

## **Zielgerichtete, simulationsgestützte Optimierung von Routenzugsystemen**

### ***Target-oriented, Simulation-based Optimization of Internal Milk-run Systems***

Andreas Martini, Tobias Mauksch, Ulrich Stache, Universität Siegen, Siegen  
(Germany), [Andreas.Martini@uni-siegen.de](mailto:Andreas.Martini@uni-siegen.de), [Tobias.Mauksch@uni-siegen.de](mailto:Tobias.Mauksch@uni-siegen.de),  
[Ulrich.Stache@uni-siegen.de](mailto:Ulrich.Stache@uni-siegen.de)

**Abstract:** Against the background of often sub-optimally planned resp. implemented systems, the optimization of existing internal milk-run systems promises considerable potential. There has not been any methodical support from the user's point of view yet to realize these potentials. This article describes an application-oriented and model-based method which supports the identification of expedient optimization measures considering design aspects by means of a static-deterministic simulation in Microsoft Excel. The application of the method and the Excel tool is shown by means of a case study. This shows that a target-oriented optimization of inefficiently planned resp. operated internal milk-run systems is possible by methodical and software implemented support. Moreover, there is additional research demand regarding a further development of the method as well as to develop comprehensive planning approaches considering the planning functions designing, dimensioning and scheduling.

### **1 Ausgangssituation, Motivation und Problemstellung**

In der innerbetrieblichen Produktionsversorgung finden Routenzugsysteme wegen ihrer Fähigkeit zur hochfrequenten Andienung mit kleinen Transportlosen zunehmend Verbreitung (Klug 2010). Die Planung derartiger Systeme ist eine sehr komplexe Aufgabenstellung. Sie weisen eine Vielzahl von Gestaltungsmerkmalen mit oftmals zahlreichen Ausprägungen auf, wobei deren Verträglichkeit untereinander nicht zwangsläufig gegeben ist. Weiterhin stehen weder allgemeingültige Erkenntnisse über die Wirkungsrichtungen und -intensitäten der Wahl von Gestaltungsalternativen zur Verfügung noch sind die Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen ihnen bekannt (Martini et al. 2015). Somit sind die Abschätzung der Folgen einer Auswahlentscheidung von Gestaltungsalternativen für die Zielgrößen des Systems in der Planungsphase ausgeschlossen und eine zielorientierte, systematische Planung von Routenzugsystemen nur bedingt und auf der Basis von Erfahrungen und Vermutungen möglich.

In der Literatur finden sich in den Bereichen der Produktionstechnik, des Operations Research (OR) sowie der Softwareentwicklung zahlreiche Methoden zur Planung, Bewertung und Optimierung von Routenzugsystemen (Martini et al. 2014) (Abb. 1). Die Ansätze der Produktionstechnik sind zumeist regelbasiert, bauen auf einfachen Berechnungen und vereinfachenden Annahmen auf. Das vorrangige Ziel ist die Erzeugung funktionierender Lösungen, das Finden des globalen Optimums wird als nachrangig angesehen. Die Verfahren des OR beschränken sich auf Teilprobleme, bilden diese in Form von Gleichungssystemen ab und lösen mittels gängiger linearer Optimierungsverfahren. Im Mittelpunkt steht die Methodenentwicklung, nicht das umsetzbare Ergebnis. Das Ziel der routenzugspezifischen Software besteht darin, die Dimensionierungs-, Dispositions- und Optimierungsverfahren des OR für reale Problemstellungen anwendbar zu machen, gestalterische Aspekte werden nur am Rande betrachtet.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein methodischer Ansatz fehlt, der eine ganzheitliche Bewertung und Analyse sowie eine darauf aufbauende zielgerichtete Optimierung von geplanten oder bestehenden Routenzugsystemen aus Anwendersicht ermöglicht.

## 2 Grundsätzliche Funktionsweise der Methode

Ausgangspunkt der Methode ist ein Routenzugsystem, das (zumindest planerisch) in den wesentlichen Komponenten (Fahrzeugtechnik, Behältertechnik, Route, Bereitstellorte, Pufferkapazitäten) definiert ist. Die Anwendung der Methode vollzieht sich in drei Stufen (Abb. 2):

- **Bewertungsmodell:** Berechnung von Bewertungskennzahlen des geplanten oder vorliegenden Routenzugsystems anhand eines vorgegebenen Kennzahlensystems
- **Analysemodell:** Berechnung der Wirkungen von Variationen der Eingangsparameterwerte des Bewertungsmodells und Bildung einer Rangfolge hieraus
- **Optimierungsmodell:** Bestimmung eines Optimierungspfades zur iterativen Verbesserung der Zielerreichungsgrade

Die oben genannten Berechnungen werden in einer statisch-deterministischen Simulation vorgenommen, die mit Hilfe eines selbstentwickelten Microsoft Excel-Tools ausgeführt wird. Hintergrund dieser Vorgehensweise ist, dass die zahlreichen Wechselwirkungen zwischen den Gestaltungsalternativen einer analytischen Betrachtung des Routenzugsystems im Wege stehen. So ist für ein bestehendes System beispielsweise nicht unmittelbar absehbar, welche Auswirkungen sich aus der Variation der Puffergröße an den Bereitstellorten auf die verschiedenen Zielgrößen ergeben. Anders als in der Ablaufsimulation wird im vorliegenden Fall nicht die Zeit variiert, sondern die diskreten (z. B. Anzahl Palettenplätze) und die kontinuierlichen (z. B. Fahrgeschwindigkeit) Eingangsparameterwerte. Durch systematische Parametervariationen der Eingangsgrößen des Modells erhält man fallspezifische Aussagen zu den Wirkungen hinsichtlich Richtung und Intensität.

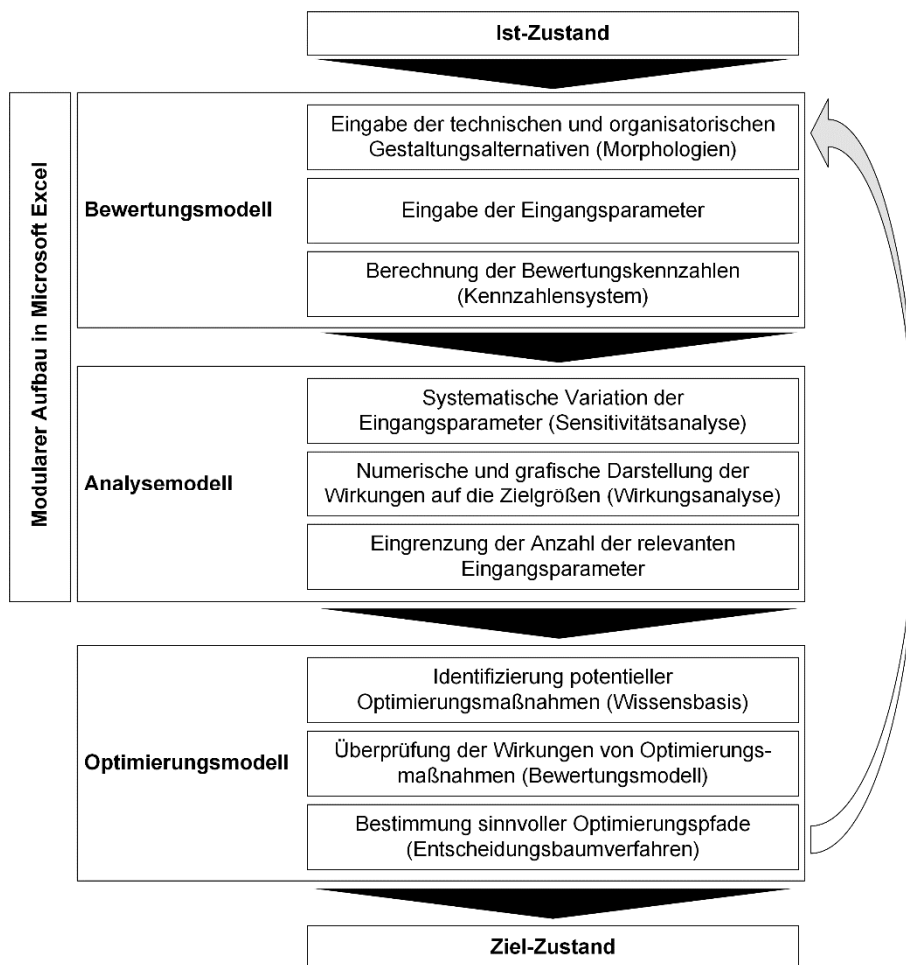
	Legende: ○ ansatzweise behandelt ● behandelt	Funktion					Transport- bedarf	Verfahren															
		Gestaltung	Dimensionierung	Disposition	Bewertung	Optimierung		konstant	variabel	Empfehlung	Wissensbasis	Berechnungsvorschrift	Exakter Algorithmus	Heuristik	Graphentheoretisches Verfahren	Naturanaloges Verfahren	Simulation	Kriterienkatalog	Kennzahlen	Sensitivitätsanalyse	Multikriterielle Bewertung	Investitionsrechnung	
Produktionstechnik	[HARRIS ET AL. 2003]	●	●				●		●	●	●												
	[COSTA ET AL. 2008]	○	●	○	○	○	●								●		○						
	[ABELLE, BRUNGS 2009]	○	○		○	●	●		●		○												
	[RAPOSO ET AL. 2009]	○	●	○	○	●	●								●		○	●					
	[DROSTE, DEUSE 2011]		○		○	○	●				○	○					○	○					
	[DROSTE 2013]	●	●	○	○	○	●		●	●	●	●				○	○	○					
	[MEINHARDT, SCHMIDT 2012]		●		○		●				●				○		○	○					
	[KRAMPS 2012]	○	●		○		●		○		●						○	○					
	[WANNER ET AL. 2012]	○	●	○	○	○	●								●		○	○	○				
	[BRUNGS 2012]	●	●		○		●		●	●	●						○	○					
	[GÜNTNER ET AL. 2012a]	●					●		●	●						○							
	[WIEGEL ET AL. 2013]		●	○	○	●	●								●		○	○					
	[GÜNTNER ET AL. 2013a]	●	●				●		●	●	●												
	[KRAUSE ET AL. 2014]	○					●		○			○											
	[KRAUSE ET AL. 2015]	○			○		●		○									○					
[KRAUSE ET AL. 2016]	○			○		●		○									○						
[VDI 2016b] & [VDI 2016c]	●	●		○		●		●	●	●							●						
Operations Research	[ELSNER 1991]		●	●	○	●	●						●	●		○					●		
	[VAIDYANATHAN ET AL. 1999]		●	●	○	●	●						●				●	●			○		
	[CIEMNOCZOLOWSKI 2007]		●	●	○	●	●	○		●			●				○	●					
	[SLY 2008]		●	●	○	●	●						●				○						
	[EMDE 2011]		●	●	○	●	●		○			●					○	●					
	[GOLZ ET AL. 2012]		●	●	○	●	●						●				○	○					
	[GOLZ 2014]		●	●	○	●	●						●				○	○					
	[KILIC ET AL. 2012]	○	●	●	○	●	●		○			●					○						
	[SATOGLU, SAHIN 2013]		●	●	○	●	●						●				○	○					
	[GYULAI ET AL. 2013]		●	●	○	●	●						●	●			○						
	[FACCIO ET AL. 2013a]		●	●	○	●	●				●				●		●	●					
	[FACCIO ET AL. 2013b]		●	●	○	●	●				●				●		●	●					
	[ALNAHAL, NOCHE 2013]		●	●	○	●	●				●	●					○						
	[ALNAHAL 2015]		●	●	○	●	●				●	●			○		●	●					
	[FATHI ET AL. 2014a]		●	●	○	●	●						●	●		○	○						
	[FATHI ET AL. 2014b]		●	●	○	●	●						●	●		○	○						
	[DEWITZ ET AL. 2014]		○	○	○	○	●				●	●			○	○							
[KLENK ET AL. 2015]		○	●	○	○	●	○					●		○	○	○	●				○		
[LIEB 2017]		○	●	○	○	●																	
Software	[DREHER ET AL. 2009]		○		○	●	●						●	●		○							
	[EßER, NÜRNBERGER 2011]		○				●	○															
	[INFORM 2013]		●	●	○	●	●				○	○					○	○					
	[WUSTMANN 2014]		○	●		○	●		●	●	●	●	●	●		○	●	○	○	○		○	
	[ALMERT 2015]		●	●		●	●							●									
	[GÜNTNER, KEUNTJE 2016]	●	●		●	○	●		●	●	●						●	●	●	●	●	●	

Abbildung 1: Vergleich bestehender Ansätze zur Planung, Bewertung und Optimierung von Routenzugsystemen (Benennung der Quellen in Martini 2017)

## 2.1 Bewertungsmodell

Als Grundlage der Berechnung müssen die Daten des jeweiligen Routenzugsystems in das Simulationstool eingegeben werden. Hierzu sind zunächst die gewählten bzw. gegebenen Gestaltungsalternativen analog zu den Morphologie-Darstellungen in der VDI 5586 Blatt 1 (2016a) zu erfassen. Anschließend sind Eingangsparameter wie Systemelemente (z. B. Transportgut, Route), Systemprozesse (z. B. Beladung, Fahrt) und weitere Eingabeparameter (z. B. Arbeitszeit, Wiederbeschaffungszeiten) einzugeben.

Um auch den Ressourcenbedarf des Routenzugsystems bestimmen zu können, ist es notwendig, eine Dimensionierung vorzunehmen. Dies erfolgt innerhalb des Bewertungsmodells automatisch. Methodisch wird dabei auf die in der VDI 5586 Blatt 2 (2016) beschriebene Vorgehensweise zurückgegriffen.



**Abbildung 2:** Lösungsansatz für die Bewertung, Analyse und Optimierung von Routenzugsystemen

Insgesamt werden im Bewertungsmodell fünf Strukturkennzahlen, 48 Kennzahlen zur Logistikleistung, 35 Wirtschaftlichkeits- und elf Qualitätskennzahlen bestimmt und dokumentiert. Diese Kennzahlen dienen im Zuge der Analyse als Zielgrößen, deren Veränderungen bei der Variation von Eingangsparameterwerten erfasst werden. Des Weiteren fungieren sie als vom Anwender auswählbare Bewertungskriterien bei der Beurteilung der Güte von Systemzuständen im Zuge der Optimierung.

## 2.2 Analysemodell

Das Analysemodell ist unmittelbar an das Bewertungsmodell angebunden. Die in das Bewertungsmodell eingegebenen und/oder berechneten Größen – und somit der geplante oder aktuelle Betriebszustand des Routenzugsystems – dienen als Ausgangswerte der Simulationsläufe im Rahmen der Sensitivitätsanalyse. In deren Verlauf werden die Eingangsparameterwerte schrittweise im Rahmen einer vorab vom Anwender zu definierenden Spannweite variiert. So wird beispielsweise bei der Untersuchung der Fahrgeschwindigkeit eine Variation in Schritten von 0,1 m/s in einem Intervall von 0,5 bis 2,0 m/s vorgenommen (Tab. 1).

*Table 1: Auszug des Test-Designs zur Variation von Eingangsparameterwerten*

Eingangsparameter	Einheit	Min-Wert	Ist-Wert	Max-Wert	Schrittweite
Fahrgeschwindigkeit	[m/s]	0,5	1,5	2,0	0,1
Routenlänge	[m]	250	500	750	50
Durchsatz je Bereitstellort	[KLT/h]*	1	5	10	1
Anzahl Anhänger je Fahrzeug	[Stk]	2	4	6	1
...	...	...	...	...	...

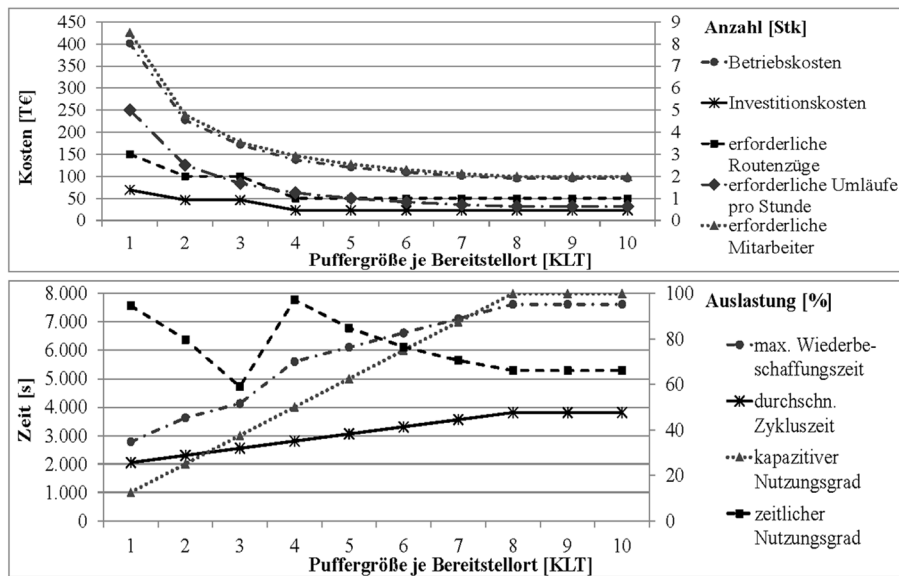
\* KLT = Kleinladungsträger

Ein analoges Beispiel zeigt Abbildung 3, die die Resultate der Variation der Puffergröße am Bereitstellort hinsichtlich von neun Zielgrößen als Liniendiagramme darstellt. Die Kostengrößen verzeichnen erwartungsgemäß mit zunehmender Puffergröße einen degressiven Verlauf. Die Wiederbeschaffungs-, die Zykluszeit wie auch der kapazitive Nutzungsgrad (mittlere Beladung) dagegen steigen. Die Anzahl der erforderlichen Umläufe sinkt zunächst stark. Der Effekt ist so stark, dass, obwohl ein Routenzug weniger benötigt wird, der zeitliche Nutzungsgrad sinkt. Bei einer Puffergröße von vier KLT je Bereitstellort hat der Effekt bereits so stark abgenommen, dass die Reduzierung der Anzahl der erforderlichen Routenzüge auf einen voll auf die zeitliche Nutzung durchschlägt und diese sprunghaft ansteigt.

Aus den Kurvenverläufen wird deutlich, dass ein Parameter, je nach Betriebspunkt, hoch wirksam oder auch von nachrangiger Bedeutung sein kann. Bezogen auf den betrachteten Einzelfall kann die Wirksamkeit einer Parameterwertveränderung sehr wohl bestimmt werden und dient als Grundlage für das weitere Vorgehen.

Insgesamt werden auf diese Weise 47 Eingangsparameterwerte variiert und 517 Systemkonfigurationen im Excel-Tool simuliert. Dies erfolgt „ceteris paribus“ („unter sonst gleichen Bedingungen“), weil dadurch die Änderungen der Zielgrößen auf die

Variation lediglich eines Eingangsparameterwerts zurückzuführen sind (Ursache-Wirkungs-Zusammenhang) (Martini et al. 2015). Das Excel-Tool benötigt für einen dieser Simulationläufe ca. zwei Minuten (CPU: Intel Core 2 Duo E8400 mit 3,0 GHz Taktfrequenz; RAM: 4 GB). Im nächsten Schritt, der Wirkungsanalyse, erfolgt eine Aggregation der 1:1-Beziehungen zwischen der Variation eines Eingangsparameterwerts und einer Zielgrößenveränderung zu den Wirkungen aller Eingangsparameter auf aggregierte Zielbündel wie beispielsweise Betriebskosten. Hierdurch wird es möglich, Wirksamkeitsrangfolgen von Gestaltungsalternativen und Eingangsparametern zu bilden und so die für die Optimierung wichtigen Größen identifizieren und die unbedeutenden ausschließen zu können.



**Abbildung 3:** Simulationsergebnis bei Variation der Puffergröße je Bereitstellort für einen KLT-Prozess

### 2.3 Optimierungsmodell

Eine Wissensbasis bietet geeignete Maßnahmen zur Ergebnisverbesserung für die im Analysemodell als aussichtsreich identifizierten Eingangsparameter an. Ist beispielsweise die Fahrgeschwindigkeit als wirksamer Eingangsparameter bestimmt worden, so enthält die Datenbasis eine Übersicht möglicher Maßnahmen zur Umsetzung der höheren Geschwindigkeit wie zum Beispiel höhere Fahrleistungen der Fahrzeugtechnik, breitere Fahrwege, Vermeidung von Kurven und Kreuzungen und Ähnliches. Bereits vor der Realisierung ist der zu erzielende Effekt aus der Wirkungsanalyse ablesbar, und es lässt sich eine Hilfestellung bei der Investitionsentscheidung gewinnen. Zur Herbeiführung der Vergleichbarkeit zwischen alternativen Routenzugvarianten mit ihren multidimensionalen Bewertungskriterien findet eine Nutzwertanalyse mit individuellen Wertfunktionen im Sinne der multiattributiven Nutzentheorie Anwendung (Keeney und Raiffa 1993). Anschließend wird anhand eines Entscheidungsbaumverfahrens (Zimmermann und Stache 2001) durch

geeignete Variantenwahl ein Schritt auf dem Pfad durch den Lösungsraum bestimmt. Damit ist die erste Iteration abgeschlossen. Das Verfahren wird fortgesetzt, bis eine gewünschte Verbesserung der Zielgrößen erreicht ist oder eine bestimmte Zahl von Iterationen ausgeführt wurde.

### 3 Fazit

Das Verfahren bietet eine systematische Vorgehensweise geplante oder bestehende Routenzugsysteme mittels Kennzahlen umfassend zu bewerten. Durch die nach dem Einsatzzweck individuell wählbaren Kennzahlen ist eine zielgerichtete Optimierung realisierbar. Der Anwender kann gezielt Maßnahmen identifizieren und diese hinsichtlich ihrer Zweckmäßigkeit beurteilen. Die Methode ermöglicht die anwendungsorientierte Optimierung von Routenzugsystemen unter Berücksichtigung individueller Ziele auch ohne Kenntnisse im Bereich des OR. Der Vergleich mit ausgewählter Literatur sowie zwei Software-Tools aus dem Bereich Produktionstechnik verdeutlicht, dass die Methode die in der Regel nur ansatzweise betrachtete Optimierung abdeckt und damit die eingangs dargelegte Forschungslücke schließt (Abb. 4).

	Funktion					Transport- bedarf	Verfahren														
	Gestaltung	Dimensionierung	Disposition	Bewertung	Optimierung		konstant	variabel	Empfehlung	Wissensbasis	Berechnungsvorschrift	Exakter Algorithmus	Heuristik	Graphentheoretisches Verfahren	Naturalogisches Verfahren	Simulation	Kriterienkatalog	Kennzahlen	Sensitivitätsanalyse	Multikriterielle Bewertung	Investitionsrechnung
[BRUNGS 2012]	●	●	○			●		●	●	●						○	○				
[DROSTE 2013]	●	●	○	○		●		●	●	●	●					○	○	○			
[WUSTMANN 2014] (Software)	○	●	●	○	●			●	●	●	●	●	●			○	●	○	○	○	
[VDI 2016b] & [VDI 2016c]	●	●	○		●			●	●	●							●				
[GÜNTNER, KEUNTJE 2016] (Software)	●	●	●	○	●			●	●	●						●	●	●	●	●	●
[MARTINI 2017]	●	●	●	●	●			●	●	●		●					●	●	●	●	○

**Abbildung 4:** Vergleich der vorliegenden Arbeit mit ausgewählter Literatur und Software aus dem Bereich Produktionstechnik

Mit Blick auf die Identifizierung von Wirkungen im Rahmen der Analyse ist die Variation mehrerer Eingangsparameterwerte des Modells anzustreben. Die vollständige Untersuchung erscheint allerdings aufgrund der Vielzahl möglicher Systemkonfigurationen nicht praktikabel. Das entwickelte Excel-Tool benötigt beispielsweise für die vollständige Berechnung der Kombinationsmöglichkeiten aus lediglich zwei Eingangsparametern bereits mehrere Stunden. Vor diesem Hintergrund erscheinen die Ansätze der statistischen Versuchsplanung (engl.: Design of Experiments (DoE)) als vielversprechend, weil lediglich eine begrenzte Anzahl der Systemkonfigurationen systematisch untersucht wird (Siebertz et al. 2010).

Ein Ansatzpunkt für die zukünftige Weiterentwicklung des Verfahrens liegt in der weitergehenden Automatisierung in den Bereichen der Auswahl und Implementierung von Verbesserungsoptionen. Aussichtsreiche Ansätze dazu finden sich in der Literatur im Gebiet der Agentensysteme (Ellinger 2016).

Weiteres Potenzial findet sich in der Verwendung dynamischer Dispositionsverfahren. Eine erfolgreiche Umsetzung hätte weitreichende Auswirkungen und müsste bereits bei der Gestaltung und Dimensionierung berücksichtigt werden. Auch hier finden sich erste erfolgversprechende Ansätze in artverwandten Feldern (Mirlach et al. 2013).

## Literatur

- Ellinger, M.: Beitrag zur agentenbasierten Konzeptplanung von Kommissioniersystemen. In: ten Hompel, M. (Hrsg.): Logistik für die Praxis,. Dortmund: Praxiswissen 2015.
- Keeney, R.; Raiffa, H.: Decisions with multiple objectives - Preferences and value tradeoffs. New York: Cambridge University Press 1993.
- Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Berlin, Heidelberg: Springer 2010.
- Martini, A.: Anwendungsorientierte und modellgestützte Bewertung, Analyse und Optimierung von Routenzugsystemen. Dissertation (Promotionsverfahren eröffnet). Siegen: Universität Siegen 2017.
- Martini, A.; Rohe, A.; Stache, U.; Trenker, F.: Einflussfaktoren in Routenzugsystemen. wt Werkstattstechnik online 105 (2015) 1/2, S. 65-71.
- Martini, A.; Stache, U.; Trenker, F.: Planung von Routenzugsystemen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 1-2, S. 50-55.
- Mirlach, M.; Günthner, W.; Ulbrich, A.; Beckhaus, K.: Auftragszuteilungsverfahren für Staplerleitsysteme. VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.): 17. Flurfördertagung – VDI-Berichte Nr. 2201, 2013, S. 67-68.
- Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE). Heidelberg: Springer 2010.
- VDI 5586 Blatt 1: Routenzugsysteme – Grundlagen, Gestaltung und Praxisbeispiele. Berlin: Beuth- 2016.
- VDI 5586 Blatt 2: Routenzugsysteme – Planung und Dimensionierung. Berlin: Beuth- 2016.
- Zimmermann, W.; Stache, U.: Operations Research - Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung. 10. Aufl., München: Oldenbourg 2001.