

# Zusammenfassung

Die Anbieter von Kurier-, Express- und Paketdiensten (KEP) haben in den letzten Jahren stark von steigenden Sendungsmengen durch das anhaltende Wachstum des Onlinehandels profitiert. Aufgrund der aktuellen Anforderungen an logistische Dienstleistungen, wie Konkurrenz- und Kostendruck sowie insbesondere dem globalen Klimawandel, stehen die Anbieter von KEP-Leistungen nun zunehmend vor der Herausforderung, ihre Lieferketten ökonomisch und ökologisch nachhaltig zu gestalten. Zur effizienten Abwicklung der Zustellung betreiben die Anbieter von KEP-Leistungen komplexe logistische Netzwerke. Vor allem die letzte Meile der Paketzustellung, die über 50 % der Prozesskosten in der Transportkette zum Kunden verursacht, steht zunehmend im Fokus. Dabei sind insbesondere die Auswahl von geeigneten Standorten, die Gestaltung der Zustellprozesse, die Zusammenstellung des Fuhrparks sowie die Planung der Touren anspruchsvolle Aufgaben, die geeignete Planungswerkzeuge erfordern.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Ansatz für die Modellierung der Letzten-Meile-Zustellung sowie der für die Abwicklung der Zustellung zu treffenden Planungsentscheidungen vorgestellt. Um den Modellierungsaufwand für eine praxisnahe Anwendung zu reduzieren, erfolgt der Modellaufbau automatisiert auf Basis eines zugrundeliegenden Datenmodells. Die Modellarchitektur des Werkzeuges ist an das agentenbasierte Modellierungsparadigma (ABM) angelegt und umfasst unterschiedliche Softwareagenten, mit denen die wesentlichen Akteure und Komponenten der Letzte-Meile-Zustellung abgebildet werden. Diese sind in eine Simulationsumgebung eingebunden, in der die Materialfluss- und Informationsprozesse ereignisdiskret durchlaufen werden. Zudem werden Planungs- und Steuerungsentscheidungen des Zustellprozesses innerhalb des Modells gelöst, was durch die Integration von problemspezifischen Lösungsverfahren in die Simulation ermöglicht wird. Die Umsetzung erfolgt mit dem Simulationswerkzeug *AnyLogic*. Die Optimierung der Zustellfahrten wird im Rahmen der Tourenplanung als „Traveling-salesperson-problem with precedence constraints“ (TSPPC) modelliert und mithilfe des Solvers *Gurobi* gelöst. Die Konzeption und Umsetzung der Modellierungsmethode erfolgt unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen an den Letzte-Meile-Zustellprozess, die sich aus der jeweiligen Netzwerkconfiguration und den individuellen Abläufen der KEP-Dienstleister ableiten. Darüber hinaus umfassen die entwickelten Komponenten die Eingangsdatenverarbeitung, eine Datenbank zur Informationsverwaltung, ein Auswertungsmodul zur Berechnung von Kennzahlen sowie ein Optimierungsmodul.

Die Evaluation der Modellierungsmethode erfolgt anhand eines praktischen Anwendungsszenarios, welches eine Woche der KEP-Zustellung in Dortmund umfasst und die konventionelle Zustellung im gesamten Stadtgebiet abbildet. Die Untersuchung zeigt, dass die entwickelte Modellierungsmethode die Materialflüsse und Prozessabläufe der Paketzustellung auf der letzten Meile realistisch abbildet. Die zeitliche und räumliche Verteilung der Sendungen auf das Stadtgebiet von Dortmund wird im Vergleich zu den verwendeten Ist-Daten valide nachgebildet. Die Methode ist zudem in der Lage, eine große Menge an Touren in einer praktikablen Rechenlaufzeit von wenigen Stunden zu berechnen und erfüllt somit eine zentrale Bedingung für den Einsatz in einer tagesaktuellen Planung. Ausgehend von der Ist-Situation lassen sich mit geringem zusätzlichem Aufwand weitere Szenarien erstellen und anhand von Kennzahlen, die im Rahmen der Simulation erhoben werden, evaluieren. Dies wird am Beispiel einer Untersuchung von alternativen Fahrzeugvarianten wie Lastenfahrrädern und elektrischen Fahrzeugen belegt, da die

Auswertung der Szenarien die Vor- und Nachteile der untersuchten Fahrzeugtypen valide abbildet. Somit ist die Modellierungsmethode ein effektives Werkzeug, um die Planung und Steuerung der letzten Meile zu unterstützen.

# Summary

In recent years, providers of courier, express and parcel services (CEP) have benefited greatly from rising shipment volumes driven by the continued growth of online retailing. Due to current demands on logistics services, such as cost pressure and in particular global climate change, CEP service providers are now increasingly faced with the challenge of making their supply chains economically and ecologically sustainable. To handle deliveries efficiently, CEP service providers operate complex logistics networks. In particular, the last mile of parcel delivery, which accounts for over 50 % of the process costs in the transport chain to the customer, is increasingly in focus. In particular, the selection of suitable locations for logistics facilities, the design of the delivery processes, the composition of the vehicle fleet as well as the planning of the tours are challenging tasks that require suitable planning tools.

This thesis presents an approach for modeling last-mile delivery and the operational planning decisions that have to be addressed in order to handle delivery. To reduce the modeling effort for a practical application, the model construction is automated based on an underlying data model. The model architecture of the tool is based on the agent-based modeling (ABM) paradigm and includes different software agents that are used to represent the main actors and components of last-mile delivery. These are integrated into a simulation environment in which the material flow and information are processed in a discrete-event manner. In addition, planning and control decisions of the delivery process are solved within the model, which is facilitated by the integration of problem-specific solution methods into the simulation. The implementation is realized with the simulation tool *AnyLogic*. The optimization of the delivery tours is modeled as a "traveling-salesperson-problem with precedence constraints"(TSPPC) in the context of route planning and solved using the solver *Gurobi*. The design and implementation of the modeling method takes into account the specific requirements of the last-mile delivery process, which are derived from the respective network configuration and the individual processes of the CEP service providers. In addition, the developed components include input data processing, a database for information management, an evaluation module for calculating key performance indicators, and an optimization module.

The evaluation of the modeling method is based on a practical application scenario, which covers one week of CEP delivery in Dortmund and depicts conventional delivery in the entire city area. The investigation shows that the developed modeling method correctly represents the material flows and process flows of parcel delivery on the last mile. The temporal and spatial distribution of shipments over the urban area of Dortmund is validly reproduced in comparison to the actual data. The method is also capable of calculating a large number of tours in a practicable calculation time of a few hours and thus fulfills a key condition for use in daily planning. Based on the actual situation, further scenarios can be created with little additional effort and evaluated on the basis of key figures computed during the simulation. This is demonstrated by the example of an investigation of alternative vehicle types such as cargo bikes and electric vehicles, since the evaluation of the scenarios validly depicts the advantages and disadvantages of the vehicle types investigated. Thus, the modeling method is an effective tool to support the planning and management of last-mile deliveries.