

# Simulation ausgewählter Heuristiken zur Tourenplanung in manuellen Kommissionierstationen

Felix Werth, Universität zu Köln  
werth@informatik.uni-koeln.de

Oliver Ullrich, Universität zu Köln  
ullrich@informatik.uni-koeln.de

## Zusammenfassung

Im Folgenden werden die Auswirkungen des Einsatzes verschiedener Heuristiken zur Tourenplanung in manuellen Kommissionierstationen bei einem Pharmagroßhandel untersucht. Dabei wird nicht nur auf die Länge der Touren eingegangen, sondern zusätzlich die Auswirkung von Ressourcenkonflikten während der Kommissionierung auf die Dauer der Bedienzeiten betrachtet. Nach einer Beschreibung des Systems werden dazu zuerst der Entwurf und die Implementierung eines agentenbasierten Modells dargestellt. Daraufhin werden einige häufig verwendete Heuristiken eingeführt und für den Anwendungsfall evaluiert. Am Schluss steht eine kurze Zusammenfassung und ein Ausblick auf das weitere Vorgehen.

## 1 Einführung

Im Rahmen einer Kooperation mit dem Arzneimittelgroßhändler *Gehe Pharma Handel GmbH* werden dessen Kommissionierungs- und Logistikprozesse untersucht, simuliert und mit Methoden der kombinatorischen Optimierung verbessert. Dazu wurde bereits eine prozessbasierte Simulationsanwendung entwickelt [8], die den vollständigen Kommissionierprozess abbildet. Als Engpässe wurden dabei die acht manuellen Kommissionierstationen identifiziert, die daher auf Optimierungspotential untersucht werden sollen.

Einfluss auf die Bedienzeiten haben die Bestückung der Regalplätze, das Teilen oder Zusammenfügen einzelner Aufträge zu Touren, die Anzahl der eingesetzten Kommissionierer und die Tourenplanung. Bei der letzteren wird in der Regel auf eine Berechnung der kürzesten Laufwege abgestellt [1, 2, 3, 5, 6, 7] und selten beachtet, dass Kollisionen der Kommissionierarbeiter in den Gängen und an den Warenregalen Verzögerungen verursachen und so unabhängig berechnete kürzeste Wege im Schnitt längere Bearbeitungszeiten nach sich ziehen können. Solche Ressourcenkonflikte sollen im Folgenden näher betrachtet werden. Die bestehende prozessbasierte Simulationsumgebung ist zur Auswertung der dazu nötigen Szenarien nicht genau genug, da sie u.a. die Laufwege innerhalb der einzelnen Handstationen nicht berücksichtigt.

Im Folgenden werden Entwurf und Entwicklung einer agentenbasierten Simulationsumgebung beschrieben, die u.a. Laufwege, Auslastung des zum Regalzugriff benötigten Raums und auftretende Behinderungen durch Kollisionen mehrerer Kommissionierarbeiter berücksichtigt. Mit dieser Simulationsanwendung werden dann die Auswirkungen ausgewählter Heuristiken auf die Bedienzeiten am Beispiel einer typischen Handstation in der *Gehe*-Niederlassung in Troisdorf bei Bonn evaluiert.

Dazu wird zuerst das betrachtete System beschrieben und das Vorgehen bei der Modellbildung erläutert, dann kurz auf die Realisierung der Simulationsanwendung eingegangen. Im Hauptteil werden einige Heuristiken vorgestellt und ihre Auswirkungen auf die Bedienzeit untersucht. Abschließend wird das Erreichte kurz zusammen gefasst und ein Ausblick auf die weiteren Vorhaben gegeben.

## 2 Systembeschreibung und Modellbildung

In der Niederlassung Troisdorf werden täglich ca. 3.500 bis 4.500 Bestellungen bearbeitet, mit insgesamt ca. 30.000 Auftragspositionen. Die Arzneimittel werden in Wannen kommissioniert, die mit einem Förderbandsystem durch die Lagerhalle geführt werden. Etwa 14.400 Positionen werden dabei manuell in acht Handstationen kommissioniert.

Dazu werden die Wannen aus dem globalen Förderband ausgekoppelt und in den Puffer einer Handstation geleitet. Ein frei werdender Mitarbeiter wählt eine wartende Wanne aus und markiert sie als in Arbeit. Er entnimmt der Wanne die Liste der bestellten Medikamente und macht sich daran, sie im Regallager einzusammeln. Hat er alles beisammen, legt er die Ware in die Wanne und schiebt sie auf das globale Förderband zurück. Die Gänge innerhalb der Station sind so schmal (ca. 80cm), dass Mitarbeiter einander ausweichen müssen und dabei verlangsamt werden.

Da untersucht werden soll, wie die Anwendung von Heuristiken auf Ebene einzelner Individuen die aggregierte Leistung des Systems beeinflusst, wie sich also aus dem Verhalten auf lokaler Ebene das globale Systemverhalten ergibt, bietet sich als Simulationsparadigma die agentenbasierte Modellierung und Simulation an. Ein agentenbasiertes Modell besteht aus Agenten (also aus je einem Satz von Attributen und Verhaltensregeln) und der Umwelt, in der sich die Agenten bewegen und mit der sie interagieren. [4]

Die Umwelt der Agenten wird im beschriebenen Modell durch die Laufwege, die Warenregale und die Zugriffspunkte des Bandpuffers gebildet. Sie wird dabei als ungerichteter, gewichteter Graph modelliert. Die Knoten repräsentieren Abzweigungspunkte, Zugriffspunkte auf Regalbereiche (je 80cm breit, 180cm hoch) und Zugriffspunkte auf Bereiche des Bandpuffers. Aufgrund der schmalen Gänge genügt es, gemeinsame Zugriffspunkte auf beide Seitenregale jeweils in der Gangmitte zu modellieren. Die Kanten des Graphen stellen Wege zwischen den einzelnen Zugriffs- und Abzweigungspunkten dar, ihre Gewichte entsprechen der Länge der Strecken.

Die Kommissionierarbeiter werden durch Agenten abgebildet, die sich mit einer Geschwindigkeit von 120 cm/sec auf den Kanten des Wegegraphen bewegen. Ein unbeschäftig-

ter Agent wählt am Förderband-Zugriffsknoten eine Wanne, berechnet gemäß einer vorgegebenen Heuristik eine Tour über die benötigten Regalzugriffspunkte und bewegt sich dann über den Graphen zu den einzelnen Punkten der Tour, wo er jeweils die Zugriffspunkte eine gewisse Zeit lang belegt. Zum Abschluss bewegt sich der Agent zurück zur von ihm bearbeiteten Wanne und markiert sie als fertig. Begegnet er auf dem Weg anderen Agenten, muss er ihnen ausweichen. Solche Kollisionen kosten Zeit, im Modell wird die Geschwindigkeit auf ein Fünftel reduziert. Einzelne Agenten verfügen dabei nicht über Wissen über die Pläne anderer Agenten, können also Kollisionen nicht durch adaptive Wegeplanung vermeiden.

Das beschriebene Problem wird als Steiner Traveling Salesman Problem bezeichnet. [1] Formal besteht es darin, eine Rundreise minimaler Länge durch eine Teilmenge der Knoten eines Graphen zu bestimmen, wobei Knoten auch mehrfach besucht werden dürfen. Im allgemeinen Fall ist es nicht effizient lösbar, für eingeschränkte Problemklassen mit sehr einfachen zugrunde liegenden Layouts existieren jedoch Lösungsverfahren mit linearer Laufzeit. [1, 6] Eine Berücksichtigung von Heuristiken ist dennoch sinnvoll, da die Optimallösung auch bei einfachen Layouts oft zu komplexen Touren führt, die für den Kommissionierer nur schwer nachvollziehbar sind. [3] Heuristiken hingegen generieren durch ihre einheitliche Strategie in der Regel Touren mit einem einfachen Muster. Zudem bedeuten voraus berechnete Touren optimaler Länge beim Einsatz mehrerer Kommissionierer nicht zwangsläufig auch gute Bedienzeiten, da Kollisionen bei der Tourbildung nicht beachtet werden.

### 3 Realisierung einer agentenbasierten Simulationsanwendung

Das beschriebene Modell wurde in einer interaktiven Simulationsanwendung implementiert (s. Abb. 1).

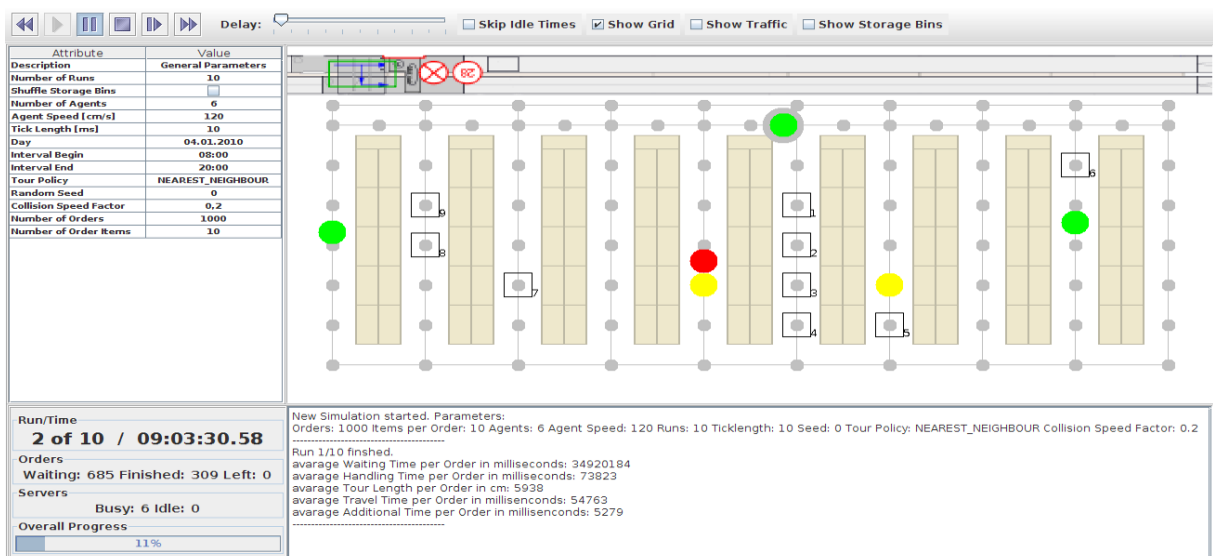


Abbildung 1: Screenshot der Anwendung

Die Anwendung wurde plattformunabhängig und lizenzkostenfrei gestaltet und ist auf einem handelsüblichen Notebook ausführbar. Sie unterstützt die Steuerung und Visualisierung von Simulationsläufen und bietet eine erste Ergebnisauswertung. Die Simulationsparameter können weitgehend durch die Benutzer verändert werden. Der Implementierungsaufwand konnte durch die Verwendung eines bestehenden Frameworks gering gehalten werden.

## 4 Einsatz ausgewählter Heuristiken

Für die Anwendung wird das Layout der Handstation B der Niederlassung in Troisdorf gewählt. Dort werden 1.637 unterschiedliche Medikamente entlang von zehn Gängen und einem Quergang gelagert. Der Ausgangspunkt der Touren befindet sich über dem fünften Gang von links. Das Modell enthält 85 Knoten, davon 59 Zugriffsknoten und 106 Kanten mit insgesamt 119m Weglänge. Für die Analyse wird angenommen, dass die Auftragspositionen gleich über die Lagerplätze verteilt sind. Häufig genutzte Heuristiken für das beschriebene Layout sind *S-Shape*, *Return*, *Largest Gap* [5] und mit Abstrichen *Nearest Neighbour* [7]. Wir verwenden zusätzlich eine *Best-Choice*-Strategie und als Referenzen eine zufällige Aufstellung der Touren (*Random*) sowie die Berechnung der Optimaltours per dynamischer Programmierung.

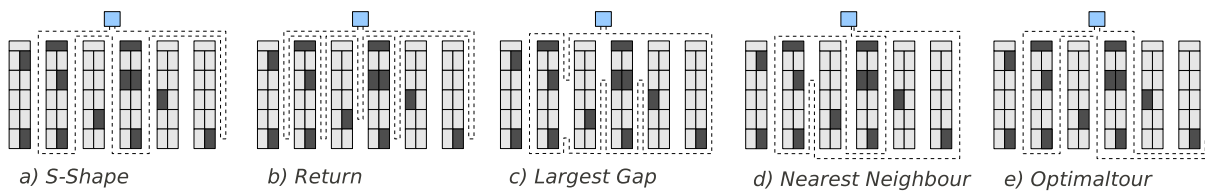


Abbildung 2: Tourverläufe zu einem Auftrag

Bei der *S-Shape* [2], *Traversal* [3] oder *Transversal* [5] genannten Heuristik wird von links nach rechts jeder Gang, in dem sich mindestens eine Auftragsposition befindet, komplett durchschritten und durch das andere Ende verlassen. (s. Abb. 2a)

Die *Return*-Heuristik [5] ähnelt der *S-Shape*-Heuristik, da auch hier jeder Gang nur einmal besucht wird. Im Gegensatz dazu wird jeder Gang von oben betreten und auch dorthin wieder verlassen. (s. Abb. 2b)

Die *Largest-Gap*-Heuristik [3] ist eine Kombination aus den beiden vorangegangenen. Die äußeren Gänge werden von oben resp. von unten komplett durchschritten, die Auftragspositionen jedes Ganges dazwischen werden in zwei Hälften eingeteilt. Als Trennungskriterium dient dabei die größte Lücke zwischen zwei Positionen innerhalb eines Ganges. Die Positionen oberhalb der Lücke werden mittels *Return*-Strategie vom oberen Quergang eingesammelt, die Positionen unterhalb vom unteren Quergang. (s. Abb. 2c)

Bei der *Nearest-Neighbour*-Heuristik [7] wird eine Tour konstruiert, indem beginnend am Depot stets die nächst gelegene Auftragsposition kommissioniert wird. Nach der letzten Position wird die Tour zurück zum Depot fortgesetzt. (s. Abb. 2d) Sie entspricht damit am ehesten dem beobachteten Vorgehen der Kommissionierer vor Ort.

Die oben genannten Heuristiken werden zusätzlich zu einer *Best-Choice*-Strategie kombiniert. Hierfür werden für jede Tour zunächst alle beschriebenen Heuristiken berechnet und daraufhin diejenige gewählt, die zur kürzesten Strecke führt.

Zur Bestimmung des Einflusses der Kollisionen auf die Tourdauern werden 10.000 Aufträge mit je zehn Positionen zufällig generiert. Für jede Heuristik werden nun die erzeugten Kommissioniertouren simuliert, jeweils mit ein bis zehn eingesetzten Agenten.

Routing Strategie	Tourlänge in cm	Anzahl Agenten										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
Random	10155	84626	86766	88980	91140	93183	95463	97697	99787	101948	104084	125882
Return	6261	52173	53206	54249	55280	56247	57407	58542	59380	60575	61611	72795
S-Shape	6012	50099	51075	51997	52977	53942	54973	56043	56747	57899	59075	69088
Largest Gap	5757	47977	48778	49633	50453	<b>51242</b>	<b>52077</b>	<b>52942</b>	<b>53683</b>	<b>54679</b>	<b>55445</b>	<b>64451</b>
Nearest Neighbour	5961	49675	50692	51774	52819	53838	54926	55910	56903	58019	58929	69416
Best Choice	5700	<b>47501</b>	<b>48469</b>	<b>49422</b>	<b>50365</b>	51351	52278	53316	54240	55213	56133	66056
Optimum	5597	46639	47793	48934	50063	51134	52262	53490	54470	55684	56763	68029

Tabelle 1: Einfluss der Heuristik auf die Tourdauer in Millisekunden

Wie sich anhand Tabelle 1 erkennen lässt, führt die *Best-Choice*-Strategie erwartungsgemäß zur kürzesten durchschnittlichen Tourlänge, die lediglich 1,84% vom Optimalwert abweicht. Die *Largest-Gap*-Heuristik liefert mit einer durchschnittlichen Abweichung von 2,86% minimal schlechtere Ergebnisse, *Random* ist erwartungsgemäß weit abgeschlagen. Jedoch steigt bei einer Erhöhung der Agentenzahl die durchschnittliche Kommissionierdauer bei der *Largest-Gap*-Heuristik weniger stark an als bei den anderen Heuristiken und der Optimallösung. Dadurch fällt hier die durchschnittliche Kommissionierdauer beim Einsatz von fünf Agenten erstmals kürzer aus als bei der *Best-Choice*-Strategie. Ab einem Einsatz von sechs Agenten dominiert gemäß der Tourdauern die *Largest-Gap*-Heuristik sogar die Optimallösung, wobei sich die Dominanz mit zunehmender Agentenzahl weiter verstärkt.

Bei der *Largest-Gap*-Heuristik kommt es offensichtlich zu relativ wenig Kollisionen und damit zu kürzeren Kommissionierdauern. Hauptbeitrag dazu ist, dass im Gegensatz zu allen anderen verwendeten Methoden durch die einheitliche Laufrichtung bei *Largest Gap* keine Kollisionen in den Quergängen stattfinden. Im Vergleich zu *Return* kommt noch hinzu, dass dort die oberen Bereiche der Gänge stärker ausgelastet sind, so dass dort vermehrt Konflikte entstehen. Diese Faktoren fallen bei geringer Agentenzahl kaum ins Gewicht, treten aber bei zunehmender Systembelastung stärker in den Vordergrund.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Auf der Basis einer Systemanalyse wurden Modellierung und Realisierung einer Anwendung zur agentenbasierten Simulation von manuellen Kommissionierstationen eines Pharmagroßhandels beschrieben. Diese wurde eingesetzt um die Auswirkungen der Anwendung von Heuristiken auf die Bedienzeit bei Einsatz mehrerer Kommissionierer zu untersuchen. Hierbei hat sich gezeigt, dass ab einem Einsatz von fünf Kommissionierern von allen betrachteten Heuristiken *Largest Gap* zu den durchschnittlich geringsten Kommissionier-

dauern führt. Bei einer weiteren Erhöhung der Anzahl Kommissionierer unterbietet sie sogar die Optimallösung. Da die durch die *Largest-Gap*-Heuristik erzeugten Tourenlängen nur geringfügig über dem Optimum liegen, die Touren dafür aber ein für die Kommissionierer leicht erkennbares Muster besitzen, kann diese Heuristik unabhängig von der Anzahl der eingesetzten Kommissionierer verwendet werden.

Im nächsten Schritt sollen adaptive Verfahren zur Tourenbildung untersucht werden, die durch Ressourcenkonflikte auftretende Störungen reduzieren können. Hierzu sollen auch Modelle von größeren Handstationen nachgebildet werden, außerdem das Zusammenlegen mehrerer Aufträge zu längeren Touren („Batching“) betrachtet werden. In einem anderen Teilprojekt sollen die realen Bestelldaten auf Muster in den Aufträgen untersucht werden, die dann bei der Lagerplatzzuordnung berücksichtigt werden können.

## Literatur

- [1] Cornuéjols, Gérard; Fonlupt, Jean; Naddef, Denis: *The traveling salesman problem on a graph and some related integer polyhedra*, In: Mathematical Programming, Volume 33, Number 1, 1-27, Springer, 1985.
- [2] De Koster, René; van der Poort, Edo: *Routing orderpickers in a warehouse: a comparison between optimal and heuristic solutions*, In: IIE Transactions, Volume 30, Number 5, 469-480, Taylor & Francis, 1998.
- [3] Hall, Randolph W.: *Distance approximations for routing manual order pickers in a warehouse*, In: IIE Transactions, Volume 25, Number 4, 76-87, Taylor & Francis, 1993.
- [4] Macal, Charles M.; North, Michael J.: *Tutorial on agent-based modelling and simulation*, In: Journal of Simulation (2010) 4, 151-162, Palgrave Macmillan, 2010.
- [5] Petersen, Charles G.: *An evaluation of order picking routeing policies*, In: International Journal of Operations & Production Management, Volume 17, Number 11, 1098-1111, Emerald, 1997.
- [6] Ratliff, H. Donald; Rosenthal, Arnon S.: *Order-Picking in a rectangular warehouse: a solvable case of the traveling salesman problem*, In: Operations Research, Volume 31, Number 3, 507-521, INFORMS, 1983.
- [7] Rosenkrantz, Daniel J.; Stearns, Richard E.; Lewis, Philip M.: *An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem*, In: SIAM J. Comput., Volume 6, Number 3, 563-581, SIAM, 1977.
- [8] Werth, Felix; Beckers, Martin; Ullrich, Oliver; Speckenmeyer, Ewald: *Simulation zur Verbesserung der Logistikprozesse eines Pharmagroßhandels*, In: Zülch, G. und Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation - Technik, Organisation und Personal, 261-268, KIT Scientific Publishing, 2010.