

KATHOLISCHE UNIVERSITÄT  
EICHSTÄTT-INGOLSTADT  
Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät



Zusammenfassung der Einzelbeiträge der kumulativen Dissertation  
gemäß §5 Abs. 3 S. 3 der Promotionsordnung der  
Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Katholischen Universität  
Eichstätt-Ingolstadt vom 1. Oktober 2015

**Integrated Order Picking and Vehicle Routing –  
Problems, Insights, and Solution Approaches**

(“Integrative Kommissionier- und Tourenplanung –  
Problemstellungen, Einblicke und Lösungsverfahren”)

Daniel Schubert

Referent  
Prof. Dr. Heinrich Kuhn

Korreferent  
Prof. Dr. Alexander Hübner

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Juli 2020

# Zusammenfassung

## Überblick

Die vorliegende kumulative Dissertation thematisiert die integrative Kommissionier- und Tourenplanung und stellt Lösungsverfahren aus dem Bereich des Operations Research für verschiedene praxisorientierte Problemstellungen vor. Die Dissertation umfasst die nachfolgenden vier Beiträge:

1. Schubert, D. (2020): Integrated Order Picking and Vehicle Routing Operations – Literature Review and Further Research Opportunities. *Veröffentlicht auf SSRN mit ID 3631748.*
2. Kuhn, H., Schubert, D. und Holzapfel, A. (2020): Integrated Order Batching and Vehicle Routing Operations in Grocery Retail – A General Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm. In *European Journal of Operational Research*, zur Veröffentlichung akzeptierter Beitrag.
3. Schubert, D., Kuhn, H. und Holzapfel, A. (2020): Same-Day Deliveries in Omnichannel Retail – Integrated Order Picking and Vehicle Routing with Vehicle-Site Dependencies. In *Naval Research Logistics*, zur Veröffentlichung akzeptierter Beitrag.
4. Ostermeier, M., Holzapfel, A., Kuhn, H. und Schubert, D. (2020): Integrated Zone Picking and Vehicle Routing Operations with Restricted Intermediate Storage. *Veröffentlicht auf SSRN mit ID 3663157.*

Die Kommissionierung und Auslieferung sind fester Bestandteil vieler Lieferketten, insbesondere jener des stationären Einzelhandels und des Onlinehandels. Sie stellen dort zumeist nicht wertschöpfende, nachgelagerte Prozesse dar, die jedoch für den größten Teil der Logistikkosten verantwortlich sind. Entsprechend vielseitig und detailliert thematisiert die wissenschaftliche Literatur sowohl die Kommissionierung als auch die Tourenplanung. Eine gesamtheitliche Betrachtung beider Prozesse erfolgt dabei in überwiegender Mehrheit nur ungenügend. Die wechselseitigen Auswirkungen auf der operativen Planungsebene werden nur beschränkt berücksichtigt, da die Prozesse zumeist isoliert betrachtet werden oder eine sequentielle Planung vorausgesetzt wird. Diese Arbeit untersucht verschiedene Kommissionier- und Tourenplanungsprobleme und zeigt die Vorteile einer integrativen Planung auf.

---

## Beitrag 1

### **“Integrated Order Picking and Vehicle Routing Operations – Literature Review and Further Research Opportunities.”**

(Schubert, 2020)

Die integrative Kommissionier- und Tourenplanung stellt einen noch jungen Forschungszweig im Bereich des Operations Research dar. Die erste diesem Bereich zuzuordnende Studie datiert nur wenige Jahre zurück (Schmid et al., 2013), während sowohl die Kommissionierung als auch die Tourenplanung bereits seit mehreren Jahrzehnten als jeweils individuelle Problemstellungen im Fokus stehen. Die beiden Forschungsbereiche zeichnen sich zudem durch eine breite Vielfalt von Problemvariationen aus, welche einen generischen Ansatz einer gesamtheitlichen Planung erschweren. Dies spiegelt sich auch in der Divergenz der untersuchten Problemstellungen wieder, für die ein integrativer Lösungsansatz entwickelt wurde. Diese orientieren sich vorwiegend an Realproblemstellungen. Verschiedene Restriktionen, wie ein sehr kurzer Planungshorizont oder ein beschränktes Zwischenlager verhindern eine Entkoppelung der Kommissionierung und Tourenplanung.

Schubert (2020) reflektiert die aktuell untersuchten Problemstellungen, fasst die wesentlichen Resultate der Studien zusammen und gibt eine Übersicht über die verwendeten Methoden. Klassische Lösungsansätze, welche eine sequentielle Planung vorschlagen, werden in der Literatur integrativen Lösungsverfahren gegenübergestellt. In den bisherigen Studien führt eine integrative Planung zu durchschnittlich geringeren Kosten, einer effizienteren Ressourcennutzung oder geringeren Verspätungen bei der Zustellung.

Abschließend zeigt Schubert (2020) verschiedene Möglichkeiten, im Forschungszweig zur integrativen Kommissionier- und Tourenplanung Fortschritte zu erzielen. Weitere Forschungsmöglichkeiten folgen aus Realrestriktionen, die bisher nicht berücksichtigt wurden, aus Vereinfachungen, welche zur Schaffung eines grundlegenden Verständnis für die Planungsprobleme getroffen wurden, sowie aus der Erweiterung hinzu in bisherigen Studien nicht abbildbaren Realproblemen.

## Beitrag 2

### **“Integrated Order Batching and Vehicle Routing Operations in Grocery Retail – A General Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm.”**

(Kuhn et al., 2020)

Die Belieferung von Micro-Stores stellt Lebensmitteleinzelhändler vor spezielle Herausforderungen, denn sowohl die Verkaufsfläche als auch die Lagerräume der Micro-Stores sind sehr klein. Sicherheitsbestände können demzufolge nur sehr beschränkt gehalten werden, sodass eine hohe Liefertermintreue notwendig ist, um den Kunden einen hohen Servicegrad zu bieten. Andererseits ist eine hohe Lieferfrequenz mit kleinen Lieferumfängen notwendig, um die Nachfrage der Micro-Stores zu erfüllen.

Die Belieferung von Micro-Store-Aufträgen erfolgt ausgehend von Distributionszentren.

---

Dort führt die Kommissionierung von kleinen Auftragsvolumen zu Effizienzverlusten, da die Prozesse auf großvolumige Supermarktaufträge ausgelegt sind. Mithilfe des sogenannten Order Batchings – dem Zusammenfassen von mehreren Aufträgen zu einem Kommissionierauftrag – können diese Effizienzverluste kompensiert und die für den gesamten Kommissionierprozess notwendige Zeit reduziert werden. Für die Tourenplanung ist von Interesse, wann die Aufträge der Kunden im Distributionszentrum bereitgestellt werden, um eine möglichst termingerechte Zustellung zu erzielen. Sowohl das Zusammenstellen der Kommissionieraufträge als auch deren Zuordnung zu Kommissionierern beeinflusst die Bereitstellungszeiten der Kundenaufträge und wirkt sich somit auf die Tourenplanung und die Qualität des Tourenplans aus.

Kuhn et al. (2020) greift das Planungsproblem der Micro-Store-Belieferungen auf und untersucht verschiedene Lösungskonzepte. Für eine integrative Lösung der Problemstellung wird eine Weiterentwicklung der Adaptive Large Neighborhood Search-Metaheuristik (ALNS) präsentiert – die General Adaptive Large Neighborhood Search (GALNS). Ein sequentielles Lösungsverfahren wird aus der Praxis entlehnt. Beide Lösungsverfahren werden in zwei Varianten genutzt, welche das Order Batching entweder erlauben oder verbieten. Das Berücksichtigen des Order Batching ermöglicht jeweils eine Verringerung der Gesamtverspätung von ca. 55%. Ein sequentielles Lösen ohne Order Batching führt zu der geringsten Lösungsqualität, während das integrative Lösen mit einer Berücksichtigung des Order Batchings zu der höchsten Lösungsqualität führt.

Die Lösungsqualität der GALNS wird außerdem mit einer vergleichbar entwickelten ALNS verglichen. Für 96% der generierten Testinstanzen erzielt die GALNS eine höhere Lösungsqualität. Die durchschnittliche Verspätung sinkt um knapp 30%. Gegenüber dem aus der Praxis entlehnten sequentiellen Lösungsansatz konnte die Gesamtverspätung sogar um 57% reduziert werden.

### Beitrag 3

#### **“Same-Day Deliveries in Omnichannel Retail – Integrated Order Picking and Vehicle Routing with Vehicle-Site Dependencies.”**

(Schubert et al., 2020)

Einzelhändler müssen sich insbesondere in kompetitiven Märkten mit den schon heute sehr hohen aber dennoch weiter steigenden Kundenerwartungen auseinandersetzen. Typischerweise erwarten Kunden Multi- und Omnichannel-Handelsangebote in Verbindung mit sehr kurzen Lieferzeiten. Die Zustellung der Ware am Folgetag der Bestellung (Next-Day-Zustellungen) stellt einen bereits weitverbreiteten Lieferstandard dar. Um Wettbewerbsvorteile zu erzielen, sind Einzelhändler bestrebt, die Ware noch am Tag der Bestellung den Kunden zuzustellen. Bei dieser Lieferoption (Same-Day-Zustellungen) liegen zwischen der Aufgabe der Bestellung und der Ankunft der Ware beim Kunden nur wenige Stunden. Eine weitere Kundenerwartung sind mit der Zustellung der Ware verbundene

---

Services, wie beispielsweise der Anschluss oder Einbau von Haushaltsgeräten. Einzelhändler zögern Same-Day-Optionen anzubieten, weil sie zumeist mit hohen Aufwendungen verbunden sind.

Schubert et al. (2020) befasst sich mit Same-Day-Lieferungen für Haushaltsgroßgeräte ausgehend von Distributionszentren. Die Kundenaufträge können aufgrund der Beschaffenheit der Großgeräte nur einzeln kommissioniert werden. Die Zustellung nachgefragten Artikel erfolgt stets zum Bestimmungsort, kann jedoch auch mit deren Anschluss oder Einbau erfolgen. Die daraus resultierenden Servicetypen benötigen spezielle Qualifikationen der Zusteller und ein entsprechendes Equipment. Zudem sind Einzelhändler einer stark schwankenden Nachfrage ausgesetzt, sodass der tägliche Ressourcenbedarf in der Kommissionierung und für die Bereitstellung von Fahrzeugen eines speziellen Servicetyps ebenso variiert. Schubert et al. (2020) präsentiert ein heuristisches Lösungsverfahren, welches die Ressourcenbereitstellung hinsichtlich der Kommissionierer und der Fahrzeuge eines speziellen Servicetyps, die Auftragszuordnung und Sequenzierung in der Kommissionierung sowie die Erstellung eines Tourenplans integrativ ermöglicht. Das integrative Lösungsverfahren reduziert die entscheidungsrelevanten Kosten um durchschnittlich 8,62% und bis zu 19,77% verglichen mit einem sequentiellen Lösungsverfahren, wie es typischerweise verwendet wird. Weiterhin analysiert Schubert et al. (2020) verschiedene Szenarien, in denen Same-Day-Zustellungen angeboten werden könnten. Der Verzicht auf kundenspezifische Zeitfenster zugunsten eines für alle Kunden gültigen spätestmöglichen Liefertermins führt zu einer Reduzierung der relevanten Kosten von mehr als 18%. Wird zugunsten einer vereinfachten Planung nur ein Fahrzeugtyp verwendet, welcher alle Servicetypen abbilden kann, erhöhen sich die entscheidungsrelevanten Kosten um ca. 5%. Eine Fallstudie mit einem der größten Einzelhändler Deutschlands belegt die obigen Resultate. Das integrative Lösungsverfahren führt zu einer Kosteneinsparung von mehr als 18% verglichen mit der Lösungsstrategie des Einzelhändlers.

## Beitrag 4

### **“Integrated Zone Picking and Vehicle Routing Operations with Restricted Intermediate Storage.”**

(Ostermeier et al., 2020)

Das Angebotsspektrum großer Supermärkte setzt sich aus verschiedenen Produktsegmenten zusammen. Diese Segmente bilden verschiedene Temperaturklassen ab, für die jeweils spezifische Regularien gelten. Die Distributionszentren, die für die Belieferung der Supermärkte verantwortlich sind, stehen vor der Herausforderung, die Anforderungen an die jeweiligen Temperaturklassen zu berücksichtigen. Deswegen erfolgt die Lagerung der die Produktsegmente in unterschiedlichen Zonen des Distributionszentrum und die Auslieferung der Ware mithilfe spezieller Fahrzeuge oder Kühlboxen.

Die tägliche Nachfrage großer Supermärkte beinhaltet Produkte mehrerer Segmente.

---

Aus Sicht des Distributionszentrums stellt jedes Segment innerhalb eines Auftrags einen Teilauftrag dar. Die Zonen, in denen die Produktsegmente lagern, sind räumlich getrennt und weisen erhebliche Temperaturunterschiede auf. Die Kommissionierung der Teilaufträge erfolgt also getrennt voneinander, sodass sie im Anschluss an die Kommissionierung zusammenzuführen sind. Dies geschieht in einem Zwischenlager, welches das Bindeglied zwischen der Kommissionierung und Auslieferung darstellt. In den Beiträgen 2 und 3 wird ein hinreichend großes Zwischenlager angenommen. Beitrag 4 führt zusätzlich eine Kapazitätsbeschränkung des Zwischenlagers ein. Weiterhin setzt die bisherige Literatur zur integrativen Kommissionier- und Tourenplanung eine vollständige Verfügbarkeit der Fahrzeugflotte zu Beginn des Planungshorizonts voraus. Mit dieser vereinfachenden Annahme bricht Ostermeier et al. (2020) und berücksichtigt die Ankunftszeiten der Fahrzeuge am Distributionszentrum und somit ihre frühestmögliche Nutzbarkeit.

Ostermeier et al. (2020) greift das gesamtheitliche Planungsproblem der Supermarktbelieferung auf. Zur Lösung des Problems stellt der Beitrag ein integratives, heuristisches Lösungsverfahren vor, welches zonenübergreifend Kommissionierpläne erstellt, die Kapazität des Zwischenlagers sowie die Fahrzeugverfügbarkeiten berücksichtigt und klassische Tourenplanungsentscheidungen trifft. Die Gesamtheit der Entscheidungen ist dabei so zu treffen, dass Kostenfunktion minimiert wird, die Verspätungen bei der Belieferung, Fahrzeugnutzungen sowie die gefahrene Strecke berücksichtigt. Für 6480 simulierten Szenarien führt das integrierte Lösungsverfahren zu knapp 60% niedrigeren Kosten als ein aus der Praxis entlehnter Lösungsansatz und reduziert die Kosten eines iterativen sequentiellen Ansatzes um ca. 15%. Die Verfügbarkeit der Fahrzeuge zu Beginn des Planungshorizontes führt zu ca. 11% niedrigeren Kosten verglichen mit einer Verfügbarkeit innerhalb der ersten 50% des Planungshorizonts. Eine Erweiterung des Zwischenlagers von 25% des Volumens der täglichen Nachfrage auf 75%, führt zu Einsparungspotentialen von mehr als 50% der entscheidungsrelevanten Kosten. Für die simulierten Szenarien führte ein zu kleines Zwischenlager (25% des Tagesvolumens) außerdem zu langen Wartezeiten von mehreren Stunden in der Kommissionierung, welche für die größte Zwischenlagergröße (75% des täglichen Volumens) in den meisten Fällen nicht auftraten.

## Fazit

Diese Dissertation befasst sich mit Herausforderungen und Möglichkeiten einer integrativen Planung von Kommissionier- und Tourenplanungsproblemen. Die Arbeit identifiziert Zusammenhänge und wechselseitige Abhängigkeiten für praxisorientierten Problemstellungen und verschiedene Zielstellungen. Weiterhin stellt sie geeignete Algorithmen vor, die eine integrative Planung ermöglichen und quantifiziert die dadurch erzielbaren Vorteile gegenüber klassischen Lösungsverfahren.

# Abstracts

## **Integrated Order Picking and Vehicle Routing Operations – Literature Review and Further Research Opportunities.**

Schubert, D. (2020)

*Abstract* In modern supply chains, customers expect a high level of service, which results in short delivery times and improved service offerings through retailers. The resulting pressure on supply chains requires a precisely coordinated scheduling of successive processes. Even though a multitude of publications on integrated production and delivery problems already exist, the research field of integrated order picking and vehicle routing is relatively young. Due to its practical relevance and theoretical challenge several studies have been published in recent years that focus on the field of integrated order picking and vehicle routing. This paper provides an overview of existing papers, their main findings, and further research opportunities to integrated order picking and vehicle routing problems.

---

## **Integrated Order Batching and Vehicle Routing Operations in Grocery Retail – A General Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm.**

Kuhn, H., Schubert, D. und Holzapfel, A. (2020)

*Abstract* In recent years, established and well-known grocery retailers have increasingly been investing in the business of micro stores and petrol station shops. Supplying these stores with perishable and durable goods leads to noticeable logistics challenges for the retailers. Since the total sales volumes of these shops are typically low and the respective sales areas are very limited, highly frequent deliveries of small sizes are required. These noticeably affect a number of operational planning problems. In the warehouse, the items requested have to be collected in small order sizes. In order to achieve efficient picking operations, orders are therefore combined into larger picking orders, i.e., batches. Afterwards the orders have to be delivered to the stores at high frequency. In practice, all the planning problems mentioned are heavily interconnected due to the short planning horizon.

Despite the practical relevance, order batching, order picking and delivery operations have not so far been investigated as an integrative planning problem. This paper therefore presents a novel modeling and solution approach to solve practically relevant problem sizes. The combinatorial complexity of the problem requires a heuristic solution approach. We propose an extension of the well-known Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) metaheuristic that we call General ALNS (GALNS), and show that a GALNS approach outperforms a similar ALNS algorithm in 96.35% of the problem instances generated. Managerial insights from general problem data and a case study with a large German grocery retailer support the applicability of the modeling and solution approach suggested in retail practice.



---

## Same-Day Deliveries in Omnichannel Retail – Integrated Order Picking and Vehicle Routing with Vehicle-Site Dependencies.

Schubert, D., Kuhn, H. und Holzapfel, A. (2020)

*Abstract* Nowadays, next-day deliveries are the commonly offered shipment standard in online retailing of consumer goods. Retailers, however, are investigating whether same-day deliveries can be offered to online and store customers in order to cope with increasing customer requirements.

The present paper considers an integrated order picking and vehicle routing problem assuming same-day delivery in the area of omnichannel retailing. In this context the paper focuses on the picking and delivery process of large durable consumer goods, e.g., consumer electronics and home appliances with the possibility of associated installation services at the customer's home as well as possible store deliveries for click-and-collect customers and short-term replenishment of store inventory. We develop a decision support model and a general variable neighborhood search based algorithm that tackle the problem described by considering the tradeoff between picking and delivery costs while ensuring customers' delivery time windows.

The results show the benefits of an integrated solution approach, which amount to approx. 13% total cost savings on average, compared to a sequential approach typically applied in practice. A case study from an internationally operating omnichannel retailer demonstrates the advantages and the applicability of the modeling and solution approach suggested in retail practice.

---

## **Integrated Zone Picking and Vehicle Routing Operations with Restricted Intermediate Storage.**

Ostermeier, M., Holzapfel, A., Kuhn, H. und Schubert, D. (2020)

*Abstract* The competitiveness of a retailer is highly dependent on an efficient distribution system. This is especially true for the supply of stores from distribution centers. Stores ask for high flexibility when it comes to their supply. This means that fast order processing is essential. Order processing affects different subsystems at the distribution center: Orders are picked in multiple picking zones, transferred to intermediate storage, and delivered via dedicated tours. These processing steps are highly interdependent. The schedule for picking needs to be synchronized with the routing decisions to ensure availability of the delivery orders at the DC's loading docks when their associated tours are scheduled. Concurrently, intermediate storage represents a bottleneck as capacities for order storage are limited. The simultaneous planning of picking and routing operations with restricted intermediate storage is therefore relevant for retail practice but has not so far been considered within an integrated planning approach.

Our work addresses this task and discusses an integrated zone picking and vehicle routing problem with restricted intermediate storage. We present a comprehensive model formulation and introduce a general variable neighborhood search for simultaneous consideration of the given planning stages. We also present two alternative sequential approaches that are motivated by the prevailing planning situation in industry. Numerical experiments that we have conducted show the need for an integrated planning approach to obtain practicable results. Further, we identify the impact of the main problem characteristics on the overall planning problem and provide valuable insights for the application of this approach in industry.

# Literatur

- Kuhn, H., Schubert, D., Holzapfel, A., 2020. Integrated order batching and vehicle routing – A general adaptive large neighborhood search algorithm. *European Journal of Operational Research*, accepted for publication. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.03.075>.
- Ostermeier, M., Holzapfel, A., Kuhn, H., Schubert, D., 2020. Integrated zone picking and delivery operations in grocery retail. Working paper, Catholic University of Eichstaett-Ingolstadt, Chair of Supply Chain Management & Operations. Published on SSRN with ID 3663157.
- Schmid, V., Doerner, K.F., Laporte, G., 2013. Rich routing problems arising in supply chain management. *European Journal of Operational Research* 224, 435–448.
- Schubert, D., 2020. Integrated order picking and vehicle routing operations – Literature review and further research opportunities. Working paper, Catholic University of Eichstaett-Ingolstadt, Chair of Supply Chain Management & Operations. Published on SSRN with ID 3631748.
- Schubert, D., Kuhn, H., Holzapfel, A., 2020. Same-day deliveries in omni-channel retail – Integrated order picking and vehicle routing with vehicle-site dependencies. *Naval Research Logistics*. Accepted for publication.