Modellierung, Optimierung und Simulation von Umschlagprozessen in Binnenterminals

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des Grades
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Felix Hofmann

2016

Referent: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Berkhahn

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Markus König

Tag der Promotion: 25.11.2016

Felix Hofmann

Modellierung, Optimierung und Simulation von Umschlagprozessen in Binnenterminals

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4980-0

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Zur Bewältigung der steigenden Gütermenge im Kombinierten Verkehr sind in den kommenden Jahren sowohl Baumaßnahmen als auch eine Verbesserung der bestehenden Logistik notwendig. Computergestützte Optimierung und Simulation sollten in Planungs- und Betriebsphase von Terminals genutzt werden, um Konzepte vorab zu testen, Kapazitäten optimal zu nutzen und Kosten zu minimieren. Zu diesem Zweck wurde ein generisches Modell entwickelt und erfolgreich in der Praxis eingesetzt.

Um die Abläufe eines Terminals realistisch abzubilden, ist eine integrierte Prozess- und Ablaufplanung notwendig, eine Kopplung von Routing und Scheduling. Das resultierende Optimierungsproblem ist so komplex, dass keine geschlossene Lösung auf höchster Detailstufe möglich ist. Daher wird das Problem zerlegt und durch angepasste Heuristiken gelöst. Die Dekomposition erfolgt durch einen Multiskalen-Ansatz mit zwei verschieden detaillierten Ebenen: eine makroskopische (grobe) und eine mikroskopische (feine) Ebene.

Auf makroskopischer Ebene findet für jede Ladeeinheit eine dynamische Routensuche durch einen angepassten Dijkstra-Algorithmus in einem zeitexpandierten Netzwerk statt. Ein iteratives Verfahren der Flussumlegung steuert diese Suchen hinsichtlich des Systemoptimums. Auf mikroskopischer Ebene wird der Lösungsraum durch einen Rolling-Horizon-Ansatz beschränkt. Je nach Transportsystem und Anforderungen werden unterschiedliche Optimierungsverfahren eingesetzt.

Des Weiteren wird die Unsicherheit der Eingangsdaten berücksichtigt. Durch multiple Simulationsläufe mit stochastisch veränderten Parametern werden der Einfluss der Unsicherheit und die Auswirkungen möglicher Maßnahmen untersucht. Als Maßnahmen werden robuste Planung und Reaktion durch einen Online-Algorithmus gewählt.

Abschließend werden die Terminals Hamburg-Billwerder und der geplante Megahub Lehrte mit optionaler Längsförderanlage simuliert und analysiert. Nach der Justierung und Validierung des Modells anhand von Realdaten aus Hamburg, werden die Parameter simulationsbasiert optimiert. Unter anderem werden die maximale Leistung und die minimalen Kosten der Terminals untersucht. Optimierungspotenzial gegenüber den Realdaten wird aufgezeigt.

Die Rechenzeit eines Simulationslaufs liegt im Bereich von wenigen Sekunden. Damit ist eine Unterstützung oder Steuerung des Betriebsablaufs in Echtzeit möglich. Die Abläufe können in 2D und in 3D visualisiert werden.

Schlüsselwörter: Terminal, Modellierung, Optimierung, Simulation, Routing, Scheduling, Multiskalen-Ansatz, Unsicherheit.

Abstract

To handle the rising amount of intermodal traffic in the upcoming years, additional infrastructure provision is necessary as well as the improvement of existing logistic processes. Computer-aided optimisation and simulation should be used in the planning and the operating phase of terminals in order to test new concepts in advance, to optimise the use of capacities, or to minimise costs. For this purpose, a generic model was developed and successfully applied in practice.

For a realistic representation of the processes in a terminal, routing and scheduling methods have to be integrated. The resulting optimisation problem is very complex. A holistic solution with the maximum level of detail is not possible. Therefore, the problem is decomposed and solved by adapted heuristics. The decomposition is accomplished by a multi-scale approach with two levels of detail: a macroscopic (rough) and a microscopic (fine) level.

On the macroscopic level, an adapted Dijkstra algorithm performs a dynamic routing in a time-expanded network for every load unit. The routing is controlled by an iterative method of flow relocation in order to approximate the system optimum. On the microscopic level, the solution space is reduced by a rolling horizon approach. According to the transportation system and the requirements, different optimisation methods are used.

Furthermore, the uncertainty of the input data is considered. Robust scheduling and the reaction by an online algorithm are applied. The influence of the uncertainty and of the actions taken are analysed by means of simulation with multiple simulation runs.

Finally, the terminals in Hamburg-Billwerder and the planned Megahub Lehrte with an optional sorting system are simulated and analysed. After adjusting and validating the model with real data from Hamburg, the parameters are optimised based on simulation results. The peak performance and minimum costs of the terminals are analysed. Possible improvement compared to reality is demonstrated.

The performance of the model is good: A simulation run requires only a few seconds. Thus, the terminal operation can be supported or controlled in real time. A visualisation in 2D or 3D is possible.

keywords: terminal, modelling, optimisation, simulation, routing, scheduling, multi-scale approach, uncertainty.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung i

Abstract ii

1 Einleitung 1
- 1.1 Situation und Motivation . . . 1
- 1.2 Abgrenzung und Ziele . . . 2
- 1.3 Anforderungen an das Modell . . . 5
- 1.4 Stand der Forschung . . . 6
- 1.5 Lösungskonzept und Aufbau der Arbeit . . . 10

2 Modellierung 13
- 2.1 Terminals . . . 14
  - 2.1.1 Infrastruktur und Geometrie eines Terminals . . . 15
  - 2.1.2 Belastung eines Terminals . . . 16
  - 2.1.3 Leistungsfähigkeit und Auslastung eines Terminals . . . 19
- 2.2 Ladeeinheiten . . . 20
- 2.3 Operationen . . . 23
  - 2.3.1 Mikroskopische Operationen . . . 23
  - 2.3.2 Ladeeinheiten-Operationen . . . 25
  - 2.3.3 Rüstoperationen . . . 27
  - 2.3.4 Jobs . . . 27
  - 2.3.5 Makroskopische Operationen . . . 28
  - 2.3.6 Routen . . . 30
- 2.4 Ressourcen . . . 30
  - 2.4.1 Ladeeinheiten-Ressourcen . . . 31
  - 2.4.2 Transportsysteme . . . 33
  - 2.4.3 Lager . . . 35
- 2.5 Ressourcennutzungsplan . . . 40
  - 2.5.1 Auslastung eines Transportsystems . . . 40
  - 2.5.2 Auslastung eines Lagers . . . 41
- 2.6 Subressourcen und Überschneidungen . . . 42

3 Integriertes Routing und Scheduling mit Multiskalen-Ansatz 47
- 3.1 Theoretische Grundlagen . . . 47
  - 3.1.1 Optimierung . . . 47
  - 3.1.2 Numerische Verfahren und Heuristiken für diskrete Probleme . . . 51

3.1.3 Behandlung von Nebenbedingungen . . . 56
3.1.4 Routing . . . 58
3.1.5 Scheduling . . . 60
3.1.6 Multiskalen-Ansatz . . . 62
3.2 Analyse des vorliegenden Problems . . . 63
3.2.1 Klassifizierung und Komplexität des Optimierungsproblems . . . 63
3.2.2 Ziele der Optimierung und Anforderungen an eine Zielfunktion . . . 65
3.2.3 Nebenbedingungen . . . 67
3.3 Lösung durch Multiskalen-Ansatz . . . 69
3.3.1 Makroskopisierung und Intervalle . . . 70
3.3.2 Zielfunktion und Bewertung der Operationen . . . 73
3.3.3 Berücksichtigung der Nebenbedingungen . . . 75
3.3.4 Stochastische oder deterministische Methoden . . . 75

4 Makroskopische und mikroskopische Optimierung 77
4.1 Makroskopische Optimierung . . . 77
4.1.1 Ablauf und Abbruch . . . 78
4.1.2 Einplanung . . . 80
4.1.3 Auslastungsfaktoren . . . 81
4.1.4 Ausplanung . . . 84
4.1.5 DNF . . . 86
4.1.6 Abhängigkeiten in Ursprungs- und Bestimmungsressourcen . . . 87
4.2 Routensuche . . . 90
4.2.1 Suchmethodik, entwickeltes Verfahren und Ablauf der Suche . . . 90
4.2.2 Zeitliche Planung der Operationen . . . 93
4.2.3 Aufbau des Graphen . . . 95
4.2.4 Bewertung einer Route mit Kosten . . . 96
4.2.5 Greedy-Dijkstra . . . 97
4.3 Mikroskopische Optimierung . . . 100
4.3.1 Aufteilung und Ablauf . . . 100
4.3.2 Rolling Horizon . . . 101
4.3.3 Optimierungsmenge und Priorisierung . . . 102
4.3.4 Bewertung und Reduktion der Lagerplätze . . . 103
4.3.5 Optimierungsverfahren . . . 106
4.3.6 Inkonsistenz zwischen den Ebenen . . . 107

5 Unsicherheit, Maßnahmen und Simulation 109
5.1 Unsicherheit . . . 109
5.2 Maßnahmen zur Behandlung der Unsicherheit . . . 110
5.2.1 Robustheit . . . 111
5.2.2 Reaktion durch Online-Algorithmus . . . 113
5.3 Simulation . . . 114
5.3.1 Theoretische Grundlagen . . . 114
5.3.2 Ablauf der Simulation . . . 116
5.3.3 Einspeisung der Störungen . . . 118

6 Justierung, Validierung und Optimierung der Parameter 119
6.1 Justierung des Modells . . . 119
6.1.1 Ablauf der Justierung . . . 119
6.1.2 Eingangsdaten . . . 121
6.1.3 Ergebnisse . . . 122
6.1.4 Online-Justierung . . . 123
6.2 Validierung . . . 125
6.3 Optimierung der Parameter und Qualität eines Schedules . . . 126

7 Ergebnisse 129
7.1 Untersuchte Terminals und Datenherkunft . . . 129
7.2 Justierung und Validierung . . . 130
7.3 Optimiertes Modellverhalten . . . 132
7.3.1 Minimale Kosten in Billwerder . . . 133
7.3.2 Maximale Leistung in Lehrte . . . 134
7.3.3 Minimale Kosten in Lehrte . . . 135
7.3.4 Robustheitsparameter . . . 137
7.4 Analysen . . . 140
7.4.1 Unsicherheit und Robustheit . . . 141
7.4.2 Nutzen einer Längsförderanlage . . . 143
7.4.3 Konfidenz und Laufzeit . . . 145
7.4.4 Weitere Analyse-Möglichkeiten . . . 147

8 Zusammenfassung und Ausblick 153

Literaturverzeichnis 157

Abbildungsverzeichnis 163

Tabellenverzeichnis 165

Lebenslauf 167