

Simulation und Optimierung fahrerloser Transportsysteme

Sönke Hartmann¹, Dirk Briskorn², Nils Kemme³

¹ HSBA Hamburg School of Business Administration
Alter Wall 38, 20457 Hamburg
soenke.hartmann@hsba.de

² Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Lehrstuhl für Produktion und Logistik, 24098 Kiel
briskorn@bwl.uni-kiel.de

³ HPC Hamburg Port Consulting
HHLA Container Terminal Burchardkai, 21129 Hamburg
n.kemme@hpc-hamburg.de

Dieser Beitrag stellt eine Simulationsstudie vor, die am Container-Terminal Altenwerder in Hamburg durchgeführt wurde, um verschiedene Fragestellungen zur Einsatzplanung der fahrerlosen Transportfahrzeuge (automated guided vehicles, AGVs) zu untersuchen. Nach einem Überblick über die Struktur des Simulationsmodells wird die Anwendung im vorliegenden Praxisfall diskutiert. Hierzu werden verschiedene Simulationsuntersuchungen zusammengefasst, um die vielseitige Einsatzfähigkeit des Modells zu demonstrieren.

Schlüsselwörter: Simulation, Optimierung, fahrerlose Transportsysteme, automated guided vehicle, AGV, Container-Terminal, Container-Logistik

1 Einleitung

Simulation ist ein wichtiges Instrument zur Analyse komplexer dynamischer Prozesse in der Logistik. Die Erstellung eines Simulationsmodells ist allerdings häufig mit hohen Kosten verbunden. Darüber hinaus ist das Erreichen eines realistischen Modellverhaltens und damit die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Realität oftmals nicht trivial.

Der vorliegende Beitrag stellt ein Simulationsmodell vor, das für den Container-Terminal Altenwerder in Hamburg entwickelt wurde. Das Modell bildet die Prozesse der fahrerlosen Transportfahrzeuge (automated guided vehicles, AGVs) ab, die die Container zwischen dem Kai und dem Containerlager transportieren. Für die Effizienz der logistischen Prozesse ist die Optimierung der Zuordnung von Transportaufträgen zu

AGVs von entscheidender Bedeutung. Nur durch geeignete Optimierung können die Containerbrücken am Kai gleichmäßig und rechtzeitig mit AGVs versorgt werden, und nur so kann die Kapazität der AGV-Flotte voll ausgenutzt werden.

Im Rahmen dieser Studie wurde bewusst ein einfach strukturiertes Modell entwickelt. Auf diese Weise wurden nicht nur begrenzte Entwicklungskosten und –zeit erreicht, sondern auch ein realistisches Modellverhalten. Anhand verschiedener Studien zu algorithmischen und betrieblichen Fragestellungen wird die Praxistauglichkeit des Modells gezeigt.

2 Der Container-Terminal Altenwerder

Der 2002 in Betrieb gegangene Container-Terminal Altenwerder in Hamburg (vgl. Abbildung 1) zählt zu den modernsten Container-Umschlaganlagen der Welt. Der Containerumschlag ist weitgehend automatisiert.

Das Löschen und Laden der Schiffe erfolgt mit Containerbrücken. Beim Löschen nimmt eine Containerbrücke einen Container auf dem Schiff auf und stellt ihn auf einem fahrerlosen Transportfahrzeug ab. Dieses Fahrzeug, im folgenden als AGV bezeichnet, transportiert den Container vollautomatisch zum Containerlager (siehe Abbildung 2 und 3). Das Lager ist in einzelne Blöcke aufgeteilt; jeder Block wird von zwei vollautomatischen Kränen bedient. Das AGV fährt in eine Übergabeposition am Lagerblock. Dort nimmt ein Lagerkran den Container auf und stellt ihn im Lagerblock ab, während das AGV den nächsten Transportauftrag erhalten kann. Der Ladeprozess verläuft in umgekehrter Richtung.

Die am Lösch- und Ladeprozess beteiligten Geräte werden von einer Steuerungssoftware gesteuert, die den einzelnen Geräten in Echtzeit Fahraufträge sendet. Wesentliches Ziel ist hierbei eine hohe Produktivität, d.h. die Maximierung der pro Stunde umgeschlagenen Container.

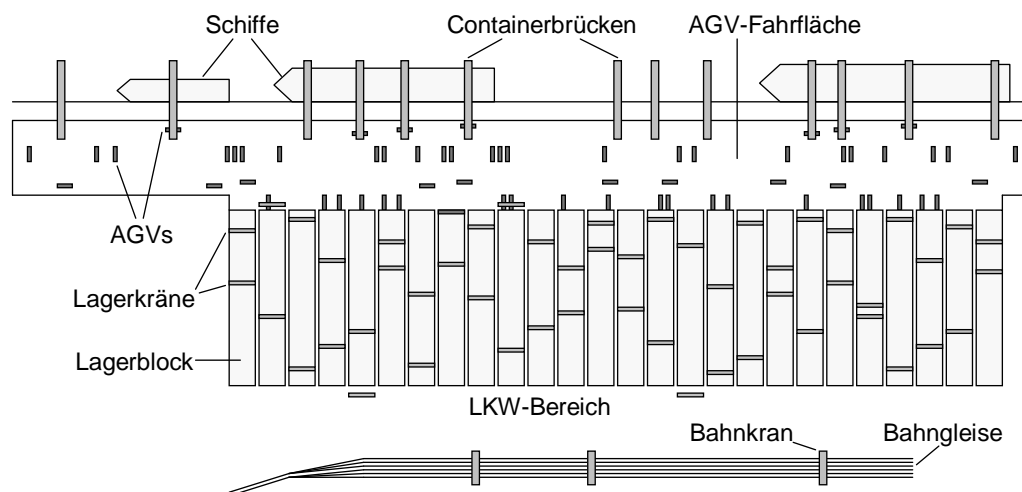


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Container-Terminals Altenwerder



Foto © Hamburger Hafen und Logistik AG

Abbildung 2: AGV von der Containerbrücke aus gesehen

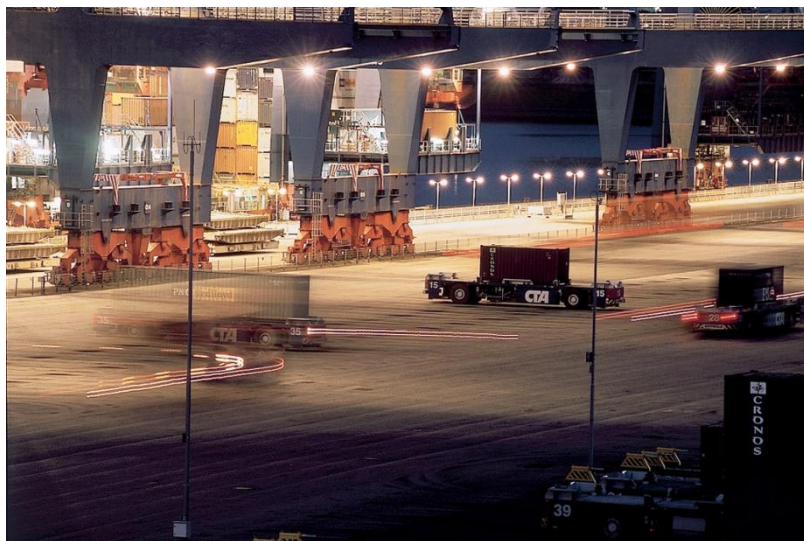


Foto © Hamburger Hafen und Logistik AG

Abbildung 3: AGVs auf der Fahrfläche

3 Zuordnung von Aufträgen zu AGVs

In die Optimierung gehen die dringendsten Aufträge ein. Außerdem werden diejenigen AGVs berücksichtigt, die derzeit keinen Auftrag haben oder die demnächst freiwerden (der Entladezeitpunkt wird von den Lagerkränen und den Containerbrücken bestimmt). Jedes dieser AGVs ist genau einem Auftrag zuzuordnen. Eine weitere Berechnung in die Zukunft, also mehrere Aufträge je AGV im voraus, ist nicht sinnvoll, da eine längerfristige Prognose der Abläufe schwierig ist.

Es ergibt sich also ein so genanntes Zuordnungsproblem, das mathematisch eher einfach strukturiert ist. Da nur ein Teil der AGV-Flotte und der Aufträge berücksichtigt

wird, ist zudem die Problemgröße überschaubar. Die Schwierigkeit liegt dementsprechend nicht in der mathematischen Lösbarkeit, sondern in der spezifischen Anwendung:

- Es ist nicht a priori klar, wie die Lösungen zu bewerten sind, d.h. welche Zuordnungen von Aufträgen zu AGVs gut sind und welche nicht. Übergreifende Ziele wie Produktivitätsmaximierung lassen sich nicht unmittelbar in einer auf einem Ausschnitt des Gesamtsystems basierenden Optimierung verwenden.
- Einige der vorliegenden Daten sind mit Unsicherheiten behaftet. So können etwa die tatsächlichen AGV-Fahrzeiten von den geschätzten Zeiten abweichen, wenn ein Fahrzeug während der Fahrt bremsen muss, um ein anderes vorbeizulassen.

Außerdem ist zu bedenken, dass eine einmal berechnete Zuordnung von Aufträgen zu AGVs nicht vollständig ausgeführt werden muss. Wird ein AGV frei, das zuvor bereits einmal zugeordnet wurde, aber noch nicht frei war, kann eine neue Zuordnung für dieses AGV berechnet werden. Nur die Zuordnungen von freien AGVs zu Aufträgen werden also tatsächlich umgesetzt. Da sich Daten ständig ändern können, sollte stets auf Basis der aktuellen Daten neu optimiert werden. Es handelt sich also um ein Problem der Online-Optimierung.

4 Das Simulationsmodell

Das Simulationsmodell wurde mit Hilfe des Frameworks DESMO-J der Universität Hamburg entwickelt (vgl. [1]). Es besteht aus dem Materialfluss, der die Umschlagsgeräte umfasst, und dem Informationsfluss, der die Steuerung beinhaltet. Das Verhalten der Umschlagsgeräte wurde in stark vereinfachter Form modelliert; auf eine Visualisierung des Materialflusses wurde verzichtet.

Die AGVs melden sich am Zielort eines Fahrauftrags nach einer Zeit, die sich wie folgt berechnet: Die minimal mögliche Fahrzeit wird mit Hilfe einer Formel bestimmt, die Fahrstrecke, Anzahl Kurven und Geschwindigkeit berücksichtigt. Diese minimale Fahrzeit wird dann um einen Faktor vergrößert, der Wartezeiten durch gegenseitige Behinderungen der AGVs auf der Fahrfläche abbildet.

Die Lagerkräne und Containerbrücken, die nicht im Fokus der Untersuchungen standen, wurden nicht explizit abgebildet. Die Idee bestand darin, stattdessen lediglich ihren Einfluss auf die AGVs zu berücksichtigen. Daher wurden Lagerkräne und Containerbrücken insbesondere durch Verteilungen für die Zeiten modelliert, die das AGV dort jeweils während der Container-Übergabe gebunden ist.

Die Steuerungskomponente des Simulationsmodells bildet die Zuordnung von Aufträgen zu AGVs in sehr detaillierter Form ab. Sämtliche Auftragsdaten sind ebenso vorhanden wie konkrete Algorithmen. Aufgrund der verteilungsbasierten Modellierung der Containerbrücken und Lagerkräne sind für diese Geräte keine Steuerungsalgorithmen erforderlich. Die Lager-Komponenten der Steuerung sind vereinfacht über Verteilungen abgebildet.

Das Ergebnis ist ein stark abstrahiertes Simulationsmodell, das verschiedene Vorteile bietet. Aufgrund der Einfachheit des Modells ist die Entwicklungszeit kurz, die Kosten sind entsprechend gering. Darüber hinaus ist das Modell leicht so konfigurierbar, dass ein realistisches Verhalten erreicht wird – es müssen lediglich für die oben aufgeführten Parameter Verteilungen aus Betriebsstatistiken ermittelt werden.

Ein detaillierteres Modell wäre u.U. sogar weniger realistisch – beispielsweise wurde eine explizite Abbildung der Lagerkräne (anstelle der Verteilung der Übergabezeiten) eine realistische Abbildung der Algorithmen der Kransteuerung sowie der landseitigen

und lagerbedingten Aufträge der Kräne erfordern. Ungenauigkeiten hierbei können die für den Untersuchungszweck relevanten Übergabezeiten in unkontrollierter Form verfälschen.

Daneben sind allerdings auch die Grenzen des Modellierungsansatzes zu beachten. So ist bei der Interpretation von Simulationsergebnissen zu bedenken, dass bestimmte indirekte Einflüsse der Auftragszuordnung nicht erfasst werden. Führt etwa eine verbesserte Auftragszuordnung zu kürzeren Leerfahrten der AGVs, so kann dies weniger gegenseitige Behinderungen der AGVs auf der Fahrfläche und somit noch kürzere Leer- und Lastfahrzeiten zur Folge haben. Das Modell bildet jedoch das eigentliche Fahrzeugverhalten und somit einen solchen Effekt nicht ab.

5 Validierung des Modells

Eine Übertragung von Simulationsergebnissen auf die Realität ist nur dann sinnvoll, wenn sich Modell und Echtsystem gleich oder zumindest hinreichend ähnlich verhalten. Vor Durchführung der Studien wurde das Simulationsmodell daher validiert.

Ein Vergleich von Kennzahlen aus dem Simulationsmodell mit Kennzahlen aus dem Echtbetrieb war nicht möglich. Der Grund hierfür liegt in Einflüssen wie Gerätestörungen und schwer planbare manuelle Tätigkeiten am Schiff, die im Echtbetrieb stets vorhanden sind. Daher wurde das Simulationsmodell mit einer Instanz der realen Steuerungssoftware verglichen, die nicht an die echten Umschlagsgeräte, sondern über die echten Schnittstellen an sehr detaillierte und realistische Gerätesimulatoren gekoppelt ist.

Im Vergleich auf Basis von festgelegten Szenarien ergaben sich Differenzen zwischen den Kennzahlen der Simulation und der echten Steuerung. Diese waren jedoch eher gering und weitgehend durch die speziellen Annahmen im Simulationsmodell erklärbar. Das ähnliche Verhalten von Simulationsmodell und realem System konnte bei verschiedenen Variationen wichtiger Steuerungsparameter bestätigt werden.

6 Algorithmen zur Auftragsoptimierung

In einer Studie wurden verschiedene Algorithmen zur Auftragszuordnung untersucht. Einer der betrachteten Algorithmen ist eine einfache Heuristik, die auf Basis einer Bewertung in jedem Schritt zunächst den "dringendsten" Auftrag bestimmt und für diesen dann das "beste" AGV. Dies wird wiederholt, bis alle Aufträge bzw. AGVs zugeordnet sind (siehe auch [2]). Solche Algorithmen werden in der Literatur oft als "Greedy-Verfahren" bezeichnet.

Als alternativer Algorithmus wurde die Ungarische Methode (vgl. [3]) untersucht. Im Gegensatz zur oben beschriebenen Heuristik berechnet sie tatsächlich eine optimale Zuordnung. Hierzu betrachtet sie alle in die Optimierung eingehenden AGVs und Aufträge simultan und bestimmt aus allen möglichen Kombinationen die gemäß einer Bewertungsfunktion beste.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Ungarische Methode eine geringfügig höhere Umschlagsproduktivität liefert als die einfache Heuristik. Offensichtlich ist der Vorteil einer mathematisch exakten Lösung aufgrund der sich ständig ändernden und unsicheren Eingangsdaten nur gering.

7 Dringlichkeitsbewertung

An verschiedenen Stellen der Auftragsoptimierung ist eine Bewertung der Dringlichkeit der Aufträge nötig: Nur die dringendsten Aufträge gehen in die Optimierung ein, und in der oben beschriebenen Heuristik wird in jedem Schritt der jeweils dringendste Auftrag bestimmt.

Es wurden verschiedene Ansätze untersucht, die die Dringlichkeit eines Auftrags bewerten. So kann ein Auftrag als dringend eingestuft werden, wenn für ihn gemäß einer groben Zeitplanung zu einem frühen Zeitpunkt ein AGV an der Containerbrücke benötigt wird. Alternativ kann ein Auftrag dringend sein, für den die angesichts der gerade verfügbaren AGVs geringstmögliche Verspätung gegenüber dem Planzeitpunkt bereits groß ist. Auch eine Definition ohne Planzeiten ist denkbar: Ein Auftrag wäre dann etwa dringend, wenn er der nächste Auftrag für eine Containerbrücke ist, die derzeit im Verhältnis wenige AGVs im Zulauf hat.

Die Ergebnisse der Simulation machen deutlich, dass die verspätungsbasierte Dringlichkeit schlechte Ergebnisse liefert, während die beiden anderen Ansätze ähnlich gut sind. Das Problem der verspätungsbasierten Dringlichkeit ist, dass in die Berechnung mit erwarteter AGV-Verfügbarkeitszeit und erwarteter Leerfahrzeit mehr potentiell unsichere Daten eingehen als in die anderen Ansätze. Problematisch ist auch, dass tendenziell gerade die Aufträge mit langer erwarteter Leerfahrzeit als potentiell verspätet und damit dringend gelten. Damit erhalten gerade Aufträge mit größerer Entfernung zu den derzeit verfügbaren AGVs bevorzugt ein AGV, wodurch längere Leerfahrten entstehen können. Dies wurde auch durch die Simulation bestätigt.

8 Zuordnungsbewertung

Um Zuordnungen von Aufträgen zu AGVs miteinander vergleichen zu können, müssen sie bewertet werden. Dies gilt sowohl für die oben beschriebene Heuristik als auch für die Ungarische Methode. Es wurden sowohl eine additive als auch eine multiplikative Bewertungsfunktion untersucht.

In die Bewertung können verschiedene Größen eingehen. Die erwartete Verspätung ist die Zeit, die das zugeordnete AGV zu spät ankommen und damit die Containerbrücke warten lassen würde. Analog dazu ist die geschätzte Wartezeit die Zeit, die das zugeordnete AGV zu früh ankommen würde – in diesem Fall würde also das AGV warten. Auch die durch die Zuordnung zu einem Auftrag entstehende Leerfahrzeit eines AGVs zum Aufnahmeort des Containers kann in die Bewertung einfließen. Für die Bewertung können diese (und andere) Größen gewichtet und summiert werden. Zudem kann diese Bewertungssumme für jeden Auftrag in Abhängigkeit von der Dringlichkeit gewichtet werden. Dies ist insbesondere relevant bei Verfahren, die alle Zuordnungen simultan bewerten, wie dies in der oben beschriebenen Ungarischen Methode geschieht.

Die Simulationsergebnisse zeigen allerdings, dass die Bewertungsvarianten zu ähnlichen Produktivitäten führen, solange die relevanten Größen berücksichtigt und sinnvoll gewichtet sind.

9 Manuelle Regelung

Im laufenden Betrieb eines Container-Terminals besteht häufig der Bedarf, regelnd in die Abläufe einzugreifen. Die Mitarbeiter im Leitstand eines Terminals müssen die Möglichkeit haben, die von der Steuerungssoftware bestimmten automatischen Prozesse zu manipulieren. Wenn etwa eine Containerbrücke noch besonders viele Container zu löschen bzw. zu laden hat, das Schiff aber schnell abzufertigen ist, kann es notwendig sein, die Arbeit dieser Containerbrücke zu beschleunigen.

Eine solche Beschleunigung kann etwa über eine Anpassung der Zeitvorgaben der entsprechenden Aufträge oder auch über eine Erhöhung der im Zulauf befindlichen AGVs erfolgen. Sowohl in der Wirkung auf beschleunigte Containerbrücken als auch in der Wirkung auf die Gesamtproduktivität aller Brücken waren in der Simulation allerdings keine größeren Unterschiede zwischen den Ansätzen feststellbar.

10 Fazit

Die Studie hat gezeigt, dass sich auch mit einem einfachen (und daher kostengünstigen) Simulationsmodell relevante Ergebnisse für die betriebliche Praxis erzielen lassen. Dies gilt insbesondere dann, wenn das Modell durch eine Parametrierung auf Basis von Betriebsstatistiken realistisch konfiguriert wird. Ein solcher auf einfache Strukturen und Parametrierbarkeit ausgerichteter Modellierungsansatz dürfte auch in anderen Bereichen der Logistik vielversprechend sein.

Die Simulation der Zuordnung von Aufträgen zu AGVs auf dem Container-Terminal Altenwerder hat wichtige Erkenntnisse geliefert. So kann die Verwendung zu vieler unsicherer Daten oder vermeintlich plausibler Optimierungskriterien negative Folgen haben. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass aufwändigere mathematische Algorithmen u.U. nur wenig bessere Ergebnisse liefern als einfache Verfahren, was auch auf die Unsicherheit der Eingangsdaten zurückzuführen ist.

Literatur

- [1] Page, B., Lechler, T., Claassen, S.: Objektorientierte Simulation in Java mit dem Framework DESMO-J. Hamburg 2000.
- [2] Briskorn, D., Drexl, A., Hartmann, S.: Inventory based Dispatching of Automated Guided Vehicles on Container Terminals. In: OR Spectrum 28 (2006) S. 611-630.
- [3] Kuhn, H.W.: The Hungarian method for the assignment problem. In: Naval Research Logistics Quarterly 2 (1955), S. 83-97.