routen derart gruppiert, dass die Findung eines gültigen Fahrplans gewährleistet ist bzw. es wird die Nichtexistenz eines gültigen Fahrplans gezeigt. Dies erfolgt nach einer festgelegten Logik in kürzester Zeit. Die eigentliche Optimierung des Fahrplans hinsichtlich eines minimalen Ressourceneinsatz erfolgt in der darauffolgenden Stufe mittels eines gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems.

5.1.1 STUFE 1 – TAKTZEITFESTLEGUNG

Im ersten Schritt werden auf Basis der in der Routenplanung definierten Routen und den zugeordneten Senken sowie Transportvolumina Takt- und Umlaufzeiten berechnet. Grundlage bildet eine Festlegung von Taktzeiten für alle Routen streng nach einem größten gemeinsamen Teilers (ggT). Der ggT entspricht dabei der minimal möglichen Taktzeit unter Einhaltung aller Nebenbedingungen. Zudem sind für Routen nur solche Taktzeiten gültig, welche einem Vielfachen des ggT entsprechen. Daraus ergibt sich für weitere Betrachtungen der Vorteil, dass das Problem durch die Einführung eines ggT diskretisiert und der Lösungsraum verkleinert wird.

In Abb. 5 ist die der Berechnung des ggT und der darauf aufbauenden Festlegung der Taktzeiten zugrunde liegende Logik als Pseudocode dargestellt. Sollen Zykluszeiten auch über den Schichtwechsel erhalten bleiben, ohne dass sich in der Folgeschicht ein anderer Fahrplan ergibt, ist nur eine ganzzahlige Anzahl an Touren je Schicht zulässig. Demnach werden iterativ alle möglichen Anzahlen an Touren je Schicht ($AnzTou$) durchlaufen (min. 1 Tour pro Route und Schicht, max. 1 Tour pro Minute und Route) und jeweils der resultierende ggT berechnet, welcher sich als Quotient aus Arbeitszeitnetto einer Schicht (AZN) und der Anzahl an Touren ergibt. Nach Festlegung des ggT ergibt sich die Taktzeit für eine Route R_i mit gegebenen Durchsatz als das größtmögliche Vielfache des ggT , ohne dass dadurch Restriktionen seitens der Routenzugkapazität verletzt werden. Da nicht jedes beliebige Vielfache des ggT eine ganzzahlige Anzahl Touren je Schicht gewährleistet, muss dies geprüft werden.

```

//für alle möglichen Anzahl an Touren den ggT berechnen und
versuchen, die Taktzeiten festzulegen
for AnzTou = 1 to AZN
    ggT = AZN / AnzTou;
    //Für jede Route versuchen, die Taktzeiten festlegen
    for each Ri in R
        //für eine Route die maximal zulässige Taktzeit bestimmen
        for i = 1 to (i * ggT) <= AZN
            //Restriktionen prüfen
            if
                Berechne_Auslastung(Taktzeit: i * ggT) <= 1 AND
                //Analog Formel 3.4
                (i*ggT) mod AZN = 0
            then
                Setze_Taktzeit(Taktzeit: i*ggT);
                Berechne_Umlaufzeit(Taktzeit: i*ggT);
                //Analog Formel 3.9
            end if;
        end for;
    end for;
end for;
if Alle_Taktzeiten_gesetzt then
    Speichere_ggT_gültig;
end if;
end for;
    
```

Abbildung 5. Logik zur Taktzeitfestlegung

In der folgenden Tabelle sind für einige exemplarische Routen mögliche ggT und die resultierenden Taktzeiten aufgelistet. Darin ist auch ersichtlich, dass nicht alle Vielfache des ggT als Taktzeiten in Frage kommen. Bspw. muss für Route 4 bei einem ggT von 10min die Taktzeit auf 20min reduziert werden, da eine Taktzeit von 40min oder 30min keine ganzzahlige Anzahl an Fahrten je Schicht gewährleisten würde.

	Auslastungs- sidealer Takt	ggT bei AZN = 500 min			
		20 min (25 Touren / Schicht)	10 min (50 Touren / Schicht)	6,25 min (80 Touren / Schicht)	~3,85 min (130 Touren / Schicht)
Route 1			1 ggT = 10 min	1 ggT = 6,25 min	2 ggT = 7,7 min
Route 2		1 ggT = 20 min	2 ggT = 20 min	2 ggT = 12,5 min	5 ggT = 19,2 min
Route 3	30min	1 ggT = 20 min	2 ggT = 20 min	3 ggT = 25 min	5 ggT = 19,2 min
Route 4	40min	1 ggT = 20 min	2 ggT = 20 min	4 ggT = 31,3 min	10 ggT = 38,5 min
Route 5	50min	1 ggT = 20 min	5 ggT = 50 min	7 ggT = 50 min	13 ggT = 50 min
Route 6	60min	1 ggT = 20 min	5 ggT = 50 min	7 ggT = 50 min	13 ggT = 50 min

Tabelle 2. Beispielhafte Taktzeitfestlegung in Abhängigkeit des ggT

Ergebnis der Taktzeitfestlegung ist somit eine Auswahl an ggT und den jeweils zugehörigen Taktzeiten für die Routenzüge, so dass kapazitive und zeitliche Restriktionen erfüllt werden. Es sei angemerkt, dass durch Festlegung des ggT die Anzahl an zur Verfügung stehenden Taktzeiten eingeschränkt wird, was dazu führt, dass i.d.R. mehr Touren pro Stunde gefahren werden müssen, als bei einer flexiblen (auslastungsideal)en Taktzeitwahl.

5.1.2 STUFE 2 – SLOTFESTLEGUNG

Im darauf folgenden Schritt der Fahrplanberechnung wird versucht, einen gültigen Fahrplan auf Basis der eingestellten Taktzeiten zu erzeugen. Hierzu werden Beladezeiten der Routenzüge sowie Kapazitätsbeschränkungen seitens der Quelle über s. g. Slots berücksichtigt. Über einen initialen Startzeitversatz können Routen überschneidungsfrei zueinander gruppiert werden, sofern ihre Taktzeiten bestimmte Bedingung erfüllen. Legt man beispielsweise einen ggT von 15min zugrunde, so könnte ein überschneidungsfreier Fahrplan für drei Routen R_a (Taktzeit = 30min) und R_b, R_c (Taktzeit = 1h) lauten:

Abfahrtszeiten R_a : 00:00, 00:30, 01:00, 01:30 ...
 Abfahrtszeiten R_b : 00:15, 01:15 ...
 Abfahrtszeiten R_c : 00:45, 01:45 ...

Die Bedingung, dass Routen mit unterschiedlichen Taktzeiten zueinander gruppiert werden können, lässt sich entsprechend Tab. 3 in Abhängigkeit der Taktzeit und des gewählten ggT formulieren:

	Taktzeit 1	Taktzeit 2	...	Taktzeit n-1	Taktzeit n
Gruppe 1		$4 * ggT$	...	$2 * ggT * 2^{n-2}$	$2 * ggT * 2^{n-1}$
Gruppe 2	$3 * ggT$	$6 * ggT$	...	$3 * ggT * 2^{n-2}$	$3 * ggT * 2^{n-1}$
Gruppe 3	$5 * ggT$	$10 * ggT$	...	$5 * ggT * 2^{n-2}$	$5 * ggT * 2^{n-1}$
Gruppe 4	$7 * ggT$	$14 * ggT$	...	$7 * ggT * 2^{n-2}$	$7 * ggT * 2^{n-1}$
Gruppe 5	$9 * ggT$	$18 * ggT$	...	$9 * ggT * 2^{n-2}$	$9 * ggT * 2^{n-1}$

...

Tabelle 3. Taktzeitgruppen

Im einfachsten Fall lassen sich demnach Routen genau dann überschneidungsfrei gruppieren, sofern aller Taktzeiten in der selben Gruppen liegen. Wird diese Betrachtung dahin gehend erweitert, dass an der Quelle innerhalb eines ggT mehrere Routenzüge beladen werden können, lassen sich mehrere Taktzeitgruppen innerhalb eines ggT zeitversetzt gruppieren. Die resultierenden Zeitfenster innerhalb eines ggT werden im Folgenden als Slots bezeichnet. Wenn in obigen Beispiel innerhalb des ggT von 15min 2 Routenzüge beladen werden können (bspw. durch mehrere Beladespuren oder einer Beladezeit $< 7,5$ min), könnten drei zusätzliche Routen R_d (Taktzeit = 45min) und R_e, R_f (Taktzeit = 1,5h) entsprechend des folgenden Fahrplans bedient werden:

Abfahrtszeiten R_d : 00:08, 00:53, 01:38, 02:23 ...
 Abfahrtszeiten R_e : 00:23, 01:53 ...
 Abfahrtszeiten R_f : 00:38, 02:08 ...

Der resultierende Fahrplan für dieses Beispiel ist in Abb. 6 dargestellt.

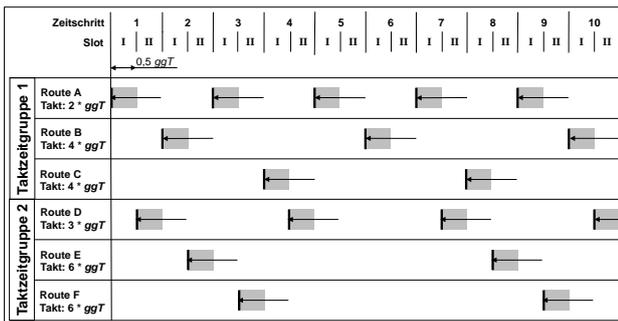


Abbildung 6. Slotzuweisung für Routen unterschiedlicher Taktzeitgruppen

Da die Anzahl an zur Verfügung stehender Slots abhängig von dem ausgewählten ggT sowie den berechneten Taktzeiten sind, kann i.d.R. nicht für jede gültige Lösung der Taktzeitfestlegung auch eine gültige Slotbelegung berechnet werden. Lediglich für Lösungen, bei denen jeder Route ein Slot zugewiesen werden konnte, ist gewährleistet, dass sich für den gewählten ggT und die eingestellten Taktzeiten ein überschneidungsfreier Fahrplan konstruieren lässt. Die verbleibenden Fahrplankombinationen ergeben sich allgemein nach der in Abb. 7 als Pseudocode formulierten Logik zur Slotzuweisung.

```

AnzSlots = RoundDown(ggT / Bedienrate)

for Slot = 1 to AnzahlSlots
    ersteRoute = r0; //Eine Dummyroute

    //Die noch nicht zugewiesene Route mit minimaler Taktzeit für
    //ein neues Slot bestimmen
    for each Ri in R
        if Ri.Slot = 0 And Ri.Taktzeit < ersteRoute.Taktzeit then
            ersteRoute = Ri;
        end if;
    end for;

    //Die gefundene Route zuweisen und Slot auffüllen
    If ersteRoute <> r0 then
        ersteRoute.Slot = Slot;
        ggTSlot = ersteRoute.Taktzeit;
        AuslastungSlot = ggT / ersteRoute.Taktzeit;

        //Weitere Routen aus selber Taktzeitgruppe in dieses Slot
        //gruppieren
        for each Rj in R
            if
                Rj.Slot = 0 And
                Rj.Taktzeit mod ggTSlot = 0 AND
                (AuslastungSlot + ggT / Rj.Taktzeit) < 1
            then
                Rj.Slot = Slot
                AuslastungSlot = ggT / Rj.Taktzeit;
            end if;
        end for;
    end if;
end for;

if Alle_Slots_gesetzt then
    Speichere_ggT_gültig;
end if;
    
```

Abbildung 7. Logik zur Slotzuweisung

Entsprechend des Beispiels aus Tab. 2 ergeben sich nach dieser Logik folgende Slotzuweisungen:

	ggT bei AZN = 500 min, Beladezeit = 1,5 min							
	20 min		10 min		6,25 min		3,85 min	
	Taktzeit	Slot	Taktzeit	Slot	Taktzeit	Slot	Taktzeit	Slot
Route 1			1 ggT	I	1 ggT	I	2 ggT	I
Route 2	1 ggT	I	2 ggT	II	2 ggT	II	5 ggT	II
Route 3	1 ggT	II	2 ggT	II	3 ggT	III	5 ggT	II
Route 4	1 ggT	II	2 ggT	III	4 ggT	II	10 ggT	II
Route 5	1 ggT	III	5 ggT	IV	7 ggT	IV	13 ggT	
Route 6	1 ggT	IV	5 ggT	IV	7 ggT	IV	13 ggT	

Tabelle 4. Beispielhafte Taktzeit- und Slotfestlegung in Abhängigkeit des ggT

Bereits nach Abschluss der Slotfestlegung kann mit geringen Aufwand manuell ein Fahrplan generiert werden, welcher die Forderung nach einer geglätteten Auslastung von Lager und vorgelagerten Prozessen erfüllt. Innerhalb eines Slots bilden die Startzeitversätze der Routen den verbleibenden Freiheitsgrad für die Einsatzplanung zur Optimierung des Ressourceneinsatzes.

5.1.3 STUFE 3 – FAHRPLANOPTIMIERUNG

Für jede Lösung der Fahrplanberechnung können i.d.R. mehrere überschneidungsfreie Fahrpläne erzeugt werden, welche sich jedoch hinsichtlich des resultierenden Ressourceneinsatzes unterscheiden. Einerseits resultieren aus der Taktzeitfestlegung je ggT eine unterschiedliche Anzahl an Touren je Schicht, was zu einem unterschiedlichen Mitarbeiterbedarf führt. Andererseits besteht bei flexibler Ressourcendisposition die Möglichkeit, zwischen Touren auf unterschiedlichen Routen zu wechseln, sofern diese in geeigneter Weise zueinander im Fahrplan gruppiert sind. In Abb. 8 ist dieser Zusammenhang beispielhaft dargestellt. Beide Lösungen stellen dabei gültige, d.h. überschneidungsfreie Fahrpläne dar. Der geänderte Startzeitversatz von Route 6 in Lösung 2 führt jedoch dazu, dass dauerhaft maximal 3 Touren im Umlauf sind, wodurch bezogen auf eine gesamte Schicht ein Routenzug / Mitarbeiter weniger benötigt wird.

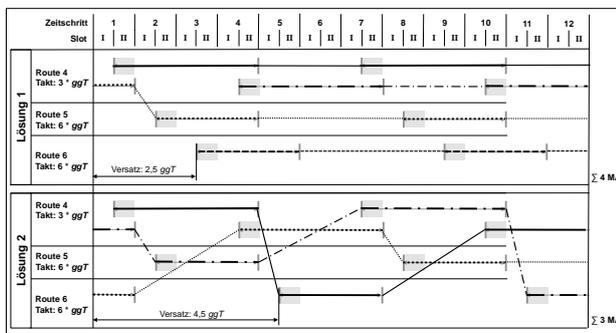


Abbildung 8. Vergleich zweier Einsatzpläne in Abhängigkeit des initialen Startzeitversatzes

Da auch Sprünge zwischen Touren unterschiedlicher Slots möglich sind, muss stets der komplette Fahrplan betrachtet werden. Das daraus folgende Optimierungsproblem lässt sich demnach wie folgt beschreiben: Aus einer gegebenen Menge an Routen R , einer gegebenen Menge an gültigen ggT und den korrespondierenden Taktzeit- und Slotzuweisungen, sowie einer gegebenen Flottendefinition (Fähigkeitsprofile je Mitarbeiterpool) sind die Startzeitversätze jeder Route derart zu wählen, dass:

- jede Fahrt des Fahrplans durch genau einem Fahrzeug / Mitarbeiter ausgeführt wird und
- die aus dem Einsatzplan resultierende Gesamtzahl an Fahrzeugen / Mitarbeitern minimal ist.

Dabei werden die folgenden Annahmen zugrunde gelegt:

- Die Umlaufzeit je Route ist für alle Touren dieser Route konstant.
- Ein Routenzug ist nach Rückkehrzeit im Bahnhof sofort verfügbar, etwaige Verteilzeiten oder zeitliche Reserven sind Bestandteil der Umlaufzeit.

- Die Zuweisung von Routenzügen auf Touren erfolgt nach FIFO bezogen auf den letzten Rückkehrzeitpunkt des Zuges.
- Zum Schichtwechsel bleiben Routenzüge an ihrem aktuellen Aufenthaltsort stehen und werden in der nächsten Schicht mit neuen Fahrern besetzt.

Aufgrund der umfangreichen Berechnungslogik wird an dieser Stelle auf eine Formulierung des zugrunde liegenden Pseudocodes verzichtet. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass sich der Fahrplan durch die Einführung des ggT als gemischt-ganzzahliges lineares Programm (engl. MILP) darstellen lässt, in dem die Startzeitversätze je Route Freiheitsgrade bilden. Da alle Fahrten im Depot beginnen und enden (im Gegensatz zu VSP), bildet die Fahrerzuweisung selbst kein Optimierungsproblem. Bei Zuweisung nach FIFO im Depot existiert zu jedem Fahrplan nur genau ein möglicher Einsatzplan. Der Einsatzplan muss dabei jeweils nur über eine begrenzte Zeitspanne ausgewertet werden, da sich dieser – wie auch der Fahrplan – mit einer definierten Periodendauer wiederholen (vgl. Abb. 8).

5.2 DISKUSSION DER POTENZIALE EINER FAHRPLANOPTIMIERUNG

Die beschriebene Fahrplanlogik wurde auf einem realen Anwendungsfall aus der Automobilindustrie angewendet, welcher dem Fallbeispiel aus Kap. 3.3 ähnelt. Ausgehend von einer vornehmlich anhand von Layoutrestriktionen getroffenen Routenfestlegung ergaben sich Abfahrts- und Umlaufüberschneidungen (vgl. Kap. 3.3), welche zu langen Wartezeiten führen würden. Da sich das Routenzugsystem noch in der Planungsphase befand und insb. dynamische Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Routen untersucht werden sollten, wurde zur Absicherung der Planung und zur Validierung der Fahrplanlogik eine Simulationsstudie durchgeführt, in deren Rahmen das Potenzial einer Fahrplanoptimierung mithilfe des beschriebenen Modells aufgezeigt werden konnte.

Betrachtet wurden dabei 6 Szenarien. Die ersten 3 Szenarien gingen davon aus, dass die sich direkt aus der Routenfestlegung hervorgehenden „auslastungsidealen“ Taktzeiten nicht angepasst werden. Eine Abfahrtszeitglättung findet nur zu Schichtbeginn durch eine einmalige Versatzsteuerung Berücksichtigung. Variiert wurde zwischen Szenario 1-3 die Flexibilität der Mitarbeiterdisposition. Während in Szenario 1 jeder Mitarbeiter nur eine Route bedienen kann, wurden die Mitarbeiter in Szenario 2 in 2 Mitarbeiterpools aufgeteilt, welche jeweils die Hälfte der Routen bedienen können. In Szenario 3 hingegen kann jeder Mitarbeiter eine beliebige Route bedienen. Für Szenario 4-6 wurde der Fahrplan mittels des Modells optimiert, wobei die selben Abstufungen hinsichtlich einer flexiblen Mitarbeiterdisposition verwendet wurden.

In Abb. 9 sind die wichtigsten Ergebnisse der Simulationsstudie aufgezeigt. Die Differenz an notwendigen Mitarbeitern in den unterschiedlichen Szenarien bezieht sich jeweils auf die maximale Anzahl an Mitarbeitern in Szenario 1.

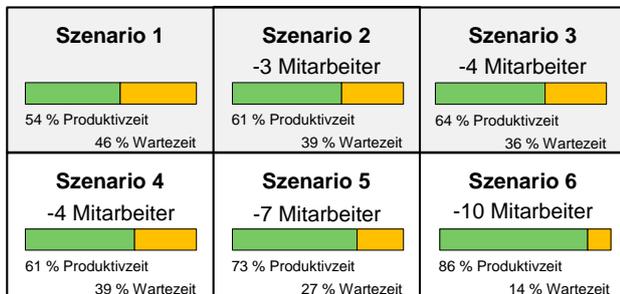


Abbildung 9. Resultierende Mitarbeiteranzahl der betrachteten Szenarien

Ersichtlich ist, dass sich – wie zu erwarten – Einsparpotenziale durch eine flexible Mitarbeiterdisposition unabhängig von einer Fahrplanoptimierung ergeben. Allerdings ergeben sich ähnlich hohe Potenziale einzig durch eine Vermeidung von Abfahrtszeitkollisionen. Dieses Ergebnis kann unabhängig von einer flexiblen Mitarbeiterdisposition oder einer Lösung des Optimierungsproblems entsprechend der dritten Stufe im Modell erzielt werden, da nach logikbasierter Taktzeit- und Slotfestlegung ein überschneidungsfreier Fahrplan gewährleistet werden kann. Die Simulationsstudie hat ebenfalls bestätigt, dass sich der effizienteste Prozess durch eine Kombination aus flexibler Mitarbeiterdisposition und eine darauf angepasste Fahrplanoptimierung realisieren lässt, was mit mit hohen Einsparpotenzialen verbunden ist.

Für die Szenarien 5 und 6 wurde jeweils ein optimaler Fahrplan nach dem in Kap. 5.2.3 vorgestellten Optimierungsmodells berechnet. Der optimale Fahrplan wurde dabei durch vollständige Enumeration aller gültigen Takt- und Slotfestlegungen (Schritt 1, 2) und den Startzeitversätzen (Schritt 3) ermittelt, wodurch die Anzahl an auszuwertenden Fahrplankombinationen sehr groß war und die Findung des optimalen Fahrplans entsprechend lange Zeit in Anspruch genommen hat. In Abb. 11 ist die Berechnungsdauer zur Findung des optimalen Fahrplans in Abhängigkeit der Systemgröße beispielhaft dargestellt. Die unterschiedlichen Systeme wurden dabei durch Variation der Anzahl an Routen des der Simulationsstudie zugrunde liegenden Anwendungsfalls erzeugt. Implementiert wurde das Fahrplanmodell als gemischt-ganzzahliges Programm in Tecnomatix Plant Simulation Version 10.1., da dieses – im Gegensatz zu speziellen Optimierungssoftwares – sowohl in Forschung und Industrie insb. im Bereich der Logistikplanung breite Anwendung findet.

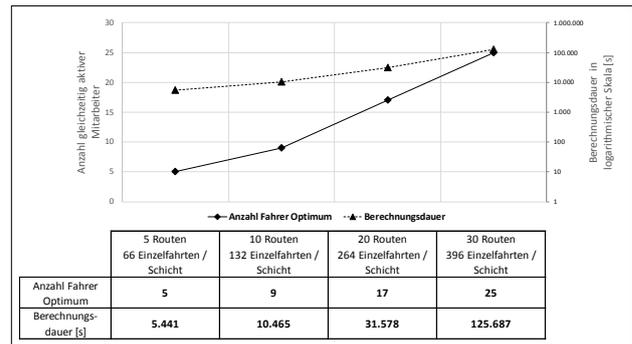


Abbildung 10. Berechnungsdauer zur Findung der optimalen Lösung in Abhängigkeit der Systemgröße

Aus Abb. 10 ist ersichtlich, dass die Lösung mittels vollständiger Enumeration bereits für vergleichsweise kleine Systeme zu langen Rechenzeiten führt, wodurch diese für einen realen Einsatz derzeit ungeeignet ist. Gründe hierfür sind einerseits in der Wahl der Implementierungsumgebung zu sehen. Tecnomatix Plant Simulation bietet keine Mehrkernunterstützung und Speicher- und Lesevorgänge von Zwischenergebnissen verursachen lange Rechenzeiten. Weiterhin sind Defizite hinsichtlich des Lösungsverfahrens zu sehen. Da sich der Lösungsraum exponentiell zur Anzahl der einzuplanenden Routen vergrößert, ist eine Lösung mittels vollständiger Enumeration nicht in effizienter Zeit zu berechnen. Die Erweiterung des Algorithmus hinsichtlich der Eingrenzung des Lösungsraumes mithilfe exakter und heuristischer Verfahren sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Innerbetriebliche Routenverkehre finden in der Praxis eine immer breitere Anwendung zur hochzyklischen Bereitstellung kleinerer Losgrößen. In vielen Anwendungsfällen werden diese Systeme derart gesteuert, dass Routenzüge auf festgelegten Routen die zugeordneten Senken in einem festen Takt versorgen. Aus planerischer Sicht stellt die Auslegung der Routenverläufe eine komplexe Aufgabe dar, da neben den geforderten Transportvolumina eine Vielzahl von Layoutrestriktionen und betrieblichen Regelungen beachtet werden müssen. Um diesen Planungsaufwand im laufenden Betrieb möglichst gering zu halten, kann es vorteilhaft sein, Routen einmalig auszuliegen und auf Veränderungen von Transportvolumina primär über Anpassungen der Taktzeit einer Route und damit des Fahrplans zu reagieren. Bestehende Methoden und Modelle widmen sich jedoch vornehmlich der Findung einer optimalen Route, was eine flexible Anpassung der Routenverläufe voraussetzt.

In diesem Paper wurde ein Modell beschrieben, mithilfe dessen ein bzgl. Abfahrtszeiten überschneidungsfreier Fahrplan erstellt werden kann. Diese Anforderung ist für Systeme, in denen viele Routen in einem zentralen Lager beladen werden, von besonderer Bedeutung. Kern des

Modells bildet eine geschickte Festlegung von Taktzeiten nach einem gemeinsamen Teiler.

Die zugrunde liegende Logik des Modells wurde in eine Softwareanwendung überführt, welche zur Planung und Steuerung von Kleinteile-Routenzügen in mehreren Fahrzeugwerken der BMW Group eingesetzt wird. Die dadurch erstellten überschneidungsfreien Fahrpläne tragen zu einer Glättung der untätigen Transportmengen bei und garantieren eine hohe Kapazitätsauslastung des vorgelagerten Materialflusssysteme. Weiterhin wird durch die Beibehaltung definierter Routen der wiederkehrende Überplanungsaufwand signifikant reduziert.

Darüber hinaus wurde gezeigt, dass durch eine Optimierung des Fahrplanes mittels eines gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems die Anzahl an gleichzeitig aktiven Fahrzeugen reduziert werden kann. Verbunden mit einer flexiblen Mitarbeiterdisposition lassen sich dadurch erhebliche Einsparpotenziale erzielen. Die Optimierung des Modells mit dem Ziel einer schnelleren Lösungsfindung ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [Bek-2006] Bektas, T.: The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. In: *Omega*, Jg. 34 (2006)3, S. 209–219. [Dan-1959] Dantzig, G. B.; Ramser, J. H.: The Truck Dispatching Problem. In: *Management Science*, Jg. 6 (1959) 1, S. 80–91.
- [Bun-2009] Bunte, S.; Kliwer, N.: An overview on vehicle scheduling models. In: *Public Transport*, 1-4 (2010), S. 299–317.
- [Deu-2013] Deuse, J.; Droste, M.: Mathematische Modellierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme zur Optimierung der produktionsbezogenen Materialversorgung. Forschungsbericht; Institut für Produktionssysteme, Technische Universität Dortmund. Dortmund, 2013.
- [Dre-2009] Dreher, S.; Nürnberger, A.; Kulus, D.: Routenzugoptimierung in der Produktionslogistik. In: *ZWF*, Jg. 104 (2009)3, S. 131–135.
- [Dro-2013] Droste, M.: Parameterbasierte Modellierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme zur Planung der Materialbereitstellung in der Montage. 1., Aufl Auflage. Herzogenrath: Shaker, 2013.
- [Emd-2010] Emde, S.; Boysen, N.: Optimally Routing and Scheduling Tow Trains for JIT-Supply of Mixed-Model Assembly Lines. Working or Discussion Paper; Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Friedrich-Schiller-Universität Jena. Jena, 2010.
- [Flo-1956] Flood, M. M.: The Traveling-Salesman Problem. In: *Operations Research*, Jg. 4 (1956) 1, S. 61–75.
- [Fre-1995] Freling, R.; Paixão, J.; Wagelmans, A. P.: Models and algorithms for vehicle scheduling. Rotterdam: Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam, 1995.
- [Gol-2012] Golz, J.; Gujjula, R.; Günther, H.-O.; Rinderer, S.; Ziegler, M.: Part feeding at high-variant mixed-model assembly lines. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Jg. 24 (2012)2, S. 119–141.
- [Gün-2012] Günthner, W. A.; Klenk, E.; Galka, S.: Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport - Ergebnisse einer Studie. München: fml Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, 2012.
- [Gün-2013] Günthner, W. A.; Durchholz, J.; Klenk, E.: Schlanke Logistikprozesse - Handbuch für den Planer. Berlin: Springer Vieweg, 2013.
- [Gyu-2013] Gyulai, D.; Pfeiffer, A.; Sobottka, T.; Váncza, J.: Milkrun Vehicle Routing Approach for Shop-floor Logistics. In: *Procedia CIRP*, Jg. 7 (2013), S. 127–132.
- [Käm-2006] Kämpf, M.: Probleme der Tourenbildung. Chemnitz: TU, Fak. für Informatik, 2006.
- [Kil-2012] Kilic, H. S.; Durmusoglu, M. B.; Baskak, M.: Classification and modeling for in-plant milk-run distribution systems. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 62 (2012), 9-12, S. 1135–1146.
- [Klu-2010] Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [Lap-1993] Laporte, G.: The vehicle routing problem - An overview of exact and approximate algorithms. Rev. June 1993 Auflage. Montréal: Centre for Research on Transportation, 1993.

- [Lap-2009] Laporte, G.: Fifty Years of Vehicle Routing. In: *Transportation Science*, Jg. 43 (2009)4, S. 408–416.
- [Opi-2009] Opitz, J.: Automatische Erzeugung und Optimierung von Taktfahrplänen in Schienenverkehrsnetzen. Dissertation; Professur für Verkehrsströmungslehre, Technische Universität Dresden. Dresden, 2009.
- [Raf-1983] Raff, S.: Routing and scheduling of vehicles and crews. In: *Computers & Operations Research*, Jg. 10 (1983)2, S. 63–211.
- [Ser-1989] Serafini, P.; Ukovich, W.: A Mathematical Model for Periodic Scheduling Problems. In: *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, Jg. 2 (1989)4, S. 550–581.
- [Shu-2007] Shunji Yagyu: Das synchrone Managementsystem - Wegweiser zur Neugestaltung der Produktion auf Grundlage des synchronen Produktionssystems. Landsberg am Lech: mi-Fachverlag, 2007.
- [Suh-2007] Suhl, L.; Kliewer, N.; Steinzen, I.: eOrganisation: Service-, Prozess-, Market-Engineering - Optimierungssysteme für die Dienstplanung im ÖPNV. Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe, 2007.
- [Vai-1999] Vaidyanathan, B. S.; Matson, J. O.; Miller, D. M.; Matson Jack E.: A capacitated vehicle routing problem for just-in-time delivery. In: *IIE Transactions*, Jg. 31 (1999)11, S. 1083–1092.
- [Vit-2008] Vitali, G.: Modelle und Lösungsverfahren für die integrierte Ressourceneinsatzplanung im öffentlichen Personennahverkehr. Dissertation; Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn. Paderborn, 2008.

Dr. rer. nat. Thomas Arlt, Leiter Materialsteuerung, Versorgungssicherung und Kapazitätsmanagement Antriebssysteme, BMW Group

Adresse: BMW Group, Hufelandstraße 4, 80788 München

Dipl.-Ing. Marco Dewitz, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner, Ordinarius des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

Adresse: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching