

Der Transportlogistikdienstleister in einem Multiagentenmodell des Güterverkehrs

Stefan Schröder, Michael Zilske, Gernot Liedtke, Kai Nagel

1 Einleitung

Seit etwa dem Jahr 2005 erscheinen die ersten Veröffentlichungen zur Mikromodellierung des Güterverkehrs. Zum Teil handelt es sich um mehrstufige Mikromodelle mit Rückkoppelungen; zum Teil nutzen die Modellentwickler Prinzipien oder sogar gesamte Entwurfsmuster aus der agentenbasierten Programmierung. In jüngster Zeit hat sich die Entwicklung der Mikromodellierung beschleunigt. Die Fortschritte lassen sich in zwei wesentliche Modellgruppen einteilen: Güterflussbasierte und tourbasierte Modelle. Güterflussbasierte Modelle werden in der Regel zur Abbildung des interregionalen Güterverkehrs eingesetzt. Im Wesentlichen werden hier Warenströme in Frachtaufträge und Frachtaufträge in Lkw-Fahrten umgewandelt. Tourbasierte Modelle werden vor allem in der städtischen (Güter)Wirtschaftsverkehrsmodellierung angewendet. Sie fokussieren auf die phänomenologische Rekonstruktion von Fahrzeug-Touren in Raum und Zeit.

Praktischen Modellen aus beiden Gruppen ist gemeinsam, dass sie bestimmte logistische Entscheidungen (z.B. über Losgröße, Tourenplanung oder Transportkettenplanung) vernachlässigen oder nur implizit phänomenologisch berücksichtigen. Die Maßnahmensensitivität der Modelle ist daher fallweise kritisch zu beurteilen. Auswirkungen von Maßnahmen könnten, zum Beispiel bei der Unterstützung von Kosten-Nutzen-Analysen, falsch eingeschätzt werden. Der Hintergrund ist folgender: Die Akteure im Güterverkehr können Politikmaßnahmen ausweichen indem sie logistische Entscheidungen ändern. Die „wahren“ Kostenänderungen sollten daher unter Berücksichtigung logistischer Anpassungsreaktionen der Akteure

bestimmt werden. Um es jedoch noch komplizierter zu machen, sei anzumerken, dass nicht alle Anpassungen unmittelbar auftreten, da Akteure teilweise durch Routinen, Verträge und investiertes Kapital zumindest kurz- bis mittelfristig gebunden sind.

Um dieses logistische Verhalten im Verkehrsmodell adäquat abbilden zu können, müssen die für das Verkehrssystem relevanten Entscheidungsträger sowie deren wesentliche Entscheidungen identifiziert werden. Diese Entscheidungen stellen in der Regel stark interdependente mikroökonomische Optimierungsprobleme dar. Zwei Typen von Entscheidungsträgern spielen hierbei eine herausragende Rolle: Firmenlogistiker und Transportlogistikdienstleister. Diese bauen jeweils komplexe Logistik- bzw. Transportnetze auf, die Güterflüsse im Raum wesentlich beeinflussen.

Um die „methodischen Lücken“ auf dem Weg zu einem Maßnahmen-sensitiven Güterverkehrsmodell zumindest teilweise zu schließen, konzentriert sich dieser Aufsatz auf die Abbildung des Transportlogistikdienstleisters in einer Multiagentensimulation des Güterverkehrs. Die Transportlogistikdienstleister werden als zusätzliche Agenten-Schicht in die Verkehrssimulation MATSim (die zu diesem Zeitpunkt auf die Simulation des Personenverkehrs spezialisiert ist) integriert (vgl. [Bal099]). Mit diesem Ansatz lassen sich komplexe Rückkoppelungen zwischen Verkehr, Transport und Logistik abbilden.

Der Aufsatz gliedert sich wie folgt: Im Anschluss an diese einleitenden Vorbemerkungen wird ein kurzer Überblick über die wesentlichen Entwicklungen auf dem Gebiet der Güterverkehrsmodellierung gegeben. Wir konzentrieren uns dabei auf die Abbildung logistischer Entscheidungen. Anschließend wird die Pkw-Simulation von MATSim vorgestellt (Abschnitt 2). Abschnitt 3 erarbeitet die Rolle des Transportlogistikdienstleisters. Dieser wird in Form zweier verschiedener Agenten modelliert: des Transport-Service-Provider-Agenten und des Carrier-Agenten. In Abschnitt 4 wird ein Szenario konstruiert, in dem ein Transport Service Provider und mehrere Carrier eine Nachschubkette bedienen. In aufeinander aufbauenden Fallbeispielen werden zunehmend komplexere Fälle simuliert, um die Funktionalität der entwickelten Simulation zu verdeutlichen. Abschließend fassen wir die Entwicklungen zusammen.

2 Hintergrund

In der Literatur finden sich zwei Gruppen von mikroskopischen Güterverkehrsmodellen: Güterflussbasierte und tourbasierte Modelle.

2.1 Güterflussbasierte Modelle

Güterflussbasierte Modelle werden in der Regel zur Abbildung des interregionalen Güterwirtschaftsverkehrs eingesetzt. [Jon07] entwickeln ein Logistikmodul für ein güterflussbasiertes Verkehrsmodell für Norwegen und Schweden. Dabei werden Handelsströme disaggregiert, um logistische Entscheidungen mikroskopisch abbilden zu können. Zwei wesentliche logistische Entscheidungen werden modelliert: Losgrößenwahl (Entscheidung des Versenders) und Transportkettenwahl (Entscheidung des Transportdienstleisters). Die Transportkettenwahlentscheidung wird in weitere Entscheidungen aufgefächert: (i) Art der Transportkette (direkt oder mehrgliedrig), (ii) Wahl von Umschlagszentren und (iii) die Wahl von Verkehrsmitteln sowie Ladungsträger und Fahrzeugart für jeden Abschnitt der gewählten Transportkette. [Wis07] entwickeln eine Mikrosimulation für den großräumigen urbanen Wirtschaftsverkehr in Tokio, in der explizit folgende logistische Entscheidungen modelliert werden: Losgrößenwahl, Wahl des Transporteurs, Fahrzeugauswahl und Tourenplanungsentscheidung.

In der neueren Literatur finden sich Ansätze, bei denen die einzelnen Akteure mit Hilfe der Agententechnologie aus der Informatik modelliert werden. In agentenbasierten Modellen können Akteure als autonom handelnde Entscheidungseinheiten abgebildet werden. Dies ermöglicht die Modellierung von diversen Koordinationsmechanismen (z.B. Auktionen), Lern- und Optimierungsverhalten sowie die Abbildung von unvollständiger Information. Außerdem lassen sich mit diesem Ansatz kurz-, mittel- und langfristige Entscheidungen voneinander trennen. [Lie09] hat sich dieser Modellierungsmethode bedient und ein Modell für den innerdeutschen Güterverkehr entwickelt. Er unterscheidet zwei Arten von Agenten, den Versender und den Carrier. Der Versender bestimmt Transportlosgröße und beauftragt Carrier; Carrier planen Touren unter Nutzung einer

Tourenplanungsheuristik. Beide Agenten koordinieren sich über einen Transportmarkt. Weitere vielversprechende Ansätze finden sich beispielsweise in [Roo10] und [Ram08].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die beschriebenen Ansätze den Transportlogistikdienstleister explizit abbilden. Aus der Praxis wird deutlich, dass dessen logistische Entscheidungen im Wesentlichen durch die Realisierung von Skaleneffekten motiviert werden. Dies erfolgt prinzipiell auf zwei verschiedenen und dennoch stark interdependenten Ebenen: Auf der Ebene der logistischen Suprastruktur sowie auf der Ebene der Transportmittel. In ihren Modellen tragen die oben genannten Autoren der Realisierung von Skaleneffekten durch die Abbildung folgender logistischer Entscheidungen Rechnung: Transportkettenwahl, Fahrzeugartwahl und Tourenplanung.

2.2 Tourbasierte Modelle

Tourbasierte Modelle werden vornehmlich für die Modellierung des Wirtschaftsverkehrs in Städten und Ballungsräumen eingesetzt. Der urbane Wirtschaftsverkehr unterscheidet sich in mehrerlei Hinsicht vom interregionalen Wirtschaftsverkehr (vgl. [Hun07]): Zunächst sind einige Verkehrsmittel im städtischen Wirtschaftsverkehr faktisch irrelevant (wie zum Beispiel der maritime Transport). Zweitens verstehen wir unter städtischem Wirtschaftsverkehr nicht nur den reinen Gütertransport, sondern auch den Transport zur Erbringung von sonstigen Dienstleistungen sowie den kommerziellen Transport von Personen. Und schließlich stellt der städtische Güterverkehr nur ein sehr begrenztes Teilsystem des Gesamtgüterverkehrssystems dar und ist daher fallweise abhängig vom interregionalen Güterverkehr. Ein tourbasiertes Mikromodell entwickelt beispielsweise [Hun07]. In ihrem Modell bauen sie Touren mit Hilfe von Random Utility Modellen sukzessive zusammen. Ein weiterer tour-basierter Ansatz findet sich in [Jou10], der Touren auf Basis von empirischen Fahrzeugbewegungen rekonstruiert.

Bei der Gegenüberstellung beider Modellwelten lässt sich feststellen, dass güterflussbasierten Mikromodelle einen Schwerpunkt auf Losgrößen- und Verkehrsmittelwahl setzen; Marktinteraktionen werden ebenfalls berücksichtigt und zum Teil erfolgt eine Tourenplanung.

Hingegen fokussieren die meisten tourbasierten Mikromodelle auf die phänomenologische Rekonstruktion von Touren und vernachlässigen vorgelagerte logistische Entscheidungen in den Bereichen Lagerplanung (Standorte), Bestellpolitik, Transportkettenwahl, Zeitfensterbestimmung und Tourenplanung.

Als Brücke zwischen den skizzierten Modellkategorien identifizieren wir den Transportlogistikdienstleister als einen entscheidenden Akteur. Er ist ein Makler in den Transportmärkten und somit ein „Scharnier“ zwischen den Entscheidungen auf der Transportnachfrageseite und der Transportangebotsseite. Seine explizite Einführung kann als Weiterentwicklung tourbasierter Modelle in Richtung güterfluss- bzw. frachtauftragsbasierter Modellierung angesehen werden und ermöglicht verschiedene Perspektiven auf das Transportsystem: Güterflusssicht und Fahrzeugsicht. Letztere erfordert jedoch eine geeignete Abbildung der Transportinfrastruktur sowie ausgefeilte Umlegungsalgorithmen, die die Transportnachfrage unter Berücksichtigung der physischen Gegebenheiten (wie Netzkapazitäten) auf das Transportangebot verteilen. Ein wesentlicher Teil der Netzkapazitäten wird durch den motorisierten Individualverkehr beansprucht. Idealerweise sollte daher der Personen- und der Güterverkehr gemeinsam berücksichtigt werden. Die vergleichsweise ausgereifte Multi-Agenten-Simulation MATSim simuliert Fahrzeuge des MIV im physischen Netz. Sie bietet nicht nur eine Simulationsumgebung für Fahrzeugbewegungen im Raum sondern ebenso klare Schnittstellen für den Informationstransfer von physischer Ebene und individueller Entscheidungsebene.

2.3 MATSim: Pkw-Simulation

Das in MATSim implementierte Verkehrsnachfragemodell besteht aus einer Menge von Agenten, die einzelne Nutzer des Verkehrssystems repräsentieren. Jeder Agent ist mit einem *Plan* ausgestattet, der Orte, Uhrzeiten und Typen aller *Aktivitäten* beinhaltet, die der Agent an diesem Tag geplant hat. Außerdem beinhaltet dieser die *Wege*, die den Ort jeder Aktivität mit dem der nächsten verbinden. Wege können in unterschiedlichen Modi sowie – je nach gewähltem Modus – auf unterschiedlichen Routen durch das Verkehrssystem zurückgelegt

werden. Eine Auswahl für sämtliche dieser Optionen ist im Plan kodiert.

Alle Agenten führen ihre Pläne gleichzeitig in einer Simulation des Transportsystems aus. Die Simulation greift Staueffekte, verpasste Abfahrten öffentlicher Verkehrsmittel und verspätetes Ankommen an Aktivitätsorten auf. Das Ergebnis der Simulation wird den Agenten als Erfahrung zugeführt. Sie verwenden es, um ihre Pläne mit einer *Nutzenfunktion* zu bewerten, die für jedes Individuum personalisiert werden kann (zum Beispiel indem sie von ihrem Einkommen oder ihrem Alter abhängt).

Zu Beginn der nächsten *Iteration* machen einige Agenten einen neuen Plan, indem sie eine Kopie eines ihrer bestehenden Pläne verändern. Dies geschieht mit einem von mehreren unterschiedlichen *Modulen*, die den Entscheidungsdimensionen der Agenten entsprechen. Ein Modul wählt einen neuen Weg, ein anderes wechselt den Verkehrsmodus, und ein weiteres wählt neue Zeiten für die Aktivitäten. Dieser Schritt im Simulationsablauf heißt *Umplanung (re-planning)*. Die Agenten, die keinen neuen Plan machen, wählen einen ihrer bestehenden Pläne, basierend auf einem Random Utility Modell.

Das hier verwendete Modell für Planung und Umplanung ist offensichtlich auf Personenverkehr zugeschnitten. Bisher wurde der Frachtverkehrsanteil in Fallstudien, die mit MATSim durchgeführt wurden, durch Pläne abgebildet, die zwei Aktivitäten enthalten: je eine für das Abholen und das Anliefern der Sendung. Diese wurden durch einen einzelnen Weg verbunden, und es gab in keiner Entscheidungsdimension Anpassungs-Flexibilität außer in der Wegewahl. Der Frachtverkehr diente im Wesentlichen als Teil der Grundbelastung des Verkehrssystems ohne jedoch mit Anpassungsverhalten ausgestattet zu sein. Eines der Ziele dieses Beitrags ist, diese Situation zu verbessern, indem Frachtfahrzeugfahrer als eine eigene Klasse nicht-autonomer Agenten modelliert werden, die von ebenfalls modellierten Frachtverkehrsunternehmen beschäftigt werden und deren Interessen dienen. Die bisher fehlenden Entscheidungsdimensionen der Frachtfahrzeugfahrer werden dann als Logistikerentscheidungen realisiert, die von den Frachtverkehrsunternehmen getroffen werden.

3 Das Agentenmodell

Der Transportlogistikdienstleister verantwortet den Transport zwischen Lieferanten und ihren Empfängern. Er ist folglich zuständig für die Transportorganisation und Transportdurchführung und entspricht demnach dem Bild einer breit aufgestellten klassischen Spedition. Zur Verminderung der Komplexität und zur klaren Trennung verschiedener Rollen wird der Transportlogistikdienstleister in Form zweier verschiedener Agenten modelliert: dem *Transport-Service-Provider-(TSP-)Agenten* und dem *Carrier-Agenten*. Diese Trennung entspricht im Übrigen auch der Spezialisierung in den heutigen Transportmärkten in sogenannten Netzwerkanbietern (wie Kühne+Nagel, Schenker, Stückgutkooperationen) und reinen Fuhrunternehmen. Erstere bieten zunehmend kontraktlogistische Dienstleistungen an und kaufen immer häufiger Dienstleistungen von reinen Frachtführern und Lagerbetreibern ein, anstatt diese selber zu produzieren.

Für jeden der beiden gilt es, die wichtigsten Entscheidungen zu identifizieren und in individuellen Plänen festzuhalten. Ein Plan repräsentiert die voraussichtlich durchzuführenden logistischen Operationen mit beispielsweise einem Transportfall oder einer Transportressource. Die Pläne sind zwar zukunftsgerichtet, doch reflektieren sie auch die gemachten Erfahrungen in der Vergangenheit. Für einen gewissen Zeitraum können sie zu einer Routine werden. Über einen Zeitraum gültige Absprachen zwischen einem Kunden und einem Dienstleister werden in Form von Kontrakten (bzw. Kontraktplänen) festgelegt. Bei Änderungen dieser Arrangements hat zwar in der Regel ein Agent eine stärkere Machtposition, doch schlussendlich müssen bezüglich ihrer Details beide beteiligten Agenten ihr Einverständnis geben. Die Agenten, ihre Fähigkeiten, ihre Handlungen, ihre Erfahrungen und ihre Pläne werden im Folgenden erläutert.

3.1 TSP-Agent

Die *Kontrakte* der TSP-Agenten stellen geschäftliche Verpflichtungen gegenüber den Versendern dar. Ein Kontrakt bestimmt Art der Güter, regelmäßige Transportlosgröße, Gesamtjahresmenge, Versende- und Empfangsort sowie den Preis der Dienstleistung. Ein *Frachtauftrag*

(*Shipment*) zwischen einem Versender und Empfänger stellt die Basistransporteinheit dar.

Jeder TSP-Agent hat Fähigkeiten, Ressourcen und Kenntnisse. TSP-Agenten haben beispielsweise Zugriff auf bestimmte Umschlagzentren, und sie haben Geschäftskontakte zu Carriern. Ihre Planungsintelligenz bezieht sich auf den Einsatz von Carriern und die Planung von Transportketten. Mit diesen Fähigkeiten plant der TSP-Agent die Erfüllung der Transportkontrakte. Für jeden Frachtauftrag legt er eine Transportkette an. Für jedes Glied der Kette wählt er ein Fuhrunternehmen aus (wobei er von Fall zu Fall auch ein Fuhrunternehmen für mehrere Aufträge bestimmen kann). Eine Transportkette ist die Folge von logistischen Umschlagstätigkeiten und eingesetzten Carriern auf dem Weg vom Versender zum Empfänger. Im einfachsten Fall gibt es genau zwei Umschlagstätigkeiten: *Abholung* und *Anlieferung*. TSPs können jedoch auch Hub-and-Spoke-Netzwerke mit *Transshipment* bzw. Umschlagsaktivitäten aufbauen. Ein *Transshipment* ist eine Anlieferungs-Aktivität, die unmittelbar von einer Abholung am gleichen Ort gefolgt wird. Auf diese Weise können intermodale Transportnetze oder aber auch monomodale sowie multimodale Stückgutnetze dargestellt werden.

Der TSP-Agent ist der Planer von Transportketten. Seine Pläne beziehen sich auf das Routing von Frachtaufträgen durch Umschlagzentren sowie durch Netzwerke von beauftragten Subunternehmen.

3.2 Carrier-Agent

Auch die Carrier-Agenten haben Kontrakte. Anstelle der Warenversender sind die Auftraggeber aber in diesem Fall die TSP-Agenten. Diese Kontrakte haben ähnliche Attribute wie die der TSP-Agenten, nur beziehen sie sich auf einzelne Abschnitte der Transportketten der TSPs.

Carrier gelangen an Kontrakte, indem sie an die TSP-Agenten Angebote abgeben. Dabei spezifizieren die TSPs die Attribute der Kontrakte, wie Mengen, Orte, Zeitfenster und Frequenzen. Im derzeitigen Modell wurde auf eine komplexe Abbildung der Marktinteraktionen verzichtet bei der Carrier auch Angebote ablehnen

können. Stattdessen akzeptieren sie jeden gewonnenen Kontrakt (wie es auch in [Tam10] der Fall ist). Die Fähigkeiten der Carrier sind ihre Ressourcen (Fahrzeuge, Depots) und Planungsintelligenz (vereinfachte Tourenplanung). Schließlich gehören auch einfache Preiskalkulationsregeln zur Ausstattung der Carrier. Die wichtigsten Entscheidungen der Carrier sind

- Modalwahl (einschließlich der Wahl aus verschiedenen Fahrzeugarten) und
- Vehicle Routing und Scheduling.

Folglich besteht der Plan eines Carriers aus einer Liste von eingesetzten Fahrzeugen, wobei jedem Fahrzeug ein Tourenplan zugeordnet ist. Jeder Tourplan enthält Abholungen und Anlieferungen sowie die dazugehörigen Zeitfenster. Für jede Tour wird eine Route bestimmt, die die Reihenfolge der Stopps und den Weg durch das physische Netzwerk festlegt. In unserer Implementierung starten und enden alle Touren im Depot.

Für jedes eingesetzte Fahrzeug werden in MATSim ein Fahrzeug und ein Fahreragent angelegt. Der Fahreragent führt seine Tour genauso aus, wie ein Personenverkehrsagent seinen Tagesplan ausführt.

4 Die Simulation

Die Simulation läuft in folgenden Schritten ab:

1. Initialisierung der Welt.
2. Erzeugung der anfänglichen Pläne für die verschiedenen Agenten.
3. Ausführung der Mobilitätssimulation.
4. Bewertung der Pläne.
5. Verbesserung der Pläne.

Die Schritte drei bis fünf werden wiederholt, bis – idealerweise – ein Gleichgewichtszustand erreicht wird.

In Schritt 1 wird der statische Teil des Modells initialisiert. Dieser Vorgang besteht in der Erzeugung des Straßennetzes, der Transport

Service Provider mit den Standorten ihrer Umschlagzentren und der Carrier mit den Standorten ihrer Depots und ihren Fahrzeugflotten.

In Schritt 2 wird für jeden Agenten ein initialer Plan erzeugt. Die Transport Service Provider bilden Transportketten, um ihre Frachtverträge zu erfüllen. Jedes Teilstück von jeder Transportkette wird an einen Carrier vergeben. Die Carrier bilden dann für jedes ihrer Fahrzeuge einen Tourenplan, der Abholungs- und Anlieferungsaktivitäten für die übernommenen Verträge sowie die vollständige Beschreibung der Route durch das Verkehrsnetz enthält. Die Transport Service Provider und die Carrier können für ihre Entscheidungsstrategie auf Informationen über den anfänglichen Zustand des Transportsystems zurückgreifen und damit dessen eingeschränkte Kapazität berücksichtigen. So werden die Routen anhand der Reisezeiten auf dem leeren Straßennetz gewählt.

Diese initialen Pläne für den Frachtverkehr werden dann in die MATSim-Mobilitätssimulation eingespeist. Dort werden sie als Lkw fahrende Agenten repräsentiert und belasten gemeinsam mit dem Personenverkehr das Verkehrssystem. In Schritt 3 führen alle diese Agenten ihre Pläne aus und machen Erfahrungen über die Belastung des Netzes. Währenddessen melden sie ihre frachtbezogenen Aktivitäten an den Carrier, für den sie unterwegs sind.

In Schritt 4 bewerten die Agenten den Erfolg ihres Plans. Das in MATSim verwendete Modell für den Personenverkehr verwendet eine Nutzenfunktion, die darauf zugeschnitten ist, das Ergebnis eines Mobilitätsplans einer Person an einem typischen Arbeitstag zu bewerten. Die hier vorgestellten Frachtverkehrsagenten müssen hingegen eine besondere Nutzenfunktion verwenden, die ihren ökonomischen Erfolg abbildet. Die Carrier berechnen ihre Kosten als Summe der Fahrtkosten ihrer Fahrzeuge und einem Term für individuelle fixe Kosten. Die Transport Service Provider berechnen ihre Kosten als Summe der Entgelte, die sie an Carrier bezahlen und eventuell angefallene Opportunitätskosten für verpasste Zeitfenster.

In Schritt 5 erzeugen Agenten neue Pläne, um in der nächsten Iteration besseren Erfolg zu erzielen. Zum Beispiel können die Carrier-Agenten ein Modul für heuristische, zeitabhängige Tourenplanung verwenden,

um die Fahrzeugpläne neu zu bilden. Stattdessen können sie auch nur neue Routen für die einzelnen Wege suchen. Sie können Lieferungen zwischen Fahrzeugen verschieben oder sogar ein ganzes Fahrzeug hinzufügen oder entfernen. In diesem Schritt aktualisieren die Carrier auch ihre Tariftabellen. Der Transport Service Provider wiederum kann die Zusammensetzung der Transportketten und die Vergabe der Aufträge an die Carrier umplanen. Dazu holt er neue Angebote von den Carriern ein, die auf der Grundlage der aktualisierten Tariftabelle abgegeben werden. Eine wichtige Frage ist an dieser Stelle, wie die Carrier Änderungen an der Menge der von ihnen zu erfüllenden Aufträge in ihre Pläne einbauen. Wenn sie ein Verfahren verwenden, bei dem der Tourenplan in einem Schritt als Funktion der Menge der Aufträge bei gegebener Fahrzeugflotte gebildet wird, ist dies kein besonderes Problem. Wenn aber ein iteratives Verfahren verwendet wird, bei dem an einem bestehenden Plan lokale Änderungen vorgenommen werden, um einen neuen zu erzeugen, so muss eine Möglichkeit gegeben sein, den neuen Plan an die möglicherweise geänderte Menge von Aufträgen anzupassen.

Durch wiederholtes Ausführen ihrer Pläne sammeln sowohl Passagiere als auch Carrier und Transport Service Provider Erfahrung mit dem Verkehrssystem. Die Carrier werden durch Staueffekte und andere Störungen des Verkehrssystems beeinflusst, indem ihre Kosten durch längere Fahrzeugbenutzung steigen oder indem sie für verpasste Abholungs- oder Anlieferungszeitfenster bestraft werden. Die Kosten, die den Carriern entstehen, wirken sich auf ihre Preissysteme aus und kommen dadurch beim Transport Service Provider an. Der wiederum kann auf die Preisänderungen reagieren, indem er Aufträge zu anderen Carriern verlagert oder seine Transportketten umbaut.

5 Fallstudie

Das formulierte Multiagentenmodell wurde in der Programmiersprache JAVA implementiert und mit MATSim integriert. Anschließend wurde ein Szenario für eine Fallstudie aufgesetzt. Der Schwerpunkt dieser Fallstudie liegt darauf, die Funktionalität des Modells und die Rolle der unterschiedlichen Agententypen zu verdeutlichen. Es geht nicht darum, ein realistisches und kalibriertes Verhaltensmodell anzuwenden. Wir

demonstrieren die Interaktion zwischen den Frachtverkehrsagenten, indem wir sie unter unterschiedlichen Bedingungen simulieren, z.B. nach der Durchführung verkehrlicher Maßnahmen wie der Einführung einer Innenstadtmaut.

Szenario

Das Straßennetz für unser Szenario ist ein einfaches Gitter mit einem Stachel. Das Gitter repräsentiert einen vereinfachten Innenstadtbereich. Alle Kanten sind in beide Richtungen befahrbar und haben dieselben Eigenschaften. Jede Kante ist 1 km lang, hat eine Kapazität von 1000 Fahrzeugen pro Stunde und ist für eine Geschwindigkeit von 50 km/h ausgelegt. Der Stachel stellt die Verbindung zu einem weiter entfernten Industriestandort dar. Er ist 80 km lang und erlaubt eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h.

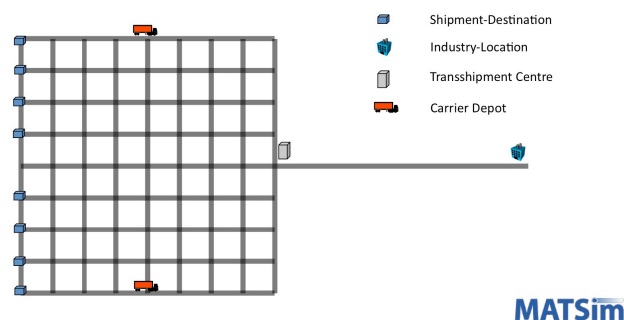


Abbildung 1: Das Szenario

Die Frachtverkehrsagenten sind folgendermaßen ausgestaltet:

Transport-Service-Provider-Agent

Unser Szenario enthält nur einen Transport Service Provider. Er hat acht Frachtaufträge angenommen. Jeder Frachtauftrag hat eine Größe von fünf Einheiten. Alle Shipments beginnen an dem Industriestandort am östlichen Ende des Stachels. Die Ziele der Shipments sind entlang der Nord-Süd-Achse am Westende des Gitters gleich verteilt (siehe Bild 1). Das logistische Netz des TSP-Agenten besteht aus einem Umschlagzentrum, das dort angesiedelt ist, wo die interurbane Straße

(der Stachel) die Stadt verlässt. Der TSP-Agent muss dieses Umschlagzentrum nicht benutzen, er hat nur die Möglichkeit dazu. Außerdem kennt er sämtliche Carrier und kann somit von jedem dieser Carrier Dienstleistungen in Anspruch nehmen.

Das Verhalten des TSP-Agenten besteht im Bilden von Transportketten und in der Auswahl der Carrier. Was die Transportketten angeht, so kann er entweder alle Shipments auf dem direkten Weg vom Industriestandort zu den Zielen befördern, oder er kann sie alle durch das Umschlagzentrum leiten. In jedem Fall holt er Angebote von allen Carrier ein. Der Carrier, der den günstigsten Preis anbietet, erhält den Zuschlag.

Während der Simulation probiert der TSP-Agent die alternativen Transportketten aus und sammelt Informationen über die Performance beider Möglichkeiten.

Carrier Agent

In unserem Experiment gibt es vier Carrier. Zwei von ihnen haben ihren Standort in der Mitte der Nordkante des Gitters. Die anderen beiden sind in der Mitte der Südkante angesiedelt. Jeder Carrier ist mit genau einem Fahrzeug ausgestattet (siehe Tabelle 1). Wir modellieren drei Fahrzeugtypen: Schwere (Kapazität: 40 Einheiten), mittelschwere (20 Einheiten) und leichte Fahrzeuge (10 Einheiten).

Tabelle 1: Carrier

Carrier	Standort	Fahrzeug
Carrier 1	Norden	leicht
Carrier 2	Süden	leicht
Carrier 3	Norden	mittelschwer
Carrier 4	Süden	schwer

Das Verhaltensmodell für die Carrier umfasst Tourenplanung und eine Strategie zur Festsetzung von Preisen. Für die Tourenplanung wird in diesem Szenario eine typische Planungsheuristik verwendet, die aus einem Tourenbildungs- und einem Tourenverbesserungsalgorithmus besteht. Für die Tourenbildung wird der bekannte Savings-Algorithmus von Clarke und Wright [Cla64] verwendet. Als Verbesserungsverfahren

kommt eine spezielle Variante eines Two-Opt-Algorithmus zum Einsatz [Lap00].

Die Preise werden rein kostenorientiert gesetzt, d.h. die Carrier nehmen an, dass sie den Marktpreis nicht beeinflussen können. Wenn ein Carrier mit einer Art von Shipment noch keine Erfahrung gemacht hat, also noch nie einen Auftrag mit der gleichen Quelle, dem gleichen Ziel und gleicher Stückzahl ausgeführt hat, wählt er entweder einen zufälligen Preis (mit einer Wahrscheinlichkeit $p=0.5$) oder einen vorausschauenden Preis ($p=0.5$). Um den vorausschauenden Preis festzusetzen berechnet der Carrier die Luftliniendistanz der betreffenden Strecke und nimmt einen gewissen Beladungsgrad an (eine Zufallszahl zwischen 0.2 und 1). Wenn der Carrier dagegen bereits Erfahrung mit einem ähnlichen Shipment gemacht hat, bietet er mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.8 den Preis aus seiner persönlichen Preisliste an. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.2 weicht der angebotene Preis zufällig vom Listenpreis ab. Die Abweichung ist aber nicht größer als fünfzig Prozent des Listenpreises.

Wenn der Carrier seine Pläne bewertet, aktualisiert er auch seine persönliche Preisliste mit den Kosten jedes ausgeführten Shipments. Die Kosten jedes Shipments werden berechnet, indem die Kosten der Tour auf alle Shipments in der Tour umgelegt werden, proportional zur zurückgelegten Distanz und dem in Anspruch genommenen Anteil an der Kapazität.

In Tabelle 2 sind die Eingabedaten unserer Simulation dargestellt. Wir nehmen der Einfachheit halber an, dass die zurückgelegte Distanz der wichtigste Kostenfaktor ist. Jeder Simulationslauf besteht aus 50 Iterationen. Da das Preisfestsetzungsverhalten der Carrier zufällige Komponenten beinhaltet, haben wir 10 Simulationsläufe mit jeweils unterschiedlichem Anfangswert für den Zufallsgenerator gestartet.

Tabelle 2: Simulationsparameter

Kostenarten	
Kosten pro km	1 [€]
Kosten pro Umschlag	5 [€]
Innenstadtmaut	10 [€]
Simulation	
Anzahl der Iterationen	50
Anzahl der Simulationsläufe	10

Fälle

- **Fall 1:** Die Carrier planen ihre Touren auf triviale Weise. Sie beladen ihr Fahrzeug nur mit je einem Shipment zur gleichen Zeit.
- **Fall 2:** Tourenplanung mit dem Savings-Algorithmus.
- **Fall 3:** Tourenplanung mit dem Savings-Algorithmus. In der Stadt sind schwere Fahrzeuge verboten.
- **Fall 4:** Tourenplanung mit dem Savings-Algorithmus. In der Stadt sind schwere Fahrzeuge verboten. Es gibt eine Innenstadtmaut für mittelschwere Fahrzeuge.

Ergebnisse

In Tabelle 3 wird ein Auszug aus den Ergebnissen gezeigt. Für jeden Fall geben wir die beste und die zweitbeste gefundene Lösung an. Für jeden Carrier wird die insgesamt zurückgelegte Distanz angegeben und ob in der Lösung das Umschlagzentrum (UZ) verwendet wird.

Tabelle 3: Zurückgelegte Fahrzeugmeter pro Carrier

Fall	Carrier 1	Carrier 2	Carrier 3	Carrier 4	Gesamt	UZ
1	184.200	0	366.400	903.000	1.453.600	nein
	366.400	184.200	184.200	720.800	1.455.600	nein
2	0	0	0	206.200	206.200	nein
	0	0	0	206.200	206.200	nein
3	0	0	62.000	180.200	242.200	ja
	0	0	62.000	180.200	242.200	ja
4	54.000	0	36.000	180.200	270.200	ja
	72.000	28.000	0	180.200	280.200	ja

In Fall 1 wurden fast 1500 Fahrzeugkilometer zurückgelegt. Der Fall ist so angelegt, dass jeder Carrier nur ein Shipment im Fahrzeug transportieren kann. Das ist sicherlich ein unrealistisches Szenario, aber es dient als obere Schranke für die Kosten. Alle anderen Szenarien können im Vergleich zu diesem Fall bewertet werden.

In Fall 2 stellen wir die Carrier mit intelligenterem Tourenbildungsverhalten aus. Die beste Lösung hinsichtlich der zurückgelegten Fahrzeugkilometer ist, alle Shipments an Carrier 4 zu vergeben. Dieser verwendet dann seine vergleichsweise große Fahrzeugkapazität, um in einem sogenannten Milk-run, einer einzigen Tour, sämtliche Shipments vom Industriestandort abzuholen und dann auszuliefern. Insgesamt legt er 206 km zurück. Dieses Ergebnis ist die mit Abstand effizienteste Lösung und stellt somit die untere Schranke für die Kosten dar.

In Fall 3 setzen wir ein Verbot für schwere Fahrzeuge in der Stadt in Kraft, d.h. Carrier 4 kann nicht mehr in die Innenstadt fahren, so dass die effiziente Auslieferungsfahrt, wie in Fall 2, nicht mehr möglich ist. Der Einfachheit halber erlauben wir Carrier 4 weiterhin, das städtische Straßennetz zum Verlassen der Stadt sowie zur Rückkehr zum Depot zu nutzen. In der besten Lösung, die für diesen Fall gefunden wurde, kommt das Umschlagzentrum an der Einfahrt zur Innenstadt zur Anwendung. Der TSP-Agent vergibt die Strecke vom Industriestandort

zum Umschlagzentrum an Carrier 4. Dieser kann auf der langen Strecke seinen Konsolidierungsvorteil ausnutzen. Direkt am Umschlagzentrum übernimmt Carrier 3 alle Shipments. Dieser fährt dann zwei Auslieferungstouren vom Umschlagzentrum zu den Zielorten. In diesem Fall ist also eine Transportkette aus zwei Wegen unter Verwendung des Umschlagzentrums die beste Lösung für den TSP-Agenten.

In Fall 4 führen wir eine Stadtmaut für mittelschwere Fahrzeuge ein. Die Maut beträgt 10 € pro Tag und Fahrzeug. Sie wird fällig, wenn ein Fahrzeug in den städtischen Bereich einfährt bzw. das städtische Straßennetz nutzt. Die insgesamt zurückgelegten Fahrzeugkilometer steigen um 12 Prozent, und die Aufträge werden von Carrier 3 zu den Carriern verlagert, die leichte Fahrzeuge verwenden.

6 Zusammenfassung

In diesem Aufsatz wurde ein Multiagentenmodell des Güterverkehrs vorgestellt, bei dem die transportlogistischen Entscheidungen auf zwei Arten von Agenten aufgeteilt worden sind: Transport Service Provider, die Transportketten bauen, und Carrier, die Touren planen und durchführen. Beide Agenten bündeln (konsolidieren) innerhalb ihres Planungsraumes Transportfälle und realisieren auf diese Weise Skaleneffekte.

Auf der untersten Ebene des Modells entstehen Fahrzeugtouren, die in die Verkehrssimulation MATSim eingespeist werden. Änderungen der Verkehrsnachfrage, Störungen im Verkehrssystem oder neue verkehrspolitische Rahmenbedingungen werden durch die Agenten wahrgenommen und in Richtung der vorgelagerten Entscheidungen weitergegeben. Auf diese Weise reagiert das Modell in der Tourenplanung, Fahrzeugwahl und Transportkettenbildung ausweichend auf äußere Einflüsse.

Die Fallstudien zeigen, dass das Modell, welches zunächst auf sehr einfachen heuristischen Entscheidungsregeln seiner Agenten basiert, stufenweise auf einen komplexeren Entscheidungskalkül umgestellt werden kann. Nicht auszuschließen ist jedoch, dass das Gesamtsystem durch fortgesetztes lokales und erfahrungsgetriebenes Lernen zu

realitätsnäheren Planungs- und Handlungsstrategien kommt als dies durch die Anwendung ausgereifter Optimierung der Fall sein könnte: Letztere ist sehr rechenzeitintensiv und kommt immer dann an ihre Grenzen, wenn Probleme stochastisch und/oder durch mehrere miteinander in Beziehung stehende Agenten gelöst werden. In dem vorliegenden Aufsatz wurde auch demonstriert, dass zur Lösung der aktuellen Fragen in der Güterverkehrsmodellierung in die Trickkiste der klassischen Optimierung und ihrer modernen Entwicklungsrichtungen, der Agententechnologie und schließlich auch der Mikroökonomie gegriffen werden muss, um die für das Gesamtsystem relevanten Phänomene adäquat beschreiben zu können. Mit Hilfe der neuen an MATSim gekoppelten Agenten ist es möglich, die Lücke zwischen den erklärenden güterflussbasierten und den phänomenologischen tourbasierten Modellen zu schließen. Daraus könnte sich eines Tages ein verhaltenssensitives Instrument für die Analyse von verkehrspolitischen und logistischen Maßnahmen entwickeln.

Literatur

- [Bal09] Balmer, M., M. Rieser, K. Meister, D. Charypar, N. Lefebvre, K. Nagel, K.W. Axhausen (2009): *MATSim-T: Architecture and Simulation Times*, in A. L. C. Bazzan and F. Klügl (eds.) *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*, 57–78, Information Science Reference, Hershey.
- [Cla64] Clarke, G. and Wright, J.W. (1964): *Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points*. *Operations Research*, 12:568-581.
- [Hun07] Hunt, J.D., Stefan, K.J. (2007): *Tour-based microsimulation of urban commercial movements*. *Transportation Research Part B: Methodological* 41 (9), 981–1013.
- [Jon07] De Jong, G. and Ben-Akiva, M. (2007): *A micro-simulation model of shipment size and transport chain choice*,

Transportation Research Part B 41 (2007), pp. 950–965
(Special Issue on Freight Transport).

- [Jou10] Joubert, J.W., Fourie, P. J., Axhausen, K. W. (2010): *Large-Scale Combined Private Car and Commercial Vehicle Agent-Based Traffic Simulation*, TRB 89th Annual Meeting Compendium of Papers DVD.
- [Lap00] Laporte, G., Gendreau, M., Potvin, J.-Y. and Semet, F. (2000): *Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem*. International Transactions in Operational Research, 7: 285–300.
- [Lie09] Liedtke, G. (2008): *Principles of a micro-behaviour commodity transport modelling*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review Vol. 45, Issue 5, September 2009, Pages 795-809.
- [Ram08] Ramstedt, L. (2008): *Transport policy analysis using multi-agent-based simulation*, Dissertation, Department of Systems and Software Engineering, School of Engineering Blekinge Institute of Technology, Schweden.
- [Roo10] Roorda, M.J., Cavalcante R., McCabe S. and Kwan H. (2010): *A conceptual framework for agent-based modelling of logistics services*, Transportation Research Part E 46, Pages 18-31.
- [Wis07] Wisetjindawat, W, Sano, K., Matsumoto, S. (2007): *Micro-Simulation Model for Modeling Freight Agents Interactions in Urban Freight Movement*, 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 21-25, 2007. Washington D.C.