Universität für Bodenkultur Wien

Department für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften

Institut für Produktionswirtschaft und Logistik
Vorstand: Univ.Prof. Dr. Manfred Gronalt

Betreuer: Univ.Prof. Dr. Manfred Gronalt

AGENTEN-BASIERTE SIMULATION INTERMODALER GÜTERTRANSPORTNETZWERKE

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
an der Universität für Bodenkultur Wien

Eingereicht von
Mag. Edith Schindlbacher

Wien, Dezember 2014

Danksagung

Mein Dank gilt Univ.-Prof. Dr. Manfred Gronalt für die stetige Ermutigung zur Durchführung und der laufenden Unterstützung in der Erarbeitung dieser Dissertation. Danke auch an meinen Zweitbetreuer Univ.-Prof. Dr. Christian Almeder für die Unterstützung dieser Arbeit.

Ein großes Dankeschön geht an meine Kollegen am Institut für Produktionswirtschaft und Logistik. Besonders bedanke ich mich bei Karl Etlinger und Martin Posset für die Mithilfe bei der Bereitstellung der Datengrundlage und bei Benno Hüttler und Nikola Ilo für den Support in simulations- und programmiertechnischen Belangen. Herzlichen Dank an alle Kollegen für die vielen gemütlichen Mittagspausen!

Mama, Papa und Otto, ich bedanke mich für die Sicherheit, die ihr mir in jeder Lebenssituation gebt.

Kurzfassung

Aufgrund der Prognosen für die Entwicklung des Container-Transportvolumens ist der zentral- und osteuropäische Raum aktuell mit Fragestellungen der Terminal-Netzwerkplanung konfrontiert. Die somit anstehenden Planungsmaßnahmen sind nicht zielführend, wenn sie isoliert auf einzelne Teilbereiche des Systems oder regional beschränkt durchgeführt werden, bzw. die Auswirkungen einzelner Initiativen auf das gesamte Transportnetzwerk nicht berücksichtigt werden.

In dieser Arbeit wird daher ein Agenten-basiertes Simulationsmodell zur Planung und Evaluierung von intermodalen Gütertransportnetzwerken vorgestellt, das einen systemumfassenden Ansatz verfolgt. Die Herausforderungen dabei bestehen in der Berücksichtigung der entscheidenden Akteure und der notwendigen Transportinfrastruktur, wie auch der Einführung effizienter Betriebskonzepte sowohl für Terminals als auch für Zugsprodukte innerhalb des betrachteten Netzwerkes und von und zu Import- und Exportregionen. Das Modell ermöglicht unter der Berücksichtigung verschiedener Akteurssichten die dynamische Ermittlung der Leistungsparameter für das gesamte Netzwerk und der einzelnen Systemelemente.

Die entwickelten Betriebskonzepte und verschiedenen Funktionalitäten des Simulationsmodells werden anhand von Anwendungsfällen auf ihre Anwendbarkeit getestet, und in weiterer Folge entsprechende Netzwerkkonfigurationen für unterschiedliche Transportnachfragemengen ermittelt.

Schlagwörter: Agent-basierte Simulation, Intermodale Netzwerke, Containertransport

Abstract

Future prospects of the development of intermodal transport clearly show that central and eastern Europe actually faces challenges in terminal network evolution. Isolated measures concerning only parts of the system or with limited regional scope remain unrewarded. The same applies for individual activities with no regard to the impact on the whole network.

This work presents an agent-based simulation model for the planning and evaluation of intermodal freight transportation networks with a system-wide scope. The challenges can first be seen in the incorporation of the significant actors. Second, efficient operational concepts have to be established for the intermodal terminals and also for the train products on a network-spanning level. The developed model eventually enables the dynamic evaluation of the performance of the whole system, as well as on the level of individual elements.

The designed opertional concepts and model functionalities are thereafter tested and approved by implenting user cases for various operational and infrastructural network configurations and different scenarios of transportation demand.

Key words: Agent-based simulation, intermodal networks, container transportation

Inhaltsverzeichnis

I. Einleitung 11

1. Ausgangslage und Zielsetzung 13

2. Grundlagen System Intermodaler Verkehr 15

3. Stand der Forschung 17

3.1 Netzwerkplanung 19

3.2 Agenten-basierte Simulation und Gütertransportsystemmodelle 23

II. Modellierung 29

4. Netzwerk und Betrieb 31

4.1 Modellterminals 32

4.2 Modellzüge 33

5. Agenten-basiertes Netzwerk Simulationsmodell 34

5.1 Grundlagen Agenten-basierter Modellierung und Simulation 34

5.2 Simulationsumgebung AnyLogic® 35

5.3 Konzeptentwicklung und Modellimplementierung 36

5.3.1 Modell Klassen 36

5.3.2 Beispiele zur Modellfunktionalität und Entscheidungsfindung 57

5.4 Ergebnisparameter und Kennzahlen 62

III. Modellvalidierung 67

6. Modellzüge und Basisfahrpläne 69

IV. Anwendungsfälle und Ergebnisse 75

7. Rahmenbedingungen 77

8. Netzwerktopologie 77

9. Daten Transportnachfrage 79

10. Szenarien 80

11. Zusammenfassung und Ausblick 94

A. Literatur 97

B. Routing Algorithmus und Quelle Transportdaten 103

C. Tabellenverzeichnis 105

D. Abbildungsverzeichnis 107

I. Einleitung

1. Ausgangslage und Zielsetzung

Die Prognosen für die Entwicklung des Container-Transportvolumens gehen nach der krisenbedingten Wachstumspause im Jahr 2009 von einer Fortsetzung der stetig steigenden Zahlen aus (Seidelmann, 2010). Dadurch stehen für den gesamteuropäischen Raum nicht nur notwendige Ausbaumaßnahmen von bestehender Infrastruktur an, sondern auch die Anbindung und Erschließung neuer Regionen, vor allem in Zentral- und Osteuropa (CEE), wird von großer Bedeutung. Aktuelle Studien über die Entwicklung des intermodalen Schienen- und Straßentransports in den zentral- und osteuropäischen Staaten beleuchten die dafür relevanten sozioökonomischen Faktoren und berücksichtigen auch politische, infrastrukturelle und brancheninterne Kriterien. Als treibende Schlüsselfaktoren für Transportvolumen und Marktpotenzial werden unter anderem Restrukturierungen in Wirtschafts- und Finanzpolitik, Erweiterung der Eurozone, steigender Privatkonsum und fortschreitende Entwicklung des industriellen Sektors genannt. Im Zuge der Integration neuer EU-Mitgliedstaaten und aktueller Beitrittskandidaten wurden Programme zur Verbesserung der Transportinfrastruktur entwickelt. Zu diesen Programmen gehören u.a. ambitionierte Ausbaupläne für Hafenanlagen, wodurch sich auch der Hinter- und Binnenlandtransport entwickeln kann, und auch der für die nächsten Jahre geplante Ausbau der Trans-europäischen Korridore IV, V, IX und X. Abbildung 1 aus (UIC, 2010) verdeutlicht diesen Wachstumstrend und zeigt das Transportvolumen in TEU im Jahr 2007 im Vergleich zum prognostizierten Wachstum des Transportvolumens in den CEE - Ländern im unbegleiteten intermodalen Verkehr bis zum Jahr 2020.

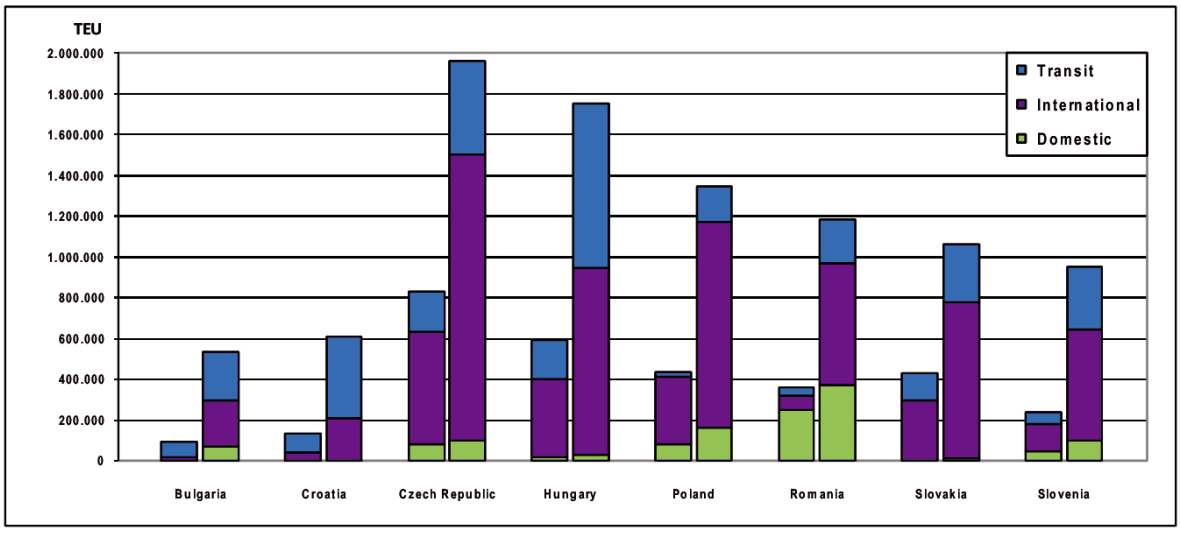


Abbildung 1: Transportvolumen in TEU im unbegleiteten intermodalen Verkehr 2007/2020

Als Konsequenz dieser Entwicklung erwarten die Experten des Eisenbahnverbandes UIC schon für das Jahr 2015 erhebliche Kapazitätsengpässe, sowohl im europäischen Schienennetz, als auch bei den entsprechenden Terminals des Netzwerkes (Seidelmann, 2010). Für

diese zu erwartende Situation gibt Abbildung 2 aus UIC (2010) einen Überblick, der unabhängig von exakten Standorten bestehender Terminals und geplanter Terminals, die Umlegung der Transportströme auf die dafür benötigte Umschlagskapazität in zentraleuropäischen Terminalregionen zeigt.

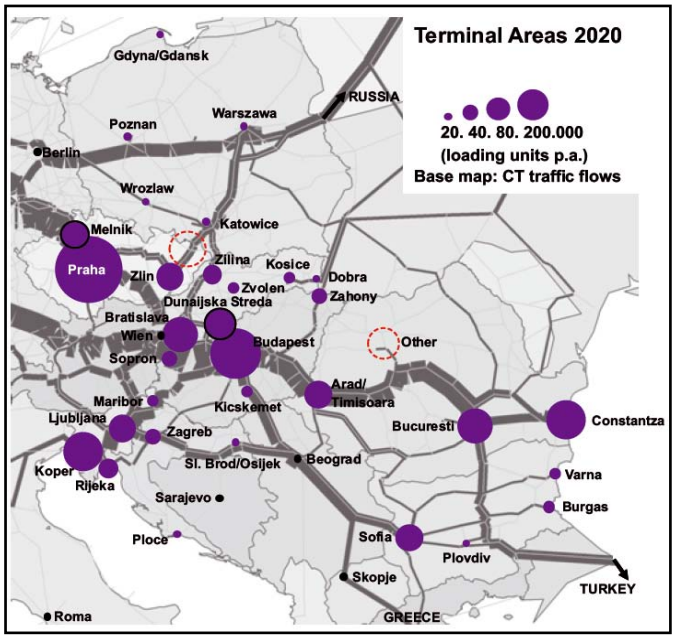


Abbildung 2: Benötigte Umschlagskapazität in Ladeeinheiten je Terminalregion im Jahr 2020

Die Herausforderungen bestehen nun in der zeitgerechten Planung des Ausbaus der Transportinfrastruktur und der Einführung effizienter Betriebskonzepte, sowohl für Terminals als auch für Zugprodukte im intermodalen Güterverkehr. Zu beachten sind dabei auch Lösungen für die Entlastung der aktuellen Hauptanlaufstellen für den europäischen Import und Export, vor allem der europäischen Nordhäfen, beispielsweise durch die Förderung der Erreichbarkeit durch die Bildung neuer starker Verkehrsachsen und Erweiterung von Hafenanlagen im Baltischen Raum wie auch der Südhäfen (EC, 2005).

Wie wichtig die grenzüberschreitende Koordination der Terminalentwicklung ist, betont etwa auch der Geschäftsführer von Kombiverkehr Deutsche Gesellschaft für kombinierten Güterverkehr mbH & Co KG: „Nur wenn in ganz Europa die Umschlagkapazitäten für den Kombinierten Verkehr Schiene-Straße im Gleichschritt wachsen, können wir neue internationale Züge bedarfsgerecht aufbauen." (Kombiverkehr, 2007).

Auch zahlreiche von Regional- und Infrastrukturförderprogrammen der EU unterstützte Projekte zeigen die Aktualität und Bedeutung die der Weiterentwicklung des europäischen intermodalen Transportnetzwerkes zukommt (siehe Punkt 2.). Der Fokus der Projekte liegt auf dem Ausbau und der Stärkung der Hauptverkehrsachsen des wachsenden europäischen Rau-

mes. Besondere Aufmerksamkeit kommt der Vernetzung mit dem Süd- und Osteuropäischen Raum zu, sowie auch der innerstaatlichen Erschließung dieser Regionen.

Ein Erfordernis um der wachsenden Transportnachfrage gerecht zu werden ist auch die weitere Optimierung und Flexibilisierung des Kombinierten Verkehrs. Besonders großes Potenzial liegt hierbei noch in der Verbesserung von Schnittstellen in der eingesetzten Informations- und Kommunikationstechnologie (Posset et al., 2014).

Die somit anstehenden Planungsmaßnahmen sind nicht zielführend, wenn sie isoliert auf einzelne Teilbereiche des Systems oder regional beschränkt durchgeführt werden, bzw. die Auswirkungen einzelner Initiativen auf das gesamte Transportnetzwerk nicht berücksichtigt werden. Ziel der vorgelegten Arbeit ist daher die Entwicklung eines Agenten-basierten Simulationstools für die Planung und Evaluierung intermodaler Gütertransport-Netzwerke zur Unterstützung der sich abzeichnenden Infrastrukturentwicklungen. Mit Hilfe der Simulation können verschiedene Netzwerkdesigns, einerseits gegeben durch Variation der Terminalstandorte und der jeweiligen Betriebskonzepte, und andererseits durch unterschiedliche Fahrpläne und Zugprodukte, hinsichtlich der Gesamtleistungsfähigkeit aber auch der Leistungsparameter der einzelnen Netzwerkkomponenten miteinander verglichen werden. Die Simulation kann über den zeitlich dynamischen Zugang beispielsweise den Effekt einzelner Zugprodukte auswerten oder die Rolle einzelner Terminals im Netzwerk mit ganz bestimmten Aufgaben versehen. Was den hier vorgestellten Modellierungs- und Simulationsansatz von den in Punkt 2. genannten bereits vorliegenden Arbeiten unterscheidet, ist vor allem die Betrachtung eines gesamten Netzwerkes und nicht nur einzelner Systemelemente und die Anwendung des Agenten-basierten Simulationsansatzes.

2. Grundlagen System Intermodaler Verkehr

Per Definition von UN/ECE (2001) bezeichnet der Begriff Intermodaler Verkehr „den Transport von Gütern in ein und derselben Ladeeinheit oder demselben Straßenfahrzeug auf zwei oder mehreren Verkehrsträgern, wobei ein Wechsel der Ladeeinheit, aber kein Umschlag der transportierten Güter selbst erfolgt“. Zum Einsatz kommen dabei Ladeeinheiten vom Typ Container, Wechselbehälter und Sattelanhänger. Eine noch spezifischere Form des Transports ist der in dieser Arbeit analysierte Kombinierte Verkehr. Dies „ist ein Intermodaler Verkehr, bei dem der überwiegende Teil der in Europa zurückgelegten Strecke mit der Eisenbahn, dem Binnen- oder Seeschiff bewältigt und der Vor- und Nachlauf auf der Straße so kurz wie möglich gehalten wird“ (UN/ECE, 2001).

Eine Transportkette im Kombinierten Verkehr gliedert sich, wie in Abbildung 3 dargestellt, in die Elemente Vorlauf, Hauptlauf und Nachlauf, wobei dazwischen ein Umschlagsprozess in einem Terminal oder Binnenhafen stattfindet.

Der Transportprozess beginnt mit dem sogenannten Vorlauf, welcher den Transport der intermodalen Ladeeinheit des Verladers durch einen Frachtführer oder Spediteur auf der Straße (oder im Fall eines Versenders mit Gleisanschluss auf der Schiene) zum ersten Umschlagsknoten bezeichnet. Hier findet der Umschlag der Ladeeinheit auf den Verkehrsträger Schiene oder Binnenwasserstraße statt. Nun beginnt der Hauptlauf bis zum Umschlagsknoten des Empfängers, der auch weitere Umschläge zwischen denselben oder zu anderen Verkehrsträgern beinhalten kann. Schlussendlich wird im Nachlauf die Ladeeinheit vom Umschlagsknoten, in der Regel nach einem weiteren Verkehrsträgerwechsel wieder per LKW, zum Empfänger befördert.

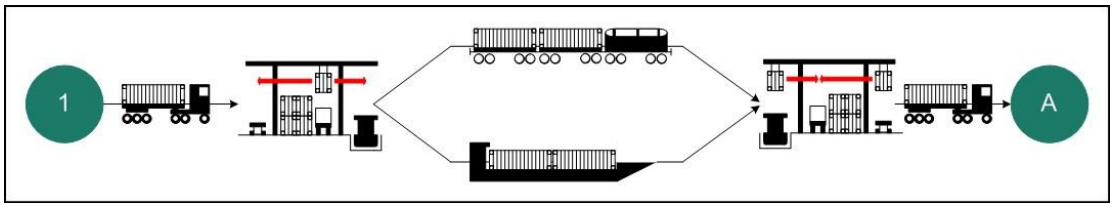


Abbildung 3: Intermodaler Verkehr. Quelle: Posset et al. (2014), S.37

In die Abwicklung dieses Transportprozesses ist eine Reihe von Akteuren eingebunden. Abbildung 4 zeigt den Informationsfluss und auch den Güterstrom zwischen den Beteiligten.

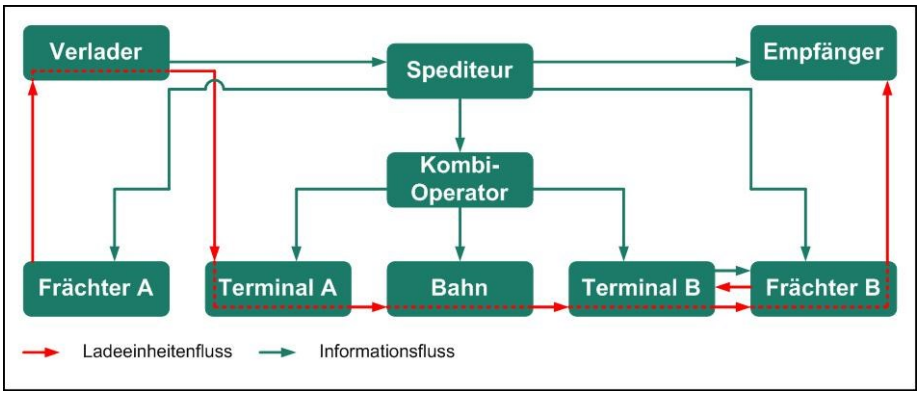


Abbildung 4: Zusammenspiel der beteiligten Partner im Kombinierten Verkehr. Quelle: Posset et al. (2014)

Der Verlader (eine natürliche oder juristische Person) übergibt die zu versendenden Güter an einen Spediteur oder Frachtführer mit dem Auftrag, diese an den Empfänger auszuliefern. Der Spediteur ist für die Organisation des Transportes und damit zusammenhängenden Dienstleistungen verantwortlich, der Frachtführer hingegen übernimmt dessen Durchführung. Ein Spediteur kann beim Vorhandensein entsprechender Mittel auch als Frachtführer fungieren. Kombi-Operators bieten den Zugang zum Intermodalen Verkehr, in dem sie an der Schnitt-

stelle zwischen den Verkehrsträgern agieren und die Zugsverbindungen zwischen den Terminals, oder auch die Abwicklung der gesamten Transportkette vom Verlader zum Empfänger anbieten. Der Terminal bietet die Infrastruktur und die notwendigen Dienstleistungen rund um den Umschlag der Ladeeinheiten zwischen den verschiedenen Verkehrsträgern. Schließlich wirken noch jene Akteure, die die tatsächliche Transportleistung auf Schiene (Eisenbahnverkehrsunternehmen) und Wasserstraße (Liniendienstbetreiber der Binnenschifffahrt und Reedereien) erbringen, und alle zuständigen Infrastrukturbetreiber auf den Transportprozess mit ein (vgl. Posset et al., 2014).

Eine umfassende Beschreibung des Systems Intermodaler Verkehr geben Posset et al. (2014) und stellen ausführliche Informationen über die Transportprozesse und dafür notwendigen Infrastrukturen, die beteiligten Akteure sowie rechtliche und organisatorische Rahmenbedingungen bereit.

3. Stand der Forschung

Zu Beginn der Forschungsübersicht wird ein Auszug bereits durchgeführter Projekte im Themenfeld vorgestellt. Umfassenden Überblick dazu geben Projektdatenbanken wie bspw. das Transport Research Portal, das die Förderung eines engeren und besseren Austausches zwischen Forschenden zum Ziel hat (Transport Research Portal, 2010) oder das Portal der Europäischen Kommission, das Informationen über alle EU-finanzierten Forschungsprogramme sowie ihrer Ergebnisse zur Verfügung stellt (EC, 2010). Die Übersicht über den wissenschaftlichen State of the Art gliedert behandelte Problemstellungen und Lösungsansätze nach den verschiedenen Planungsebenen und zeigt bisherige Anwendungen von Simulationsmethoden und speziell ABS in Gütertransportproblemen auf.

Die Schwerpunkte der von der EU geförderten, meist in Kooperation von Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung durchgeführten Projekte richten sich sowohl auf infrastrukturelle Belange und technische Interoperabilität, als auch auf die Kompatibilität von Informations- und Kommunikationstechnologien und die Zusammenarbeit auf organisatorischer Ebene. Das Projekt B2B Loco etwa hat zum Ziel, eine Plattform von Wissen, Best Practices, neuen Technologien und Lösungen in der Transportlogistik zu schaffen, mit der Perspektive der Förderung der Kooperation von klein- und mittelständischen Unternehmen und marktorientierter Forschung (B2B Loco, 2010). Die Analyse der operationalen und logistischen Voraussetzungen für die Entwicklung eines nahtlosen schienenbasierten Gütertransportservices zwischen den Benelux Staaten und der Türkei bzw. Griechenland auf einem Trans-europäischen Megakorridor hat sich das Projekt CREAM zur Aufgabe gemacht (CREAM, 2011). Der Fokus des Projekts TRANSITECTS liegt in der Förderung des alpenquerenden Transports durch die Steigerung der Attraktivität der Schienenverbindungen im begleiteten und unbegleiteten kombinierten Verkehr (TRANSITECTS, 2010). Im skandinavischen Raum arbeitet das Projekt

COINCO North unter anderem an der Entwicklung einer umweltfreundlichen und effizienten Infrastruktur für den Personen- und Gütertransport in der Region Oslo-Göteborg-Malmö/Øresund, sowie dessen internationale Anbindung (COINCO North, 2010). Diese Anbindung kann z.B. an den Ost-West Transportkorridor zwischen Skandinavien und Litauen erfolgen, dessen Weiterentwicklung das Ziel des Projektes EAST WEST TC und des Nachfolgeprojekts EAST WEST TC II ist (EWTC, 2007 und EWTC, 2011). Mit der Etablierung eines integrierten Transportsystems in der Region des Baltischen Meeres und vor allem der Förderung von dessen Gateway Funktion beschäftigt sich das Projekt TransBaltic (TransBaltic, 2011). Diese Maßnahmen haben auch wesentlichen Einfluss auf die Kapazität des Transeuropäischen Korridors VI in Richtung Süden. Diese Nord-Süd Achse von der Baltischen See bis zur Adria ist der Mittelpunkt mehrerer Initiativen. Das Projekt FLAVIA zielt darauf ab, die intermodale Güterverkehrslogistik zwischen Zentral- und Südosteuropa zu verbessern, ohne in neue Infrastruktur investieren zu müssen. Mit Benchmarking, Engpassanalysen und Zugänglichkeitsanalysen sollen Maßnahmen für eine bessere Interkonnektivität getroffen werden um dazu beizutragen, das Potenzial des Schienengüterverkehrs besser auszuschöpfen (FLAVIA, 2010). Die Weiterentwicklung des Baltisch-Adriatischen Schienenkorridors ist auch das Ziel der transnationalen Forschungsprojekte BATCo, SoNorA und Scandria mit der Aufgabenstellung der Strategieentwicklung für Infrastrukturinvestitionen und auch strategischen Logistiklösungen (BATCo, 2010, SonNorA, 2010 und Scandria, 2010).

All diesen Projekten ist gemeinsam, dass sie übergeordnete und überregionale Problemstellungen behandeln. Der wissenschaftliche State of the Art konzentriert sich auf die Entwicklung von Modellen zur Entscheidungsunterstützung auf verschiedensten Ebenen:

Die Klassifizierung der Planungsebenen für Transportservices hinsichtlich des Planungshorizonts, siehe bspw. Crainic (2000), Macharis und Bontekoning (2004), beginnt mit der Unterscheidung in langfristige strategische Entscheidungen, die über die Grundstruktur hinsichtlich der Menge an Ressourcen, Standorten und benötigter Infrastruktur bestimmen. Im nächsten Schritt, der taktischen mittelfristigen Planung, wird über die optimale Auslastung der Infrastrukturen einerseits durch Zuweisung der Transportflüsse und andererseits durch Festlegung des Transportangebots entschieden. Hier wird meist eine Unterscheidung in Regional- und Ferntransporte getroffen. Speziell in der ersten Kategorie wo es weniger Bündelungseffekte gibt, kann dies bei nicht adäquater Einschätzung der zukünftigen Nachfrage, z.B. auch durch saisonale Schwankungen, zu ineffizienter Ressourcennutzung führen. In der letzten Ebene, der operativen Planung, wird auf die Dynamik von kurzfristigen Ereignissen reagiert und die Services der taktischen Planung auf die aktuellen Anforderungen angepasst. In diesen Bereich fallen u.a. Einsatzplanung für Personal und Equipment, die Terminplanung für Wartungsarbeiten wie auch das kurzfristige Routing für Transporte.

3.1 Netzwerkplanung

Der erste Schritt in der Planung von Transportnetzwerken ist die Festlegung der Netzwerktopologie. Einen Überblick über Standortplanungsprobleme, sogenannte Hub Location Problems, geben Alumur und Kara (2008). Von Yamada et al. (2009) wird ein kombinierter Optimierungsansatz für das Design von multimodalen Transportnetzwerken angewandt. Die Methode entscheidet einerseits auf infrastruktureller Ebene über die Verbesserung oder die Neueinführung von Straßen, Schienen, Wasserstraßen und Terminals, und ist kombiniert mit einer Methode zur Zuweisung der Transportflüsse, welche die zuvor getroffenen Entscheidungen der infrastrukturellen Veränderungen mitberücksichtigt. Etlinger et al. (2013) zeigen einen Ansatz zur Bestimmung der Grundtopologie und Zuweisung der Transportflüsse für intermodale Netzwerke. Zur Standortplanung von Terminals wird ein Mixed Integer Linear Programming Modell angewandt, das auf Basis der Gesamtkosten von Containertransport und -handling für eine bestimmte Transportnachfrage aus einer Menge möglicher Terminals die optimalen Standorte ermittelt. Zusätzlich wird den ausgewählten Terminals ein bestimmter Terminaltyp, welche sich nach Kapazitäten und Kostenstrukturen unterscheiden, zugewiesen und auch die Berücksichtigung von Restriktionen hinsichtlich der Anzahl der Verbindungen zwischen den Terminals ist möglich.

Auf strategischer Ebene kommen zur Prognose von Güterverkehrsaufkommen und deren Planung bzw. Allokation sogenannte Makromodelle zum Einsatz. Das Modell STAN (Guélat et al., 1990; Crainic et al., 1990) wurde in Skandinavien zur nationalen Transportplanung verwendet und beschäftigt sich mit der strategischen Planung von Güterflüssen mit dem Ziel durch die Zuordnung der Verkehre zu verschiedenen Modi und Transportrouten die Gesamtkosten zu minimieren.

Im Projekt DSSITP - Decision Support System for Intermodal Transport Policy (Macharis et al., 2011) kommen drei Modelle gemeinsam zur Entscheidungsunterstützung bei der Strategieentwicklung für den Intermodalen Transport zum Einsatz. Kombiniert werden die Modelle NODUS (siehe auch Jourquin und Beuthe, 1996 und Geerts und Jourquin, 2001), das bei Kostenminimierung den Modus und die Route für Transporte auswählt, das Modell LAMBIT, ein Tool zur Standortanalyse für Terminals und das Modell SIMBA, welches Binnen-Schiffstransporte simuliert.

Zur nationalen Gütertransportprognose für Deutschland und Bestimmung des Modal Split und auch der Terminalwahl wird das Modell SimuGV (Schneider et al., 2003) herangezogen. SimuGV ist auch in das Modellsystem MOSES – Strategic Simulation and Modelling Tool for Rail Freight Transportation eingebunden, das von der Deutsche Bahn AG angewandt wird (Schneider, 2003).

Einen Schritt weiter gehen Modelle, die speziell auf die Optimierung und Simulation von intermodalen Gütertransporten ausgerichtet sind. In diesem Bereich wurden schon eine Vielzahl

von Modellen mit unterschiedlichem Fokus hinsichtlich des untersuchten Bereichs im intermodalen System und anderen Schwerpunkten in der Fragestellung entwickelt. Die Komplexität des Systems intermodaler Verkehr wird u.a. auch dadurch verdeutlicht, dass der Großteil der Arbeiten sich auf einen Teilbereich und eine spezielle Problemstellung in der Transportkette beschränkt.

Im transnationalen Forschungsprojekt „MINT - model and decision support system for evaluation of intermodal terminal networks“ im Rahmen des Forschungsprogramms ERA-NET TRANSPORT, hat sich dieser Sachverhalt bereits deutlich herausgestellt. So wurden z.B. Modelle entwickelt, die den Modal Split auf Basis der Kosten zwischen Schiene und Straße kalkulieren (Floden, 2007), Modelle, die sich auf die Kostenberechnung von Schienentransporten fokussieren (Troche, 2009), detaillierte Terminal-Simulationsmodelle (Benna und Gronalt, 2008; Gronalt et al., 2008 und 2012) oder auch Simulationsmodelle von Verschubtätigkeiten (Hüttler et al., 2012). Schienennetzwerk-Simulationsmodelle ermöglichen eine ausführliche Nachbildung von allgemeinen Zugbewegungen und spezifischen Schienenkapazitätsanalysen. Modelloutput sind dann Parameter wie die Summierung von Verspätungen, die Anzahl verspäteter Züge oder durchschnittliche Verspätungen. Modelle mit dieser Funktionalität sind u.a. SIMONE, RailSys, SiSYFE, SIMU, IS SENA (CAPMAN, 2004) oder auch OpenTrack (Nash und Hürlimann, 2004 und Opentrack, 2010).

Auf taktischer Ebene gibt Wieberneit (2008) einen Forschungsüberblick über die Behandlung von Problemstellungen im Design von Transportservices mit Hilfe von mathematischen Optimierungsansätzen. Die Aufgabenstellungen umfassen hier Entscheidungen über die Häufigkeit, den Modus, den Fahrplan und die Route eines Transportservice, sowie auch das Routing der Fracht im angebotenen Servicenetzwerk. Zusätzlich werden Fragestellungen der Zuordnung von Personal und Transportmitteln und die Repositionierung von Leercontainern und Transportmitteln behandelt. Alle diese Entscheidungen haben wechselseitige Auswirkungen aufeinander. Die evaluierten Ansätze behandeln allerdings immer nur Teile des Systems und so zeigt die untersuchte Literatur auch die Schwierigkeit auf, realistische Problemstellungen zu lösen. Eine Literaturanalyse zum Themenbereich der Multimodalen Gütertransportplanung von SteadieSeifi et al. (2014) unterstreicht diese Erkenntnisse. Die Analyse mit Schwerpunkt auf Arbeiten zu taktischen Planungsproblemen ergibt, dass die gleichzeitige Planung für verschiedene Ressourcen und auch dynamische und stochastische Aspekte in der Datengrundlage in die Lösungsansätze miteinbezogen werden sollen. Die Autoren sprechen sich weiters für die Integration verschiedener Planungsstufen aus, wobei jedoch auch schon die Komplexität der einzelnen Problemstellungen bestätigt wird.

Mit Hilfe eines Optimierungsmodells auf taktischer Planungsebene zielen Andersen et al. 2009) darauf ab, Potentiale für die Verbesserung der Interoperabilität bei grenzüberschreitenden Transporten aufzuzeigen. Ziel des eingesetzten Modells ist eine verbesserte Integration des Flottenmanagements und des Design des Service-Netzwerkes, wobei der Austausch und

die Kooperation zwischen Subsystemen ein wichtiger Faktor ist. Das Hauptziel ist die Bestimmung der Abfahrtszeiten von Services, so dass die Durchlaufzeit für eine bestimmte Nachfragemenge minimiert wird. Der Ansatz berücksichtigt des Weiteren auch Warte- und Bearbeitungszeiten in Netzwerkknoten.

Ein weiterer mathematischer Ansatz wird von Anghinolfi et al. (2011) zur Planung von Containertransporten in Schienennetzwerken mit Terminals mit spezieller Technologie für schnellen Containerumschlag gewählt. Die Route durch das Netzwerk und die folglich gewählten Züge sollen so bestimmt werden, dass auch die vorgegebenen Erfordernisse hinsichtlich der Ankunftszeit der einzelnen Transporte eingehalten werden. Die Planung erfolgt in zwei Schritten. Für jeden Container werden zuerst werden alle möglichen Züge der Route, und daraus die Sequenz der tatsächlich verwendeten Züge ermittelt. Im Anschluss erfolgt die Bestimmung des verwendeten Waggons je vorausgewähltem Zug als entscheidendes Kriterium für den möglichst schnellen Umschlag im Terminal.

Viele Arbeiten behandeln die Kostenoptimierung von Transportsystemen. Beispielsweise präsentieren Lindstrom Bandeira et al. (2009) ein System zur Entscheidungsunterstützung für integrierte Voll- und Leercontainertransporte mit dem Ziel die Gesamtkosten für Transport, Handling und Lagerung zu minimieren. Die Methode schlägt die Splittung des Problems in ein statisches Modell zur kostenoptimalen Zuordnung der Container, inklusive Transport, Handling und Lagerung, zu den Nachfragepunkten ohne Berücksichtigung der Transportzeiten, und der anschließenden Anwendung eines heuristischen Modells zur Verwendung dieser Lösung als Ausgangspunkt für die zeitliche Disposition vor. Janic (2007) stellt ein Modell zur Kalkulation der internen und externen Kosten für intermodale Netzwerke und Straßennetzwerke vor. Sensitivitätsanalysen bei der Anwendung auf ein vereinfachtes europäisches Netzwerk zeigen überproportionale Kostensenkungen bei steigenden Transportdistanzen für beide Netzwerke, stärker ausgeprägt jedoch im intermodalen Netz. Weitere Untersuchungen mit der Unterscheidung zwischen konventionellen Zügen mit einer Länge von 500 bis 600 Metern und speziell langen Zügen von 800 bis 1000 Metern Länge, sogenannten Long Intermodal Freight Trains, ergaben eine Verringerung des Break-even Punkts in der Transportdistanz um 300 km durch Letztere (Janic, 2008).

Ballis und Golias (2002 und 2004) und Abacoumkin und Ballis (2004) führen eine komparative Kosten/Mengen-Analyse für verschiedene Entwürfe bimodaler Terminals durch. Berücksichtigt werden einerseits verschiedene Parameter hinsichtlich Infrastruktur und Technologien, andererseits fließen organisatorische Parameter wie z.B. Ankunftszeitenverteilungen der LKWs und unterschiedliche Zugprodukte in die Analyse mit ein. Ergebnis ist, dass jedes Design für eine gewisse Spanne im Volumen das Effektivste ist.

Die Frage, wie intermodale Transporte eine Konkurrenz zum monomodalen Straßentransport darstellen können stellen sich Bierwirth et al. (2012). Die Autoren entwickeln ein Planungs-

modell zur Konsolidierung von Güterflüssen auf taktischer Ebene, das unter Berücksichtigung von Kostenfaktoren über Transportmodus, Transportservice und Terminals entscheidet.

Andere Arbeiten legen den Schwerpunkt auf die Rahmenbedingungen für Transportsysteme und Koordinationsprozesse zwischen den Systemteilnehmern. Miller-Hooks et al. (2007) stellen eine Analyse von operationalen und regulatorischen Strategien zur Förderung der Attraktivität eines Korridors zwischen den skandinavischen Ländern und Südosteuropa vor. Es kommt ein Rahmenwerk zur Simulation und dynamischen Zuordnung von Transportaufträgen zu verschiedenen Varianten des angebotenen multimodalen Transportnetzwerkes zum Einsatz. Zuerst wird mittels eines kosten- und zeitbasierten Routingalgorithmus ein Set von Pfaden kombiniert aus Strecken und Modi ermittelt, das anschließend von einer Zuordnungs-Komponente für die Generierung der Netzwerkflüsse herangezogen wird. Abschließend kommt eine Simulationskomponente zum Einsatz, die ein Warteschlangenmodell zur Simulation des Zeitbedarfes der Aufträge auf Strecken und Knoten implementiert (Mahmassani et al., 2007).

Auch Lehtinen und Bask (2012) konzentrieren sich in Ihrer Arbeit auf den Transportkorridor zwischen Skandinavien und Südosteuropa. Mit Hilfe von Experten werden verschiedene Businessmodelle und ihre mögliche Entwicklung in einem Zeitfenster von fünf Jahren diskutiert, die durch die Kombination von Schienen-, Straßen- und Short-Sea Wasserstraßenverbindungen auch die peripheren nördlichen Regionen an das kerneuropäische Transportnetz anbinden. Das größte Potential als Startmodell für den Korridor wird einem Modell zugewiesen, das durch strategische Allianzen zwischen den Spediteuren und Reedern/Operatoren gekennzeichnet ist.

In diese Richtung gehen auch die Forschungsergebnisse von Puettmann und Stadtler (2010). Sie streichen einen Mangel an Forschung im Bereich kooperativer Planungsansätze für intermodale Transportketten mehrerer Serviceanbieter hervor. Die Autoren stellen ein Koordinationssystem für drei Parteien, einen Spediteur für den Vorlauf, einen Operator für den Hauptlauf und einen weiteren Spediteur für den Nachlauf, vor, das auf iterativen gegenseitigen Angeboten und der individuellen Entscheidungsfindung auf Basis mathematischer Modelle beruht und die Minimierung der Gesamtkosten zum Ziel hat. Der Vorteil dieses Ansatzes gegenüber z.B. der zentralen Planungseinheit im Modell von Andersen et al. (2009) ist, dass kritische Daten von den einzelnen Akteuren nicht offengelegt werden müssen.

Ein weiterer Teilbereich in der Forschung ist die Planung und Steuerung des Containertransportes per LKW zwischen Versendern/Empfängern, Terminals und Depots. Dazu wurden verschiedene Ansätze zur Zeit- und/oder Kostenminimierung mit exakten und heuristischen Methoden eingesetzt (Zhang et al., 2010, Nossack und Pesch, 2013).

Zehendner und Feillet (2014) verwenden ein Mixed Integer Linear Programming Modell um die Servicequalität der Straßentransporte und zusätzlich die Abwicklung anderer Transportmittel in den Terminals durch Terminvorgaben für die LKWs zu verbessern. Diese Ergebnisse

auf taktischer Planungsebene werden anschließend mit einem ereignisorientierten Simulationsmodell, das in erster Linie die Zuweisung der Umschlagsgeräte nachbildet, unter dynamischen Bedingungen validiert.

Verschiedene Autoren behandeln die Thematik der intermodalen Routenplanung. Southworth und Peterson (2000) umfassen Straßen-, Schienen- und Wasserstraßenverbindungen in einem GIS-basierten Transportnetzwerk von den USA, Kanada und Mexiko und verwenden einen kürzeste-Wege Algorithmus. Die Zielsetzung im von Chang (2008) vorgestellten Algorithmus ist die Integration von zusätzlichen Charakteristika des Problems. Erstens werden verschiedene Optimierungsziele wie Zeit und Kosten berücksichtigt, zweitens werden Fahrpläne und Zeitrestriktionen beachtet und drittens wird Skaleneffekten in der Kostenkalkulation Rechnung getragen. Eine Tabu-Search basierte Methode zur Lösung des Routing Problems in intermodalen Netzwerken wird von Verma et al. (2012) für den Transport von Gefahrgut vorgeschlagen. Dieser Ansatz zielt einerseits auf die Reduktion der Transportkosten ab, und berücksichtigt andererseits das durch den Transportmodus gegebene erwartete Risiko.

3.2 Agenten-basierte Simulation und Gütertransportsystemmodelle

Simulationstechniken gelten als effektive Instrumente um Güterverkehrslogistik zu analysieren und den Einfluss von Planungs- und Managemententscheidungen zu untersuchen. Boschian et al. (2011) setzen Techniken der Metamodellierung ein, um ein generisches Referenzmodell für intermodale Transportsysteme zu beschreiben. Dieses Modell stellt die Grundlage für die Implementierung eines konkreten Systems in einem ereignisorientierten Simulationsmodul dar. Die Autoren wenden den vorgeschlagenen Ansatz für eine Fallstudie auf den Hafen von Triest und ein verbundenes Inlandterminal an, um Vorteile der Anwendung mit integrierten Informations- und Kommunikationstechnologien im Test von Managementstrategien aufzuzeigen.

Ein weiterer taktischer ereignisorientierter Simulationsansatz zur Analyse des Güterzugbetriebs wird von Marinov und Viegas (2011) vorgestellt. Ziel der Arbeit ist die Unterstützung der Zugproduktplanung für Operatoren durch die Entwicklung eines Tools zur Analyse von Zugbewegungen in einem Netzwerk. Die Komponenten des Schienennetzes werden als sich gegenseitig beeinflussende Warteschlangensysteme realisiert und auf Fallbeispiele angewandt, die einerseits geringe und andererseits beträchtliche Abweichungen vom Fahrplan zu bewältigen haben.

Parola und Sciomachen (2005) untersuchen das Potential des nordwestlichen Italienischen Hafensystems für zukünftige Steigerungen im Transportaufkommen auf See, mit speziellem Fokus auf dem landseitigen Transport. Das Ziel ist die Analyse der Aufteilung im Modal Split, des Sättigungsgrades der Schieneninfrastruktur und der Stauanfälligkeit an den LKW-Gates der einzelnen Terminals im Hafen. Die Hauptkomponenten des verwendeten der diskre-

ten Ereignissimulation werden von den Häfen in Genua und La Spezia gebildet. Beide bestehen aus jeweils mehreren maritimen Containerterminals, die jedoch als Black box nicht näher untersucht, sondern deren Schiffs, LKW- und Zugankünfte aggregiert betrachtet werden. Das Simulationsmodell ist modular aufgebaut und besteht aus dem Schiffsanlegeplatz, dem LKW-Gate und dem Zug-Gate Modul.

Mit einem Simulationsansatz auf strategischer Ebene analysieren Caris et al. (2007) regulatorische Maßnahmen zur Stimulierung des intermodalen Binnenschifftransports. Das in einem diskreten Ereignissimulationsmodell abgebildete Transportnetzwerk ist in drei Komponenten aufgeteilt: Dem Binnenwasserstraßen-Netzwerk, bestehend aus Terminals, Wasserstraßen und Containerflüssen, der Hafenanlage (in der Fallstudie wird der Hafen von Antwerpen untersucht), und einem Modul zur Planung und Steuerung der Schleusenfunktionalität. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Analyse der Verbindungen der Binnenwasserstraße (die Schienenverbindungen im Netzwerk werden außer Acht gelassen) und soll Hilfestellung in der operativen Planung des betrachteten Netzwerkes geben und so beispielsweise das Potential für einen Schiffs-Hub oder die Leistungsfähigkeit verschiedener Schiffsservices analysieren.

Der Einsatz von Agenten-basierter Simulation im Gütertransportbereich ist vielfältig und oft basieren die Ansätze auf Modellen für den Personentransport (Cavalcante und Roorda, 2013). Das Mikrosimulationsmodell für Personenverkehr MATSIM beispielsweise verfolgt einen aktivitätsbasierten Ansatz zur Modellierung und Zuweisung von Personenflüssen. Das Modell umfasst die zwei Ebenen der vorhandenen Verkehrsinfrastrukturen und der Verhaltensmöglichkeiten und –regeln und daraus resultierenden Aktivitätsplänen der Individuen. Einer der wesentlichen Unterschiede zum intermodalen Güterverkehr, wo die verschiedenen Modi nur in Terminals miteinander interagieren ist, dass sich in multi-modalen Personenverkehrsnetzwerken, speziell im städtischen Raum, die verschiedenen Verkehrsträger wie Autos, Motorräder, Busse, Straßenbahnen und auch Radfahrer und Fußgänger einander stark beeinflussen können. Auch die Wahl von Route und Modus bzw. Modi von Individuen wird von ungleich mehreren Umweltfaktoren und anderen Verkehrsteilnehmern abhängen, als dies beim Gütertransport der Fall ist (Balmer et al., 2008, Rieser, 2010).

Auch das Konzept für die Modellierung von Gütertransportmärkten von Baindur und Viegas (2011) basiert auf mehreren miteinander verbundenen Ebenen. Auf der physischen Ebene agieren Agenten von nicht kognitiven Entitäten wie Transportmitteln oder Ladeeinheiten, die von den Agenten mit Entscheidungsfähigkeiten auf der Markt-Ebene kontrolliert und gesteuert werden. Beide Typen von Agenten interagieren in einem regulativen Umfeld miteinander, das die Markbedingungen widerspiegelt und Marktregeln vorgibt. Auch Cavalcante und Roorda (2013) setzen Agenten in der Modellierung eines Transportmarktes ein, berücksichtigen jedoch zusätzlich noch Skaleneffekte.

Holmgren et al. (2013) bringen ein Multi-Agenten System zum Einsatz, um regionale und überregionale Transportaktivitäten zwischen Lieferanten und Kunden zu bestimmen. Auf die Bestellung eines Kunden erfolgt mit dem Lieferanten gemeinsam die Entscheidung über die Transportlösung und die benötigten Ressourcen und Infrastrukturen. Das Transportnetzwerk wird von einem gerichteten Graphen gebildet, dessen Kanten durch Knoten, die bspw. Kunden, Terminals oder Lieferanten repräsentieren, verbunden sind. Die Zielsetzung der Autoren ist die Ermittlung der gesamten Transportmenge je Region, sowie die transportierten Tonnen-Kilometer für jeden Modus und jede Verbindung in einer Region.

Es hat sich gezeigt, dass Agenten-basierte Methoden in Umgebungen mit Unsicherheit, also sich ständig weiterentwickelnder Problemstellung, gute Erfolge erzielen. Máhr et al. (2010) stellen einen Vergleich der Ergebnisse eines Optimierungsansatzes und eine Multi-Agenten Ansatzes zur Lösung eines dynamischen Truck-load Pick-up and Delivery Problems mit Zeitfenstern an. Beide Ansätze können auf dynamische Ereignisse reagieren, die durch Variationen in der Servicezeit und den Ankunftszeiten der Aufträge gegeben sind. Der strukturelle Unterschied in den Lösungsansätzen liegt in der zentralisierten Entscheidungsfindung im Optimierungsmodell und der verteilten Kontrolle im Multi-Agenten System. Dieses wird völlig dezentral, ohne jegliche übergeordnete Informationssammlung und Entscheidungsbefugnis, implementiert. Das bedeutet, jeder Container ist ein Agent und "verkauft" sich in Auktionen an den bestbietenden LKW-Agenten. In der durchgeführten Fallstudie können beide Ansätze den jeweils anderen in Abhängigkeit von der Art und Kombinationen der Unsicherheitsfaktoren übertreffen.

Ein Konzept für den Einsatz von Auktionsmechanismen in intermodalen Gütertransportnetzwerken, jedoch für Szenarien unter Unsicherheit, wird auch von Schindlbacher und Gronalt (2010) präsentiert. Die Autoren schlagen umgekehrte versiegelte Auktionen vor, um im Störungsfall eine neue Route und neue Umschlagsknoten für Güterflüsse mit den geringsten Kosten für das Gesamtnetzwerk zu finden. Unsichere Umweltbedingungen bilden auch die Grundlage für die Analyse der Robustheit von Terminalnetzwerken gegenüber von Störfällen in Schindlbacher et al. (2011) und Häuslmayer et al. (2011). Im vorgestellten Simulationsmodell wird jedes Terminal von einem Agenten im Netzwerk vertreten, dessen Terminal-interne Prozesse durch ein mit System Dynamics implementierten Modul abgebildet werden. Bei Bedarf, d.h. wenn die Terminals aufgrund diverser möglicher Störfälle die geplanten Züge nicht mehr abfertigen können, koordinieren die Agenten untereinander die Umleitung von Zügen zu anderen Terminals im Netzwerk.

Die Vielzahl an Akteuren in der intermodalen Transportkette und möglichen Schwierigkeiten in deren Integration unterstreichen laut Henesey and Törnquist (2002) umso mehr die Relevanz von Verfügbarkeit und Zugänglichkeit wichtiger Informationen, die die tägliche Planung der einzelnen Akteure beeinflussen kann. Die Autoren sehen besonders die Schnittstelle von Hafen-Bahnanbindung als ein kritisches Element für die Leistung der gesamten Transportket-

te und betonen daher die Wichtigkeit der Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten in der Transportkette. Weiters wird ein Multi-Agenten Simulationsansatz vorgeschlagen, der den Bahnverkehr, ein Containerterminal und deren Schnittstelle abbildet, und so die Beobachtung des Verhaltens, der Planung und Koordination zwischen den Agenten als Basis für ein System zur Entscheidungsunterstützung erlaubt.

Rizzoli et al. (2002) und Gambardella et al. (2002) stellen die Anwendung eines Agenten-basierten Transportplanungstools kombiniert mit einem diskreten Ereignissimulationsmodell vor, um die Flüsse von Ladeeinheiten im kombinierten Schienen- und Straßentransport innerhalb und zwischen Inland-Terminals zu planen. Das Transportplanungstool bestimmt die Route für die Ladeeinheiten und bucht diese auf Züge und LKWs. Das Simulationsmodell, das den geplanten Transport im Anschluss ausführt, setzt sich aus drei Modulen zusammen: Einem Modul zur Planung und Simulation des Straßennetzwerkes, ein Terminal-Simulationsmodul (siehe Abbildung 5) und ein Modul zur Implementierung der Ankünfte und Abfahrten von Zügen. Die einzelnen Module arbeiten parallel und tauschen Informationen miteinander aus. Wichtige Elemente des Tools sind der Zugfahrplan mit den jeweiligen Abfahrts- und Ankunftszeiten, der somit die Reisezeit der Züge angibt, und ein Zeitplan für die LKW Ankünfte je Terminal. Es werden die grundlegenden Terminalprozesse simuliert, der Schienenkorridor jedoch nur abstrakt dargestellt und die Transferzeit der Züge aus dem Fahrplan ausgelesen.

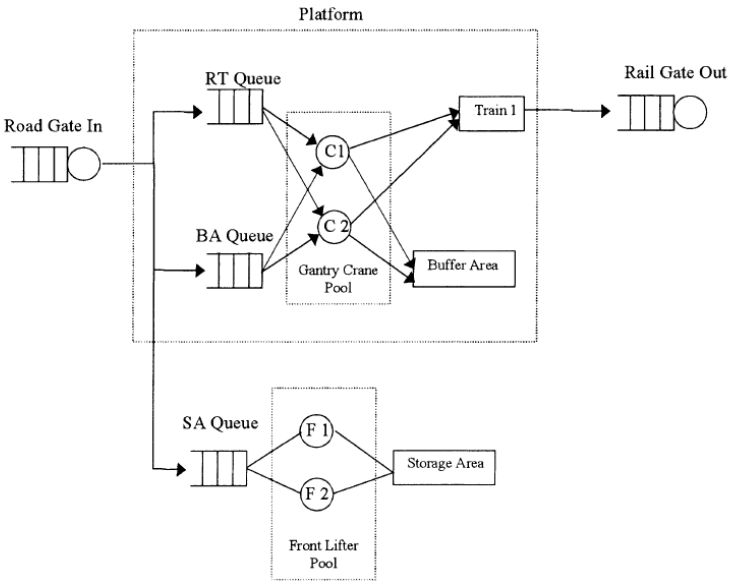


Abbildung 5: Struktur des Warteschlangensystems für den Prozess des Containereingangs per LKW und Containerausgangs per Zug in Rizzoli et al. (2002)

Aus der hier zusammengefassten Literatur geht hervor, dass es noch keinen Simulationsansatz gibt, der ein gesamtes intermodales Gütertransportnetzwerk im Detail evaluieren kann. Das in

dieser Arbeit vorgestellte Modell SIMNET umfasst die Analyse des Netzwerk-Serviceangebots und die kapazitive Überprüfung der Terminalinfrastrukturen im Netzwerk für eine bestimmte Transportnachfrage (siehe Tabelle 1). Es wird nicht nur untersucht, ob, und unter welchen Bedingungen die Transportnachfrage erfüllt werden kann, sondern bei Bedarf werden auch Anpassungen für die angebotenen Zugrelationen vorgenommen. Ein wichtiger Faktor für die Systemleistung ist auch die zeitgerechte Bereitstellung von Leercontainern und deren Lagerhaltung. Das Agenten-basierte Simulationsmodell bildet die Transportprozesse von der Routenplanung und Zugbuchung, Anforderung und Lieferung der Leercontainer, Straßenvorlauf, Terminalhandling und Schienentransport bis hin zum Nachlauf inklusive des Leercontainerrücktransports in ein Depot ab. Auch Import- und Exportverkehre in systemexterne Regionen werden per Schienenverbindung modelliert. Die Details zum Modellkonzept und dessen Umsetzung werden unter Punkt 5.3 ausführlich dargestellt.

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Planungs- und Evaluierungsmodellen für Gütertransportnetzwerke

	Literatur	Analyseebene			Kategorie								Methode				Modus			
		strat.	takt.	op.	NW Infrastr. Design	Service NW Design	Terminal Design	Zuweisung NW-Flüsse	Scheduling, Verkehrspl.	Modal Split	Routing	Leer-container	Optimierung / Berechnung	Simulation sys.-dyn.	Simulation discrete event	Simulation agentbased	Schiene	Straße	Wasser-straße	intermdoal/ multimodal
Planung	Yamada et al. (2009)	x			x			x					x				x	x	x	x
	Ellinger et al. (2013)	x			x			x					x				x	x		x
	Crainic et al. (1990)	x						x					x				x			
	Macharis et al. (2011) - NODUS	x								x	x		x				x	x	x	
	Schneider et al. (2003)	x						x		x			x				x	x	x	
	Macharis et al. (2011) - LAMBIT	x			x								x							
	Floden (2007)		x							x			x				x	x		
	Andersen et al. 2009)		x			x			x				x				x			
	Bierwirth et al. (2012)		x			x				x			x				x	x		x
	Anghinolfi et al. (2011)			x		x		x					x				x			x
	Zhang et al. (2010)			x					x			x	x					x		
	Nossack und Pesch (2013)			x					x			x	x					x		
	Mähret al. (2010)			x					x			x	x			x		x		
Evaluierung	Ballis und Golias (2002 und 2004)	x					x								x					
	Zehendner und Feillet (2014)		x				x		x				x		x					
	Gronalt et al. (2008 und 2012)			x			x								x					
	Macharis et al. (2011) - SIMBA	x				x									x				x	x
	CAPMAN (2004)			x	x								x		x		x			
	Nash und Hürlimann (2004)			x	x										x		x	x		
	Parola und Sciomachen (2005)		x		x					x					x		x	x		
	Southworth und Peterson (2000)		x								x		x				x	x	x	x
	Chang (2008)			x							x		x				x	x	x	x
	Verma et al. (2012)			x							x		x				x	x		x
	Boschian et al. (2011)		x	x			x								x		x	x	x	x
	Marinov und Viegas (2011)		x			x									x		x			
	Caris et al. (2007)		x		x	x									x				x	x
	Holmgren et al. (2013)	x								x	x					x	x	x	x	x
	Heneseyand Tömquist (2002)		x				x									x	x			
	Mahmassani et al. (2007)		x			x				x	x				x		x	x	x	x
	Rizzoli et al u. Gambardella et al. (2002)			x			x				x				x	x	x	x		x
	Schindlbacher et al. (2011)	x	x				x	x						x		x	x	x		x
	SIMNET		x	x		x	x				x	x				x	x	x		x

II. Modellierung

4. Netzwerk und Betrieb

Für die Modellierung von Transportnetzen ist notwendig, die Netzwerkinfrastruktur, die diese benützenden Transportmittel und Transporteinheiten, die organisatorischen Einheiten und Informationsflüsse abzubilden. Eine weitere Voraussetzung um Transportprozesse in diesem System abzubilden ist die Definition der betrieblichen Rahmenbedingungen der Infrastrukturen und der bereitgestellten Services durch die organisatorischen Elemente (vgl. Punkt 2.).

Der in dieser Arbeit vorgestellte objektorientierte Modellierungsansatz umfasst Schienen- und Straßenverbindungen, Container Terminals und Leerctontainer Depots als Netzwerkinfrastruktur. Die Transportnachfrage ist zwischen lokalen Regionen im Einzugsgebiet der Terminals und außerhalb des Netzwerkes gelegenen Import- und Exportdestination gegeben. Zum Gütertransport werden intermodale Ladeeinheiten als Transporteinheiten verwendet, die von den Transportmitteln LKW und Zug befördert werden. Die Transportflüsse werden von organisatorischen Einheiten, wie z.B. der Routenplanung, auf Basis der angebotenen Services wie Zugfahrplänen der Operatoren und Umschlags- und Lagermöglichkeiten in den Terminals entworfen. Die tatsächlichen Transportprozesse entstehen anschließend durch die Zusammenarbeit der gesamten beteiligten physischen und steuernden Elemente. Im Folgenden wird auf die umgesetzten betrieblichen Rahmenbedingungen näher eingegangen sowie die konkrete Modellimplementierung im Detail erläutert.

Neben der vorhandenen Infrastruktur und den beteiligten Akteuren werden Systemverhalten und Systemleistung wesentlich von den Rahmenbedingungen für den Netzwerkbetrieb bestimmt. Darunter sind einerseits die operativen Parameter der verschiedenen Terminals, und andererseits die diese miteinander verbindenden Zugprodukte zu verstehen.

Die maßgeblichen Parameter in der Bestimmung der Terminal-Betriebskonzepte betreffen einerseits die Umschlags- und Lagerkapazitäten, und andererseits die für den Terminalbetrieb ebenso wichtigen Faktoren, welche die internen Abläufe bestimmen. Dazu gehören unter anderem das Abfertigungsverfahren der Züge und die sich daraus ergebenden Durchlaufzeiten (Standverfahren oder Fließverfahren), oder der Anteil der möglichen Direktumschläge von Transportmittel zu Transportmittel ohne Zwischenabstellung der Container. Erheblichen Einfluss auf diese Parameter haben sowohl das Design des Terminal-Layouts, wie auch der Mix der Container-Typen in der Umschlagsmenge (im Vergleich zu Standardcontainern werden z.B. von Sattelanhängern die Terminalressourcen stärker beansprucht). Ebenso spielen die Ankunftszeiten der verschiedenen Zugprodukte und zu- und abliefernden LKWs eine nicht unwesentliche Rolle für die Abläufe im Terminal, da auch damit die Belegung von Umschlag- und Lager- bzw. Abstellkapazitäten gesteuert werden können. Der Containerfluss im Terminal, der durch diese Prozesse möglich wird, ist in Abbildung 6 übersichtsmäßig dargestellt.

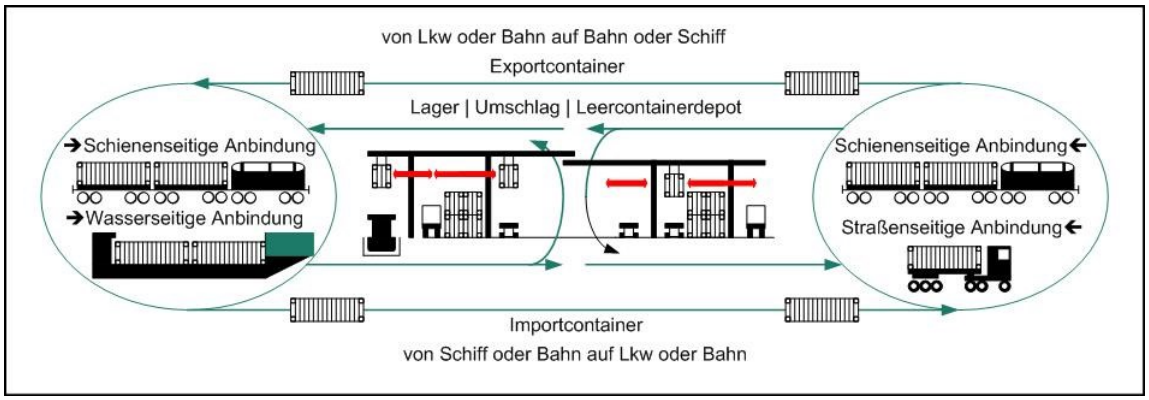


Abbildung 6: Containerfluss im Terminal. Quelle: Posset et al. (2014), S. 53

Zu den Einflussfaktoren für die Bestimmung der geeigneten Zugprodukte zwischen zwei Terminals zählen in erster Linie das Transportvolumen und dessen Variabilität innerhalb eines bestimmten Zeitraumes. Wenn ausreichende Mengen zu transportieren sind, wird die Entscheidung, natürlich auch unter Berücksichtigung der Häufigkeit der Verbindung und je nach Stabilität des Nachfragemusters, auf Ganzzugssysteme fallen. Für Shuttle-Verbindungen stehen verschiedene Systeme zur Verfügung (z.B. Y-Shuttle, Line Train oder Group Train). Geht man in der Betrachtung über einzelne Punkt-zu-Punkt Verbindungen hinaus, untersucht also ein Netzwerk, so gewinnt das Problem schnell an Komplexität und wird umso stärker auch von der Funktionalität der Terminals beeinflusst.

Eine wesentliche Anforderung an das entwickelte Simulationsmodell war es, im Netzwerkdesign hinsichtlich der Topologie und auch der operativen Gestaltung flexibel zu sein. Die Definition sogenannter Modell-Elemente für die Beschreibung der Rahmenbedingungen für den Netzwerkbetrieb erlaubt die Abbildung verschiedenster Infrastrukturkonzepte und Netzwerk-Betriebskonzepte. Die Modellterminals beinhalten beispielsweise verschiedene Funktionalitäten und Kapazitäten der Terminals, und auch die vorgesehenen Modellzüge beschreiben mehrere Typen von Zügen, die sich in ihren Eigenschaften und der Handhabung im System unterscheiden.

4.1 Modellterminals

Die Modellterminals wurden auf Basis von 29 bestehenden Binnenterminals in Europa gebildet. Dazu wurden die Referenzterminals anhand der möglichen Umschlagsleistung in 4 Kategorien eingeteilt (Small, Medium, Large und X-Large) und je Kategorie die Umschlagsleistung gemittelt. Diese Unterscheidung ist ausreichend für den Schritt der Standortplanung. Für die Implementierung im Simulationsmodell wurden für die 4 Grundkategorien die genauen Parameter wieder anhand gemittelter Werte bestimmt. Diese umfassen u.a. detaillierte Daten zu Lagerkapazitäten, Ladegleisen, Vorstaugleisen, Equipment und Betriebszeiten, und wurden durch Expertenwissen um zahlreiche betriebliche Einflussgrößen wie beispielsweise Wahr-

scheinlichkeitsverteilungen für LKW Liefer- und Abholzeiten oder Abfertigungszeiten innerhalb des Terminals, sowie Informationen betreffend der Terminalprozesse und -funktionalitäten ergänzt, die den operativen Betrieb maßgeblich mitbestimmen, wie z.B. Lagerstandsobergrenzen und -untergrenzen für Repositionierungsprozesse in den Leercontainerlagern oder Parameter für notwendige Gleiskapazitäten und Zeitfensteranforderungen für das Zulassen neuer Relationen.

Ausgehend von den Grundkategorien wurden folgende Modellterminals definiert:

- Modellterminal Small: "kleines" Terminal mit rein lokalen Import- und Exportverkehren.
- Modellterminal Medium_1: "mittleres" Terminal, beschreibt ein Feeder-Terminal, dessen Schwerpunkt in der Bedienung lokaler Verkehre und der Zulieferung für Gateways liegt.
- Modellterminal Medium_2: siehe Modellterminal Medium_1, jedoch mit mehr Umschlagskapazität und daher anderer infrastruktureller Ausprägung.
- Modellterminal Large_1: "großes" Terminal, beschreibt ein Gateway-Terminal, dessen Schwerpunkt auf nationalen Verkehren liegt.
- Modellterminal Large_2: beschreibt ein Gateway-Terminal, dessen Schwerpunkt auf internationalen Verkehren und direktem Zug-Zug Umschlag liegt. Weiters hat es mehr Umschlagskapazität als Modellterminal Large_1 und ist daher von anderer infrastruktureller Ausprägung.
- Modellterminal X-Large: "sehr großes" Terminal vom Typ internationales Gateway-Terminal mit Schwerpunkt direkter Zug-Zug Umschlag. Das Größenverhältnis zum Modellterminal Large_2 liegt bei 1:3.
- Zusatzmodul: Alle Typen können auch die Funktionalität eines Leercontainer-Depots integrieren, welche allerdings auch eigenständig als Netzwerkknoten existieren können und je nach Größe einem der Modellterminals zugewiesen werden.

4.2 Modellzüge

- Die Definition der Modellzüge erfolgte auf Basis einer Menge von über 220 Realzügen, die aufgrund der Containeranzahl und Anteilen der verschiedenen Containertypen gruppiert werden können. Die im Simulationsmodell von den Operatoren einsetzbaren Modellzüge umfassen die Zugtypen Ganzzug, Shuttle und Line Train. Sie sind im Weiteren spezifiziert durch beispielsweise den möglichen Anteil von Spezial-Ladeeinheiten wie Sattelanhänger, oder auch durch die Definition als reine Leercontainer-Züge.

- Zur Vorbereitung von Fallstudien-Szenarien mit der Fragestellung nach dem Einfluss von steigender Transportnachfrage auf das Netzwerk war es von großer Bedeutung die Grundauslastung der verschiedenen Modellterminals in Form von Import- und Exportzügen, die nach einem bestimmten "Fahrplan" in den Terminals aufschlagen, zu entwerfen. Dies ist methodisch konsequent auf Basis der zuvor definierten Modellzüge erfolgt.
- Zur Erstellung der verschiedenen Grundauslastungs-Fahrpläne wurden 13 Modellzüge, die in Punkt 4.2 genauer dargestellt werden und von Einzelwagen-Verkehren bis zu XL-Züge reichen, mit jeweils durchschnittlicher TEU Menge und Standardabweichung, sowie unterschiedlichen Anteilen an Standardcontainern, Wechselbehältern und kranbaren Sattelanhängern definiert. Der Anteil der Containertypen erlangt zusammen mit einem Parameter der Modellterminals für die Längenverteilung der Container (Anteile 20 und 40 TEU Container) wichtigen Einfluss auf die Hub- und Lagerprozesse in den Terminals.

5. Agenten-basiertes Netzwerk Simulationsmodell

5.1 Grundlagen Agenten-basierter Modellierung und Simulation

Die Umsetzung des Simulationsmodells ist durch die Methode der Agenten-basierten Simulation (ABS) erfolgt. Mit Hilfe Agenten-basierter Modellierung und Simulation wird ein komplexes System durch eine Gruppe von Agenten abgebildet, die einer Reihe von (oft sehr einfachen) Verhaltensregeln folgen. D.h. Agenten sind als diskrete Entitäten geschaffen um das Verhalten ihrer Gegenstücke in der Realität abzubilden. Das Systemverhalten ergibt sich aus der Handlungsweise und den Interaktionen der einzelnen Akteure. Jeder Agent handelt dabei nach festgelegten Zielen und Regeln und hat eigene Kontrollmechanismen (dezentrale System-Kontrolle). Weiters haben sie die Fähigkeit autonome Entscheidungen zu treffen und aktiv zu handeln, also Aktionen in Abhängigkeit von einer durch den internen Status generierten Motivation oder als Reaktion auf Umweltbedingungen auszuführen. Zusammengefasst eignet sich ABS daher u.a. für Problemstellungen,

- die naturgemäß durch Agenten repräsentiert werden, d.h. wenn das Ziel die Modellierung des Verhaltens von Individuen in einer diversifizierten Population ist,
- wenn sich Agenten strategisch verhalten, d.h., wenn sie Reaktionen der anderen Agenten auf das eigene Verhalten antizipieren und
- wenn es wichtig ist, Agenten zu modellieren die kooperieren, zusammenarbeiten oder Organisationen bilden (siehe Borshchev, 2013).

Für die Implementierung von ABS-Modellen gibt es keine Standard Sprache und die Modellstruktur (Einsatz von grafischen Elementen und Codierung) hängt von der verwendeten Soft-

ware ab. Die Vorgabe des Verhaltens der Agenten kann auf verschiedene Weisen umgesetzt werden. Zum einen kommen sogenannte "Statecharts" zum Einsatz, wo die Handlungen des Agenten aufgrund seines aktuellen Status gesetzt werden. Zum anderen können Aktionen von bestimmten Ereignissen, wie beispielsweise der Änderung einer Umweltvariable, neuen Informationen oder zeitlich bedingten Auslösern, angestoßen werden. Diese Art der Modellierung zieht im Regelfall eine Vielzahl gleichzeitig auftretender Ereignisse nach sich und stellt dadurch auch gewisse Anforderungen an Rechenleistung und Speicherkapazität der Simulationsrechner (siehe Borshchev, 2013).

ABS ist eine neue Modellierungs- und Simulationstechnik, die zusehends an internationaler Anhängerschaft gewinnt, jedoch gerade im Bereich der Operations Research noch in den Kinderschuhen steckt. Betont wird sogar die Notwendigkeit der Anwendung von Agenten-basierter Modellierung aufgrund der steigenden Komplexität in den abzubildenden Systemen. Als Beispiel für immer komplexere Systeme, deren Modellierung bereits an den Grenzen der Machbarkeit steht, werden Transportnetzwerke genannt (Siebers et al., 2010).

Die Eigenschaften der zugrundeliegenden Problemstellung für die vorliegende Arbeit entsprechen genau jenen Kriterien, die für den Einsatz der ABS sprechen. Das Transportsystem besteht aus mehreren unterschiedlichen, gleichzeitig und voneinander unabhängig agierenden Akteuren. Die Entscheidungen, die diese Akteure aufgrund der für sie geltenden Regeln und vorhanden Informationen treffen, können einerseits die Umweltbedingungen für die anderen Systemteilnehmer beeinflussen, und führen andererseits durch die Kooperation mit den Anderen zur Gesamtsystemleistung - der Abwicklung der Transportaufträge. Zur Modellimplementierung wurde die im Folgenden beschriebene Simulationsumgebung AnyLogic® gewählt.

5.2 Simulationsumgebung AnyLogic®

Die AnyLogic IDE wie auch AnyLogic Modelle lassen sich durch die betriebssystemunabhängige Java-Umgebung auf allen gebräuchlichen Betriebssystemen betreiben. Es werden, im Gegensatz zu vielen anderen Tools, alle gängigen Ansätze der Simulationstechnik unterstützt, es können also die Methoden der diskret-ereignisorientierten, Agenten-basierten und systemdynamischen Simulation in einem Modell kombiniert werden.

AnyLogic® Modelle basieren auf dem Konzept der Objektorientierung. Die Hauptfunktionalität der Modelle wird im Regelfall durch die grafisch unterstützten implementierten aktiven Entitäten-Klassen abgebildet. Sie repräsentieren die realen Objekte, die durch Aktivitäten und Zustände definiert sind und mit ihrer Umgebung interagieren können. Der Objektorientierung folgend, können die Konzepte von Vererbung und Datenkapselung in beliebige Tiefe implementiert werden, so dass sich die Modellstruktur einer Hierarchie von Instanzen bildet.

Das Objektverhalten (wie Hauptantreiber, Reaktionen, Gedächtnis oder Zustände) wird unabhängig von dieser Struktur definiert. Dafür stehen Zustandsdiagramme, zeit- und ereignisge-

steuerte Vorgänge und Kommunikationsverbindungen zur Verfügung. Das globale Systemverhalten resultiert schließlich aus der Interaktion der verschiedenen individuellen Verhaltensmuster der Entitäten (siehe AnyLogic, 2014).

Die mit Hilfe der vordefinierten Elemente entwickelten Modelle sind beliebig mit reinen Java-Klassen erweiterbar und ergänzbar.

5.3 Konzeptentwicklung und Modellimplementierung

Das entwickelte Simulationsmodell bildet die Funktionalitäten und das Zusammenspiel der verschiedenen Netzwerk-Elemente ab, und analysiert die Leistung der einzelnen Elemente sowie des gesamten Systems. Um eine möglichst hohe Dynamik im Modell zu ermöglichen, wurde für die verschiedenen Akteure die Option vorgesehen, bei Bedarf auch in das Netzwerk-Betriebskonzept einzugreifen (d.h. beispielsweise Zug-Fahrpläne zu ändern). Damit kann erreicht werden, dass das durch die statische Planung als Modellinput entstandene Netzwerk-Betriebskonzept noch bedarfsgerechter angepasst wird. Die Modell-Eingangsdaten werden von Excel-Files während des Simulationsstarts eingelesen und auch die errechneten Ergebnisse wiederum in Excel-Files exportiert.

Der notwendige Dateninput für das Simulationsmodell kann grob in 3 Bereiche gegliedert werden:

1. Transportnachfrage: Mengenangaben für Quelle-Ziel Verkehre (Einzugsgebiete der Terminals oder aggregierte geografische Import-Export Destinationen außerhalb des simulierten Netzwerkes).
2. Transportinfrastruktur und Service: Containerterminals und ihre Funktionen und Leistungsparameter, Schienen- und Straßenkanten und ihre Spezifikation, Transportquellen und -senken des Netzwerkes, Relationen und Fahrpläne der Operator.
3. Weitere Netzwerkakteure: Informationen zu Routenplanung und Leercontainermanagement.

Im nächsten Abschnitt wird das in AnyLogic® implementierte Modellkonzept im Detail erläutert und im Anschluss die Ergebnisse der Modellvalidierung und die Fallstudienergebnisse dargestellt. Für die Routenplanung wurde ein von der Arizona State University zur Verfügung gestellter kürzester Wege Algorithmus nach Dijkstra übernommen und für die Klassen des Simulationsmodells adaptiert (Arizona State University, 2012).

5.3.1 Modell Klassen

Eine Übersicht über alle Modellbausteine gibt das Klassendiagramm in Abbildung 7. Die Parameter der einzelnen Klassen und deren Funktionalität wird im Anschluss erläutert.

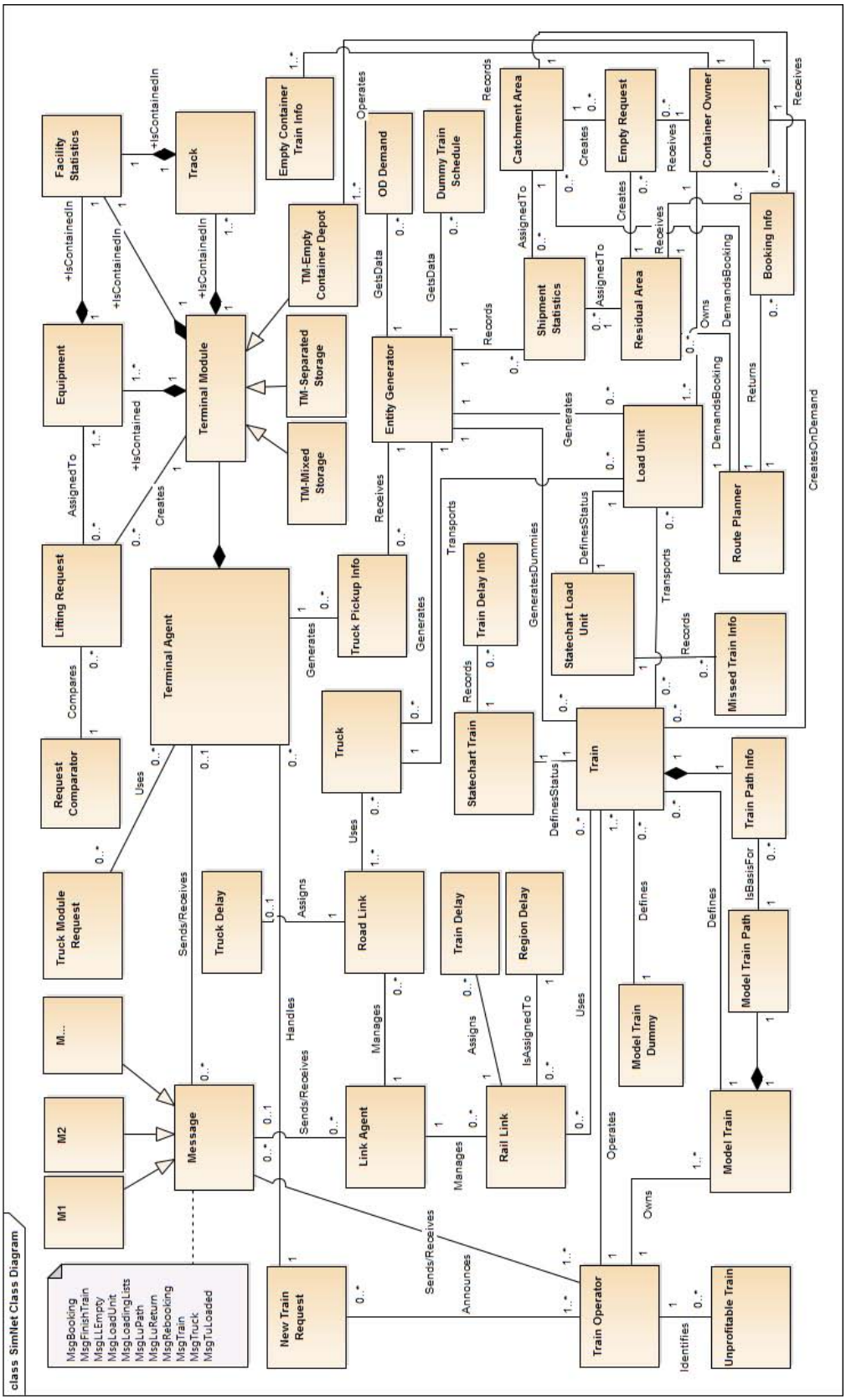


Abbildung 7: Klassendiagram Simulationsmodell

Die Hauptfunktionalität des Simulationsmodells wird von den folgenden handlungsaktiven Entitäten-Klassen gesteuert und ausgeführt:

1. Entity Generator: Steuerungseinheit Transportnachfrage und LKW-Verkehre

   Der Entity Generator erzeugt die tatsächlichen Transportaufträge aus den Einzugsgebieten der Terminals und den Netzwerkquellen und -senken. Weiters werden die LKWs, die Ladeeinheiten zu Terminals zuliefern und abholen, in dieser Steuereinheit erzeugt. Die sich im Gesamtsystem befindlichen Leercontainer (deren Verwaltung liegt beim Container Owner) werden bei Simulationsstart vom Entity Generator erzeugt und zu den Leercontainer Depots und den Residual Areas verteilt. Eine wichtige Aufgabe ist auch die Generierung der Lageranfangsbestände an Containern in den Terminals, wie auch die nach den jeweiligen "Fahrplänen" ankommenden Import- und Exportzüge der Terminals zur Nachbildung der Terminalgrundauslastung und die dafür notwendigen Ladeeinheiten.

Tabelle 2: Inputparameter für das Active Object Entity Generator

Parameter	Datentyp/ Java Klasse	Beschreibung
shareECinRAs	*double*	Allgemeiner Anteil an System-Containern (leer), die sich bei Simulationsstart anteilig aufgeteilt in ResidualAreas und den Leercontainer Depots befinden.

2. Route Planner: Routenplanung und Zugbuchung

   Der Routenplaner ist dafür verantwortlich, für jeden Transportauftrag die effizienteste Route hinsichtlich des Ankunftszeitpunktes durch das Netzwerk zu ermitteln. Dies erfolgt in 2 Schritten. Zuerst werden mittels eines k-shortest path Algorithmus die k - kürzesten Wege für jedes Knotenpaar im Netzwerk (Terminals (Depots) und Residual Areas) errechnet. Anschließend wird für jeden erhaltenen Transportauftrag der zeitmäßig schnellste Pfad aus den aktuell verfügbaren Zugverbindungen für die zuvor ermittelten distanzmäßig kürzesten Pfade eruiert. Im Fall von Änderungen in den Netzwerkverbindungen (Operator können Relationen einstellen oder hinzufügen), wird der k-shortest Path Algorithmus neuerlich ausgeführt.

Tabelle 3: Inputparameter für das Active Object Route Planner

Parameter	Datentyp/ Java Klasse	Beschreibung
kDist	*int*	Anzahl der k-kürzesten Pfade, die hinsichtlich der Distanz zwischen zwei Netzwerk-Knoten für die Routenplanung berücksichtigt werden.
kMax	*int*	Ein Netzerk-Pfad basierend auf der kürzesten Distanz kann durch die Kombination der verschiedenen Zug-Relationen auf den Strecken zu mehreren möglichen Zug-basierten Pfaden führen. Der Parameter kMax beschränkt die maximale Anzahl dieser für die Routenplanung berücksichtigten Pfade.

3. Container Owner: Leercontainer Eigentümer und Depotverwalter (Reederei)

   Der Container Owner verwaltet eine bestimmte Menge an 20 und 40 Fuß Leercontainern (Standardcontainer), die dem System für die Transportaufträge zur Verfügung stehen und eine festzulegende Anzahl an Leercontainer Depots. Die Depots können eigene Standorte sein, oder als separates Modul an einem Terminal angebunden sein. Die operativen Prozesse in einem Depot werden daher auch von Terminal Agenten und Terminal Module - Einheiten durchgeführt. Für Transportaufträge, die Wechselbehälter oder Sattelanhänger benötigen, werden diese Ladeeinheiten extra vom Entity Generator generiert (da diese im Regelfall den Kunden selbst gehören) und nach Abschluss des Transportes wieder eliminiert. Die Hauptaufgabe des Container Owners liegt in der Bereitstellung von Leercontainern für die Terminaleinzugsgebiete und die Verwaltung und Ausgleichung der Depotbestände. Da auch in den Residual Areas ausreichend Leercontainer zur Verfügung stehen müssen, bzw. von dort wieder ins System rückzuführen sind, gehören solche Repositionierungsprozesse mittels bedarfsgerechten Zügen auch zu den Aufgaben des Container Owners.

Tabelle 4: Inputparameter für das Active Object Container Owner

Parameter	Datentyp/ Java Klasse	Beschreibung
id	*String*	String-ID zur eindeutigen Identifizierung des Objekts.
depots	*ArrayList <Integer>*	Liste der IDs der Terminal Agents, die Standorte für ein Leercontainer Depot dieses Container Owners sind.
nbTwenty	*int*	Anzahl an 20 Fuß Containern die vom Container Owner im System zur Verfügung stehen.
nbFourty	*int*	Anzahl an 40 Fuß Containern die vom Container Owner im System zur Verfügung stehen.
distrTruckTime	*String/double*	Verteilungsfunktion + 3 Parameter für die Zeitspanne der Anfrage um einen Container und dem Startzeitpunkt des beladenen LKWs im Depot in Stunden.
distrTrainTime	*String/double*	Verteilungsfunktion + 3 Parameter für die Zeispanne der Anfrage eines Bedarfszuges für die Leercontainer Repositionierung und dessen Abfahrt in den nächsten Tagen.

4. Operator: Anbieter der Netzwerk-Relationen

   Ein Operator stellt die Zugrelationen innerhalb des Netzwerkes und die Verbindungen von und zu den Residual Areas zur Verfügung. Ausgehend von einem vorzugebenden Fahrplan werden die tatsächlichen Züge erzeugt, und stehen dann dem Route Planner für Buchungen zur Verfügung. Basierend auf ihrer Auslastung können Relationen eingestellt werden - sofern die betroffenen Netzwerkknoten (Terminals (Depots) und Residual Areas) noch durch andere Relationen an das Netzwerk angebunden sind. Bei entsprechender Nachfrage können vom Operator auch zusätzliche Verbindungen eingeführt werden. Diese setzen allerdings einen erfolgreichen Koordinierungsprozess mit den betroffenen Terminals voraus, da diese entsprechend ihrer Kapazitäten Zeitfenster be-

stimmen müssen, die Einführung aber auch ablehnen können. Es können beliebig viele Entitäten aus dieser Klasse erzeugt werden.

Tabelle 5: Inputparameter je Active Object Operator

Parameter	Datentyp/ Java Klasse	Beschreibung
id	*int*	Nummer zur eindeutigen Identifizierung des Objekts.
name	*String*	String-Variable zur Identifizierung des Objekts.
planningHorizon	*int*	Anzahl der Wochen, für die im Voraus die Züge aller Relationen erzeugt werden, die dann zur Buchung für den Route Planner zur Verfügung stehen.
nbTrainsUtilStats	*int*	Anzahl von bereits abgewickelten Zügen, die für die Auswertung herangezogen werden, ob eine Relation eingestellt wird, oder ob eine zusätzliche Relation eingeführt wird.
limitUtilRentability	*double*	Auslastungsgrenzwert für die Rentabilität eines Zuges.
nbDaysBookingStats	*int*	Anzahl der Tage über die die Buchungslage einer Relation analysiert wird. Dient als Grundlage für die potenzielle Einführung einer zusätzlichen Relation.
limitDaysBooking	*int*	Grenzwert für die maximale durchschnittliche Wartezeit für eine Buchung auf einen konkreten Zug in Tagen. Wird dieser überschritten, wird vom Operator das Verfahren zur Einführung einer neuen Relation angestoßen. Analysewert: Anzahl der Tage, die jede Ladeeinheit auf einen verfügbaren Zug warten muss.
timeTabuList	*int*	Anzahl der Wochen, für die eine Relation für einen neuerlichen Versuch der Einführung einer zusätzlichen Relation (unabhängig davon, ob der vorherige Versuch erfolgreich war oder nicht) oder Streichung einer Relation gesperrt ist.
probAcceptNTW	*double*	Wahrscheinlichkeit, mit der ein alternatives Zeitfenster (vorgeschlagen von den Terminal Agents) für die Einführung einer neuen Relation vom Operator akzeptiert wird.
changeOrigTrainTime	*boolean*	Übersteigt die Wartezeit bei der Zugbuchung den Grenzwert und die cycle time der Relation ist größer als wöchentlich, kann zuerst dieser Wert erhöht werden anstatt eine zusätzliche Relation einzufügen. Der Parameter gibt an, ob in diesem Fall bei Bedarf die Abfahrts- bzw. Ankunftszeiten der Originalrealtion geändert werden darf.
listModelTrains	*ArrayList <ModelTrain>*	List aller angebotenen Relationen eines Operators. Eine Auflistung aller Model Train-Parameter eines Operators (ein ModelTrain entspricht einer Zug-Relation) werden beim Simulationsstart eingelesen und daraus erfolgt die Generierung der Model Trains. Für die benötigten Parameter siehe Java-Klasse ModelTrain.

5. Catchment Area: Einzugsgebiet eines Terminals

Jedem Terminal ist mindestens ein Einzugsgebiet zugeordnet, das den lokalen Netzwerkeintritt und -austritt von Ladeeinheiten per LKW darstellt. Für jeden von der Catchment Area ausgehenden Transportauftrag muss vom Routenplaner der Pfad angefragt werden, und ein Leercontainer (ausgenommen sind Aufträge für Wechselbehälter und Sattelanhänger) bereitgestellt werden. Dafür muss im Regelfall ein Leercontainer aus einem Depot vom Container Owner angefordert werden, oder es kann ein sich von einem vorangegangenem Import noch in der Region befindlicher Leercontainer geeignet sein. Mehrheitlich werden Importcontainer nach dem Entladen an ein vom Container Owner bestimmtes Depot rückgeführt. Es können beliebig viele Entitäten aus dieser Klasse erzeugt werden, die minimal benötigte Zahl ist abhängig von der Anzahl der Terminals im Netzwerk.

Tabelle 6: Inputparameter je Active Object Catchment Area

Parameter	Datentyp/ Java Klasse	Beschreibung
id	*int*	Nummer zur eindeutigen Identifizierung des Objekts.
assignedTA	*int*	ID des zugeordneten Terminal Agents.
distrDelayReturn	*String/double*	Verteilungsfunktion + 3 Parameter zur Angabe der zeitlichen Spanne, nach der eine Ladeinheit nach der Ankunft (beladen) in der Catchment Area als Leercontaienr wieder an ein Depot zurück geschickt wird.
refillRate	*double*	Anteil an Ladeeinheiten, die nicht gleich zum Depot zurückgeschickt werden, sondern zur direkten Wiederverwendung für die nächsten Shipments in der Catchment Area verbleiben.

6. Residual Area: Aggregierte Quell- und Zielregion außerhalb des untersuchten Netzwerkes

   Eine Residual Area stellt eine aggregierte geografische Region außerhalb des betrachteten Netzwerkes dar, die per Schiene als Quelle und Senke für Transportaufträge an das Netzwerk angebunden ist. Diese Region kann eine bestimmte Menge an Leercontainern aufnehmen, die dann wiederum für Sendungen aus der Region zur Verfügung stehen. Bei Über- oder Unterschreiten von definierten Grenzmengen wird ein Repositionierungsprozess mit dem Container Owner angestoßen, um bedarfsgerechte Leercontainerzüge von oder zu den systeminternen Depots zu realisieren. Es können beliebig viele Entitäten aus dieser Klasse erzeugt werden.

Tabelle 7: Inputparameter je Active Object Residual Area

Parameter	Datentyp/ Java Klasse	Beschreibung
id	*int*	Nummer zur eindeutigen Identifizierung des Objekts.
upBorderEmptyT	*int*	Maximale Anzahl von 20 Fuß Leercontainern je Container Owner im Netzwerk in der Region. Bei Überschreitung des Grenzwertes werden Repositionierungsmaßnahmen ausgelöst.
loBorderEmptyT	*int*	Minimale Anzahl von 20 Fuß Leercontainern je Container Owner im Netzwerk in der Region. Bei Unterschreitung des Grenzwertes werden zusätzliche Container angefordert.
upBorderEmptyF	*int*	Maximale Anzahl von 40 Fuß Leercontainern je Container Owner im Netzwerk in der Region. Bei Überschreitung des Grenzwertes werden Repositionierungsmaßnahmen ausgelöst.
loBorderEmptyF	*int*	Minimale Anzahl von 40 Fuß Leercontainern je Container Owner im Netzwerk in der Region. Bei Unterschreitung des Grenzwertes werden zusätzliche Container angefordert.
orderSizeEmpty	*int*	Standard TEU Wert für den Repositionierungsprozess von Leercontainern in Residual Arreas bei Unterschreitung des Grenzwertes.
relcationSizeEmpty	*int*	Standard TEU Wert für den Repositionierungsprozess von Leercontainern in Residual Areas im Fall der Überschreitung des Grenzwertes.

7. Link Agent: Steuerungseinheit für alle Netzwerkkanten

   Der Link Agent ist für die Koordination der Übergabe von LKWs und Zügen zwischen den Netzwerkknoten und -kanten verantwortlich. Für den Fall von überlasteten Termi-

nal- und Vorstaugleisen hat er beispielsweise zur Überbrückung des Engpasses die Möglichkeit, eigene Netzwerk-Abstellgleise vorübergehend zur Verfügung zu stellen.

Tabelle 8: Inputparameter für das Active Object Link Agent

Parameter	Datentyp/ Java Klasse	Beschreibung
nbStorageTracks	***int***	**Anzahl der gesamten Hinterstellgleise im Netzwerk, die zusätzlich zu den Terminal Vorstaugleisen zur zwischenzeitlichen Abstellung von Zügen zur Verfügung steht.**
regionDelays	***ArrayList <RegionDelay>***	**ArrayList mit Detailinformationen zu den Zugsverspätungen für eine Region im Netzwerk (Jeder Rail Link wird jeweils einer Region zugeordnet, dies erfolgt beispielsweise nach Ländern.). RegionDelays beinhalten Informationen über den Anteil verspäteter Züge, die Verteilungsfunktion für die absolute Verspätungszeit und deren Parameter. Siehe Java-Klasse RegionDelay.**

8. Rail Link: Schienenkante

   Ein Rail Link übernimmt ihm zugewiesene Züge für die vorgesehene Transportzeit, die zusätzlich durch störungsbedingte Verzögerungen (abgebildet durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung) verlängert werden kann. Es können beliebig viele Entitäten aus dieser Klasse erzeugt werden, die genaue Zahl ergibt sich aus der Anzahl der durch Schienenkanten verbundenen Netzwerkknoten.

Tabelle 9: Inputparameter je Active Object Rail Link

Parameter	Datentyp/ Java Klasse	Beschreibung
id	*int*	Nummer zur eindeutigen Identifizierung des Objekts.
time	*double*	Normale Fahrtzeit (ohne Verspätung) in Minuten.
distance	*int*	Distanz der Verbindung in km.
bNode	*int*	Anfangsknoten der Verbindung.
eNode	*int*	Endknoten der Verbindung.
delayCode	*int*	ID der zugewiesenen Region für die Verspätungs-Informationen.

9. Road Link: Straßenkante

   Einem Road Link werden die LKWs, die zwischen den Einzugsgebieten und dem zugeordneten Terminal und zwischen allen Einzugsgebieten und Leercontainer Depots verkehren, zugewiesen. Die Hauptaufgabe liegt in der Regelung der Transportzeit, die auf Basis von Distanz und Geschwindigkeit berechnet wird. Es können beliebig viele Entitäten aus dieser Klasse erzeugt werden, die genaue Zahl ergibt sich aus der Anzahl der Terminals und Depots.

Tabelle 10: Inputparameter je Active Object Road Link

Parameter	Datentyp/ Java Klasse	Beschreibung
id	*int*	Nummer zur eindeutigen Identifizierung des Objekts.
timeFactor	*double*	Faktor für die normale Fahrtzeit (ohne Verspätung) in Minuten für einen Kilometer.
distrDistance	*String/double*	Verteilungsfunktion + 3 Parameter für die Distanz in km.
catchmentArea	*int*	ID der zugeordneten Catchment Area.
terminal	*int*	ID des zugeordneten Terminals bzw. Depots.

10. Terminal Agent: Steuerungseinheit eines Terminals (Leercontainer Depots)

Ein Terminal Agent fungiert als Steuerungseinheit für ein Terminal und/oder Depot um einerseits interne Abläufe zu verwalten und zu steuern, und ist andererseits für die Interaktion und Kommunikation mit den restlichen Akteuren im Netzwerk verantwortlich. Die Hauptaufgaben liegen u.a. in der Annahme und Übergabe von LKWs und Zügen mit dem Link Agent als Kommunikationspartner, die Reihung von Hubaufträgen im Fall von Verspätungen, oder der Evaluierung und Koordination von Zeitfenstern für neue Relationen eines Operators. Diese Aufgaben erfordern einen intensiven Informationsaustausch mit den operativ agierenden Einheiten des Terminals (Vollcontainer Modul, Leercontainer Modul).

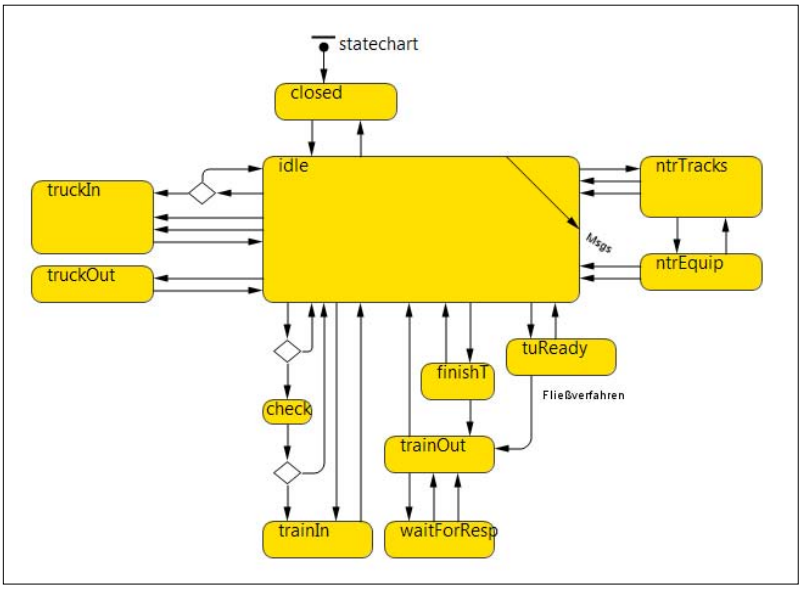


Abbildung 8: Übersicht der Steuerungsprozesse eines Terminal Agenten

Abbildung 8 zeigt das Zustandsdiagramm eines Terminal Agenten und bietet eine grobe Übersicht der Steuerungsprozesse. In den einzelnen Stati (die gelb eingefärbten Bereiche markieren die aktuellen Arbeitsprozesse) und den dazwischenliegenden Übergängen (dargestellt durch die Pfeile), welche durch unterschiedliche empfangene Nachrichten oder Bedingungen ausgelöst werden, laufen im Hintergrund eine Vielzahl an Hand-

lungssträngen und Algorithmen ab, die schlussendlich Terminalabläufe bestimmen. Es können beliebig viele Entitäten aus dieser Klasse erzeugt werden.

Tabelle 11: Inputparameter je Active Object Terminal Agent, Teil 1

Parameter	Datentyp/ Java Klasse	Beschreibung
id	*int*	Nummer zur eindeutigen Identifizierung des Objekts.
stringID	*String*	String-Variable zur Identifizierung des Objekts.
depot	*boolean*	Ja/Nein Variable, ob der NW-Knoten der Standort eines Leercontainer Depots ist.
calID	*ArrayList <Integer>*	Liste mit den IDs der zugeordneten Catchment Areas.
numberLoadingTracks	*int*	Gesamtanzahl Ladegleise im Knoten.
numberPrestowTracks	*int*	Gesamtanzahl Vorstaugleise am Knoten.
lengthPrestow Tracks	*int*	Länge der Vorstaugleise in Meter (Mittelwert für alle Gleise). Dieser Wert wird durch eine modellinterne Funktion in TEU umgerechent, der als Basis für potentiell notwendige Zugteilungen dient.
lengthPrestowTracks TEU	*int*	Interner Wert, wird aus lengthPrestowTracks errechnet.
maxNbTrucks InTerminal	*int*	Maximale Anzahl sich gleichzeitig im Terminal befindlicher LKWs. Gesamtwert für alle Module eines Knotens.
nbTruckParkingSlots	*int*	Anzahl LKW Stellplätze vor dem Terminal.
distrDelayTruckIn	*String/double*	Verteilungsfunktion + 3 Parameter, die die zeitliche Verzögerung zwischen der LKW Ankunft am Terminal und der richtigen Ladeposition im Terminal angibt.
distrDelayTruckOut	*String/double*	Verteilungsfunktion + 3 Parameter, für die Zeitdauer des Verlassens des LKWs des Terminals nach dem Ladevorgang.
distrTimeShuntingIn	*String/double*	Verteilungsfunktion + 3 Parameter, für die benötigte Zeit für die Beistellung des Zuges vom Vorstaugleis aufs Ladegleis bzw. von der Strecke aufs Ladegleis.
distrTimeShuntingOut	*String/double*	Verteilungsfunktion + 3 Parameter, für die benötigte Zeit für die Zugausfahrt aus dem Terminal auf die Strecke oder die Vorstaugleise.
additionTime	*int*	Beistellzeit in Minuten - sie gibt an, wie lange vor der Abfahrtszeit der Zug für die Beladung auf den Terminalgleisen stehen muss.
schStart	*long[]*	Array von Werten des Datentyps long - zur Angabe der Öffnungszeiten des Terminals.
schEnd	*long[]*	Array von Werten des Datentyps long - zur Angabe der Öffnungszeiten des Terminals.
schValues	*Object[]*	Array von Werten des Datentyps Object -zur Angabe der Öffnungszeiten des Terminals.
statsWeeksNewTrain	*int*	Anzahl der Wochen, über die die Auslastungswerte von Gleisen und Equipment bei der Anfrage für eine neue Relation evaluiert werden.
additionTimeArrival	*int*	Durchschnittliche Entladezeit eines Zuges in Minuten. Wird auch für die Evaluierung des Zeitfensters für die Einführung einer neuen Relation benötigt.
maxTrackUtil NewTrain	*double*	Stündlicher Auslastungsgrenzwert eines Ladegleises, bei dessen Unterschreitung das Gleis noch als "verfügbar" zählt (z.B. 5-10 Minuten). Wird für die Evaluierung des Zeitfensters für die Einführung einer neuen Relation benötigt.
counterPropE	*int*	Anzahl Stunden, für die mögliche Verschiebung des Anfragezeitfensters für eine neue Relation nach vorne. Wird vom Terminal durchgeführt, wenn das Originalzeitfenster und die Verschiebung nach hinten nicht möglich ist.
counterPropL	*int*	Anzahl an Stunden für die mögliche Verschiebung des Anfragezeitfensters für eine neue Relation nach hinten. Wird vom Terminal durchgeführt, wenn das Originalzeitfenster nicht möglich ist.

Tabelle 12: Inputparameter je Active Object Terminal Agent, Teil 2

Parameter	Datentyp/ Java Klasse	Beschreibung
distrTrDeliveryTime	*String/double*	Verteilungsfunktion + 3 Parameter für die Abhol-Zeitfenster für LKWs nach der Zugankunft. Gilt auch für Dummy Verkehre.
distrTrPickUpTime	*String/double*	Verteilungsfunktion + 3 Parameter für die Zuliefer-Zeitfenster für LKWs vor der Zugabfahrt. Gilt auch für Dummy Verkehre.
requiredNbLiftings	*int*	Durchschnittliche benötigte Hubanzahl für einen Zug. Wird für die Evaluierung des Zeitfensters für die Einführung einer neuen Relation benötigt.
avgTimeLiftings	*int*	Durchschnittliche Dauer für den Umschlag einer Ladeeinheit in Minuten. Wird für die Evaluierung des Zeitfensters für die Einführung einer neuen Relation benötigt.
minTransship TimeCont	*double*	Zeitparameter für die Buchungsroutine des RoutePlanners für die minimal benötigte Umschlagszeit zwischen zwei Zügen, so dass der Weitertransport stattfinden kann.
thresholdStorageFC	*double*	Auslastungsgrenzwert Vollcontainerlager: bei Überschreitung dürfen keine Import Züge mehr im Terminal angenommen werden.
thresholdStorageEC	*double*	Auslastungsgrenzwert Leercontainerlager: bei Überschreitung dürfen keine Import Züge mehr im Depot angenommen werden.
shareTruckPiUpDummy	*double*	Anteil an LKW-Abholungen für Import Dummy Load Units.
shareTruckDelDummy	*double*	Anteil an LKW-Anlieferungen für Export Dummy Load Units.
shareDummyTrainDM	*double*	Anteil an Direkthüben zwischen Dummy - Zügen.
shareTwentiesDummy	*double*	Anteil an 20' Containern bei Dummies - wichtiger Parameter für die Entwicklung der Lagerauslastung.
initialStorUtilDummies	*double*	Ausgangswert der Lagerauslastung durch Dummy Ladeeinheiten - diese werden entsprechend der Längenverteilung bei Simulationsstart erzeugt.

11. Terminal Module: Operative Einheit des Terminals (Leercontainer Depots)

Das Terminal Module agiert operativ und setzt die Terminalprozesse auf physischer Ebene um. So werden beispielsweise für den Umschlag von Ladeeinheiten verschiedene integrierte Ressourcen, wie Equipment und Lagerflächen, herangezogen. Ein Terminal Module kann als Standardmodul oder als Leercontainer Depot spezifiziert werden. Es können beliebig viele Entitäten aus dieser Klasse erzeugt werden, die genaue Zahl ergibt sich aus der Anzahl der Terminals und Leercontainer Depots.

Tabelle 13: Inputparameter je Active Object Terminal Module

Parameter	Datentyp/ Java Klasse	Beschreibung
id	*int*	Nummer zur eindeutigen Identifizierung des Objekts.
nr	*int*	Terminal-interne Nummer des Moduls.
type	*String*	mixed...Gemischtes Modul für Vollcontainer und Leercontainer, full...reines Vollcontainer Modul, empty...reines Leercontainer Modul.
capStorageCont	*int*	Lagerkapazität von Standard-Containersn in TEU (Volumen).
capStorageSAL	*int*	Lagerkapazität von Ladeeinheiten vom Typ SAL (Anzahl).
capStorageWAB	*int*	Lagerkapazität von Ladeeinheiten vom Typ WAB (Anzahl).
equipPerTrack	*HashMap <Integer,Array List<Integer>>*	Zuweisung des Equipments zu den Ladegleisen.
schStart	*long[]*	Array von Werten des Datentyps long - zur Angabe der Betriebszeiten des Terminals.
schEnd	*long[]*	Array von Werten des Datentyps long - zur Angabe der Betriebszeiten des Terminals.
schValues	*Object[]*	Array von Werten des Datentyps Object -zur Angabe der Betriebszeiten des Terminals.
utilStorCont	*double*	Auslastungsgrenzwert der Lagerfläche für Standardcontainer: wenn dieser Überschritten wird, müssen Maßnahmen des Terminal Agents folgen.
utilStorWAB	*double*	Auslastungsgrenzwert der Lagerfläche für WAB-Ladeeinheiten: wenn dieser Überschritten wird, müssen Maßnahmen des Terminal Agents folgen.
utilStorSAL	*double*	Auslastungsgrenzwert der Lagerfläche für SAL-Ladeeinheiten: wenn dieser Überschritten wird, müssen Maßnahmen des Terminal Agents folgen.
upBorderEmptyT	*int*	Maximale Anzahl von 20 Fuß Leercontainern je Container Owner im Netzwerk im Modul. Bei Überschreitung des Grenzwertes werden Repositionierungsmaßnahmen ausgelöst.
loBorderEmptyT	*int*	Minimale Anzahl von 20 Fuß Leercontainern je Container Owner im Netzwerk im Modul. Bei Unterschreitung des Grenzwertes werden zusätzliche Container angefordert.
upBorderEmptyF	*int*	Maximale Anzahl von 40 Fuß Leercontainern je Container Owner im Netzwerk im Modul. Bei Überschreitung des Grenzwertes werden Repositionierungsmaßnahmen ausgelöst.
loBorderEmptyF	*int*	Minimale Anzahl von 40 Fuß Leercontainern je Container Owner im Netzwerk im Modul. Bei Unterschreitung des Grenzwertes werden zusätzliche Container angefordert.
orderSizeEmpty	*int*	Standard TEU Wert für den Repositionierungsprozess von Leercontainern zwischen Depots bei Unterschreitung des Grenzwertes.
relocationSizeEmpty	*int*	Standard TEU Wert für den Repositionierungsprozess von Leercontainern zwischen Depots im Fall der Überschreitung des Grenzwertes.

12. Equipment: Umschlaggerät im Terminal (Kran, Reach Stacker, Leercontanier Stapler)

Ein Equipment ist innerhalb eines Terminal Modules einem oder mehreren Ladegleisen zugeordnet. Somit steht es nicht automatisch für alle Hubaufträge zur Verfügung. Zugewiesene Hubaufträge werden unter Berücksichtigung der allgemeinen Hubzeit (abhängig vom Typ der Ladeeinheit und Spezifikation des Equipments) und zusätzlicher zeitlicher Belegung durch potenzielle Servicehübe (diese werden nicht konkret ausgeführt, sondern leiten sich vom Lagerstand ab), und der Möglichkeit von der Durchführung eines Direktumschlages von LKW auf Zug und umgekehrt oder zwischen zwei Zügen, ausgeführt. Die selbst geführten Auslastungs-Statistiken sind ein Entscheidungskriterium im Prozess der Zeitfensterevaluierung für neue Relationen. Es können beliebig viele Entitäten aus dieser Klasse erzeugt werden.

Tabelle 14: Inputparameter je Active Object Equipment

Parameter	Datentyp/ Java Klasse	Beschreibung
id	*int*	Nummer zur eindeutigen Identifizierung des Objekts.
type	*int*	Typ des Equipments: 1…Kran, 2...Reach Stacker.
distrCont	*String/double*	Verteilungsfunktionen + 3 Parameter der Hubzeit in Minuten für Standardcontainer.
distrWAB	*String/double*	Verteilungsfunktionen + 3 Parameter der Hubzeit in Minuten für Ladeinheiten vom Typ WAB.
distrSAL	*String/double*	Verteilungsfunktionen + 3 Parameter der Hubzeit in Minuten für Ladeinheiten vom Typ SAL.
timeSavingDM	*double*	Faktor für die Zeitersparnis eines Direkthubes zwischen Zügen und zu LKWs in Prozent.
reshThreshold1	*double*	Grenzwert 1 der Lagerauslastung für die Änderung der Verteilungsfunktion für den Zeitbedarf der Servicehübe.
reshThreshold2	*double*	Grenzwert21 der Lagerauslastung für die Änderung der Verteilungsfunktion für den Zeitbedarf der Servicehübe.
k1	*double*	k-Parameter der linearen Funktion 1 zur Abbildung der Verteilung von Servicehub-Zeiten in Minuten, wenn Container von/zum Lager gehoben werden.
d1	*double*	d-Parameter der linearen Funktion 1 zur Abbildung der Verteilung von Servicehub-Zeiten in Minuten, wenn Container von/zum Lager gehoben werden.
k2	*double*	k-Parameter der linearen Funktion 2 zur Abbildung der Verteilung von Servicehub-Zeiten in Minuten, wenn Container von/zum Lager gehoben werden.
d2	*double*	d-Parameter der linearen Funktion 2 zur Abbildung der Verteilung von Servicehub-Zeiten in Minuten, wenn Container von/zum Lager gehoben werden.
k3	*double*	k-Parameter der linearen Funktion 3 zur Abbildung der Verteilung von Servicehub-Zeiten in Minuten, wenn Container von/zum Lager gehoben werden.
d3	*double*	d-Parameter der linearen Funktion 3 zur Abbildung der Verteilung von Servicehub-Zeiten in Minuten, wenn Container von/zum Lager gehoben werden.

13. Track: Ladegleis oder Terminal-Vorstaugleis

Ein Track stellt ein einzelnes Lade- oder Vorstaugleis in einem Terminal dar. Track - Objekte sind in die Terminal Modules eingebettet und übernehmen die Züge nach der Überstellung ins Terminal. Die selbst geführten Auslastungs-Statistiken sind ein Entscheidungskriterium im Prozess der Zeitfensterevaluierung für neue Relationen. Es können beliebig viele Entitäten aus dieser Klasse erzeugt werden.

Tabelle 15: Inputparameter je Active Object Gleis

Parameter	Datentyp/ Java Klasse	Beschreibung
idList	*int*	ID zur eindeutigen Identifikation des Objekts innerhalb jedes Terminal Agenten.
idPerType	*int*	Zweite ID zur Trennung für Vorstaugleise und Ladgleise für die interne Verwendung.
type	*String*	Gleistyp: loading…Ladegleis, prestow…Vorstaugleis
moduleNr	*int*	Nummer des Moduls, dem das Gleis zugeordnet ist (wenn Ladegleis).
length	*int*	Gleislänge in Meter.

14. Statechart Load Unit: Steuerungseinheit einer Ladeeinheit

Die Statechart Load Unit ist einerseits für die Aufzeichnung von Statistiken für die Transportaufträge und auch die Ladeeinheit selbst zuständig, und andererseits für die

Handhabung gewisser Ausnahmesituationen, wie z.B. wenn durch zu späte Anlieferung im Terminal ein gebuchter Zug nicht erreicht werden kann. Abbildung 9 zeigt eine Übersicht der möglichen Situationen in der sich eine volle oder leere Ladeeinheit befinden kann. Es können beliebig viele Entitäten aus dieser Klasse erzeugt werden.

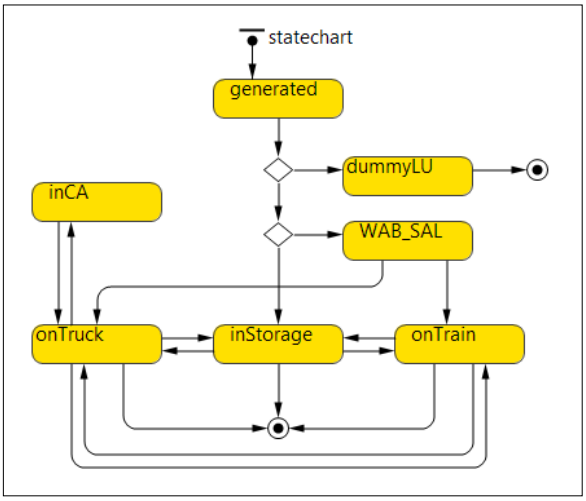


Abbildung 9: Zustandsdiagramm Ladeeinheit

15. Statechart Train: Steuerungseinheit eines Zuges

Die Steuerungseinheit des Zuges überwacht alle Abläufe während des Lebenszyklus eines Zuges. Zu den Kontrollfunktionen zählt u.a., dass der Zug mit den Terminals kommuniziert um den Fahrplan einzuhalten, oder spezielle Aufgaben zur Sicherstellung des richtigen Handlungsschemas im Fall von Shuttlezügen und Line-train Zügen. Ähnlich wie von den Steuerungseinheiten der Ladeeinheiten werden diverse Statistiken aufgezeichnet. Die verschiedenen Phasen im Transportablauf lassen sich aus dem in Abbildung 10 gezeigten Zustandsdiagramm ablesen. Es können beliebig viele Entitäten aus dieser Klasse erzeugt werden.

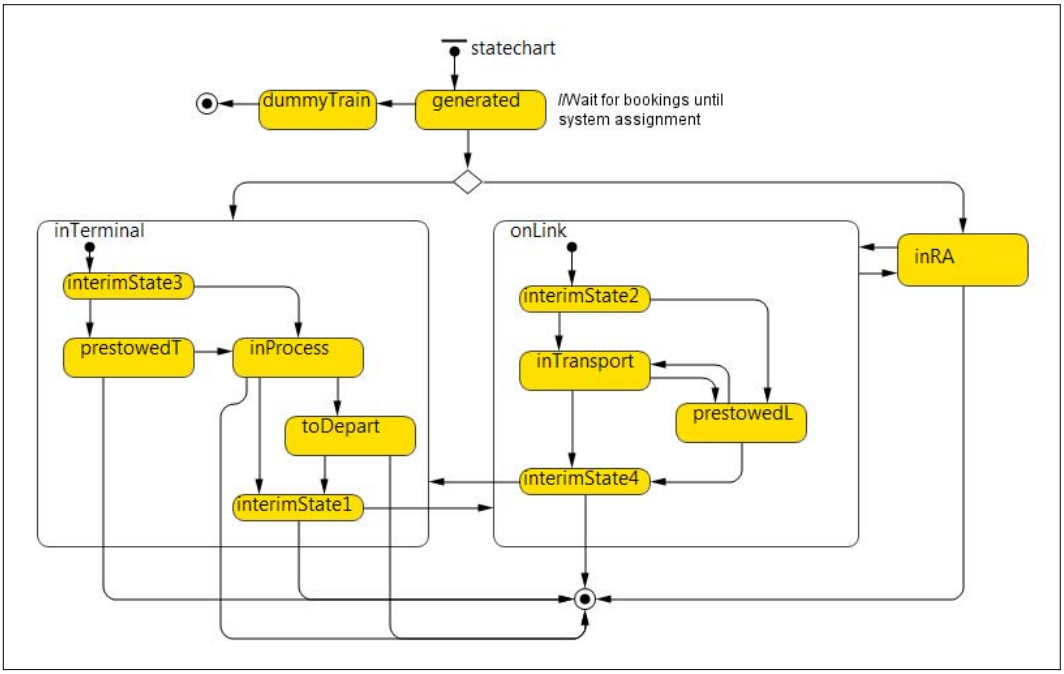


Abbildung 10: Zustandsdiagramm Zug

Die beiden letztgenannten Elemente, Statechart Load Unit und Stateschart Train, gehören zu jenen aktiven Modellelementen, die keinen externen Dateninput erfordern, sondern im Bedarfsfall bei der Erzeugung der zu steuernden Entitäten generiert werden. Zwei weitere Modellklassen, deren Objekte ohne äußeren Input erstellt werden, sind die Einheiten zur Dokumentation der Leistungsparameter der Lagerflächen der Terminal Module, sowie von Equipment und Gleisen. Auch die diversen Kennzahlen zu den Shipments zwischen zwei Systemknoten werden von eigenen Statistik-Objekten ermittelt (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Parameter der modellintern erzeugten Active Objects

Facility Statistics (je Track, je Equipment, je Lager)	**Das Statistik Objekt wird im Modell automatisch für die entsprechenden Objekte erzeugt und schreibt Auslastungswerte für Gleise und Equipment auf stündlicher Basis für alle Wochentage mit. Für die Lagerauslastung wird die Zeit der Überschreitung des Auslastungsgrenzwertes dokumentiert.**		
	dayInt	***int***	**Nummer des Wochentages. AnyLogic/Java interner Wert für Sonntag=1.**
	dayString	***String***	**Name des Wochentages.**
Shipment Statistics (je Origin-Destination Paar)	**Das Statistik Objekt wird im Modell automatisch für jedes Knotenpaar von Systemeintritts- und -austrittspunkten von Shipments erzeugt.**		
	origin	***int***	**ID des Systemeintritt-Knotens.**
	destination	***int***	**ID des Systemaustritt-Knotens.**
	stringID	***String***	**Zusammenfassung der Knoten IDs zur Identifikation des Statistik Objektes.**
StChLoadUnit (je Ladeeinheit im Netzwerk)	**lu**	***LoadUnit***	**Die Statechart einer Ladeeinheit dokumentiert die Stati einer Ladeeinheit, wie den Beladungsstatus oder ob sie sich auf einem Zug oder im Lager befindet mit. Weiters werden Statistiken zum Container und auch den einzelnen Sendungen aufgezeichnet.**
StCHTrain (je Zug im Netzwerk)	**tr**	***Train***	**Die Statechart eines Zuges dokumentiert die Stati des Zuges, wie den Aufenthaltsort (auf den Ladegleisen im Terminal, Vorgestaut, auf der Kante,..) mit und zeichnet dazu Statistiken auf. Außerdem wird der Fahrplan des Zuges überwacht, und beispielsweise der KnotenAgent informiert, wenn die Departure-Zeit erreicht ist.**

Die für den gesamten Systemablauf durchaus relevanten LKW Transporte kommen in der aktuellen Modellausbaustufe ohne zusätzliche aufwändige Steuerungs- und Kontrollmechanismen aus.

Zu diesen als aktive Agenten fungierenden Modellelementen kommen noch die in Tabelle 17 bis Tabelle 21 in alphabetischer Reihenfolge aufgelisteten "handlungs-passiven" Entitäten-Klassen zur Vervollständigung der Modellfunktionalität und Sammlung von Laufzeitdaten zur Ergebnisaufbereitung hinzu.

Tabelle 17: Objekt Klassen Modellinterne Erzeugung Teil 1

Booking Info	Information vom Operator an den RoutePlanner über die mögliche abschnittsweise Buchung eines Ladeeinheiten - Pfades (je Zug, dabei können von einem Zug mehrere Teilstrecken involviert sein).		
	trainID	*int*	ID des ersten möglichen Zuges für den angeforderten Model Train unter Angabe des frühest möglichen Buchungszeitpunkts.
	depDate	*Date*	Datum und Zeit der Abfahrt des Zuges.
	arrDate	*Date*	Datum und Zeit der Ankunft des Zuges.
DuTrSchedule	Zugfahrplan-Info für Dummy Trains.		
	tAgent	*int*	TAgent, von dem der Zug abfährt, bzw. wo der Zug ankommt.
	modelTrain	*int*	ID des Dummy Model-Trains (für Informationen über die Zug-Charakteristika).
	type	*String*	Zugtyp: import, export.
	mo	*double*	Wahrscheinlichkeit, mit der der Zug Montags fährt.
	tu	*double*	Wahrscheinlichkeit, mit der der Zug Dienstags fährt.
	we	*double*	Wahrscheinlichkeit, mit der der Zug Mittwochs fährt.
	th	*double*	Wahrscheinlichkeit, mit der der Zug Donnerstags fährt.
	fr	*double*	Wahrscheinlichkeit, mit der der Zug Freitags fährt.
	sa	*double*	Wahrscheinlichkeit, mit der der Zug Samstags fährt.
	su	*double*	Wahrscheinlichkeit, mit der der Zug Sonntags fährt.
	hour	*int*	Ankunfts-/Abfahrts- Stunde.
	min	*int*	Ankunfts-/Abfahrts- Minute.
ECTrainInfo	Information über Leercontainer-Bedarfszüge zur Repositionierung von Containern zwischen Depots. Verwendung für Output - Statistiken.		
	date	*Date*	Zeitpunkt der Zugabfahrt.
	fromDep	*int*	Abfahrts-Depot (bzw. Residual Area).
	toDep	*int*	Ankunfts-Depot (bzw. Residual Area).
	teu	*int*	Anzahl an überführten TEU.
Empty Request	Wird von CatchmentArea, Residual Area oder TAgent an einen ContainerOwner geschickt, wenn vom Betreffen Ladeeinheiten benötigt werden oder ein Überschuss zur Repositionierung vorhanden ist.		
	erID	*int*	ID zur eindeutigen Identifikation der Anfrage.
	type	*int*	Anfrage wird gestellt von: 1…CA, 2…RA, 3…TAgent.
	node	*int*	ID des anfragenden Knoten.
	tModuleNr	*int*	ID des TModules (Depots) des anfragenden Knotens (wenn TAgent).
	owner	*String*	ID des Container Owners.
	message	*String*	Information darüber, ob es sich um Überschuss oder Fehlmengen handelt; bei der Antwort des ContainerOwners das OK oder die Absage.
	teuTwenty	*int*	Anzahl an 20-Fuß Containern.
	teuFourty	*int*	TEU-Anzahl an 40-Fuß Containern.
Lifting Request	Hubauftrag für eine Ladeeinheit. Wird im TModule generiert und abhängig vom benützten Ladegleis des Transportmittels dem möglichen Equipment zugeordnet.		
	idLU	*int*	Nummer zur eindeutigen Identifizierung des Objects.
	possEquip	*ArrayList <Integer>*	Liste der IDs des möglichen Equipment.
	priority	*int priority;*	Priorität des Hubauftrages. Dieser ist höher bei Direkthüben (Zug-Zug, Zug-LKW), oder wenn aufgrund der Abfahrtszeit eine Priorisierung eines Zuges vorgenommen werden muss.
	liftFrom	*int*	ID des Transportmittels (Zug, LKW), wenn vom Lager = 0.
	liftTo	*int*	ID des Transportmittels (Zug, LKW), wenn zum Lager = 0.
	liftStringF	*String*	Werte: "truck", "train", "storage"
	liftStringT	*String*	Werte: "truck", "train", "storage"
	typeCont	*int*	Werte: container=1, wab=2, sal=3
	typeReq	*String*	Werte: beladen="loa",entladen= "unl"
	track	*int*	ID des Ladegleises, wenn LKW: 0.
	dummyDM		Information, ob es sich um einen Direkthub einer Dummy-Ladeeinheit handelt.
Load Unit	Ladeeinheit vom Typ Standardcontainer, WAB oder SAL. Kann einem Leercontainer-Owner gehören (Systemcontainer), und in diesem Fall für Transportaufträge gebucht werden. Alternative: Dummy-Ladeeinheit zur Simulation der Grundauslastung der Terminals.		
	id	*int*	Nummer zur eindeutigen Identifizierung des Objects. Wird automatisch bei Entitäts-Erzeugung generiert.
	stringID	*String*	String-Variable zur eindeutigen Identifizierung des Objects.
	type	*int*	1...Standardcontainer, 2...WAB, 3...SAL
	dummy	*boolean*	True, wenn die LE "nur zur Nachbildung einer Basisauslastung für die Terminals" verwendet wird.
	acutalTrain	*int*	ID des aktuellen Zuges, sofern sich die LE auf einem Zug befindet.
	acutalTruck	*int*	ID des aktuellen LKWs, sofern sich die LE auf einem LKW befindet.

Tabelle 18: Objekt Klassen Modellinterne Erzeugung Teil 2

MissedTrainInfo	Zusammenfassung der Informationen über einen Missed-Train-Event einer Ladeeinheit, d.h. die LE konnte den gebuchten Zug nicht erreichen. Verwendung für Statistik.		
	nodeID	*int*	Knoten, in dem das Ereignis aufgetreten ist.
	importT	*String*	Relation, auf der sich die Ladeeinheit befand (0 falls LKW).
	exportT	*String*	Relation, auf die die LE in weiterer Folge gebucht war (diejenige, der nicht mehr erreicht wurde).
	date	*Date*	Datum des Ereignisses.
MoTrDummy	Detailinformation zu einem Modell-Dummy Zug. Daraus werden die tatsächlichen Züge generiert. Die Längenverteilung der LEs hängt vom jeweiligen Terminal wo der Zug ankommt oder abfährt ab.		
	id	*int*	ID des Modellzuges.
	nbTeuAvg	*double*	Durchschnittliche Anzahl an TEU.
	nbTeuSd	*double*	Standardabweichung für Anzahl TEU.
	shareContAvg	*double*	Durchschnittlicher Anteil an Standardcontainern.
	shareWabAvg	*double*	Durchschnittlicher Anteil an WAB.
	shareSalAvg	*double*	Durchschnittlicher Anteil an SAL.
	shareTypeSD	*double*	Standardabweichung für die jeweiligen Containertypen.
MoTrPath	Der Pfad einer Relation im Netzwerk besteht aus mind. einer solchen Teilstrecke. Sie dient als Ausgangsinformation für den konkreten Fahrplan der tatsächlichen Züge.		
	from	*int*	ID Startknoten.
	to	*int*	ID Endknoten.
	dayOfWeekDep	*int*	Nummer des Wochentages der Abfahrt - Start bei Sonntag=1.
	dayOfWeekArr	*int*	Nummer des Wochentages der Ankunft - Start bei Sonntag=1.
	depTimeHour	*int*	Stunde der Abfahrt.
	depTimeMinute	*int*	Minute der Ankunft.
	arrTimeHour	*int*	Stunde der Ankunft.
	arrTimeMinute	*int*	Minute der Ankunft.
	nrPathFraction	*int*	Nummer der Teilstrecke des Pfades (Start bei 1).
ModelTrain	Detailinformation zu einer Relation. Daraus werden die tatsächlichen Züge generiert.		
	mtID	*String*	String-Wert zur eindeutigen Identifizierung des Objects.
	trainType	*String*	Zugtyp der Relation. Werte: bl,sh,li,du, em...block, shuttle, line, dummy, empty.
	moTrPath	*ArrayList <MoTrPath>*	Repräsentiert den Fahrplan der Relation, enthält alle Teilstrecken des Pfades. Ein Ganzzug hat nur eine Teilstrecke, die Pfade von Shuttle und Line Trains bestehen aus mind. 2 MoTrPath-Objekten.
	lengthTEU	*int*	Zuglänge der Relation in TEU.
	maxTeuSal	*int*	Max. TEU von Containern des Typs SAL, die auf einen Zug der Relation geladen werden dürfen.
	cycle	*int*	Zyklus der Relation. Werte: 1...Zug fährt wöchentlich, 2...alle 2 Wochen, 4...alle 4
	calLastTrain	*Gregorian Calendar*	Abfahrtsdatum des letzten generierten Zuges der Relation, davon ausgehend wird der nächste Zug erzeugt - in Abhängigkeit vom cycle.
	counterMT	*int*	Zähler für die Anzahl der tatsächlich generierten Züge der Relation.
	lastTrainID	*int*	ID des letzten generierten Zuges dieser Relation.
NewMoTrainInfo	Datenobjekt zum Aufzeichnen der Statistik über versuchte und durchgeführte Einführungen von neuen Relationen eines Operators.		
	omtID	*String*	ID der Original-Relation.
	nmtID	*String*	ID der neu eingeführten Relation (falls der Versuch erfolgreich war).
	date	*Date*	Datum der (versuchten) Einführung.
	realised	*boolean*	true…Relation wurde eingeführt, false…Einführung fehlgeschlagen
	deniedByOperator	*String*	1…Einführung fehlgeschlagen obwohl ein Zeitfenster gefunden wurde. Basiert auf dem probAcceptNTW-Parameter des Operators.
	justCycleChange	*String*	1…Es wurde der cycle der Original-Relation geändert (verkürzt), die Einführung einer neuen Relation war nicht notwendig. 0…neue Relation.
	coordinatedTW	*String*	1…Das vom Operator vorgeschlagene Zeitfenster war nicht möglich, jedoch wurde mit den Terminals ein alternatives Zeitfenster gefunden.
	fullTrain	*boolean*	true…Einführung einer Relation auf der gesamten Originalstrecke, false…Einführung einer Relation auf einer Teilstrecke der Originalrelation (Shuttle oder Line Train).

Tabelle 19: Objekt Klassen Modellinterne Erzeugung Teil 3

NewTrainRequest	Datenobjekt für die Anfrage bzw. den Informationsaustausch zwischen Operator und TAgent über die Einführung einer neuen Relation.		
	id	*int*	Nummer zur eindeutigen Identifizierung des Objekts.
	oldMoTrID	*String*	ID der Original-Relation.
	terminal	*int*	ID des betreffenden Terminals.
	operator	*int*	ID des Operators.
	weekDay	*int*	Wochentag für Zeitfenster im Terminal.
	hour	*int*	Start-Stunde für Zeitfenster im Terminal.
	min	*int*	Start-Minute für Zeitfenster im Terminal.
	text	*String*	Werte: arr…Ankunft, dep…Abfahrt, arrdep…Ankunft und Abfahrt, accept…Zeitfenster akzeptiert, deny…Zeitfenster abgelehnt.
	nbNode	*int*	Nummer des Terminals im Pfad der Relation.
	messType	*String*	Werte: req...request, resp...response
	messContent	*String*	Vom TAgent die Einführung der Relation betreffende Werte: accept, deny, change ...neuer Vorschlag für das Zeitfenster vom TAgent
	cycle	*int*	Werte: 1...Zug fährt wöchentlich, 2... alle 2 Wochen, 4...alle 4 Wochen, wichtig für die Evaluierung der Auslastung der Kapazitäten im Terminal
	fixed	*boolean*	Wenn true, wurde vom betreffenden Terminal bereits eine Zeitfenster-Änderung vorgenommen und es darf keine weitere Änderung vorgeschlagen werden. Der Parameter kommt zur Verwendung, wenn es mehrere Teilstrecken im Pfad der Relation gibt, und es bei der Ermittlung eines möglichen Zeitfensters mehrere Rekursionen aufgrund Vorschläge nachfolgender Terminals kommt. Es darf je Terminal nur ein mal ein neues Fenster vorgeschlagen werden (wenn das Anfrage-Zeitfenster aus Kapazitätsgründen nicht möglich ist).
	counterProp	*boolean*	Wird vom TAgent auf true gesetzt, wenn ein Gegenvorschlag für das Zeitfenster gemacht wurde.
	cycleChange	*boolean*	Wenn true, konnte als erste Maßnahme der cycle-Parameter des Zuges verändert werden, z.B. von 2-wöchiger auf wöchentliche Bedienung der Relation.
	trainType	*String*	Zug-Typ: falls es regelmäßige Leercontainer-Relationen gibt, wichtig für die Auswahl des richtigen Modules des TAgents zur Evaluierung der Kapazitätsparameter.
	fullTrain	*boolean*	Wenn true wird die gesamte Original-Relation zusätzlich eingeführt, sonst nur eine
	idLastTr	*int*	ID des letzten generierten Zuges der Original-Relation. Wird benötigt für die Bestimmung des ersten Abfahrtsdatums des potenziellen neuen Zuges und für die Wahl der richtigen Woche für die Evaluierung der Kapazitätsparameter falls die Relation mit einem cycle>1 geplant ist. In diesem Fall wird die Terminalauslastung auch im mehrwöchigen Rhythmus analysiert, da es aufgrund mehrerer Relationen mit einem cycle>1 Unterschiede in der wöchentlichen Terminalauslastung geben kann.
	origWeekday	*int*	Wochentag der Abfahrt der Originalrelation.
	origHour	*int*	Stunde der Abfahrt der Originalrelation.
ODDemand	Menge und Charakteristika der Transportnachfrage. Aus dieser Information werden die einzelnen Transportaufträge (Shipments) generiert.		
	orig	*int*	ID Systemeintrittspunkt (Catchment Area oder Residual Area).
	dest	*int*	ID Systemaustrittspunkt (Catchment Area oder Residual Area).
	jan	*double*	Anteil an der Gesamtmenge für Jänner.
	feb	*double*	Anteil an der Gesamtmenge für Februar.
	mar	*double*	Anteil an der Gesamtmenge für März.
	apr	*double*	Anteil an der Gesamtmenge für April.
	may	*double*	Anteil an der Gesamtmenge für Mai.
	jun	*double*	Anteil an der Gesamtmenge für Juni.
	jul	*double*	Anteil an der Gesamtmenge für Juli.
	aug	*double*	Anteil an der Gesamtmenge für August.
	sep	*double*	Anteil an der Gesamtmenge für September.
	oct	*double*	Anteil an der Gesamtmenge für Oktober.
	nov	*double*	Anteil an der Gesamtmenge für November.
	dec	*double*	Anteil an der Gesamtmenge für Dezember.
	sumTeu	*double*	Transportmenge für gesamten Simulationszeitraum in TEU.
	w1	*double*	Anteil von der Monatsmenge für den Monatsanfang (1. Woche wenn diese mind. 5 Tage hat, sonst bis inkl. der 2. Woche).
	w2	*double*	Anteil von der Monatsmenge für die Monatsmitte 1 (2. oder 3. Woche - abhängig von w1).
	w3	*double*	Anteil von der Monatsmenge für die Monatsmitte 2 (3. oder 4. Woche - abhängig von w1).
	w4	*double*	Anteil von der Monatsmenge für den Monatsende.

Tabelle 20: Objekt Klassen Modellinterne Erzeugung Teil 4

RegionDelay	Information über Zug-Verspätungen für eine bestimmte Region/Kategorisierung von Strecken. Die einzelnen Rail Links werden einer dieser Kategorien zugeordnet.		
	regId	*int*	ID der Region/Kategorie.
	shareTrainD	*double*	Anteil an verspäteten Zügen für diese Region/Kategorie.
	distrTD	*String*	Angabe der Verteilungsfunktion für die Verspätungszeit.
	par1	*double*	Parameter für die Verteilungsfunktion für die Verspätungszeit (Absolutwert in Minuten).
	par2	*double*	Parameter für die Verteilungsfunktion für die Verspätungszeit.
	par3	*double*	Parameter für die Verteilungsfunktion für die Verspätungszeit.
Request Comparator	Implementiert das Comparator-Interface für die Klasse LiftingRequest. Wird im TModule und Equipment benötigt.		
Shipment	Ein Shipment wird vom EntityGenerator aus der Transportnachfrage (Klasse ODDemand) generiert und an den betreffenden Startknoten (CA oder RA) weitergegeben.		
	id	*int*	Automatisch generierte ID des Shipments.
	source	*int*	ID des Startknotens.
	destination	*int*	ID des Endknotens.
	teu	*int*	TEU - Menge des Shipments.
	type	*int*	Containertyp für das Shipment.
	dueDate	*Date*	Geplante Startzeit an der Quelle (dient als Richtwert für die Buchungsanfrage).
	contOwner	*String*	Verwendung einer Ladeeinheit von diesem Container Owner. Wird erst vom Startknoten
	idLU	*int*	Wird erst vom Startknoten zugewiesen, wenn feststeht welcher Container zur Verfügung steht.
Train	Tatsächliches Zug-Objekt, erzeugt auf der Informationsbasis des jeweiligen modelTrain-Objektes.		
	id	*int*	Nummer zur eindeutigen Identifizierung des Objekts.
	stringID	*String*	String-Wert zur Identifizierung des Objekts.
	trainType	*String*	Werte: bl...block, sh...shuttle, li...line, du...dummy, em...empty
	moTrainType	*String*	Identifikation des modelTrain-Objektes.
	owner	*String*	Name des Operators.
	pathInfo	*ArrayList <TrainPathInfo>*	Liste von TrainPathInfo-Objekten. Enthält alle Informationen zu den Teilstrecken (Fahrplan).
	nodes	*ArrayList <Integer>*	Liste aller Netzwerk-Knoten im Pfad.
	departureTime	*Date*	Die Variable wird vom zugeordneten StChTrain-Objekt zur Überwachung der Abfahrtszeit im aktuellen Knoten verwendet.
	plannedArrivalTime	*Date*	Die Variable wird zur zeitgerechten Übergabe von Dummy Trains an Terminals verwendet.
	actualLU	*ArrayList <LoadUnit>*	Liste der geladenen Ladeeinheiten.
	bookingTEU	*HashMap <Integer, Integer>*	HashMap zur Aufzeichnung der Buchungsmengen auf den einzelnen Teilstrecken des Zuges. Key: nrPathFraction, Value: summiert die TEU-Werte der gebuchten LEs auf.
	booking	*HashMap <Integer, ArrayList <Integer>>*	HashMap zur Aufzeichnung der IDs der gebuchten LEs auf den einzelnen Teilstrecken des Zuges. Key: nrPathFraction, Values: ArrayList mit den IDs der gebuchten LEs.
	bookingSAL	*HashMap <Integer, Integer>*	HashMap zur Aufzeichnung der Summe der TEU der gebuchten SAL Ladeeinheiten auf den einzelnen Teilstrecken des Zuges. Key: nrPathFraction, Value: Summe der TEU.
	lengthTEU	*int*	Länge des Zuges in TEU.
	maxSAL	*int*	Max. TEU von Ladeeinheiten des Typs SAL, die auf den Zug gebucht werden dürfen.
	counterModelTrain	*int*	Zähler für die Anzahl der tatsächlich generierten Züge der Relation.
	actualNode	*int*	Die Variable wird vom zugeordneten StChTrain-Objekt zur Status-Überwachung verwendet.
TrainDelay	Objekt-Klasse zur Festlegung der tatsächliche Zeit eines Zuges auf dem RailLink (inkl. Verspätungen). Aus Gründen der Modellierung werden Entitäten mit dieser Information benötigt.		
	train	*Train*	Zug Objekt.
	timeOnLink	*double*	Gesamtzeit auf der Strecke in Minuten.

Tabelle 21: Objekt Klassen Modellinterne Erzeugung Teil 5

TrainDelayInfo	Objekt-Klasse zur Dokumentation von verspäteten Zug-Ankünften und -Abfahrten.		
	moTrain	*String*	ID der Relation.
	trainID	*int*	ID des verspäteten Zuges.
	date	*Date*	Datum und Zeit des Auftretens der Verspätung.
	node	*int*	ID des Knoten der verspäteten Ankunft oder Abfahrt (Terminal oder Residual Area).
	dep	*boolean*	true…wenn verspätete Ankunft im Knoten.
	arr	*boolean*	true…wenn verspätete Abfahrt im Knoten.
	delay	*double*	Ausmaß der Verspätung in Minuten.
TrainPathInfo	Konkretes Teilstrecken-Informations-Objekt erzeugt aus einem Objekt der Klasse MoTrPath. Gibt den tatsächlichen Fahrplan an.		
	from	*int*	ID des Startknotens.
	to	*int*	ID des Endknotens.
	departure	*Date*	Datum und Zeit der Abfahrt.
	arrival	*Date*	Datum und Zeit der geplanten Ankunft.
	nrPathFraction	*int*	Nummer der Teilstrecke des Pfades (Start bei 1).
Truck	Objekt-Klasse der LKWs.		
	id	*int*	Nummer zur eindeutigen Identifizierung des Objekts.
	startNode	*String*	String-ID vom Startknoten (CA oder Terminal/Depot).
	endNode	*String*	String-ID vom Endknoten (CA oder Terminal/Depot).
	depDate	*Date*	Datum und Zeit der Abfahrt.
	loadingList	*ArrayList <LoadUnit>*	Liste der geladenen Ladeeinheiten.
	loadingRequest	*ArrayList <Integer>*	Liste mit den IDs der zu ladenden Ladeeinheiten.
	dummy	*boolean*	True, wenn der LKW nur zur "Nachbildung einer Basisauslastung für die Terminals" verwendet wird.
TruckDelay	Objekt-Klasse zur Angabe der tatsächliche Fahrtzeit eines LKW auf einem RoadLink. Aus Gründen der Modellierung werden Entitäten mit dieser Information benötigt.		
	truck	*Truck*	LKW-Objekt.
	time	*double*	Fahrtzeit in Minuten für diesen LKW auf der Kante.
TruckModule Request	Definiert die Be- und Entladelisten für einen LKW für alle TModules eines TAgents. Für den Fall, dass ein LKW z.B. einen Vollcontainer für das VC-Modul bringen und einen LC aus dem LC-Modul mitnehmen kann. Wird bei Eintreffen des LKWs im		
	tnID	*int*	ID des LKWs.
	modID	*int*	Nummer des Modules.
	loading	*ArrayList <Integer>*	Liste der IDs zu ladender LEs.
	unloading	*ArrayList <LoadUnit>*	Liste der zu entladenden LEs.
	modType	*String*	Typ des Modules (empty, mixed/full).
Truck PickUpInfo	Nach Ankunft einer beladenen Ladeeinheit im Terminal mit Destination einer zugehören CA, wird ein TruckPickUpInfo an den Entity Generator geschickt damit dieser einen LKW mit Ladeliste zur Abholung der LE generieren kann.		
	lnID	*int*	ID der Ladeeinheit.
	time	*Date*	Abholzeitpunkt, generiert nach den Terminal-internen Zeitfenstern.
	terminal	*int*	ID des Terminals.
	dummy	*boolean*	Gibt an, ob es sich um eine Dummy Ladeeinheit handelt.
Unprofitable Train	Entitäten dieser Klasse werden zur Dokumentation von eingestellten Relationen und Versuchen der Einstellung einer Relation eines Operators verwendet. Eine Relation wird nicht eingestellt, wenn sie die letzte Verbindung des Endknoten zum Netzwerk ist.		
	modelTrainID	*String*	ID der Relation.
	date	*Date*	Datum der (versuchten) Einstellung.
	discarded	*boolean*	True, wenn die Relation eingestellt wurde. False, wenn die Relation nicht eingestellt werden konnte, da es die letzte Verbindung im Netzwerk zum Endknoten ist.

Essentiell in der Agenten-basierten Modellierung sind die Kommunikationsstrukturen und -mechanismen zwischen den einzelnen Agenten. Im entwickelten Modell findet in erster Linie direkter Informationsaustausch durch das adressierte Schicken von Nachrichten statt. Es wird aber auch indirekte Kommunikation über "Dritte" betrieben, wie z.B. im Fall des Link Agents als Vermittler zwischen Terminals und Kanten, oder die Informationen werden über auch für andere zugängliche Variablen weitergegeben. Die versandten Nachrichten stellen schon aufgrund ihres Typs einen bestimmten Informationsgehalt bereit, der durch zusätzliche Parameter ergänzt wird. Eine wichtige Funktion stellt die Übermittlung von Objekten durch Nachrichten

dar, d.h. eine Nachricht kann neben anderen Informationen auch Objekte transportieren. Beispielsweise werden Zug- und LKW-Objekte durch Nachrichten zwischen Netzwerkkanten und Terminals übergeben. Die im Einzelnen übermittelten Informationen werden in Tabelle 22 bis Tabelle 23 detailliert dargestellt.

Tabelle 22: Objekt - Klassen zur Kommunikation der Modellelemente Teil 1

MsgBooking	Buchungsauftrag für eine Ladeeinheit an einen Operator, gesendet vom Route Planner.		
	luID	*int*	ID der Ladeeinheit (LE).
	trainID	*int*	ID des mit der LE zu buchenden Zuges.
	from	*int*	Startknoten - da die LE auch für eine Teilstrecke der Relation gebucht werden kann.
	to	*int*	Endknoten - da die LE auch für eine Teilstrecke der Relation gebucht werden kann.
	possTime	*Date*	Frühest möglicher Ladezeitpunkt beim Startknoten.
	teu	*int*	TEU-Länge des Containers.
	type	*int*	1..Cont, 2…WAB, 3…SAL - wichtig für den Parameter maxSAL eines Zuges.
MsgFinishTrain	Nachricht von StChTrain an das aktuelle Terminal, dass die Abfahrtzeit des Zuges erreicht ist.		
	trainID	*int*	ID des Zuges.
MsgLLEmpty	Ladeliste bei einem Leercontainer Repositionierungs-Auftrag.		
	erID	*int*	ID des Empty Requests.
	contList	*ArrayList <Integer>*	Liste mit den IDs der betroffenen Ladeeinheiten.
MsgLoadUnit	Nach Anfrage von CA, RA oder Depot an Container Owner bei Überschuss oder Fehlmengen von Leercontainer, wird diese Nachricht verwendet um die IDs der betreffenden Leercontainer auszutauschen.		
	contO	*String*	ID des betreffenden Container Owners.
	luID	*int*	ID der zu versendenden LE im Fall einer Einzel-Repositionierung per LKW.
	listIDs	*ArrayList <Integer>*	Liste der zu versenden LEs im Fall einer Repositionierung per Zug.
	message	*String*	Zusatzinformationen in Abhängigkeit von der Anfrage.
MsgLoadingLists	Die Be- und Enladelisten für einen Zug/LKW werden per Message vom TAgenten das entsprechene Modul (Vollcontainer, Leercontainer) weitergeben.		
	tuID	*int*	ID des Zuges/LKWs.
	listUnloading	*ArrayList <LoadUnit>*	Liste der zu entladenden LEs.
	teuUnloading	*int*	Summe TEU der zu entladenden LEs.
	listLoading	*ArrayList <Integer>*	Liste der IDs der zu beladenden LEs.
	teu loading	*int*	Summe TEU der zu beladenden LEs.
	type	*int*	1…Zug, 2…LKW
	track	*int*	Nummer des Ladegleises, wenn LKW: 0.
	mod	*String*	empty…Leercontainer-Modul, full…Vollcontainer-Modul
	dummy	*boolean*	Gibt an, ob es sich um einen Dummy Zug handelt.
MsgLuPath	Pfad-Information für ein Shipment. Wird vom RoutePlanner oder ContainerOwner (bei Leercontainer-Repositionierung) an die CA oder RA zurückgegeben.		
	idLU	*int*	ID der Ladeeinheit.
	shNr	*int*	ID des Shipments.
	path	*int[]*	Pfad-Information gegeben als Knoten-IDs und Kanten in Form der TrainIDs. Für Road-Link Kanten wird die Information "0" angegeben.
	dep	*Date*	Abfahrszeitpunkt des ersten Zuges. Die Abfahrt von der CA wird aufgrund vom Anlieferungs- zeitfenster des Terminals festgelegt (oder der Startknoten ist eine RA, dann entfällt dieser Schritt).
	startCA	*boolean*	Gibt an, ob der Startknoten eine CA ist.
MsgLuReturn	Die Nachricht geht von CAs an den ContOwner wenn ein LC an ein Depot retourniert werden soll. Der ContOwner ermittelt das passende Depot an das die LE zu retournieren ist, und gibt die Pfad-Information dazu an die CA zurück (MsgLuPath).		
	luId	*int*	ID der Ladeeinheit.
	ca	*int*	ID der Catchment Area.
	co	*String*	ID des Container Owners.
	teu	*double*	TEU-Länge des Containers.
	message	*String*	Zusatzinformationen abhängig von der Anfrage.

Tabelle 23: Objekt - Klassen zur Kommunikation der Modellelemente Teil 2

MsgRebooking	Die Nachricht wird von der Statechart der LU an den RoutePlanner geschickt, wenn eine Zug nicht erreicht wurde oder ein bereits gebuchter Zug vom Operator gestrichen wird (Einstellen einer Relation).		
	startNode	*int*	Startknoten des neuen Pfades.
	endNode	*int*	Endknoten des neuen Pfades (bleibt natürlich gleich wie beim alten Pfad).
	idLU	*int*	ID der Ladeeinheit.
	teu	*double*	TEU-Länge der Ladeeinheit.
	type	*int*	1...Standardcontainer, 2...WAB, 3...SAL - relevant für Buchung bei begrenztem SAL Anteil eines Zuges.
	earliestDep	*Date*	Frühest möglicher Ladezeitpunkt beim Startknoten.
	requestFrom	*String*	Gibt an, von wem die Neubuchungsanfrage gesendet wurde.
	text	*String*	Zusatzinformationen zur Anfrage (missedTrain, trainDiscarded).
MsgTrain	Die Nachricht wird für verschiedene Übergabeanfragen und -prozesse von Zügen zwischen TAgent, LinkAgent und RailLinks versendet.		
	train	*Train*	Zug-Objekt.
	message	*String*	Nachrichtentext, woraus ersichtlich ist, ob es ein Anfrage, Reaktion auf eine Anfrage oder tatsächliche Übergabe ist.
	termID	*int*	ID des TAgents, falls involviert.
MsgTruck	Die Nachricht wird für verschiedene Übergabeanfragen und -prozesse von LKWs zwischen TAgent, LinkAgent und RailLinks versendet.		
	truck	*Truck*	LKW-Objekt.
	message	*String*	Nachrichtentext, woraus ersichtlich ist, ob es ein Anfrage, Reaktion auf eine Anfrage oder tatsächliche Übergabe ist.
	destination	*int*	ID der Destination - CA oder TAgent (Depot)
MsgTuLoaded	Nachricht vom TModule and den TAgent, dass die Be- und Enladeliste eines Transportmittels abgearbeitet wurde, und das Terminal verlassen werden kann.		
	tuID	*int*	ID der Transporteinheit (Zug oder LKW).
	listLoaded	*ArrayList <LoadUnit>*	Liste der im Modul zugeladenen Ladeeinheiten.
	listUnloaded	*ArrayList <Integer>*	Liste der IDs der im Modul entladenen Ladeeinheiten.
	type	*int*	Typ der Transporteinheit: 1…Zug, 2…LKW
	moduleNr	*int*	ID des Modules.

5.3.2 Beispiele zur Modellfunktionalität und Entscheidungsfindung

Um einen Einblick in die Funktionsweise des Modells zu geben, werden im Folgenden ausgewählte Aktivitäten im Detail dargestellt.

Versenden eines Transportauftrages aus einer Catchment Area

Die einzelnen vom Entity Generator erzeugten Transportaufträge werden zum festgelegten Zeitpunkt des Auftretens der Transportnachfrage an den Versendeknoten übermittelt. Erhält also beispielsweise eine Catchment Area (CA) ein Shipment-Objekt (entspricht einem Transportauftrag), so werden die in Abbildung 11 dargestellten Abläufe angestoßen. Als ersten Schritt überprüft die CA je nach verlangtem Container Typ für den Transportauftrag die Verfügbarkeit. Im Fall eines Auftrages für eine Ladeeinheit vom Typ WAB oder SAL wird dafür eine neue passende Ladeeinheit und die dazugehörige Steuerungseinheit (Objekt vom Typ Statechart Load Unit) erzeugt. Dies ist erforderlich, da der Container Owner nur Standardcontainer zur Verfügung stellt, und unterliegt der Annahme, dass Spezialcontainer von den Versendern selbst oder zwischengeschalteten Logistikunternehmen bereitgestellt werden (Anmerkung: Diese Ladeeinheiten werden nach Beendigung des Transportauftrages wieder eliminiert, die während des Transportes gesammelten Daten über den Transportverlauf zwischen dem jeweiligen Quell- und Zielknoten werden für die Gesamtstatistik dokumentiert.).

Wird ein Standardcontainer benötigt, wird geprüft, ob ein Leercontainer mit der richtigen Länge in der Region für einen neuen Auftrag zur Verfügung steht. Ist dies der Fall, so wird das Shipment dem entsprechenden Container zugewiesen. Wird allerdings kein passender Leercontainer gefunden, muss dieser vom Container Owner angefordert werden. Nach Eintreffen der Leercontainer-Anfrage beim Container Owner ermittelt dieser das dem Quellknoten nächstgelegene Depot mit einer passenden Ladeeinheit und erzeugt gleichzeitig den LKW für den Transport des Leercontainers. Der CA wird anschließend die ID des bestimmten Containers übermittelt. Sie wird dem Shipment zugeordnet und ist Voraussetzung für den Start der Routenplanung.

Stand die Ladeeinheit in der CA bereits zur Verfügung oder wurde vom Container Owner eine Ladeeinheit zugewiesen, erhält im nächsten Schritt der Route Planner die notwendigen Informationen zur Routenplanung und Zugbuchung beim Operator. Ist dieser Auftrag abgeschlossen, wird die Pfad-Information für die Ladeeinheit an die CA weitergegeben und dort der Abfahrtszeitpunkt für den beladenen Container festgelegt.

Unterdessen erfolgt je nach definiertem Startzeitpunkt der Transport des Leercontainer vom Depot zur CA. In Teilschritte zerlegt bedeutet dies Folgendes: Bei Ankunft des LKWs beim Depot wird dieser im Fall eines freien Slots in das Terminal eingelassen und der Beladeprozess erfolgt laut Ladeliste des LKWs (ID des Leercontainers). Anschließend erfolgt die Übergabe des LKWs an den Link Agent, der wiederum die Zuweisung an das richtige Road Link Objekt übernimmt. Nach Ablauf der dort bestimmten Transportzeit basierend auf einer Verteilung für die Streckenlänge und dem der Strecke zugeordneten Geschwindigkeitsparameter kommt der LKW in der Catchment Area an, d.h. wird wieder über Zwischenschaltung des Link Agents an die CA übergeben. Das LKW-Objekt wird nach Beendigung dieses Transportes eliminiert. Stehen die Pfad-Informationen für den Transportauftrag und die Ladeeinheit für den Transport zur Verfügung, kann bei Erreichen der Abfahrtszeit der Transport des Shipments gestartet werden (Anmerkung: mit Hilfe eines weiteren LKW-Objekts).

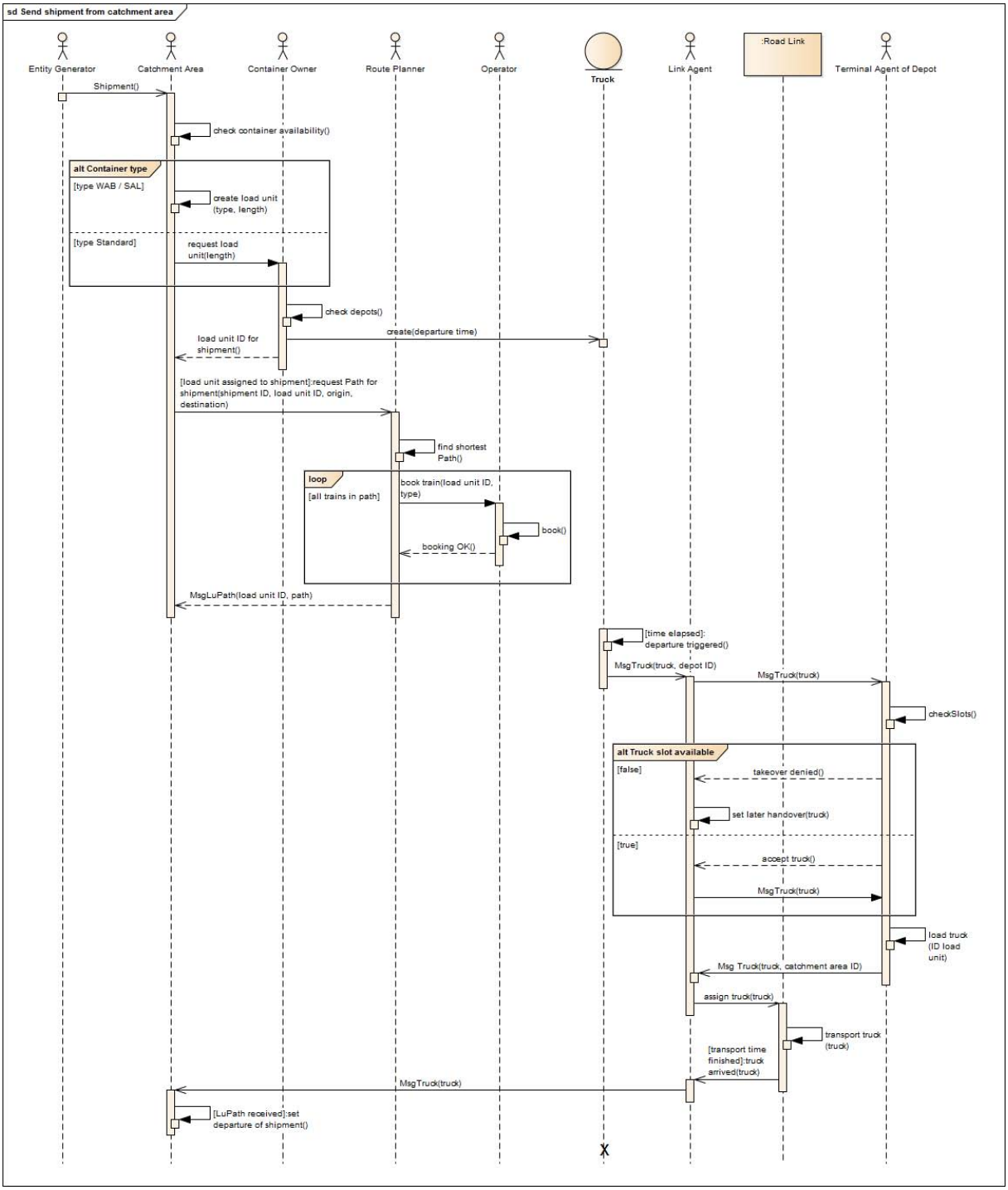


Abbildung 11: Sequenzdiagramm zur Bearbeitung eines Transportauftrages in der Catchment Area

Einführung einer neuen Relation durch den Operator

Der Operator führt Auslastungs-Statistiken über seine Relationen, um das Fahrplanangebot bei Bedarf anzupassen (siehe Abbildung 12). Liegt die durchschnittliche Auslastung einer Relation über einen bestimmten Zeitraum unter einem festgelegten Grenzwert (der Parameter kann je nach gewünschtem Evaluierungszeitraum beliebig verändert werden) und wären die betroffenen Knotenpunkte nach Einstellen der Relation noch durch andere Verbindungen an das Netzwerk angeschlossen, wird der Operator diese Verbindung aus dem Fahrplanangebot herausnehmen. Über diesen Schritt muss der Route Planner informiert werden, um die Informationsbasis für den Algorithmus der Routenplanung zu aktualisieren.

Ist eine Relation über diesen Zeitraum hoch ausgelastet und die durchschnittliche Zeitspanne zwischen dem gewünschten Buchungszeitpunkt für eine Relation und dem aufgrund der freien Kapazitäten tatsächlich möglichen Buchungsdatum übersteigt einen definierten Grenzwert (der Parameter wird auch über die Input-Daten für das Szenario gesetzt), versucht der Operator eine zusätzlich Relation auf dieser Strecke einzuführen. Dazu muss eine Anfrage über die freien Hub- und Lagerkapazitäten an die betroffenen Terminals gestellt werden. Wie die Evaluierung der Kapazitäten in den Terminals erfolgt und eine Entscheidung getroffen wird, ist in Abbildung 13 im Detail dargestellt. Die Terminals haben, wenn das vom Operator vorgeschlagene Originalzeitfenster nicht geeignet ist, die Möglichkeit ein alternatives Zeitfenster für die Ankunfts- bzw. Abfahrtszeit der Züge vorzuschlagen. Jedem Terminal ist ein einmaliger Vorschlag einer neuen Option gestattet, die wiederum von dem bzw. den anderen Terminals neu überprüft werden muss. Handelt es sich bei der Relation um einen Blockzug, ist dieser Prozess relativ schnell durchlaufen, im Fall von Line Train-Zügen kann dies jedoch zu mehrfachen Iterationen führen. Hat ein Terminal bereits einen Gegenvorschlag eingebracht (der bei den anderen Beteiligten nicht möglich war) und kann einer neuerlichen Alternative nicht zustimmen, so kann die neue Relation zu diesem Zeitpunkt nicht eingeführt werden. Der Operator hat allerdings nach Ablauf einer gewissen Sperrfrist die Möglichkeit einen neuerlichen Evaluierungsprozess anzustoßen.

Vereinfachend für dieses Verfahren wirkt, dass Kapazitäten auf den Strecken in diesem Prozess nicht berücksichtigt werden.

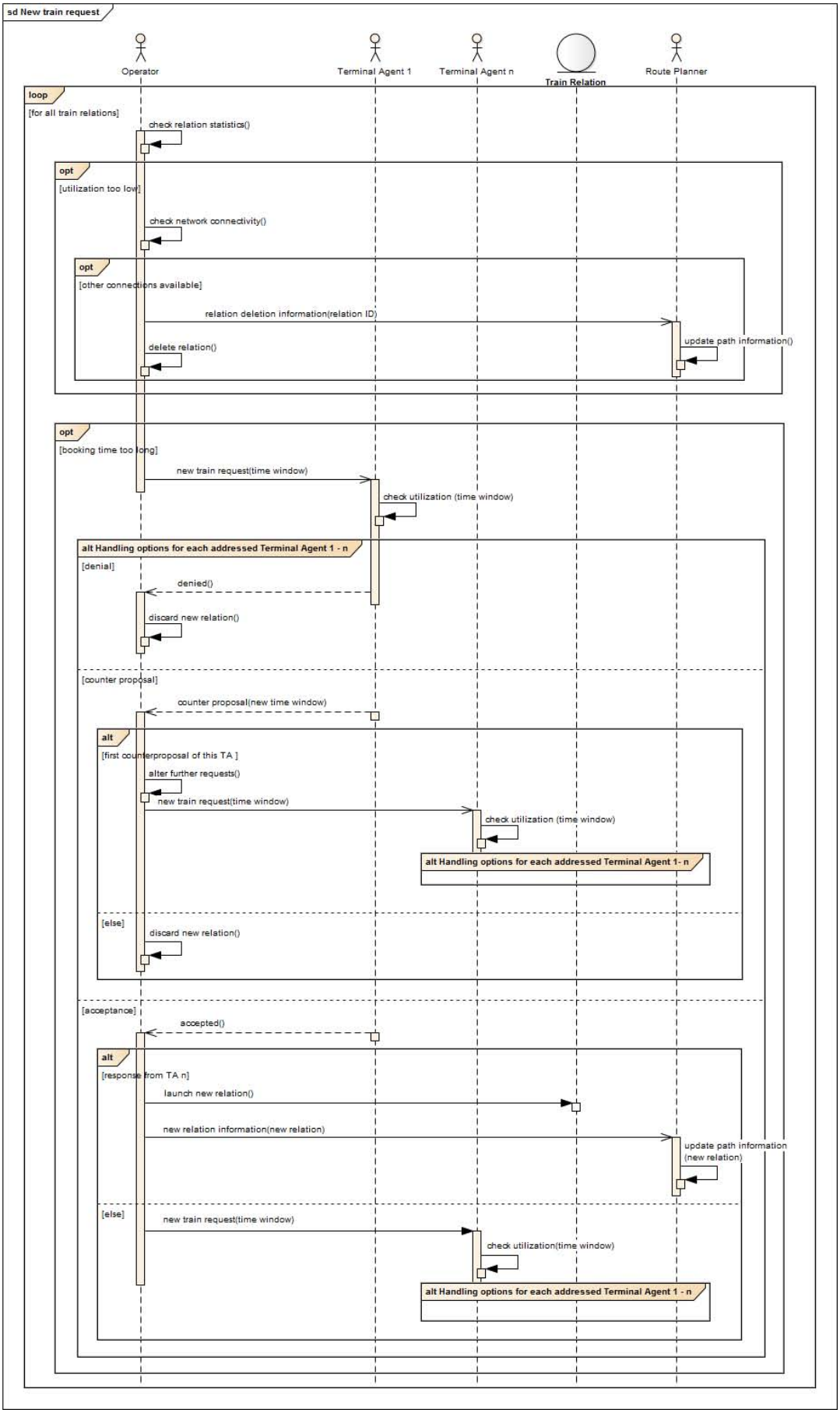


Abbildung 12: Sequenzdiagramm zur Einführung einer neuen Relation

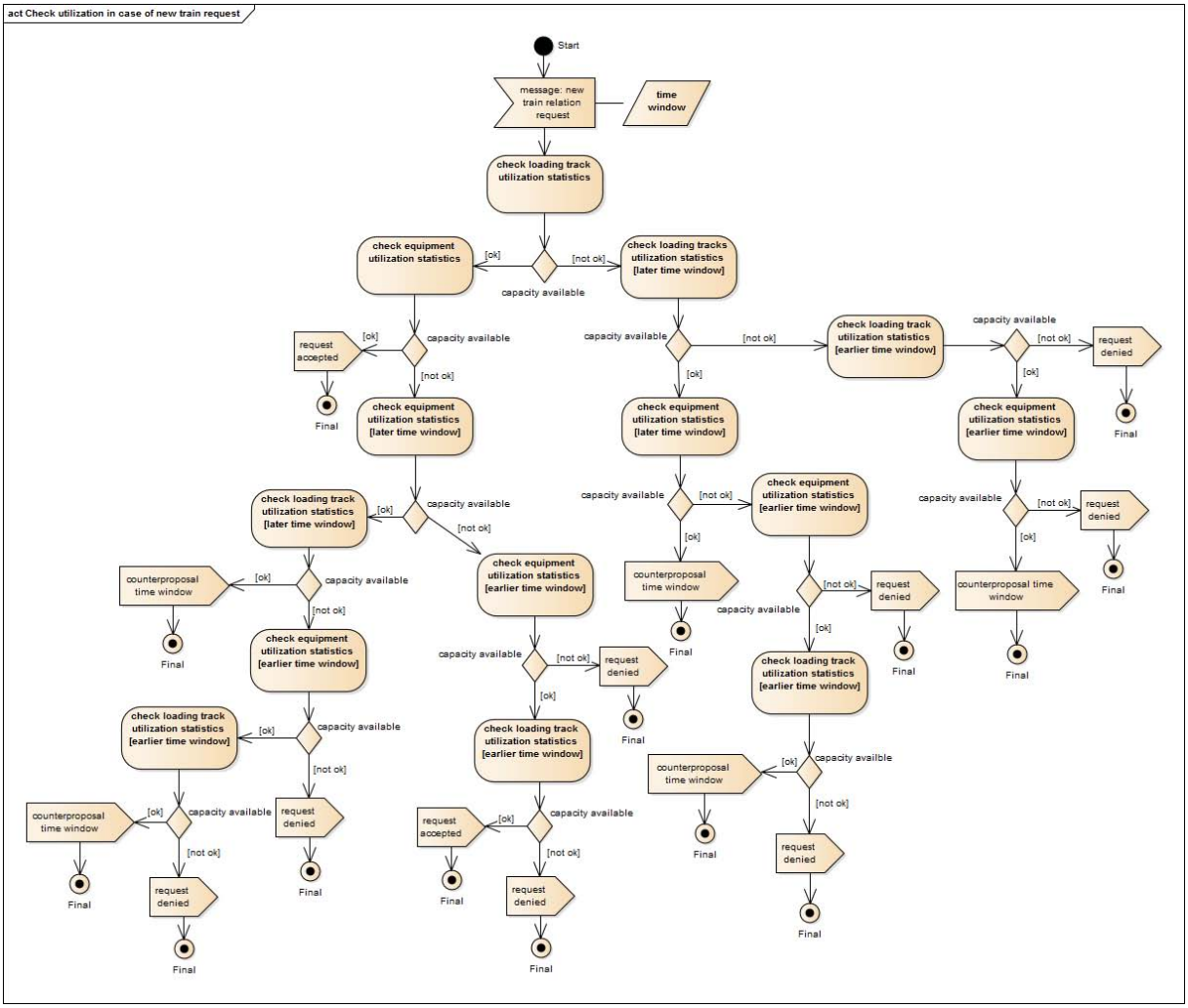


Abbildung 13: Aktivitätsdiagramm zum Prüfen eines Zeitfensters für eine neue Relation im Terminal

5.4 Ergebnisparameter und Kennzahlen

Das Simulationsmodell liefert als Ergebnis eines Simulationslaufes eine Reihe von Informationen, die zur Ableitung von Kennzahlen zum Vergleich verschiedener Szenarien herangezogen werden. Folgende Informationen liegen nach der Evaluierung eines Szenarios vor:

Outputparameter System

1. Allgemeine Szenariodaten:
   - Anzahl neu eingeführter Relationen
   - Anzahl Bedarfszüge Leercontainer-Repositionierung
   - Gesamtanzahl gefahrene Züge
   - Anzahl Züge zur Grundauslastung der Terminals
   - Anzahl Ladeeinheiten zur Grundauslastung der Terminals

- Gesamtanzahl gefahrene LKWs
- Gesamtanzahl transportierter Wechselbehälter
- Gesamtanzahl transportierter Sattelanhänger
- Anzahl der Export Wechselbehälter und Sattelanhänger je Catchment Area und je Residual Area

2. Output zu Transportaufträgen je Quelle-Ziel Knotenpaar:
   - Anzahl Transportaufträge
   - Durchschnittliche Gesamt-Durchlaufzeit
   - Durchschnittliche Gesamt-Transportzeit per LKW
   - Durchschnittliche Gesamt-Transportzeit per Zug
   - Durchschnittliche Gesamt-Liegezeit im Lager
   - Durchschnittliche Transportdistanz

3. Notwendige Umbuchungen durch das „Verpassen“ von Ladeeinheiten von Zügen - je Vorfall wird dokumentiert:
   - in welchem Knoten
   - Eingangstransporteinheit (LKW, Relation)
   - verpasste Transporteinheit (Relation)
   - Datum

4. Zugverspätungen - je Vorfall wird dokumentiert:
   - in welchem Knoten
   - Eingangs- oder Ausgangsverspätung
   - Relation und konkreter Zug
   - Datum
   - Verspätungszeit

Outputparameter je Terminal

1. Parameter je Terminal Agent:

Depot (ja/nein):					
	Auslastung	*Anzahl Transporteinheiten*			
	Prestow Tracks	nbTrucks	nbTrains		
		full/mixed m.	empty m.	other types	empty
Mo					
Di					
Mi					
Do					
Fr					
Sa					
So					
Gesamt	0	0	0	0	0
	24h		*inkl. Züge für Grundauslastung*		

2. Parameter für jedes Terminal Module:

	Auslastung	*Anteil Zeit > Grenzwert Ausl.*			*Auslastung*			*Auslastung*	*Summe*
	Loading Tracks	Storage			Storage			Equipment	nbLiftings
		Container	WAB	SAL	Container	WAB	SAL		
Mo									
Di									
Mi									
Do									
Fr									
Sa									
So									
Gesamt	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(Öffnungszeiten)		*(24 h)*			*(Öffnungszeiten)*		*(Öffnungszeiten)*	

Outputparameter für den Container Owner

1. Über alle Ladeeinheiten werden folgende Durchschnittswerte ermittelt:
   - Anzahl Transportaufträge
   - Gesamtzeit beladen
   - Gesamttransportdistanz beladen
   - Gesamtzeit leer
   - Gesamttransportdistanz leer (Repositionierungen)
   - Durchschnittliche Distanz einer Leercontainer Repositionierung.

2. Leercontainer Bedarfszüge - jeder Leercontainer Zug wird dokumentiert mit:
   - Abfahrtsknoten
   - Ankunftsknoten
   - Datum
   - Typ Ladeeinheiten (20 oder 40 Fuß).

Outputparameter je Operator

1. Parameter für alle Relationen:

	Durchschnittliche Zeit in Minuten				%	
relation ID	**in process**	**prestowed in terminal**	**waiting to depart**	**prestowed on link**	**Anteil SAL**	**Auslastung**
.						
.						
.						

2. Dokumentation aller Versuche von Einführungen einer neuen Relation bzw. Reduzierung der Cycle-Time einer bestehenden Relation:

original moTrain ID	**new moTrain ID**	**date**	**realised**	**denied by operator**	**just cycle change**	**coordinated time window**	**full train**
.							
.							
.							

3. Daten der neu eingeführter Relationen:

moTrain ID	**train type**	**length TEU**	**max TEU SAL**	**cycle**	**counter trains**	**nr path fraction**	**from**	**to**	**dep day**	**dep hour**	**dep min**	**arr day**	**arr hour**	**arr min**
.														
.														
.														

4. Daten eingestellter Relationen (bzw. Versuche):

moTrain ID	**date**	**discarded**
.		
.		
.		

Die aus diesen Output-Daten aggregierten Kennzahlen werden im Rahmen der Fallstudie in Punkt 10. zum Vergleich der verschiedenen Szenarien herangezogen.

III. Modellvalidierung

6. Modellzüge und Basisfahrpläne

Das Simulationsmodell kann für verschiedene Aufgabenstellungen herangezogen werden. Einerseits können für ein existierendes Netzwerk mit bestehender Auslastung verschiedene Szenarien von zusätzlichen Transportmengen und deren Auswirkung auf die Auslastung der Infrastruktur analysiert werden, andererseits können neue Netzwerke mit den zu erwartenden Verkehren belegt und evaluiert werden. Ideal ist in diesem Fall der kombinierte Einsatz mit einem davor angewandten Modell zur Terminal - Standortplanung und Güterflusszuweisung (siehe Etlinger et al. 2013) und die Evaluierung dieser statischen Planungsergebnisse in der dynamischen Simulationsumgebung. Für den ersten Ansatz müssen die im untersuchten Netzwerk schon bestehenden Terminals mit einer bestimmten Grundauslastung "ausgestattet" werden. Dazu werden für die unter Punkt 4.1 beschriebenen Modellterminals sogenannte Basis-Fahrpläne definiert, um eine bestimmte Menge an Import- und Exportzügen zu generieren und so die vorhandene Terminalauslastung zu erreichen. Diese Basis-Fahrpläne basieren auf der Recherche von tatsächlichen Zugankünften an österreichischen Terminals und wurden mit Hilfe von den in Punkt 4.2 bereits vorgestellten Modellzügen erstellt.

Die Modellzüge können, ähnlich zu den Modellterminals, auf Grund der durchschnittlichen Menge an transportierten bzw. zu transportierenden TEU grob in die Kategorien Small (S), Medium (M), Large (L) und X-Large (XL) unterteilt werden. Wie in Tabelle 24 ersichtlich, wird eine genauere Spezifikation durch die Standardabweichung der durchschnittlichen Transportmenge in TEU und der verschiedenen Anteile von Containertypen vorgenommen. Die Längenverteilung dieser Ladeeinheiten ist ein Parameter jedes Modellterminals.

Tabelle 24: Modellzüge für die Basis-Fahrpläne

model-train number	train category	train type	avg. TEU	sd TEU	avg. share Cont	avg. share WAB	avg. share SAL	SD share load unit type
1	S	SW small	10	0,25	0,90	0,100	0,000	0,01
2	S	SW small	10	0,25	0,10	0,450	0,450	0,01
3	M	SW	30	0,25	0,90	0,100	0,000	0,01
4	M	SH	30	0,25	0,50	0,250	0,250	0,01
5	M	SH	30	0,25	0,10	0,450	0,450	0,01
6	M	SH	50	0,25	0,95	0,025	0,025	0,01
7	M	BL	50	0,25	0,50	0,250	0,250	0,01
8	M	BL	50	0,25	0,10	0,450	0,450	0,01
9	M	BL	50	0,25	0,03	0,950	0,025	0,01
10	L	BL	70	0,10	0,95	0,025	0,025	0,01
11	L	BL	70	0,10	0,50	0,250	0,250	0,01
12	L	BL	70	0,25	0,10	0,450	0,450	0,01
13	XL	BL	80	0,01	1,00	0,000	0,000	0,01

SD…standard deviation
SW…single waggon train
SH…shuttle train
BL…block train

Die Modellvalidierung wurde einerseits durch das gezielte Herbeiführen von verschiedensten Norm- und Ausnahmesituationen während der Modelllaufzeit durch entsprechendes Setzen der Input-Daten durchgeführt, und andererseits durch das Simulieren der Terminal-Grundauslastung mit Hilfe der Basis-Fahrpläne.

Die Abwicklung der Züge der Basis-Fahrpläne, dargestellt in Punkt 6., erfolgt genauso wie jene der von den Operatoren bereitgestellten Züge. D.h. es werden Ladeeinheiten be- und entladen, die im Vor- bzw. Nachlauf mit dem LKW transportiert werden, wodurch die Belegung von Hub- und Lagerkapazitäten erfolgt. Natürlich werden dafür eigene Ladeeinheiten generiert, und nicht jene des Container Owners herangezogen, die im System für den Transport der zu evaluierenden Güterflüsse zur Verfügung stehen.

Die Spezifizierung der Basis-Fahrpläne beginnt über die Definition, ob ein Modellzug eines bestimmten Typs (siehe Tabelle 25) als Import- oder Exportzug am Terminal ankommt. Die nächsten Parameter legen die Ankunftswahrscheinlichkeit je Wochentag fest, und schließlich erfolgt die Festlegung der Ankunfts- bzw. Abfahrtszeit im Terminal.

Tabelle 25: Basis-Fahrpläne für die Modellterminals

model terminal	model-train number	type (imp/exp)	Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su	dep/arr hour	dep/arr min
Small	3	import	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	8	00
	4	import	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	6	30
	1	import	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0	7	30
	2	import	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0	7	00
	4	import	0,00	0,00	0,50	0,00	1,00	0,00	0	9	30
	6	export	0,50	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0	17	00
	4	export	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0	14	00
	1	export	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0	19	00
	2	export	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	0,00	0	14	30
	4	export	0,50	0,00	0,25	0,00	0,50	0,00	0	18	00
Medium_1	6	import	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0	7	00
	7	import	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0	16	00
	6	export	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0	12	00
	4	export	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0	14	30
	1	export	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0	17	00
Medium_2	3	import	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0	6	00
	6	import	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0	6	30
	7	import	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0	15	00
	6	export	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0	18	00
	7	export	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0	12	00
	3	export	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0	10	00
	3	export	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0	14	00
	6	export	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0	16	30
Large_1	3	import	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0	6	00
	4	import	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0	8	00
	10	import	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0	11	00
	10	import	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0	12	00
	3	export	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0	9	00
	4	export	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0	16	00
	10	export	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0	12	30
	11	export	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	14	00
	5	export	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0	9	00
	5	export	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0	11	30
Large_2	6	import	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0	7	00
	10	import	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0	11	00
	10	import	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0	10	00
	12	import	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	6	00
	10	import	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0	12	30
	7	export	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0	8	00
	10	export	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0	18	30
	10	export	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0	18	30
	10	export	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0	14	00
X-Large	13	import	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0	6	00
	13	import	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0	16	00
	10	import	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0	9	00
	11	import	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0	13	30
	10	import	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	11	30
	10	import	0,50	1,00	1,00	1,00	0,50	1,00	0	12	30
	13	export	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0	8	00
	13	export	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0	11	00
	11	export	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0	12	30
	10	export	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0	15	00
	10	export	0,00	1,00	0,50	1,00	0,50	0,00	0	16	00
	10	export	1,00	0,50	1,00	1,00	0,50	0,00	0	18	00

Die Simulation der Basis-Fahrpläne für alle, ihrem Typ entsprechend parametrisierten, Modellterminals ergibt über eine Laufzeit von sechs Monaten die im Folgenden in Tabelle 26 bis Tabelle 31 dargestellten Ergebnisse für die Grundauslastung der Terminals. Die Statistiken werden für jeden Wochentag extra geführt, da dies hinsichtlich der Planung neuer Relationen ein wichtiger Punkt ist und Spitzenzeiten genauer identifiziert werden können. Teilweise werden die Werte auf Basis von 24 Stunden berechnet, wie für die Auslastungsparameter der

Vorstaugleise (Prestow Tracks) und den Anteil der Zeit, in der ein für jedes Modellterminal festgelegter Grenzwert für die Lagerauslastung, gegliedert nach den einzelnen Kapazitäten für die verschiedenen Ladeeinheiten-Typen, überschritten wird. Die restlichen ausgegebenen Leistungsparameter beziehen sich nur auf die Leistung innerhalb der jeweiligen Betriebszeiten. Für diesen Simulationslauf wurde für die Längenverteilung der Container, basierend auf den Realdaten von den der Modellterminalspezifikation zugrunde liegenden Terminals, ein genereller Anteil an 0,64 Prozent 20-Fuß Containern und 0,36 Prozent 40-Fuß Containern angenommen. Es ist zu betonen, dass die Definition der Basis-Fahrpläne natürlich auch darauf abzielt noch entsprechenden Raum für zusätzliches Transportaufkommen zuzulassen.

Tabelle 26: Modellterminal Small

SMALL	Auslastung %	% Anteil Zeit > Grenzwert Auslastung Storage			Auslastung % Storage			Auslastung %	Summe	Auslastung %
	Loading tracks	Container	WAB	SAL	Container	WAB	SAL	Equipment	nbLiftings	Prestow tracks
Mo	0,25	0,00	0,00	0,00	0,58	0,27	0,09	0,20	79,90	0,21
Di	0,09	0,00	0,00	0,00	0,55	0,33	0,12	0,11	47,58	0,16
Mi	0,14	0,00	0,00	0,00	0,55	0,33	0,12	0,13	52,07	0,17
Do	0,08	0,00	0,00	0,00	0,54	0,30	0,12	0,12	50,10	0,16
Fr	0,25	0,00	0,00	0,00	0,56	0,32	0,13	0,19	68,49	0,17
Sa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
So	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	(Öffnungszeiten)		*(24 h)*			*(Öffnungszeiten)*		*(Öffnungszeiten)*		*(24 h)*

Tabelle 27: Modellterminal Medium_1

MEDIUM_1	Auslastung %	% Anteil Zeit > Grenzwert Auslastung Storage			Auslastung % Storage			Auslastung %	Summe	Auslastung %
	Loading tracks	Container	WAB	SAL	Container	WAB	SAL	Equipment	nbLiftings	Prestow tracks
Mo	0,13	0,00	0,00	0,00	0,55	0,25	0,10	0,19	78,47	0,13
Di	0,14	0,00	0,00	0,00	0,55	0,26	0,11	0,19	70,29	0,10
Mi	0,10	0,00	0,00	0,00	0,56	0,30	0,12	0,15	62,45	0,06
Do	0,13	0,00	0,00	0,00	0,55	0,26	0,11	0,19	74,93	0,06
Fr	0,11	0,00	0,00	0,00	0,56	0,29	0,11	0,15	62,90	0,10
Sa	0,14	0,00	0,00	0,00	0,55	0,26	0,11	0,21	64,35	0,02
So	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	(Öffnungszeiten)		*(24 h)*			*(Öffnungszeiten)*		*(Öffnungszeiten)*		*(24 h)*

Tabelle 28: Modellterminal Medium_2

MEDIUM_2	Auslastung %	% Anteil Zeit > Grenzwert Auslastung Storage			Auslastung % Storage			Auslastung %	Summe	Auslastung %
	Loading tracks	Container	WAB	SAL	Container	WAB	SAL	Equipment	nbLiftings	Prestow tracks
Mo	0,15	0,00	0,03	0,00	0,50	0,51	0,14	0,33	140,21	0,29
Di	0,16	0,00	0,05	0,00	0,51	0,57	0,16	0,27	114,19	0,35
Mi	0,08	0,00	0,08	0,00	0,49	0,56	0,15	0,22	98,56	0,10
Do	0,12	0,00	0,04	0,00	0,51	0,52	0,14	0,26	113,58	0,13
Fr	0,09	0,00	0,02	0,00	0,50	0,50	0,14	0,22	98,12	0,09
Sa	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
So	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	(Öffnungszeiten)		*(24 h)*			*(Öffnungszeiten)*		*(Öffnungszeiten)*		*(24 h)*

Tabelle 29: Modellterminal Large_1

LARGE_1	Auslastung %	% Anteil Zeit > Grenzwert Auslastung Storage			Auslastung % Storage			Auslastung %	Summe	Auslastung %
	Loading tracks	Container	WAB	SAL	Container	WAB	SAL	Equipment	nbLiftings	Prestow tracks
Mo	0,11	0,00	0,00	0,00	0,67	0,60	0,20	0,25	120,41	0,10
Di	0,11	0,00	0,00	0,00	0,69	0,64	0,21	0,21	99,62	0,13
Mi	0,07	0,00	0,00	0,00	0,66	0,58	0,19	0,17	83,22	0,10
Do	0,08	0,00	0,00	0,00	0,67	0,65	0,22	0,18	87,24	0,10
Fr	0,12	0,00	0,00	0,00	0,66	0,57	0,19	0,19	88,10	0,15
Sa	0,06	0,00	0,00	0,00	0,67	0,53	0,17	0,19	45,04	0,00
So	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	(Öffnungszeiten)		*(24 h)*			*(Öffnungszeiten)*		*(Öffnungszeiten)*		*(24 h)*

Tabelle 30: Modellterminal Large_3

LARGE_2	Auslastung %	% Anteil Zeit > Grenzwert Auslastung Storage			Auslastung % Storage			Auslastung %	Summe	Auslastung %
	Loading tracks	Container	WAB	SAL	Container	WAB	SAL	Equipment	nbLiftings	Prestow tracks
Mo	0,04	0,00	0,00	0,00	0,56	0,56	0,23	0,13	67,69	0,03
Di	0,10	0,00	0,00	0,00	0,60	0,47	0,21	0,19	93,06	0,10
Mi	0,06	0,00	0,00	0,00	0,62	0,44	0,20	0,17	84,73	0,06
Do	0,10	0,01	0,00	0,00	0,62	0,40	0,18	0,20	98,42	0,10
Fr	0,05	0,01	0,00	0,00	0,62	0,42	0,19	0,15	77,17	0,03
Sa	0,08	0,01	0,00	0,00	0,62	0,39	0,18	0,18	89,54	0,10
So	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	(Öffnungszeiten)		*(24 h)*			*(Öffnungszeiten)*		*(Öffnungszeiten)*		*(24 h)*

Tabelle 31: Modellterminal X-Large

X-LARGE	Auslastung %	% Anteil Zeit > Grenzwert Auslastung Storage			Auslastung % Storage			Auslastung %	Summe	Auslastung %
	Loading tracks	Container	WAB	SAL	Container	WAB	SAL	Equipment	nbLiftings	Prestow tracks
Mo	0,07	0,00	0,00	0,00	0,60	0,32	0,13	0,26	129,78	0,06
Di	0,08	0,00	0,00	0,00	0,62	0,34	0,13	0,25	123,03	0,07
Mi	0,05	0,00	0,00	0,00	0,61	0,32	0,12	0,21	109,27	0,06
Do	0,07	0,00	0,00	0,00	0,61	0,32	0,13	0,24	120,17	0,07
Fr	0,06	0,00	0,00	0,00	0,60	0,34	0,13	0,23	110,98	0,07
Sa	0,03	0,00	0,00	0,00	0,60	0,32	0,13	0,15	81,11	0,03
So	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	(Öffnungszeiten)		*(24 h)*			*(Öffnungszeiten)*		*(Öffnungszeiten)*		*(24 h)*

Allgemein ist zu beobachten, dass die Ladegleise aller Modellterminals sehr geringe Auslastungswerte aufweisen. Dies liegt einerseits an der bereits angesprochenen gewollten gemäßigten Grundauslastung und andererseits am im Simulationsmodell implementierten Fließverfahren für der Zugabwicklung, d.h. dass jeder Zug nur die absolut notwendige Zeit für die Be- und Entladung auf den Terminalgleisen verbringt und die restliche Zeit zwischen Ankunft und Abfahrt auf den Vorstaugleisen abgestellt wird. Dies ist auch an den vergleichsweise höheren Auslastungswerten der Vorstaugleise zu sehen, deren Statistik zusätzlich auf Basis von 24 Stunden und nicht nur den Betriebszeiten berechnet wird.

Auffallend sind auch die Unterschiede in der Lagerauslastung. Für die Containerlager ist bei jedem Modellterminal eine Anfangsauslastung festgelegt, für die auch schon jene Ladeeinheiten erzeugt werden die u.a. zur Erfüllung der Basis-Fahrpläne zur Verfügung stehen. Dieser Auslastungswert ist aufgrund der Konfiguration der Basis-Fahrpläne über die Laufzeit konstant. Die Lagerwerte zu den Ladeeinheiten vom Typ WAB und SAL ergeben sich ebenfalls

aus der Konfiguration der Modellzüge in Kombination mit den jeweiligen Kapazitäten. Es ist bei den größeren Terminals ein spezifisch höherer Auslastungsanteil der Lagerflächen vom Typ WAB und SAL zu bemerken, wobei im Modellterminal X-Large eine verhältnismäßig größere Lagerkapazität zur Verfügung steht. Die Konfiguration des Basis-Fahrplanes für das Modellterminals X-Large garantiert auch einen Anteil an direkten Zug-Zug Umschlägen von ca. 10-15 Prozent, was den üblichen Werten von Gateway-Terminals dieser Größe entspricht.

Der Parameter "nbLiftings" gibt die durchschnittliche Anzahl an Hüben pro Tag für das gesamte Equipment eines Terminals an, genauso wie die Auslastung des Equipments den Durchschnitt über alle Geräte angibt. Dass diese Werte zwischen den Terminals, aber auch an den verschiedenen Wochentagen eines Terminals, sich vom Verhältnis nicht immer gleichen liegt auf der einen Seite an der Abhängigkeit der notwendigen Servicehübe von der Lagerauslastung (die Servicehübe werden in der Simulation als zeitliche Belegung eines Equipments berücksichtigt, es wird jedoch kein Hub gezählt) und auf der anderen Seite an der Verteilung der Containertypen. Für die Typen WAB und SAL fällt eine beträchtlich längere Hubdauer an, und auch die Art des Equipments (Kran oder Reach Stacker) hat zusätzlich Einfluss auf die benötigte Zeit für einen Hub.

IV. Anwendungsfälle und Ergebnisse

7. Rahmenbedingungen

Die im Folgenden vorgestellten Anwendungsfälle (siehe Punkt 10.) wurden konzipiert, um das Simulationsmodell und die entwickelten Betriebskonzepte für intermodale Netzwerke auf ihre Anwendbarkeit zu testen. In den Szenarien sind keine konkreten Fragestellungen von realen Akteuren in den betrachteten Regionen zugrunde gelegt. Das Ziel der fiktiven Anwendungsfälle ist die Untersuchung eines Netzwerkes von 15 Terminals und eines Zugoperators. Das Netzwerk sollte zur bestehenden Situation (Grundauslastung) zusätzliche Transportmengen bewältigen und dementsprechend müssen für die neue Nachfrage auch ausreichende Zugrelationen zur Verfügung stehen. Alle Szenarien wurden mittels einer aus der Simulationsumgebung exportierten Stand-alone Java-Applikation am Vienna Scientific Cluster gerechnet.

8. Netzwerktopologie

Tabelle 32 gibt eine Übersicht über die zugrunde liegende Netzwerktopologie, d.h. den aus einer Menge von 35 möglichen gewählten 15 Terminalstandorten und jeweiligen Modellterminals, den Depotstandorten und den, den Terminals zugewiesenen Einzugsgebieten. Die Parameter der Schienen- und Straßenverbindungen zwischen den Knoten wurden entsprechend deren geografischer Lage definiert. Auf Basis der im nächsten Punkt erläuterten Grundlagen für die Transportnachfrage wurden neun aggregierte Restnetzknoten (Residual Areas RA1 bis RA9) als Import- und Exportgebiete für das untersuchte Netzwerk festgelegt.

Tabelle 32: Terminalstandorte mit Leercontainer Depot Variation D2

Terminal ID	Modellterminal	Depot	Catchment Areas	Region
19	Small	no	119	HU
10	Medium_1	no	110	SK
20	Medium_1	no	120	HU
22	Medium_2	no	122,125	CZ
24	Medium_2	no	124	CZ
26	Large_1	Depot_2	126	CZ
13	Large_1	no	113	SK
29	Large_2	no	129,13	RO
6	X-Large	no	106	AT
5	X-Large	no	105,108	AT
34	X-Large	Depot_2	131,134	RO
9	X-Large	no	109	AT
7	X-Large	no	107	AT
14	X-Large	Depot_2	117,114	HU
3	X-Large	Depot_2	101,102,103,116	AT

Für die Szenarien wurden zwei verschiedene Typen von Leercontainer Depots definiert. Der Depottyp „Depot_1“ repräsentiert ein sehr kleines Depot mit einer Lagerkapazität von 300 TEU, zwei Ladegleisen und einem Reach Stacker. Die Lagerkapazität von Depottyp „Depot_2“ hingegen umfasst 3.500 TEU und hat für die Umschlagsprozesse vier Ladegleise und je nach Szenario zwei oder drei Reach Stacker zur Verfügung. Zum Simulationsstart werden alle Depots mit Systemcontainern, gemischt im Mengenverhältnis von 3:1 von 20 Fuß und 40 Fuß Containern, zu 80 % der Lagerkapazität bestückt.

Um alle Terminals und Import-/Exportregionen miteinander zu verbinden ist eine Gesamtanzahl von 552 gerichteten Netzwerkverbindungen per Schiene notwendig. Diese sind mit Eigenschaften zu Distanz und Fahrtzeit ausgestattet und gehören einer bestimmten Region an, für die jeweils ein Verspätungsmuster vorliegt. Die Regionen setzen sich aus den einzelnen Ländern zusammen wo sich die Terminals befinden, und aus den Import- / Exportregionen für das betrachtete Netzwerk (siehe Tabelle 33). Um alle Einzugsgebiete mit den Terminals und mit allen Depotstandorten zu verbinden werden 104 ungerichtete Straßenverbindungen eingeführt. Sie weisen eine Verteilung für die Distanz und die benötigte Transportzeit pro Distanzeinheit auf.

Tabelle 33: Regionen der Schienenverbindungen mit Verspätungszeit

Region	Verspätungs-code	Anteil verspäteter Züge	Verteilungs-funktion Verspätung	Minimum [min]	Maximum [min]	Mittelwert [min]
AT	1	0,05	tria	15,00	40,00	20,00
HU	2	0,10	tria	20,00	60,00	40,00
CZ	3	0,10	tria	15,00	50,00	25,00
SK	4	0,15	tria	15,00	50,00	25,00
RO	5	0,20	tria	20,00	60,00	40,00
RA1	6	0,05	tria	15,00	40,00	20,00
RA2	7	0,05	tria	15,00	40,00	20,00
RA3	8	0,05	tria	15,00	40,00	20,00
RA4	9	0,05	tria	15,00	40,00	20,00
RA5	10	0,20	tria	20,00	60,00	40,00
RA6	11	0,10	tria	20,00	60,00	40,00
RA7	12	0,10	tria	20,00	60,00	40,00
RA8	13	0,15	tria	15,00	50,00	25,00
RA9	14	0,20	tria	20,00	60,00	40,00

Der für die Ausgangsszenarien bereitgestellte Fahrplan des Operators umfasst in Summe 549 Relationen, die durch verschiedene Modellzüge definiert sind. Davon verkehren 197 Relationen innerhalb des Netzwerkes, 217 sind als Importzüge und 120 als Exportzüge definiert. Insgesamt entfallen hiervon 534 auf den Typ Blockzug, 14 Relationen sind Shuttle-Züge und es wurde 1 Line-train Zug definiert. Letztere verkehren nur Netzwerk - intern. Die Längenvertei-

lung für die Relationen ergibt eine Maximalkapazität von 50 TEU für 2,4 Prozent der Züge, 14,8 Prozent können maximal 70 TEU transportieren, 22,8 Prozent der Relationen sind auf 80 TEU beschränkt und die restlichen 59,9 Prozent weisen eine Kapazität von 90 TEU auf. Den geringsten Anteil halten Relationen mit der Kapazität von maximal 30 TEU mit 0,1 Prozent. Relationen mit geringerer Kapazität verkehren naturgemäß zwischen kleineren Terminals, und die Relationen mit der maximal möglichen Transportmenge stehen in erster Linie für Importe und Exporte zum Restnetz und auch zwischen den großen Gateway-Terminals zur Verfügung. Der Großteil der Relationen verkehren wöchentlich, ein geringer Anteil von knapp zwei Prozent fahren im Zwei-Wochen Takt und im Rhythmus von vier Wochen. Dieser Fahrplan ist für die größte Transportnachfrage in den Szenarien definiert und soll durch das Modell, speziell auch für geringere Transportmengen, angepasst werden.

9. Daten Transportnachfrage

Als Zielregion für die Anwendungsfälle wurden Österreich und eine Reihe angrenzender Länder des Zentral- und Osteuropäischen Raumes (CEE-Staaten) ausgewählt. Gerade in dieser Region liegen aufstrebende Märkte mit wirtschaftlichem Wachstumspotential und damit potentiell steigenden Güterverkehrsmengen. Gleichzeitig verfügen sie dabei aber vielfach nur über veraltete Infrastrukturen, für die jedoch in den nächsten Jahren Modernisierungs- und Ausbauprogramme etwa im Rahmen der RailNetEurope – Korridore oder des Trans-European Transport Networks (TEN-T) geplant sind, um die prognostizierten Mengensteigerungen im Transportvolumen bewältigen zu können. Konkret umfasst die betrachte Region die Länder Österreich, Rumänien, Slowakei, Tschechien und Ungarn. Damit deckt das Zielgebiet einen Großteil der Westeuropa-Balkan Achse ab und wird auch von der baltisch-adriatischen Achse durchquert.

Als Grundlage für die Transportdaten wird eine Datenbank des Joint Research Centres der Europäischen Kommission, in der Güterverkehrsflüsse mit den jeweiligen Quellen und Zielen sowie den Transportmodi und Umschlagsorten eingepflegt sind, verwendet (TRANS TOOLS, 2012). Aus dieser Datenbasis wurden die für die Anwendungsfälle relevanten Daten herausgefiltert und aufbereitet. Dabei erfolgte eine Umrechnung der Daten von Tonnen auf die, für intermodalen Güterverkehr übliche, Standardeinheit TEU, sowie eine Aggregation der Quell- bzw. Zielzonen für die Güterverkehre die von außerhalb des betrachteten Gebiets importiert bzw. aus dem Gebiet exportiert worden sind. Zu diesem Zweck mussten die in der Datenbank vorhandenen Quell- und Zielgebiete, welche für die EU auf Ebene der NUTS2 (Nomenclature des unites territoriales statistiques) Regionen und ansonsten auf Länderebene vorliegen, gemäß den Eintritts- bzw. Austrittspunkten der Verkehre aus dem untersuchten Gebiet zu Exportzonen (Restnetzknoten), zusammengefasst werden.

Aus diesen Daten wurde eine Transportmatrix erstellt, aus der sich die für die Modellrechnungen benötigten Gütermengen aller Quell-Ziel – Paare ergeben. Die Nachfragedaten liegen auf Jahresbasis vor und werden durch das Setzen weiterer Inputparameter auf Monats- und Wochenmengen herunter gebrochen, woraus dann im Modell die einzelnen Transportaufträge generiert werden. Ausgehend von der Annahme, dass von den vorliegenden Transportmengen für das untersuchte Netzwerk nur ein bestimmter Anteil abgeschöpft werden kann, ergibt sich aus allen berücksichtigten Einzugsgebieten und Restnetzknoten eine Gesamtanzahl von 898 Knotenpaaren, die je nach Szenario zusammengefasst eine jährliche Transportnachfrage von 1.965.120 TEU bis 491.280 TEU vorweisen. Rund 40 Prozent dieser Mengen entfallen auf Netzwerk-interne Verkehre, dieselbe Menge auf Importverkehre und die restlichen 20 Prozent werden exportiert. Es werden keine Transitverkehre zwischen Restnetzknoten berücksichtigt. Bei den festgelegten Transportmengen wird von einem Anteil von sechs Prozent Wechselaufbauten und rund 13 Prozent Sattelanhängern ausgegangen. Eine weitere Unterteilung wird durch die Containerlänge für die Transportaufträge getroffen, wobei hier das Verhältnis von 20 Fuß Containern zu 40 Fuß Containern bei 0,64 zu 0,36 liegt.

10. Szenarien

Mit den definierten Szenarien werden für verschiedene Transportnachfragen unterschiedliche strukturelle und betriebliche Netzwerkkonfigurationen ausgetestet. Auf struktureller Seite werden Varianten für die Anzahl der zur Verfügung stehenden Systemcontainer, der Anzahl und des Typs von Leercontainer Depots, sowie die Equipmentausstattung für die Leercontainer Depots ausgewertet. Ausgewählte Szenarien werden zusätzlich unter veränderten Bedingungen in der Grundauslastung der Terminals untersucht. In betrieblicher Hinsicht werden verschiedene Fahrpläne und Parameter für deren potentielle Modifikation während der Laufzeit untersucht, und unterschiedliche Regelungen für die Umsetzung der Leercontainer Bedarfszüge getroffen. Vor allem in diesen Fällen ist eine längere Simulationslaufzeit zur Beobachtung der somit ermöglichten Entwicklungen interessant. Tabelle 34 listet die einzelnen festgelegten Parameter-Varianten auf und Tabelle 35 gibt die daraus definierten Szenarien an.

Mit den Ausgangszenarien S1 – S12 wird ermittelt, inwieweit die Basis-Netzwerkkonfiguration hinsichtlich der Auslastungen der Terminals, der Anzahl der zur Verfügung stehenden Systemcontainer und der Konfiguration der Leercontainer Depots für verschiedene Größenordnungen der Transportnachfrage geeignet sind. Die Szenarien S13 – S16 untersuchen weitere Varianten für die Leercontainer Depots im Netzwerk, und S17 – S21 gehen auf unterschiedliche Mengen an Systemcontainern und Parameter in der Leercontainer Repositionierung ein. In den verbleibenden Szenarien S22 – S28 wird die Möglichkeit des Modells neue Relationen einzufügen und daraus resultierende Fahrplanänderungen unter verschiedenen Bedingungen getestet. In Abbildung 14 werden die Änderungen der Konfigurationsparameter zwischen den Szenarien noch einmal übersichtlich dargestellt.

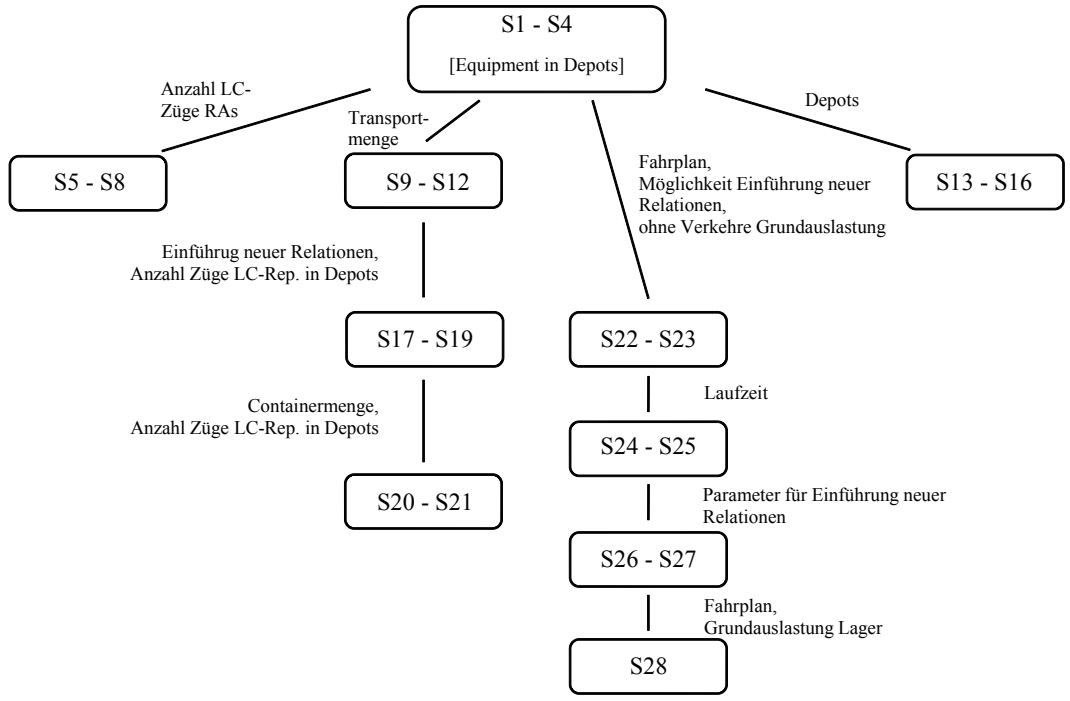
Tabelle 34: Parameter-Varianten als Grundlage der Szenarien

	Parameter		Wert	Beschreibung
STRUKTURELL	Laufzeit	LZ1	8	Simulationsperiode in Wochen.
		LZ2	12	
	Transportmenge	TM 1	491.280 TEU	Jährliche Transportnachfrage, die auf die Simulationsperiode heruntergebrochen wird.
		TM 2	982.560 TEU	
		TM 3	1.965.120 TEU	
	Container Menge	CM1	100.000 Stk. 20' Cont. 30.000 Stk. 40' Cont.	Menge an Systemcontainern: Anzahl an 20 Fuß und 40 Fuß Standardcontainern, die für die Durchführung der Transportaufträge zur Verfügung stehen.
		CM2	75.000 Stk. 20' Cont. 22.500 Stk. 40' Cont.	
		CM3	50.000 Stk. 20' Cont. 15.000 Stk. 40' Cont.	
		CM4	30.000 Stk. 20' Cont. 9.000 Stk. 40' Cont.	
	Leercontainer Depots	D1	3 x Depot_2	Anzahl und Typ der Leercontainer Depots im Netzwerk.
		D2	4 x Depot_2	
		D3	3 x Depot_2, 1 x Depot_1	
	Equipment in Depots	E2	2	Anzahl an Reach Stackern, die im Leerctontainer Depottyp Depot_2 zur Verfügung stehen.
		E3	3	
	Grundauslastung Lager	GA1	50 %	Menge an zum Simulationsstart bestehenden Containern der Grundauslastungs-Verkehre in den Terminals, so dass das Lagervolumen zum festgelegten Prozentsatz ausgelastet ist.
		GA2	60 %	
	Verkehre Grundauslastung	VG1	ja	Gibt an, ob Import- und Exportzüge bzw. LKWs mit Grundauslastungs-Verkehren von den Terminals bearbeitet werden.
		VG2	nein	
ORGANISATORISCH	Fahrplan	F1	Originalfahrplan, konzipiert für TM 3	Zur Verfügung stehender Fahrplan des Operators.
		F2	F1 durch das Modell angepasst	
		F3	F2 durch das Modell abermals angepasst	
	Maximale Buchungsdauer	MB1	10	Maximale durchschnittliche Zeit zwischen der Buchungsanfrage und Verfügbarkeit einer Relation in Tagen. Voraussetzung für einen Neueinführungsprozess.
		MB2	14	
	Minimale Auslastung	MA1	0,90	Minimale durchschnittliche Auslastung einer Relation als Voraussetzung für einen Neueinführungsprozess.
		MA2	0,97	
	Anzahl Leercontainer Züge	ALCZ-D1-1	6	Maximale Anzahl an Leercontainer Bedarfszügen je Repositionierungsprozess je Depottyp und Residual Area.
		ALCZ-D1-2	8	
		ALCZ-D1-3	10	
		ALCZ-D2-1	1	
		ALCZ-D2-2	2	
		ALCZ-RA1	6	
		ALCZ-RA2	4	

Tabelle 35: Übersicht der Szenarienkonfiguration der Anwendungsfälle

Szenario	Laufzeit	Transport-menge	Container Menge	LC Depots	Equipment	GA Lager	Verkehre GA	Anzahl Züge Depots	Anzahl Züge Residual Areas	Max. Buchung	Min. Auslastung	Fahrplan
1	LZ1	TM1	CM3	D2	E2	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	/	/	F1
2	LZ1	TM1	CM3	D2	E3	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	/	/	F1
3	LZ1	TM1	CM4	D2	E2	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	/	/	F1
4	LZ1	TM1	CM4	D2	E3	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	/	/	F1
5	LZ1	TM1	CM3	D2	E2	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA2	/	/	F1
6	LZ1	TM1	CM3	D2	E3	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA2	/	/	F1
7	LZ1	TM1	CM4	D2	E2	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA2	/	/	F1
8	LZ1	TM1	CM4	D2	E3	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA2	/	/	F1
9	LZ1	TM2	CM3	D2	E2	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	/	/	F1
10	LZ1	TM3	CM3	D2	E2	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	/	/	F1
11	LZ1	TM2	CM3	D2	E3	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	/	/	F1
12	LZ1	TM3	CM3	D2	E3	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	/	/	F1
13	LZ1	TM1	CM3	D1	E2	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	/	/	F1
14	LZ1	TM1	CM3	D1	E3	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	/	/	F1
15	LZ1	TM1	CM3	D3	E3	GA1	VG1	ALCZ-D1-1 D2-1	ALCZ-RA1	/	/	F1
16	LZ1	TM1	CM3	D3	E3	GA1	VG1	ALCZ-D1-1 D2-2	ALCZ-RA1	/	/	F1
17	LZ1	TM2	CM3	D2	E2	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	MB2	MA2	F1
18	LZ1	TM2	CM3	D2	E2	GA1	VG1	ALCZ-D1-2	ALCZ-RA1	MB2	MA2	F1
19	LZ1	TM2	CM3	D2	E2	GA1	VG1	ALCZ-D1-3	ALCZ-RA1	MB2	MA2	F1
20	LZ1	TM2	CM1	D2	E2	GA1	VG2	ALCZ-D1-2	ALCZ-RA1	MB2	MA2	F1
21	LZ1	TM2	CM2	D2	E2	GA1	VG2	ALCZ-D1-2	ALCZ-RA1	MB2	MA2	F1
22	LZ1	TM1	CM3	D2	E2	GA1	VG1	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	MB2	MA2	F2
23	LZ1	TM1	CM3	D2	E2	GA1	VG2	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	MB2	MA2	F2
24	LZ2	TM1	CM3	D2	E2	GA1	VG2	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	MB2	MA2	F2
25	LZ2	TM1	CM3	D2	E2	GA1	VG2	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	MB2	MA2	F1
26	LZ2	TM1	CM3	D2	E2	GA1	VG2	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	MB1	MA1	F2
27	LZ2	TM1	CM3	D2	E2	GA1	VG2	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	MB1	MA1	F1
28	LZ2	TM1	CM3	D2	E2	GA2	VG2	ALCZ-D1-1	ALCZ-RA1	MB2	MA2	F3

Abbildung 14: Übersicht Parameteränderungen zwischen den Szenarien



Die Konfigurationen von S1 – S4 ergeben einheitliche Ergebnisse hinsichtlich der durchschnittlichen Durchlaufzeiten der Transporte und der in Summe abgewickelten Transportaufträge. Deutliche Unterschiede ergeben sich allerdings in der Verfügbarkeit von System-Leercontainern in den Residual Areas. Hier weisen die Szenarien S3 und S4 deutliche Fehlmengen auf. Die Durchlaufzeiten der Transporte werden dadurch nicht beeinflusst, da das Modell in diesem Fall die benötigten Ladeeinheiten in den Residual Areas erzeugt. Die Gesamtmenge an Ladeeinheiten im System wird konstant gehalten indem die entsprechende Anzahl an Containern bei Exporten in die jeweiligen Residual Areas aus dem System ausscheiden.

Die durchschnittlichen Durchlaufzeiten für Transportaufträge, in Tabelle 36 auch schon für die Szenarien S5 – S8 dargestellt, müssen mit der durchschnittlichen Transportdistanz von rund 850 km für Netzwerk-interne Transporte und 1.570 km für Import- und Exportverkehre in Verbindung bewertet werden. Außerdem ist auch der Anteil der Lagerzeit der Vollcontainer in Terminals zu berücksichtigen, der rund 83 Prozent der gesamten Durchlaufzeit ausmacht.

Tabelle 36: Durchlaufzeiten und Transportmengen für S1-S8

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Durchlaufzeit in Tagen	NW-intern	8,3	7,6	8,0	8,0	8,0	7,6	7,7	8,0
	import/export	11,7	11,1	12,0	11,6	11,7	11,2	11,4	11,7
Anzahl Transporte	NW-intern	9.792	9.547	9.669	9.662	9.683	9.475	9.490	9.579
	import	3.434	3.458	3.526	3.476	3.439	3.481	3.505	3.451
	export	8.984	8.689	8.865	8.829	8.891	8.722	8.665	8.829

Die Szenarien S5 – S8 erweitern die Untersuchung der Basis-Netzwerkkonfiguration um den betrieblichen Faktor der maximal möglichen Menge an Bedarfszügen für Leercontainer Repositionierungen je Residual Area je Simulationstag. Es zeigt sich, dass der betreffende Parameter unter sonst gleichen Bedingungen keinen signifikanten Einfluss auf die Transportleistung des Netzwerkes hat. Trotz einer Verringerung der Leercontainer Bedarfszüge um rund 22 Prozent bleibt die Summe der durchgeführten Transporte und deren durchschnittliche Durchlaufzeit analog zu den Ergebnissen der Szenarien S1 – S4. Die Mehrzahl der Bedarfszüge werden erwartungsgemäß fast ausschließlich zwischen Residual Areas gefahren. Dies zeigt, dass die Bestandsobergrenzen und -untergrenzen für notwendige Repositionierungsmaßnahmen in den Residual Areas mit den Einstellungen in den Szenarien S5 – S8 besser aufeinander abgestimmt sind.

Vergleichbar zu den Szenarien S1 – S4 kommt es in den Konfigurationen mit der geringeren Menge an Systemcontainern CM4 auch zu beträchtlichen Fehlmengen in den Residual Areas. Aus diesen Ergebnissen geht hervor, dass die Parametervariation RA1 zwar überflüssigen Verkehr an Leercontainern nach sich zieht, die vorhandene Menge an Systemcontainern in

dieser Netzwerkkonfiguration jedoch ausschlaggebend für die Leercontainerverfügbarkeit in den Residual Areas ist.

Eine weitere Fragestellung in den Basis-Szenarien ist die notwendige Ausstattung mit Umschlagsequipment der Leercontainer Depots vom Typ Depot_2. Das konsistente Ergebnis über die Szenarien S1 - S8 zeigt, dass im Durchschnitt über alle Depots zwei Reach Stacker ausreichend sind und die Auslastung des Equipments rund 30 Prozent beträgt. Die höchste Auslastung der Umschlagsgeräte von rund 50 Prozent erreicht das Depot am Standort Terminal 3 (siehe Abbildung 15). Die durchschnittliche Auslastung des Lagervolumens liegt bei allen betrachteten Szenarien auch bei knapp 50 Prozent. Die Gleisauslastung ist durchgängig natürlich bei E2 höher da die Bearbeitung der Züge länger dauert, aber trotzdem unkritisch. Der Vergleich der Anteile an Leercontainer-Abholungen per LKW für Transportaufträge aus den Einzugsgebieten der Terminals an den verschiedenen Depotstandorten in Abbildung 16 zeigt, dass diese allein nicht die Depotauslastung bestimmen. Die Verschiebungen lassen sich damit erklären, dass die Rückstellungen von Leercontainern in das Depot in importlastigen Regionen einen beträchtlichen Teil der Depotauslastung ausmachen.

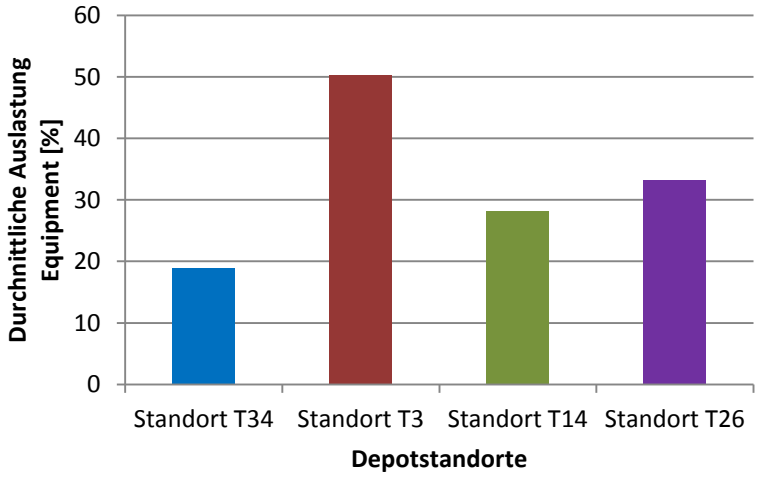


Abbildung 15: Durchschnittliche Auslastung Depot-Equipment für die Szenarien S1, S3, S5 und S7

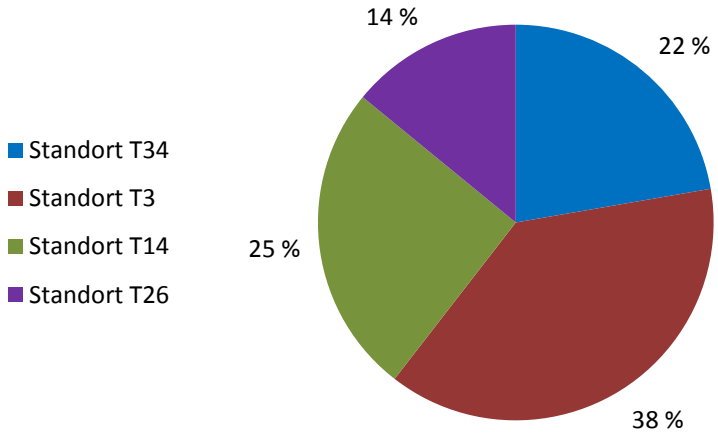


Abbildung 16: Durchschnittlicher Anteil an den gesamten Leercontainer Abholungen per LKW für die Szenarien S1, S3, S5 und S7

Das Ziel der Szenarien S9 – S12 ist das Testen der Belastbarkeit des Systems mit größerer Transportnachfrage unter sonst gleichen Bedingungen wie in den Szenarien S1 und S2. Es werden die Auswirkungen der doppelten und der vierfachen Transportnachfrage untersucht, wobei aber auch wieder Varianten der Equipmentausstattung in den Leercontainer Depots eingesetzt werden, da der Umschlag in den Depots entsprechend der Steigerung der benötigten Container steigen sollte. Dem Ausmaß der festgelegten Nachfragesteigerungen liegen die durchschnittlich noch freien Kapazitäten von Gleisen, Equipment und Lagervolumen der Terminals aus den Szenarien S1 – S8 zugrunde.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Netzwerk mit der festgelegten Konfiguration der neuen Nachfragesituation nicht gewachsen ist. Dabei treten zwei Faktoren besonders hervor. Einerseits werden in allen vier Szenarien die Kapazitätsgrenzen des Vollcontainerlagers einiger Terminals erreicht, und andererseits stehen in den Leercontainer Depots nicht ausreichend Ladeeinheiten zur Verfügung um die Nachfrage abzudecken. Beides trägt dazu bei, dass die Transportleistung des Netzwerkes nicht in gleichem Ausmaß zur Nachfragesteigerung zunimmt. So beträgt die Zunahme der abgewickelten Transportaufträge in S9 im Vergleich zur Nachfragesteigerung zu S1 – S4 von 100 Prozent nur rund 40 Prozent. In den Szenarien S10 und S12 nimmt der Durchsatz trotz der nochmals gesteigerten Nachfragemenge sogar noch ab, da die Lagerkapazitäten der Terminals noch schneller erreicht werden und auch die Leercontainerverfügbarkeit schon früher nicht mehr ausreichend gegeben ist. Beides führt konsequenterweise zum Ansteigen von Ausgangsverspätungen der Züge und auch der Anzahl der nicht erreichten Anschlusszüge von Ladeeinheiten. Tabelle 37 gibt an, um das wieviel-fache sich diese Parameter im Vergleich zu den Szenarien S1 – S4 erhöht haben. Die Werte betreffend des Zeitanteils an der Simulationsperiode in der die durchschnittliche Lagerkapazität in den Terminals zu mehr als 85 Prozent ausgelastet ist, erreicht diesen hohen Wert, da die Ver-

gleichswerte im Promille-Bereich liegen. Beispielsweise steigt die Grenzwertüberschreitung bei den Lagerkapazitäten in Szenario S9 um das Zehnfache der Werte der Vergleichsszenarien an, und die Anzahl der verpassten Anschlusszüge bei LKW-Anlieferungen ist in Szenario S12 bei den Grundauslastungs-Verkehren auf das 10,6-fache angestiegen. Es wird deutlich, dass die vierfache Transportnachfrage in den Szenarien S10 und S12 die Netzwerkkonfiguration völlig überfordert und sich daher unverhältnismäßig auf die Kennzahlen auswirkt.

Tabelle 37: Faktor des Anstiegs der Ergebnis-Parameter von Lagerauslastung, Anschlusszügen und Zugverspätungen im Vergleich zu den Szenarien S1 – S4

	S9	S10	S11	S12
Anstieg Grenzwertüberschreitung Lagerkapazität	10	37,5	11,3	40
Anstieg verpasster Anschlusszüge durch LKWs der Normalverkehre	4	8,3	4,3	9
Anstieg verpasster Anschlusszüge durch LKWs der Grundauslastungs-Verkehre	1,6	12,3	1,6	10,6
Anstieg verpasster Anschlusszüge gesamt	1,8	11,6	1,9	11,1
Anstieg Verspätungen Zugausgang	1,3	1,9	1,4	1,9
Anstieg Verspätungen Zugeingang	1,3	1,5	1,4	1,4

Für die Leercontainer Depots bedeuten diese Entwicklungen folglich eine stark verminderte Auslastung der Lagerkapazität und gleichzeitig deutlich erhöhte Auslastungen der Terminalgleise und das Equipments.

Für alle bisher betrachteten Szenarien wurde derselbe Ausgangsfahrplan des Operators verwendet, um auch die Anpassungsfähigkeit an die Nachfragesituation zu überprüfen. Der Operator hat hier die Möglichkeit zu gering ausgelastete Relationen einzustellen. Abbildung 17 zeigt, dass die durchschnittliche Auslastung aller verbleibenden Relationen des Operators in den Szenarien S9 und S11 im Vergleich zu den Szenarien S1 – S8 sinkt, allerdings werden zum Ende der Simulationsperiode noch mehr als doppelt so viele Relationen betrieben und die gesamte Transportleistung ist entsprechend höher. Für die Transportnachfrage in den Szenarien S10 und S12 hingegen bleibt die durchschnittliche Auslastung auf ähnlichem Niveau, wobei dafür die mehr als 2,5-fache Menge an Relationen notwendig ist.

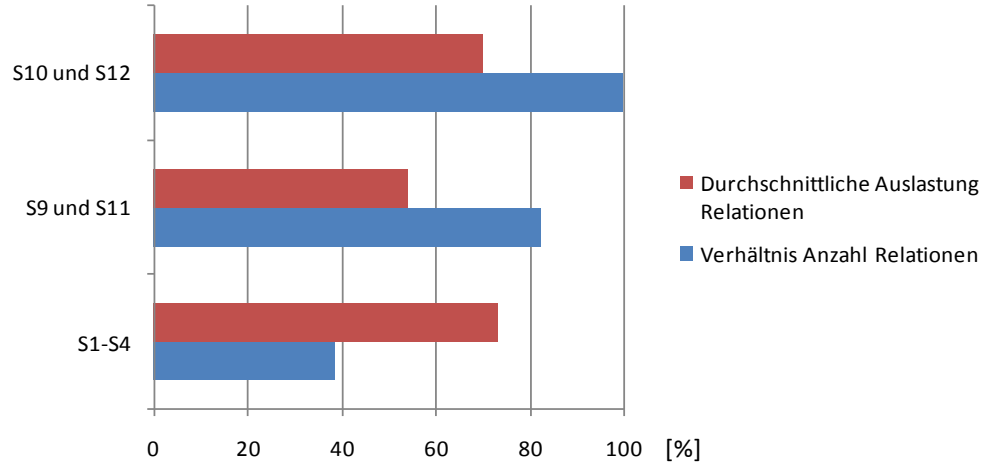


Abbildung 17: Verhältnis von Anzahl und Auslastung der Relationen für die Szenarien

Die Szenarien S13 – S15 gehen wieder von der Grundkonfiguration der Szenarien S1 und S2 aus. Basierend auf den Ergebnissen aller bisher betrachteten Szenarien werden die Transportnachfrage TM1 und die Containermenge CM3 fixiert, jedoch unterschiedliche Strukturen für die Leercontainer Depots untersucht. Da anzunehmen ist, dass die Belastung in einzelnen Depots steigen wird, wurde erneut die Equipmentausstattung mitberücksichtigt.

Die Reduktion auf drei Leercontainer Depots vom Typ Depot_2 bringt keine Einschränkungen für die Menge der abgefertigten Transportaufträge oder deren Durchlaufzeit mit sich. Der Zuwachs in der Menge der abgeholten Container per LKW bewegt sich bei den verbleibenden Depots zwischen 40 Prozent und 66 Prozent. Auch die Gesamtanzahl von Leercontainer Bedarfszügen ändert sich nicht, sondern verteilt sich auf die Depots (siehe Tabelle 38). Folglich steigen die Auslastungswerte von Gleisen und Equipment, die jedoch auch bei S9 mit nur 2 Reach Stackern im Durchschnitt, aber auch bei der Berücksichtigung von Spitzenwerten unkritisch bleiben.

Tabelle 38: Durchschnittliche Anzahl Leercontainer Züge pro Woche

	Standort T34	Standort T3	Standort T14	Standort T26
S1	4,9	10,5	6,2	4,6
S2	3,8	10,1	8,2	5,0
S13	/	12,6	12,7	3,5
S14	/	13,5	11,6	4,3
S15	7,2	10,2	7,7	4,2
S16	9,9	11,2	5,6	3,9

Die Veränderungen in der Struktur der Leercontainer Depots im Netzwerk wirken sich auch auf die Transportdistanzen für die notwendigen Repositionierungen der Leercontainer aus.

Eine verringerte Anzahl an Depots verursacht größere Distanzen für die Rückführung von Leercontainern per LKW aus den Terminaleinzugsgebieten zu den Depotstandorten. An der Anzahl an Bedarfszügen von den Residual Areas in das Netzwerk ändert sich aufgrund derselben Nachfragesituation wenig. Tabelle 39 zeigt, dass sich die durchschnittliche Gesamtdistanz für Repositionierungen je Systemcontainer für die Szenarien S13 und S14 im Vergleich zu S1 und S2 erwartungsgemäß signifikant erhöht. Damit konsistent ist auch der Anstieg der Distanzen in geringerem Ausmaß in den Szenarien S15 und S16. Beispielsweise wurden in Szenario S13 bei allen Repositionierungen in Summe 13.118.287 km zurückgelegt, und der Durchschnittswert über die Mittelwerte der Distanzen der einzelnen Repositionierungen jeden Containers beträgt 159 km.

Tabelle 39: Distanzen Leercontainer Repositionierungen in km

	S1	S2	S13	S14	S15	S16
Durchschnittliche Distanz Rep.	116	107	159	158	130	139
Gesamtdistanz Rep.	9.521.417	8.987.264	13.118.287	13.125.767	11.007.716	11.407.531

Die folgenden Szenarien zielen auf die Untersuchung der Auswirkungen der dynamischen Fahrplananpassungen ab. D.h. der Operator kann nicht nur Relationen bei zu geringer Auslastung einstellen, sondern hat nun auch die Möglichkeit zusätzliche Relationen einzuführen. In den Szenarien S17 – S19 wird daher auf Basis der mittleren Transportmenge getestet, wie sich Durchsatz und Terminalauslastungen entwickeln, wenn der Operator den Fahrplan ändern kann indem neue Relationen eingeführt werden.

Die Ergebnisse zeigen über alle Szenarien ein ähnliches Bild. Die Parametervariationen für die mögliche Anzahl an Repositionierungs-Zügen je Bestandsauswertung (diese findet täglich statt), ziehen keine positiven Veränderungen bzgl. der Verfügbarkeit von Leercontainern und dadurch des Netzwerk-Durchsatzes nach sich. Eine detaillierte Analyse der Bewegungen der Leercontainer Bedarfszüge und Containerbestände in den Residual Areas lässt darauf schließen, dass eine größere Menge an Systemcontainern dazu beitragen kann, der Nachfrage für diese Transportmengen besser gerecht zu werden. Die dafür analysierten Szenarien S20 und S21 mit gesteigerten Mengen an verfügbaren Systemcontainern zeigen konsequenterweise eine gesteigerte Leercontainerverfügbarkeit, jedoch ist diese auch nicht zu 100 Prozent gegeben. Es ist anzunehmen, dass Optimierungen im Repositionierungsprozess und Anpassungen der Bestandsgrenzen in den Residual Areas zu Verbesserungen dieser Ergebnisse führen. Dabei muss auch eine potentielle Anpassung der Konfiguration der Leercontainer Depots bedacht werden. Die aktuelle Depotstruktur für die Szenarien mit gesteigerter Transportmenge lässt die Depots teilweise schon ihren Kapazitätsgrenzen nahe kommen.

In allen Szenarien S17 – S21 werden zwar neue Relationen eingeführt, und wo es aufgrund der Ausgangsituation möglich war, die Cycle Time auf wöchentliche Abfahrten umgestellt.

Damit diese jedoch merkbar zum Tragen kommen wäre die Untersuchung einer längeren Simulationsperiode notwendig. Dies liegt auf der einen Seite daran, dass eine Auswertung der Auslastung der Relationen erst nach einem Zeitraum von vier Wochen das erste Mal erfolgt, andererseits wurde die Annahme getroffen, dass eine potenzielle Neueinführung einer Relation auch eine Vorlaufzeit von mehreren Wochen benötigt.

Ein interessantes Bild ergibt der Vergleich der Auslastungswerte der Vorstaugleise der Terminals für verschieden Szenarien in Abbildung 18. Als Referenzwert kann das Ausgangsszenario S1 herangezogen werden. In den Szenarien S9 und S10 soll die zweifache bzw. vierfache Transportnachfrage bewältigt werden. In den beiden letzten Szenarien stehen dafür auch wesentlich erhöhte Containermengen zur Verfügung.

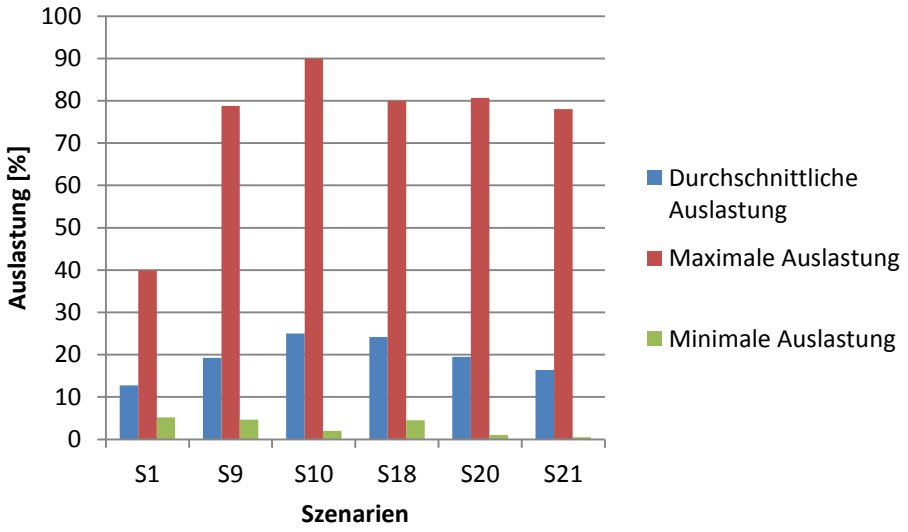


Abbildung 18: Auslastungswerte der Vorstaugleise der Terminals

Die Minimale Durchschnittsauslastung der Vorstaugleise aller Terminals in einem Szenario ändert sich verhältnismäßig wenig, und auch der Mittelwert über alle durchschnittlichen Auslastungswerte aller Terminals steigt um kaum mehr als das Doppelte an. Besonders augenfällig ist, dass in den Szenarien S20 und S21 dieselben Maximalwerte im Vergleich zu den Szenarien S9 und S18 erreicht werden. Dies ist einerseits auf die Zunahme an Leercontainer Bedarfszügen die durch die erhöhten Containermengen ermöglicht werden zurückführen, andererseits ist zu beachten, dass hier die Evaluierung ohne die Verkehre zur Terminal-Grundauslastung durchgeführt wurde. Generell ist der starke Anstieg der Maximalwerte und die moderate Zunahme der Durchschnittswerte damit zu begründen, dass die zu den netzwerkinternen Verkehren verhältnismäßig weitaus größeren Import- und Exporttransportmengen erhebliche Auswirkungen auf einige wenige Gateway-Terminals haben. Zusätzlich sind unter den neu eingeführten Relationen auch Import- und Exportverbindungen vorherrschend.

Der nächste Schritt ist die Verfeinerung des Fahrplanes des Operators. Zu diesem Zweck wurde der bisher zur Verfügung gestellte Fahrplan F1 mit den vom Modell vorgenommenen Kürzungen angepasst und die Netzwerkleistung mit dem neuen, bedarfsgerechteren Fahrplan F2 evaluiert.

Auf Basis der ermittelten Grundkonfiguration unterscheiden sich die Szenarien S22 und S23 nur dadurch, dass in S23 keine Grundauslastungs-Verkehre stattfinden. In beiden Szenarien kommt es somit zu gleich vielen Versuchen zur Einführung einer neuen Relation. Die durchschnittliche Auslastung von Ladegleisen und Equipment ist auch in S22, mit 13 Prozent Auslastung der Ladegleise und 31 Prozent Auslastung des Equipments, mit allen Verkehren nicht sehr hoch, wodurch es verwundert, dass hier kein einziger Versuch erfolgreich ist. Im Szenario S23 hingegen werden immerhin 13 neue Relationen eingeführt. Die Detailbetrachtung der Ergebnisse von S22 in Tabelle 40 zeigt, dass bei 60 Prozent der Terminals Spitzenwerte der durchschnittlichen Auslastung einzelner Wochentage von über 40 Prozent in der Auslastung des Equipments erreicht werden. Die Gleisauslastungen dürfte hingegen nicht der ausschlaggebende Faktor sein. Daraus lässt sich schließen, dass für bestimmte angefragte Zeitfenster aus Sicht der Terminals nicht ausreichend Kapazität zur Verfügung steht, um einer neuen Relation zuzustimmen. Ohne die Grundauslastungs-Verkehre stehen in S23 größere freie Kapazitäten zur Verfügung, wodurch auch Neueinführungen durchgesetzt werden.

Tabelle 40: Wochentage mit Spitzenwerten der Terminalauslastung

	S22			S23		
	max. durchschnittliche Auslastung			max. durchschnittliche Auslastung		
Terminal	Wochentag	Equipment	Ladegleise	Wochentag	Equipment	Ladegleise
19	Mo	0,27	0,27	Do	0,10	0,15
10	Sa	0,37	0,25	Fr	0,18	0,17
20	Di, Sa	0,30	0,24	Mi	0,11	0,09
22	Mo	0,47	0,23	Di	0,15	0,08
24	Mo,Do	0,40	0,18	Do	0,10	0,04
26	Mo	0,36	0,23	Mo	0,10	0,08
13	Mo	0,43	0,23	Do	0,18	0,17
29	Di	0,28	0,14	Do	0,06	0,03
6	Mo	0,42	0,11	Mo,Do	0,15	0,05
5	Di	0,40	0,14	Di	0,13	0,05
34	Do	0,39	0,12	Do	0,15	0,04
9	Di	0,41	0,15	Di	0,13	0,06
7	Do	0,40	0,14	Mi	0,16	0,07
14	Fr	0,42	0,14	Fr	0,18	0,06
3	Di	0,50	0,17	Fr	0,25	0,09

Für die folgenden Szenarien wurde die Konfiguration ohne Grundauslastungs-Verkehre gewählt, da diese auch eine enorme Auswirkung auf die Durchlaufzeit eines Simulationslaufes haben. So konnten auch Szenarien mit einer Simulationsperiode von 12 Wochen berücksich-

tigt werden, mit dem Ziel weitere Beobachtungen über die Dynamik von Neueinführungen von Relationen durchführen zu können.

Mit den Szenarien S24 und S25 kann die Effizienz des neuen Fahrplanes F2 im Vergleich zum Original verglichen werden. Am Ende der Simulationsperiode werden in S25 um rund 50 Prozent mehr Relationen betrieben als in S24. In Summe ist der Durchsatz in S25 zwar um knapp acht Prozent höher, die Auslastung der Relationen liegt jedoch nur bei 59 Prozent. Im Vergleich dazu schneiden die mit 81 Prozent ausgelasteten Verbindungen des neuen Fahrplanes in S24 im Hinblick auf die Effizienz deutlich besser ab. Für die Terminals ergibt sich aus dem neuen Fahrplan eine signifikant reduzierte Auslastung der Ladegleise, wobei es durch die nahezu selben Umschlagsmengen kaum Änderungen in der Equipmentauslastung gibt.

Die in den Szenarien S17 – S19 neu eingeführten Relationen wurden in den Fahrplan F2 aufgenommen, und es zeigt sich, dass der Bedarf für diese Verbindungen damit gedeckt ist. Durch die längere Simulationsperiode kommt es auch zu einer größeren Anzahl an umgesetzten neuen Relationen. Die Auslastung dieser hält sich jedoch in beiden Vergleichsszenarien im Schnitt in Grenzen. Auch in den Szenarien S26 und S27, wo eine Variation der Kriterien für die mögliche Neueinführung einer Relation vorgenommen wurde, ergibt sich diesbezüglich ein ähnliches Bild. Tabelle 41 zeigt eine Auswahl der erfolgreichen Neueinführungen in Szenario S26. Wie bereits erwähnt, werden schwerpunktmäßig Defizite in den Import- und Exportverbindungen ausgeglichen. Die von Beginn an bestehende Verbindung „mot_438“ ist zweimal die Grundlage einer neuen Relation. Das bedeutet, dass die Zusatzrelation, die Ende Februar entstanden ist, noch nicht ausreicht, und nach einer Sperrzeit von mehreren Wochen um die Auslastungsentwicklung in der neuen Situation beobachten zu können, der Einführungsprozess neuerlich stattfindet. Plausibel ist, dass die durchschnittliche Bearbeitungszeit in den Terminals aller abgewickelten Züge einer Relation bei Verbindungen, die Import- und Exportregionen betreffen geringer ist als für Verbindungen zwischen zwei Terminals im Netzwerk. Die Wartezeit vor der Abfahrt bezieht sich auf den Zeitraum, den ein fertig abgewickelter Zug auf den Vorstaugleisen des Terminals, sofern diese verfügbar sind, auf die planmäßige Abfahrt wartet. Unterschiede können hier durch Variationen in der Beistellzeit auftreten. So ist nachvollziehbar, dass sich durch die geringere Auslastung der Relationen „nmt_3“ und „nmt_4“ das Verhältnis von Bearbeitungs- und Wartezeit verschiebt. Dass zum Simulationsende noch keine Auswertungen für die letzten drei Relationen vorliegen ist dadurch zu erklären, dass tatsächliche Züge erst mit einer mehrwöchigen Vorlaufzeit fahren. Die Auslastungswerte sind von den bereits erfolgten Buchungen für diese Züge abgeleitet.

Tabelle 41: Erfolgreiche neue Relationen in S26

ID Neue Relation	Einführungs-datum	von	nach	ID Alte Relation	Leistungsparameter Neue Relation			
					Bearbeitungs-zeit Terminals	Wartezeit vor Abfahrt	Anteil SAL	Auslastung
nmt_3	26.01.2014	T20	RA5	mot_338	50	120	0,04	0,24
nmt_4	26.01.2014	T20	RA8	mot_592	30	141	0,01	0,10
nmt_6	16.02.2014	T24	T22	mot_698	172	111	0,13	1
nmt_7	23.02.2014	RA3	T6	mot_437	95	24	0,14	1
nmt_8	23.02.2014	RA3	T6	mot_438	89	28	0,12	1
nmt_11	02.03.2014	RA6	T13	mot_506	0	0	0,13	1
nmt_14	09.03.2014	RA6	T13	mot_511	0	0	0,12	1
nmt_22	30.03.2014	RA3	T6	mot_438	0	0	0,04	1

Die markantesten diesbezüglichen Ergebnisse von Szenario S27 auf Basis des Originalfahrplanes sind, dass im Vergleich wie schon bei S24 und S25 mehr Relationen eingeführt werden. Genauso führt dies zu der ineffizienten Situation einer geringen Auslastung der beibehaltenen Relationen aus dem Originalfahrplan von nur 48 Prozent. Bereits ausgewertete Neueinführungen erreichen eine durchschnittliche Auslastung von 32 Prozent.

Mit dem letzten Szenario S28 soll untersucht werden, zu welchen Ergebnissen eine weitere Fahrplananpassung unter Berücksichtigung der vom Modell durchgeführten Änderungen der letzten Szenarien führt. Zusätzlich wurde die Grundauslastung des Lagervolumens der Terminals erhöht, da die durchschnittliche Lagerauslastung der Terminals in den vorangegangenen Szenarien unter 60 Prozent blieb. Die Ergebnisse hinsichtlich der Auslastung der Relationen bestätigen das Überschießen bei den Neueinführungen der vorangegangenen Szenarien. Die Auslastung des Grundfahrplanes kann zwar wieder auf 60 Prozent erhöht werden, kommt aber nicht an die Werte von beispielsweise S24 mit 81 Prozent Auslastung heran. Die durchschnittliche Lagerauslastung der Terminals steigt auf 67 Prozent. Für einzelne Terminals bedeutet dies jedoch, dass ab rund der Hälfte der Simulationsperiode kritische Lagerauslastungen von über 85 Prozent erreicht werden, und für ein Drittel der Terminals kommt es zu einem Anstieg der durchschnittlichen Auslastung des Lagervolumens über 70 Prozent. Die genauen Werte sowie der Anteil der Zeit in der die Lagerauslastung größer als der festgelegte Grenzwert von 85 Prozent ist, wird in Abbildung 19 für die betroffenen Terminals dargestellt. Die Folge für die Terminals sind teilweise beträchtliche Einschränkungen im operativen Betrieb.

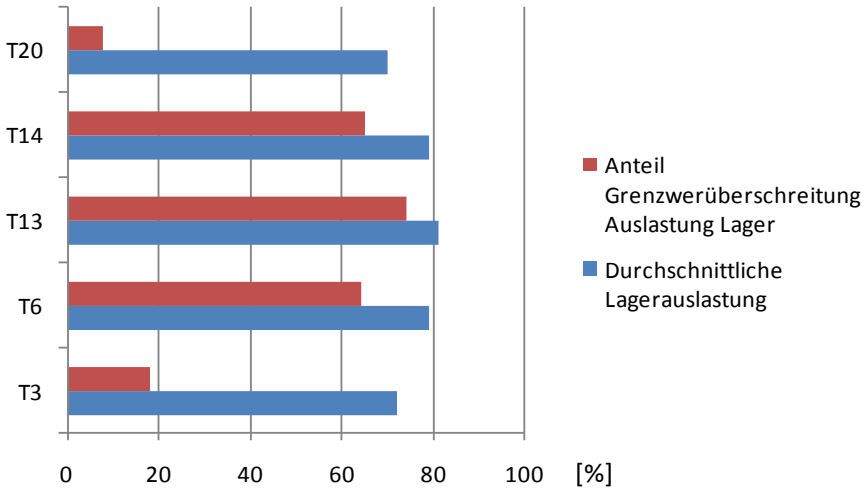


Abbildung 19: Kennzahlen Lagerauslastung S28

Für die Netzwerkleistung ergibt sich zu den Vergleichsszenarien S24 und S26 ein Rückgang des Durchsatzes um 7 Prozent und eine Erhöhung der Ausgangsverspätungen von Zügen um knapp 30 Prozent.

Für alle durchgeführten Szenarien gilt, dass ausreichend Lagerkapazitäten für Ladeeinheiten vom Typ SAL und WAB zur Verfügung stehen. Maximalwerte überschreiten hier kaum 40 Prozent. Aus diesem Grund wurde die Auslastung des Lagervolumens in den einzelnen Szenarien nur für Standardcontainer besprochen.

11. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Werkzeuges, das die Planung und Evaluierung von intermodalen Gütertransport-Netzwerken möglichst systemumfassend ermöglicht. Zu diesem Zweck wurde ein Agenten-basiertes Simulationstool konzipiert, mit dessen Hilfe verschiedene Netzwerkdesigns mit variierenden strukturellen und betrieblichen Eigenschaften untersucht werden können. Das Modell wertet die Gesamtleistungsfähigkeit eines Netzwerkes aus und ermittelt auch die Leistungsparameter der einzelnen Netzwerkkomponenten. Somit können einerseits unterschiedliche Varianten von Terminalstandorten und deren jeweiligen Betriebskonzepten und Standorten und Kapazitäten von Leercontainer Depots, und andererseits Entwürfe von Fahrplänen und Zugprodukten ausgewertet und miteinander verglichen werden.

Als Grundelemente für die Konfiguration der Rahmenbedingungen für die Netzwerkstruktur und den Netzwerkbetrieb wurden Modellterminals und Modellzüge definiert. Die daraus entwickelten Betriebskonzepte für intermodale Netzwerke und das Simulationsmodell wurden anschließend mittels einer Reihe von Anwendungsfällen auf ihre Anwendbarkeit getestet. Unter Berücksichtigung verschiedener struktureller Einstellungen wurde für eine festgelegte Transportnachfrage eine adäquate Ausgangskonfiguration ermittelt. Davon ausgehend wurden die Auswirkungen von infrastrukturellen Änderungen bzgl. der Leercontainer Depots und gesteigerten Nachfragemengen, sowie Varianten der Einstellungen für Leercontainer Repositionierungen und Verkehren zur Grundauslastung des Netzwerkes untersucht. Die Fähigkeit des Modells betreffend der Fahrplananpassungen wurde unter verschiedenen Parametervariationen und für unterschiedliche Simulationsperioden ausgewertet.

Generell hat sich gezeigt, dass das Modell die gewünschten Evaluierungen sehr gut bewältigen kann. Grundsätzlich ist anzumerken, dass ein Vergleich der vorliegenden Ergebnisse für die fiktiven Anwendungsfälle mit realen Problemstellungen anzustreben ist. Für die bestehenden Auswertungen ist davon auszugehen, dass ein auf die Nachfragesituation besser abgestimmter Ausgangsfahrplan zu exakteren Ergebnissen, vor allem auch hinsichtlich der Fahrplananpassung, beitragen kann. Verbesserungspotenzial im Modell gibt es dazu auch für den Prozess der Einstellung von Relationen und der möglichen Einführung von Zusatzrelationen. In der aktuellen Version werden die Auslastungs- und Buchungsstatistiken jeder Relation einzeln bewertet. Da jedoch eine Strecke im Regelfall von mehreren Relationen bedient wird, kann ein übergreifender Ansatz, der alle Relationen einer Strecke in der Auswertung berücksichtigt, das Überschießen in beide Richtungen reduzieren.

Einen anderer Ansatzpunkt für die Verbesserung der Ergebnisse ist der Repositionierungsprozess für Leercontainer der Residual Areas. Einerseits haben Eingangsparameter wie das Verhältnis von der Anzahl der Systemcontainer, der Kapazitäten der Leercontainer Depots im Netzwerk, der Nachfragemenge und den Bestandsgrenzen in den Residual Areas großen Einfluss auf das Systemverhalten. Andererseits kann das Miteinbeziehen von Auswertungen über

die Verkehre von und zu den Residual Areas, sowie das Berücksichtigen von bisherigen Repositionierungs-Dynamiken während der Laufzeit Verbesserungspotential innehaben.

Weitere Modellausbaumaßnahmen zur Verfeinerung der Abbildung der Transportprozesse werden hinsichtlich der Einführung zusätzlicher Eigenschaften und Funktionalitäten der Schienen- und Straßenverbindungen vorgeschlagen. Zusätzlich können die Modellkomplexität und Dynamik durch die Einführung von Waggon-Pools und eigenen Waggon-Objekten zur Zugbildung noch weiter gesteigert werden.

A. Literatur

Abacoumkin, C. und Ballis, A. (2004). Development of an expert system for the evaluation of conventional and innovative technologies in the intermodal transport area. European Journal of Operational Research 152, 410-419.

Alumur, S. und Kara, Y. (2008). Network hub location problems: The state of the art. European Journal of Operational Research 190, 1-21.

Andersen, J., Crainic, T.G. und Christiansen, M. (2009). Service network design with management and coordination of multiple fleets. European Journal of Operational Research 193, 377-389.

Anghinolfi, D., Paolucci, M., Sacone, S. und Siri, S. (2011). Freight transportation in railway networks with automated terminals: A mathematical model and MIP heuristic approaches. European Journal of Operational Research 214, 588-594.

AnyLogic (2014). AnyLogic® - Multimethod Simulation Software. Entnommen von http://www.anylogic.com am 12.02.2014.

Baindur, D. und Viegas, J.M. (2011). An agent based model concept for assessing modal share in inter-regional freight transport markets. Journal of Transportation Geography 19, 1093-105.

Ballis, A. und Golias, J. (2002). Comparative evaluation of existing and innovative rail-road freight transport terminals. Transportation Research Part A 36, 593-611.

Ballis, A. und Golias, J. (2004). Towards the improvement of a combined transport chain performance. European Journal of Operational Research 152, 420-436.

Balmer, M., Meister, K., Rieser, M., Nagel, K. und Axhausen, K.W. (2008). Agenten-basierte Simulation der Verkehrsnachfrage: Struktur und Rechenleistung von MATSim-T. 2nd TRB Conference on Innovations in Travel Modeling, Portland.

BATCo (2010). Projekt Baltic - Adriatic Axis. Entnommen von http://batco.datenkraft.info/ am 29.11.2010.

Benna, T., und Gronalt, M. (2008). Generic simulation for rail-road container terminals. In: Winter Simulation Conference, Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation, Session: Logistics, transportation and distribution: Container operations, 2656-2660, Miami, Florida.

Bierwirth, C., Kirschstein, T., Meisel, F. (2012). On Transport Service Selection in Intermodal Rail/Road Distribution Networks. Business Research Journal 5 (2), 198-219.

Borshchev, A. (2013). The Big Book of Simulation Modeling. AnyLogic North America.

Boschian, V., Dotoli, M., Fanti, M.P., Iacobellis, G. und Ukovich, W. (2011). A Metamodeling Approach to the Management of Intermodal Transportation Networks. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering 8 (3), 457 - 469.

B2B Loco (2010). Projekt Baltic – to - Balkan Network for Logistics Competence. Entnommen von http://www.b2bloco.eu/ am 10.12.2010.

CAPMAN (2004). Summary Report Capacity Management Project (Capman Phase 3). UIC – International Union of Railways (Hrsg.).

Caris, A. Janssens, G.K. und Macharis, C. (2007). A simulation approach to the analysis of intermodal freight transport networks. In: Proceedings of the European Simulation and Modelling Conference EUROSIS, 283-286.

Cavalcante, R. und Roorda, M.J. (2013). Freight Market Interactions Simulation (FREMIS): An Agent-Based Modeling Framework. The 2nd International Workshop on Agent-based Mobility, Traffic and Transportation Models, Methodologies and Applications (ABMTRANS). Procedia Computer Science 19, 867-873.

Chang, T.-S. (2008). Best routes selection in international intermodal networks. Computers & Operations Research 35, 2877-2891.

COINCO North (2010). Projekt Corridor of Innovation and Cooperation. Entnommen von http://www.coinconorth.com/ am 11.12.2010.

Crainic, T.G. (2000). Service Network Design in freight transportation. European Journal of Operational Research 122, 272-288.

Crainic, T.G., Florian, M. und Leal, J.U. (1990). A Model for the Strategic Planning of National Freight Transportation by Rail, Transportation Science 24 (1), 1-24.

CREAM (2011). Projekt Customer-driven Rail-freight services on a European mega-corridor based on Advanced business and operating Models. Entnommen von www.cream-project.eu/ am 09.01.2011.

EC (2005). Trans-European Transport Network, TEN-T priority axes and projects 2005. European Commission, Energy and Transport DG. Brüssel.

EC (2010). CORDIS Forschungs- und Entwicklungsinformationsdienst der Gemeinschaft. Entnommen von http://cordis.europa.eu/ am 06.09.2010.

Etlinger, K., Schindlbacher, E., und Gronalt, M. (2013). Modelling of intermodal networks. In: Proceedings of the International Conference on Harbor Maritime and Multimodal Logistics M&S 2013, 18-25, September 25-27, Athen.

EWTC (2007). East West Transport Corridor Strategy and Action Plan, Final Report – December 2007. Region Blekinge (Hrsg.), Karlskrona.

EWTC (2011). Projekt East West Transport Corridor II. Entnommen von http://www.eastwesttc.org/ am 10.01.2011.

FLAVIA (2010). Projekt Freight and Logistics Advancement in Central/South-East Europe - Validation of trade and transport processes, Implementation of improvement actions, Application of co-coordinated structures. Entnommen von http://www.flavia-online.de/ am 12.12.2010.

Floden, J. (2007). Modelling Intermodal Freight Transport – The potential of Combined Transport in Sweden. Doctoral Thesis. BAS Publishing, Göteborg.

Gambardella, L.M., Rizzoli, A.E. und Funk, P. (2002). Agent-based planning and simulation of combined rail/road transport. SIMULATION 78 (5), 293-303.

Geerts, J.-F. und Jourquin, B. (2001). Freight Transportation Planning on the European Multimodal Network. European Journal of Transport and Infrastructure Research 1 (1), 91 - 106.

Gronalt, M., Benna, T., und Posset, M. (2008). Optimizing hinterland terminal operation using simulation and neural networks. In: Proceedings of the 20th European Modeling & Simulation Symposium, International Mediterranean and Latin American Modeling Multiconference, 20th European Modeling & Simulation Symposium, 353-357, 17-19 September, Campora S. Giovanni.

Gronalt, M., Posset, M. Rojas-Navas, T., 2012. Capacity Evaluation of Inland Container Terminals – The Simulation Based Approach of SimCont. Proceedings of the 2012 International Conference on Logistics and Maritime Systems. August 22-24, Bremen.

Guélat, J., Florian, M. und Crainic, T.G. (1990). A Multimodal Multiproduct Network Assignment Model for Strategic Planning of Freight Flows, Transportation Science 24 (1), 25-39.

Häuslmayer, H., Gronalt, M., und Schindlbacher, E. (2011). Risikoanfälligkeitsanalyse von Binnenland Containerterminals. facultas.wuv, Wien.

Henesey, L. und Törnquist, J. (2002). Enemy at the gates: Introduction of multi-agents in a terminal information community. In: Maritime Engineering & Ports III. C.A. Brebbia and G. Sciutto (Hrsg.). London: WIT Press, 23-32.

Holmgren, J., Dahl, M., Davidsson, P. und Persson, J.A. (2013). Agent-based simulation of freight transport between geographical zones. The 2nd International Workshop on Agent-based Mobility, Traffic and Transportation Models, Methodologies and Applications (ABMTRANS). Procedia Computer Science 19, 829 – 834.

Hüttler, B., Zazgornik, J. und Gronalt, M. (2012). Synchronous railway simulation of shunting yards. In: Proceedings of the International Conference on Harbor Maritime and Multimodal Logistics M&S, 19-21 September, Vienna.

Janic, M. (2007). Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network. Transportation Research Part D 12, 33–44.

Janic, M. (2008). An assessment of the performance of the European long intermodal freight trains (LIFTS). Transportation Research Part A 4, 1326–1339.

Jourquin, B. und Beuthe, M. (1996). Transportation policy analysis with a geographic information system: The virtual network of freight transportation in Europe, Transportation Research Part C: Emerging Technologies 4 (6), 359-371.

Kombiverkehr (2007). Pressemitteilung vom 28.06.2007 der Kombiverkehr Deutsche Gesellschaft für kombinierten Güterverkehr mbH & Co KG. Zugänglich unter: http://www.kombiverkehr.de/web/Deutsch/Medien_Details/?&show_article=1155.

Lehtinen, J. und Bask, A.H. (2012). Analysis of business models for potential 3Mode transport corridor. Journal of Transport Geography 22, 96-108.

Lindstrom Bandeira, D., Becker, J.L. und Borenstein, D. (2009). A DSS for integrated distribution of empty and full containers. Decision Support Systems 47, 383–397.

Macharis, C., Bontekoning, Y. M. (2004). Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review. European Journal of Operational Research 153, 400-416

Macharis, C., Caris, A., Jourquin, B. und Pekin, E., (2011). A decision support framework for intermodal transport policy. European Transport Research Review 3, 167-178.

Mahmassani, H.S., Zhang, K., Dong, J., Lu, Ch.-Ch., Charan Arcot, V. und Miller-Hooks, E. (2007). Dynamic Network Simulation–Assignment Platform for Multiproduct Intermodal Freight Transportation Analysis. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2032, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 9–16.

Máhr, T., Srour, J., de Weerdt, M., und Zuidwijk, R. (2010). Can agents measure up? A comparative study of an agent-based and on-line optimization approach for a drayage problem with uncertainty. Transportation Research Part C 18, 99–119.

Marinov, M. und Viegas, J. (2011). A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network. Simulation Modelling Practice and Theory 19, 516–539.

Miller-Hooks, E., Mahmassani, H.S., Nair, R., Zhang, K., Charan Arcot, V., Kuo, A., Lu, Ch.-Ch., Dong, J. und Kozuki, A. (2007). Assessing service design options and strategies for overcoming barriers in the Reorient intermodal freight transport corridor. Proceedings of the European Transport Conference (ETC) 2007, Oktober 17-19, Leiden.

Nash, A. und Hürlimann, D. (2004). Railroad Simulation using OpenTrack, In: Proceedings of the Ninth International Conference on Computer in Railways (Comprail IX), eds. J. Allan, C.A. Brebbia, R.J. Hill, G. Sciutto & S. Sone, 45-54, Dresden.

Nossack, J. und Pesch, E. (2010). A truck scheduling problem arising in intermodal container transportation. European Journal of Operational Research 230, 666-680.

Opentrack (2010). OpenTrack – Simulation of Railway Networks. Entnommen von http://www.opentrack.ch/ am 27.11.2010.

Parola, F. und Sciomachen, A. (2005). Intermodal container flows in a port system network: Analysis of possible growths via simulation models. International Journal of Production Economics 97, 75-88.

Posset, M., Gierlinger, D., Gronalt, M., Peherstorfer, H., Pripfl, H. und Starkl, F. (2014). Intermodaler Verkehr Europa. 1. Auflage, Eigenverlag der FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH - Logistikum Steyr.

Puettmann, C. und Stadtler, H. (2010). A collaborative planning approach for intermodal freight transportation. OR Spectrum 32, 809-830.

Rieser, M. (2010). Adding Transit to an Agent-Based Transportation Simulation, Concepts and Implementation. Dissertation an der Fakultät V, Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin.

Rizzoli, A.E., Gambardella, L.M. und Funk, P. (2002). A simulation tool for combined rail/road transport in intermodal terminals. Mathematics and Computers in Simulation 59, 57–71.

Scandria (2010). Projekt Scandria - The Scandinavian-Adriatic Corridor for Innovation and Growth. Entnommen von http://www.scandriaproject.eu/ am 29.11.2010.

Schindlbacher, E. und Gronalt, M. (2010). Using Auction Mechanisms for Coordinating Container Flows in Intermodal Freight Transport Networks. In: Janssens, G.K., Ramaekers, K. and Caris, A. (Hrsg.), The 2010 European Simulation and Modelling Conference, S. 317-321, EUROSIS-ETI Publication.

Schindlbacher, E., Gronalt, M. und Häuslmayer, H. (2011): Multi-agent simulation for analysing the robustness of inland container terminal networks. International Journal of Simulation and Process Modelling 6 (4), 317-328.

Schneider, W. (2003). The German National Freight Transport Model. Paper präsentiert bei: Conference on National and International Freight Transport Models, Helsingør, Denmark.

Schneider, W., Nießen, N. und Oetting, A. (2003). Strategic modelling and simulation tool for rail freight transportation. Paper präsentiert bei: European Transport Conference 2003, Strasbourg, France. Association for European Transport (AET).

Seidelmann, C. (2010). 40 Jahre Kombinierter Verkehr Straße-Schiene in Europa - Vom Huckepackverkehr zum Intermodalen Transportsystem. Internationale Vereinigung der Gesellschaften für den kombinierten Verkehr Schiene-Straße UIRR (Hrsg.). Brüssel.

Siebers, P.O., Macal, C.M., Garnett, J., Buxton, D. und Pidd, M. (2010). Discrete-Event Simulation is Dead, Long Live Agent-Based Simulation!. Journal of Simulation 4(3), 204-210.

SoNorA (2010). Projekt South-North Axis. Entnommen von http://www.sonoraproject.eu/ am 29.11.2010.

Southworth, F. und Peterson, B.E. (2000). Intermodal and international freight network modeling. Transportation Research Part C 8, 147-166.

SteadieSeifi, M., Dellaert, N.P., Nuijten, W., Van Woensel, T. und Raoufi, R. (2014). Multimodal freight transportation planning: A literature review. European Journal of Operational Research 233, 1-15.

TransBaltic (2011). Projekt TransBaltic – Towards an integrated transport system in the Baltic Sea Region. Entnommen von http://transbaltic.eu/ am 09.01.2011.

TRANSITECTS (2010). Projekt Transalpine Transport Architects. Entnommen von http://www.transitects.org/ am 10.12.1010.

Transport Research Portal (2010). Transport Research Portal. Entnommen von http://www.intransport.eu am 06.09.2010..

Troche, G. (2009). EvaRail – activity-based transport cost model for evaluation of improvements in the rail freight system. The 16th World Congress for ITS Systems and Services 2009. 21.-25. September, Stockholm.

UIC (2010). DIOMIS - Evolution of intermodal rail/road traffic in Central and Eastern European Countries by 2020. Management Report – Developing Infrastructure & Operating Models for Intermodal Shift. International Union of Railways, Paris.

UN/ECE (2001). Terminologie des Kombinierten Verkehrs, New York and Geneva, 2001.

Verma, M., Verter, V. und Zufferey, N. (2012). A bi-objective model for planning and managing rail-truck intermodal transportation of hazardous materials. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 48 (1), 132–149.

Wieberneit, N. (2008). Service network design for freight transportation: a review. OR Spectrum 30, 77-112.

Yamada, T., Frazila Russ, B., Castro, J. und Taniguchi, E. (2009). Designing Multimodal Freight Transport Networks: A Heuristic Approach and Applications. Transportation Science 43 (2), 129-143.

Zehendner, E. und Feillet, D. (2014). Benefits of a truck appointment system on the service quality of inland transport modes at a multimodal container terminal. European Journal of Operational Research 235, 461–469.

Zhang, R., Yun, W.Y. und Kopfer, H. (2010). Heuristic-based truck scheduling for inland container transportation. OR Spectrum 32, 787–808.

B. Routing Algorithmus und Quelle Transportdaten

Arizona State University (2012). Code entnommen von https://code.google.com/p/k-shortest-paths/ am 28.08.2012.

TRANS TOOLS (2012). WORLDNET origin Destination Matrix Version 6. Entnommen von http://energy.jrc.ec.europa.eu/transtools/FTP.html am 12.05.2012.

C. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Planungs- und Evaluierungsmodelle 28
Tabelle 2: Inputparameter für das Active Object Entity Generator 38
Tabelle 3: Inputparameter für das Active Object Route Planner 38
Tabelle 4: Inputparameter für das Active Object Container Owner 39
Tabelle 5: Inputparameter je Active Object Operator 40
Tabelle 6: Inputparameter je Active Object Catchment Area 41
Tabelle 7: Inputparameter je Active Object Residual Area 41
Tabelle 8: Inputparameter für das Active Object Link Agent 42
Tabelle 9: Inputparameter je Active Object Rail Link 42
Tabelle 10: Inputparameter je Active Object Road Link 43
Tabelle 11: Inputparameter je Active Object Terminal Agent, Teil 1 44
Tabelle 12: Inputparameter je Active Object Terminal Agent, Teil 2 45
Tabelle 13: Inputparameter je Active Object Terminal Module 46
Tabelle 14: Inputparameter je Active Object Equipment 47
Tabelle 15: Inputparameter je Active Object Gleis 47
Tabelle 16: Parameter der modellintern erzeugten Active Objects 49
Tabelle 17: Objekt Klassen Modellinterne Erzeugung Teil 1 51
Tabelle 18: Objekt Klassen Modellinterne Erzeugung Teil 2 52
Tabelle 19: Objekt Klassen Modellinterne Erzeugung Teil 3 53
Tabelle 20: Objekt Klassen Modellinterne Erzeugung Teil 4 54
Tabelle 21: Objekt Klassen Modellinterne Erzeugung Teil 5 55
Tabelle 22: Objekt - Klassen zur Kommunikation der Modellelemente Teil 1 56
Tabelle 23: Objekt - Klassen zur Kommunikation der Modellelemente Teil 2 57
Tabelle 24: Modellzüge für die Basis-Fahrpläne 69
Tabelle 25: Basis-Fahrpläne für die Modellterminals 71
Tabelle 26: Modellterminal Small 72
Tabelle 27: Modellterminal Medium_1 72
Tabelle 28: Modellterminal Medium_2 72
Tabelle 29: Modellterminal Large_1 73
Tabelle 30: Modellterminal Large_3 73
Tabelle 31: Modellterminal X-Large 73
Tabelle 32: Terminalstandorte mit Leercontainer Depot Variation D2 77
Tabelle 33: Regionen der Schienenverbindungen mit Verspätungszeit 78
Tabelle 34: Parameter-Varianten als Grundlage der Szenarien 81
Tabelle 35: Übersicht der Szenarienkonfiguration der Anwendungsfälle 82
Tabelle 36: Durchlaufzeiten und Transportmengen für S1-S8 83
Tabelle 37: Steigerungen der Parameter zu Lagerauslastung, Anschlusszügen und Zugverspätungen 86
Tabelle 38: Durchschnittliche Anzahl Leercontainer Züge pro Woche 87
Tabelle 39: Distanzen Leercontainer Repositionierungen 88
Tabelle 40: Wochentage mit Spitzenwerten der Terminalauslastung 90
Tabelle 41: Erfolgreiche neue Relationen in S26 92

D. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Transportvolumen in TEU im unbegleiteten intermodalen Verkehr 2007/2020 13
Abbildung 2: Benötigte Umschlagskapazität in Ladeeinheiten je Terminalregion im Jahr 2020 14
Abbildung 3: Intermodaler Verkehr. 16
Abbildung 4: Zusammenspiel der beteiligten Partner im Kombinierten Verkehr. 16
Abbildung 5: Struktur des Warteschlangensystems für den Prozess des Containereingangs per LKW und Containerausgangs per Zug in Rizzoli et al. (2002) 26
Abbildung 6: Containerfluss im Terminal. 32
Abbildung 7: Klassendiagram Simulationsmodell 37
Abbildung 8: Übersicht der Steuerungsprozesse eines Terminal Agenten 43
Abbildung 9: Zustandsdiagramm Ladeeinheit 48
Abbildung 10: Zustandsdiagramm Zug 49
Abbildung 11: Sequenzdiagramm zur Bearbeitung eines Transportauftrages in der Catchment Area . 59
Abbildung 12: Sequenzdiagramm zur Einführung einer neuen Relation 61
Abbildung 13: Aktivitätsdiagramm zum Prüfen eines Zeitfensters für eine neue Relation im Terminal 62
Abbildung 14: Übersicht Parameteränderungen zwischen den Szenarien 82
Abbildung 15: Durchschnittliche Auslastung Depot-Equipment für die Szenarien S1, S3, S5 und S7 84
Abbildung 16: Durchschnittlicher Anteil an den gesamten Leercontainer Abholungen per LKW für die Szenarien S1, S3, S5 und S7 85
Abbildung 17: Verhältnis von Anzahl und Auslastung der Relationen für die Szenarien 87
Abbildung 18: Auslastungswerte der Vorstaugleise der Terminals 89
Abbildung 19: Kennzahlen Lagerauslastung S28 93