

DIGITALER HAFEN: MODERNE HAFENREGELUNG DURCH SIMULATION

U. Noyer¹, F. Rudolph², J. Rummel³ and M. Weber⁴

¹ DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig, Deutschland, ulf.noyer@dlr.de, www.dlr.de

² DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig, Deutschland, florian.rudolph@dlr.de, www.dlr.de

³ DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik, Berlin, Deutschland, johannes.rummel@dlr.de, www.dlr.de

⁴ DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik, Berlin, Deutschland, melanie.weber@dlr.de, www.dlr.de

Keywords: Simulation, Hafen, Verkehrsmanagement, Simulatorkopplung, Optimierung

ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wird das Potential von „digitalen Häfen“ als intermodale Verkehrsknoten analysiert und bewertet. Für diese Betrachtungen werden mehrere parallellaufende Simulatoren in einer integrierenden Architektur gekoppelt, um den bodengebundenen Verkehr, die Personenbewegungen und den Schiffsverkehr gemeinsam zu simulieren. Beim Umschlag am Hafen durchlaufen die Waren und Güter aber auch Passagiere mehrere Prozesse. Die Start- und Endzeiten der Prozesse werden für die anschließende Bewertung durch Meilensteine beschrieben. Werden diese Meilensteine sinnvoll über die Prozesse miteinander in Relation gesetzt, so lassen sich daraus effizient Kennzahlen (KPIs) bestimmen. Die relevanten Meilensteine und die Berechnung der KPIs zur Auswirkungsanalyse werden vorgestellt und definiert.

1 EINFÜHRUNG

Häfen sind Verkehrsknotenpunkte, bei denen eine Sicht über das Gesamtsystem erforderlich wird, um den Umschlag von Personen und Waren zwischen seeseitigen und der Vielfalt an landseitigen Verkehrssystemen effizienter zu gestalten und damit die Wettbewerbsfähigkeit der Häfen abzusichern und zu verbessern. Die voranschreitende Digitalisierung der Häfen ist eine wesentliche Grundlage für eine system- und prozessübergreifende Koordinierung und Optimierung des Hafenbetriebs im Kontext des globalen Transports. Diese umfassende Digitalisierung ermöglicht eine parametrisierte Modellbeschreibung der Verkehrs-, Transport- und Logistiksysteme auf allen Ebenen. In diesem Modell können durch die Anpassung einzelner Parameter die Auswirkungen auf alle anderen Vorgänge untersucht werden. So können Hafenprozesse in ihrer Variation beschrieben, planungstechnisch aufeinander abgestimmt und damit auch operativ gemanagt werden. Bestehende sowie als auch absehbare Leistungsgrenzen und Engpässe des Hafenbetriebs werden dadurch erkennbar und messbar. Ziel ist es, ein Managementsystem zu integrieren, das dem Operator in einem Leitstand die Möglichkeit gibt, die Bewegungen der Agenten zu verfolgen, einzugreifen und umplanen zu können.

Häfen bilden die Schnittstelle zwischen dem seeseitigen Transport und dem Hinterland mit seiner Verteilung auf Straßen- und Schienenverkehr sowie auf Binnenwasserstraßen. So betrachtet lassen sich Seehäfen durch den Modalitätswechsel als kleinräumig agierende Verkehrssysteme mit bis zu globaler Vernetzung sehen. Allein für das Umschlagsmanagement sind bis zu 10 verschiedene Stakeholder¹ an den entsprechenden Prozessen beteiligt. Es ist offensichtlich, dass für die Effizienzsteigerung moderner Seehäfen, als intermodale Verkehrsknoten eine system- und prozessübergreifende Koordinierung der unterschiedlichen Verkehrs-, Transport- und Logistiksysteme sowie Stakeholder einen wesentlichen Bestandteil zur Optimierung darstellt. Durch die fortschreitende Digitalisierung und die Realisierung

¹ Hafenmeister, Ladebetriebsleiter, Containerfahrer, Kranfahrer/Containerbrückenfahrer, Deckseinweiser, Hafendarbeiter/Lager- und Transportarbeiter, Lascher, Feederkoordinator, Schiffsmakler, Schiffsplaner (Quelle Point Conception)

eines „Digital Twins“ durch Simulation, soll im Projekt *I4Port* [1] zu dieser Optimierung beigetragen werden.

In diesem Paper wird die Architektur eines simulativen Prototypen vorgestellt, dabei werden die unterschiedlichen Simulatoren und deren Szenario beschrieben. Für die Datenspeicherung wird das verwendete Datenbankschema und die Kopplung zwischen den Komponenten erläutert. Weiterhin wird gezeigt, wie aus diesen Informationen Meilensteine generiert werden und sich daraus Indikatoren zum Status und zur Leistungsfähigkeit des gesamten Systems berechnen lassen, um dann einen Ausblick zu geben, wie sich Optimierungsansätze oder -strategien auswirken und bewertet werden können. Bei Erstellung der Meilensteine wird dabei das Konzept der intermodalen Reisekette verwendet und auf seeseitige Meilensteine erweitert. Das Konzept dieser Meilensteine wurde in [5] vorgestellt und in [4] weiter ausdefiniert.

2 SYSTEMUMGEBUNG

2.1 ANFORDERUNGEN AN DIE SIMULATIONS DATENBANK

Für die Gesamtsimulation werden mehrere separate Simulatoren für bodengebundenen Verkehr, für Schiffsverkehr und für Personen und Objekte in Gebäuden miteinander gekoppelt und zu einer Gesamtsimulation zusammengeführt. Hierbei wird für die Architektur (Abbildung 1) auf die bewährten Prinzipien der Projekte *Optimode.net* und *Transition* aufgebaut [2], [3]. Eine zentrale gemeinsame relationale Datenbank speichert die für den Austausch zwischen den Simulatoren und für die Gesamtsimulation relevanten Simulationszustände. Dabei erfolgt der Austausch der Simulationszustände in einem fest gewählten Takt von derzeit 60 Sekunden. Somit wird jede Minute der Blick auf das Gesamtsystem aktualisiert. Dieser Blick im gewählten Zyklus ist völlig ausreichend, um für den virtuellen Leitstand, der im Projekt simuliert wird, ein aktuelles Lagebild bereitzustellen. Auch bei einem realen Leitstand kann nicht davon ausgegangen werden, dass jederzeit sämtliche Zustände ohne Zeitverzug zugreifbar sind. Weiterhin existiert mit der Simulationssteuerung ein Toolset, um die Gesamtsimulation zu steuern. Über eine globale Tabelle wird durch die Simulationssteuerung vorgegeben, wann die einzelnen Teilsimulationen bis zu welcher Simulationszeit fortschreiten sollen. Hierbei setzt die Simulationssteuerung normalerweise das 60 Sekunden Raster ein, kann aber auch vollständig oder temporär abweichend eingestellt werden. Zum Tausch der Simulationszustände in Echtzeit wäre der Einsatz einer Datenbank nicht effizient genug, für die hier notwendige Frequenz ist er jedoch hervorragend geeignet und bietet entscheidende Vorteile. So lässt sich jederzeit in der Datenbank leicht Einblick in die Gesamtsimulation nehmen und kann leicht im Fehlerfall analysiert werden. Auch Maßnahmen zur Verifikation der Gesamtsimulation können leicht auf der Datenbank aufsetzen.

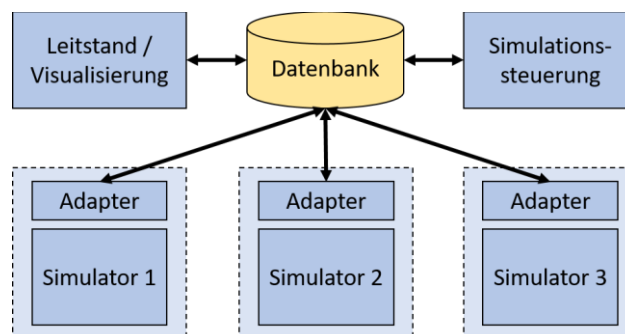


Abbildung 1: Überblick über die Architektur der Gesamtsimulation

2.2 INTEGRATION DER SIMULATIONSERGEBNISSE IN DIE DATENBANK

Die wichtigsten auszutauschenden Simulationszustände umfassen wann die relevanten Agenten u.a. in Form von Fahrzeugen, Zügen, Schiffen, Personen und Containern für das betrachtete Szenario relevante Orte erreichen und wieder verlassen: beispielsweise wann ein Zug eine Haltestelle erreicht und wieder verlässt. Das fortschreitende Szenario wird hierbei quasi in Realzeit durch die Realitätsersatzsimulation simuliert, welche im definierten Takt die aktualisierten Zustände liefert und

sich aus den jeweiligen Teil-Simulationen zusammensetzt. Dieses Design ist explizit so gehalten, dass in Zukunft die Realitätsersatzsimulation ganz oder teilweise durch Sensoren erfasste Realdaten ersetzt werden kann. Zusätzlich zu den Zuständen der Realitätsersatzsimulation wird im vorgegebenen Takt eine Prognose für zukünftige Zustände durchgeführt. Diese Prognose liefert eine Schätzung und ändert sich im weiteren Verlauf der Simulation üblicherweise. Die Prognose kann vom Operator im Leitstand herangezogen werden, um die derzeitige Situation der Agenten besser einschätzen zu können. Für die Berechnung der Prognose kann sowohl eine vollständige Simulation als auch vereinfachte Berechnungen herangezogen werden.

Bezüglich der Simulationszustände werden in einer Tabelle je Agent und Ort mehrere Zeiten für das Ankommen und Verlassen betrachtet (vgl. Tabelle 1). Die geplante Zeit (*scheduled*) gibt an, wann der Agent den Ort nach Plan erreichen bzw. verlassen soll. Diese Zeit steht bereits zu Beginn der ganzen Simulation fest und ändert sich nicht mehr. Die Gesamtheit der geplanten Zeiten stellt den vordefinierten Fahrplan für das Szenario dar. Während das Szenario mit der Zeit fortschreitet, wird die tatsächliche Zeit (*actual*) für die Agenten hinzugefügt, sobald ein Agent einen Ort erreicht bzw. verlassen hat. Sobald die tatsächlichen Zeiten einmal geschrieben wurden, ändern sie sich nicht mehr. Die tatsächlichen Zeiten werden aus der Realitätsersatzsimulation (oder aus realen Sensoren) gespeist und erlauben, den eigentlichen Verlauf der Simulation zu beobachten. Aus der Prognose werden die geschätzten Zeiten (*estimated*) generiert, welche je Agent und Ort die geschätzte Zeit der Ankunft und des Verlassens vorhersagen und für zukünftige Ereignisse ohne tatsächliche Zeiten im vorgegebenen Takt erneuert werden. Teilweise liefern die Simulatoren allerdings nur eine Prognose für eine bestimmte Zeitdauer in die Zukunft (z.B. 1 Stunde). Zusätzlich gibt es noch einige weitere Zeiten, welche es erlauben, Vorgaben für die Simulation abzustimmen und letztlich so vom Leitstand aus in die Simulation einzugreifen.

Attribut	Verwendung
id	Eindeutige ID für Agent und Streckenabschnitt
transport_type	Typ des Agenten: ship, train, person, container, ...
transport_name	Sprechender Name für den Agenten
src_location	Startort des Streckenabschnitts
dst_location	Zielort des Streckenabschnitts
scheduled_dep	Abfahrtszeit vom Startort nach Fahrplan
estimated_dep	Abfahrtszeit vom Startort nach aktueller Prognose
actual_dep	Tatsächliche Abfahrtszeit vom Startort
scheduled_arr	Ankunftszeit am Zielort nach Fahrplan
estimated_arr	Ankunftszeit am Zielort nach aktueller Prognose
actual_arr	Tatsächliche Ankunftszeit am Zielort

Tabelle 1: Attribute der Simulationszustände für den bodengebundenen Verkehr (vgl. Tabelle 7)

Bezüglich der Tabellen zum Austausch der Simulationszustände für die einzelnen Teilsimulationen ist zu betonen, dass lediglich die für die Gesamtsimulationen benötigten Zustände hier ausgetauscht werden. Jede Teilsimulation besitzt hierfür seine eigene Tabelle. Ansonsten bilden die Teilsimulationen eine Blackbox, welche ihre darüberhinausgehenden Simulationszustände nicht der Gesamtsimulation offenbaren.

Als zusätzliches Werkzeug für den Operator im Leitstand gibt es das Werkzeug der What-If-Szenarien. Diese erlauben es, die eigentliche Simulation zum aktuellen Zeitpunkt zu kopieren und unter geänderten Parametern eine alternative Prognose erstellen zu lassen (Abbildung 2). Der Operator erhält so die Möglichkeit, sich die Auswirkungen von ihm durchgeführter Dispositionsmaßnahmen mittels einer Prognose aufzeigen zu lassen, um so fundiert Entscheidungen treffen zu können. Die finale Entscheidung für dispositive Eingriffe liegt somit beim menschlichen Operator im Leitstand.

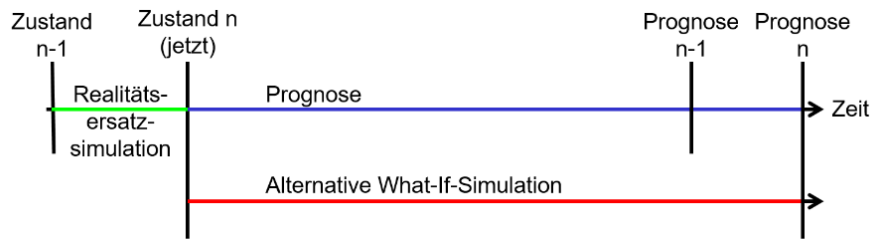


Abbildung 2: Zusammenhang Realitätssimulation, Prognose und alternative What-If-Simulation

2.3 BESCHREIBUNG DER SIMULATIONEN

Um die Vielzahl der unterschiedlichen Agenten auf dem Hafengelände und deren Detaillierungsgrad zu simulieren, wurden in die oben beschriebene Architektur die drei folgenden Simulatoren eingebunden: AnyLogic (für die Personenbewegungen innerhalb von Gebäuden), SUMO - Simulation of Urban MObility [6] (für den bodengebundenen Verkehr) und ein Entscheidungsmodell für den Schiffsverkehr.



AnyLogic ist ein Multi-methoden-Simulationswerkzeug, das von *The AnyLogic* entwickelt wird und systemdynamische, ereignisorientierte und agentenbasierte Simulationsmethodiken unterstützt. [10]



SUMO – Simulation of Urban MObility ist eine kostenlose und offene Verkehrssimulationssuite, die die Modellierung intermodaler Verkehrssysteme ermöglicht. [6]



Entscheidungsmodell für Schiffstrajektorien - Das Entscheidungsmodell beschäftigt sich mit der Generierung von Schiffstrajektorien sowie der Sequenzierung von Hafen Ein- und Ausfahrten.

Zudem ist die Kopplung so angelegt, dass beliebige Simulatoren eingebunden werden können. Um einen Überblick über das Simulationsszenario zu bekommen, wird im Folgenden die SUMO Simulation vorgestellt.

2.3.1 SUMO

Als Software zur Simulation von mikroskopischem Verkehr simuliert SUMO den landseitigen Verkehr. Dazu gehören explizit alle Fahrzeuge (wie PKW, Bus, LKW, Bahn und weitere Transportfahrzeuge auf dem Hafengelände), Personen im Straßenverkehr und Container. Ausgeschlossen sind die Simulation von Hafenkränen, die Stapelung von Containern und teilweise die Wartebereiche für Fahrzeuge. Trotzdem kann SUMO aus verschiedenen Eingangsdaten das Verhalten und die zukünftigen Aufenthaltsorte der Verkehrsteilnehmer durch mikroskopische Simulation berechnen. Dazu werden spezifische Eingangsdaten, wie Startpositionen und geplante Wege der Verkehrsteilnehmer benötigt. Diese können auch mit Fahrplänen oder Fahrten nach Bedarf realisiert werden. Das Straßennetz wird hauptsächlich auf Basis von Daten von OpenStreetMap (OSM) [7] generiert und händisch nachbearbeitet. Wichtig ist hier auch die Angabe von Fahrverboten auf bestimmten Straßen für bestimmte Fahrzeuge auf dem Hafengelände. Die Ein- und Aussteigedauer von Personen sowie die Dauer für das Umladen von Containern, erfolgt durch Angabe von Durchschnittswerten am jeweiligen Fahrzeugtyp. SUMO bietet bereits viele Standardwerte, die mit den Werten am jeweiligen Hafen ausgetauscht werden müssen.

Überblick über das Szenario:

Um alle benötigten SUMO-Features zu testen, wurde ein Simulationsmodell des Skandinavienkais (Lübecker Hafen) aufgesetzt. Der Skandinavienkai bietet das größte Terminal des Lübecker Hafens und ist einer der größten Roll-On/Roll-Off (RoRo)- und Fährhäfen Europas. Er verfügt darüber hinaus über eine sehr gute Hinterland Anbindung mit verschiedenen Intermodalverkehren, sodass hier Personen- sowie Güterverkehre abgebildet werden können [8].



Abbildung 3: SUMO Simulation – Skandinavienkai, Hafen Lübeck

Das Szenario:

Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt der SUMO-Simulation des Skandinavienkais. Das Passagierterminal befindet sich im rot markierten Bereich. Hier werden später die Personenbewegungen mit AnyLogic simuliert. Sobald eine Person das Terminal verlässt, erscheint diese in der SUMO-Simulation. Vom Terminal werden diese dann mit Bussen zum entsprechenden Anleger gebracht, wo sie dann in die Fähre umsteigen. Im hellblau markierten Bereich befindet sich der Güterbahnhof, an dem Container per Zug angeliefert werden. Container, die mit einem Trailer zum Hafen gebracht werden, fahren links unten in den Hafen und melden sich dann am Terminal (gelb markierter Bereich) an. Die Container warten dann auf der Lagerfläche (dunkelblau markierter Bereich), bis sie an einem Anleger (grün markierte Bereiche) in die Schiffe verladen werden. RoRo und PKW nehmen ebenfalls den Weg über das Terminal und warten dann auf einem der Wartebereiche (schwarz markierte Flächen), bis sie dann auf das jeweilige Schiff fahren. Die An- und Abfahrtszeiten der Schiffe berechnet später das Entscheidungsmodell für Schiffstrajektorien, diese werden dann in SUMO übernommen. Die RoRo, PKW, Container und Personen, die mit dem Schiff den Hafen erreichen, nehmen entsprechend die oben beschriebenen Wege in umgekehrter Reihenfolge.

Datengrundlage:

Als Kartengrundlage für das Simulationsszenario wurden alle verfügbaren Informationen aus OpenStreetMap (OSM) importiert und auf die Bedürfnisse des Szenarios angepasst. So wurden z.B. Straßen korrigiert, Lagerflächen und Parkplätze für die verschiedenen Fahrzeuge eingefügt und Haltestellen bearbeitet. Da zum Zeitpunkt der Simulation noch keine Realdaten für die verschiedenen Agenten vorlagen, wurden Durchschnittswerte mittels einer Literaturrecherche ermittelt und daraus ein kompletter Tagesdatensatz errechnet (Tabelle 2).

Agenten	Anzahl	Anmerkung		
SCHIFFE	10	Dazu zählen: Fähren/Containerschiffe Quelle: AIS Daten des Skandinavienkais vom 2019-10-15		
ZÜGE	5	Durchschnittswerte		
FUßGÄNGER	840	Ca 2% der Personenkapazitäten der Fähre sind Fußgänger		
PKW	965	Ca 60% der Fähren Kapazitäten		
LKW (RORO)	1334	Ca 60% der Fähren/Containerschiff Kapazitäten		
LKW (TRAILER)	400	Diese LKW bringen Container zum Hafen oder holen diese von dort ab.		
CONTAINER	1099	Transportmittel der Container: <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Anlieferung zum Hafen: 140 per Zug 200 per LKW (Trailer) 275 werden dem Hafenlager entnommen</td> <td>Abtransport vom Hafen: 112 per Zug 200 per LKW (Trailer) 284 verbleiben im Hafenlager</td> </tr> </table>	Anlieferung zum Hafen: 140 per Zug 200 per LKW (Trailer) 275 werden dem Hafenlager entnommen	Abtransport vom Hafen: 112 per Zug 200 per LKW (Trailer) 284 verbleiben im Hafenlager
Anlieferung zum Hafen: 140 per Zug 200 per LKW (Trailer) 275 werden dem Hafenlager entnommen	Abtransport vom Hafen: 112 per Zug 200 per LKW (Trailer) 284 verbleiben im Hafenlager			

Tabelle 2: Tagesdatensatz SUMO Szenario

Da es nicht möglich war, genaue Information über die hafeneigenen Fahrzeuge, wie Kräne, Stapler, Busse etc., in Erfahrung zu bringen, wurden hierfür in der Simulation flexible Fahrzeuge für den Container- bzw. Personentransport bereitgestellt. Diese sind jederzeit abrufbereit und werden durch die Container bzw. Personen angefordert.

Agenten	Anzahl	Anmerkung
HAFENEIGENE FAHRZEUGE	31	Dazu zählen: Busse, Stapler

Tabelle 3: Hafeneigene Fahrzeuge

Die Ergebnisse der Simulation:

SUMO simulierte für das Szenario insgesamt 86400 Sekunden (1 Tag). Es wurden insgesamt 84 Fußgänger, 1099 Container und 2628 Fahrzeuge eingesetzt. (Einige der 2714 geplanten Fahrzeuge sollten erst kurz vor Ende der Simulation starten, wovon einige nicht mehr vor Ende des Szenarios simuliert wurden (z.B. wegen Stau auf der Eintrittskante).) SUMO gibt eine Vielzahl von Informationen aus: z.B. die Durchschnittswerte aller Fahrzeuge (Tabelle 4)

Statistics (avg/vehicle):	
RouteLength	6182.20 m
Speed	7.29 m/s
Duration	1877.68 s
WaitingTime	474.99 s
TimeLoss	425.58 s
DepartDelay	464.14 s

Tabelle 4: Fahrzeugstatistik

Darüber hinaus können in den SUMO-Ausgabedateien zu jedem beliebigen Zeitschritt Informationen zu den einzelnen Agenten und Durchschnittswerten wie Routenlänge oder Routendauer ausgegeben

werden. Diese Daten macht sich das in Kapitel 3 vorgestellte Managementsystem zu Nutze, um die Agenten simulationsübergreifend zu koordinieren und z.B. bei Störungen eingreifen zu können.

2.3.2 ANYLOGIC

Um die Passagierprozesse im Hafenterminal abbilden zu können, wird eine agentenbasierte Netzwerkmodellierung angewendet. Realisiert wird dieses Modell mit der Software AnyLogic. Die einzelnen Wechselwirkungen der individuellen Passagierprozesse werden über *State Charts* abgebildet und orientieren sich an Meilensteinen, wie sie unter [5] definiert wurden.

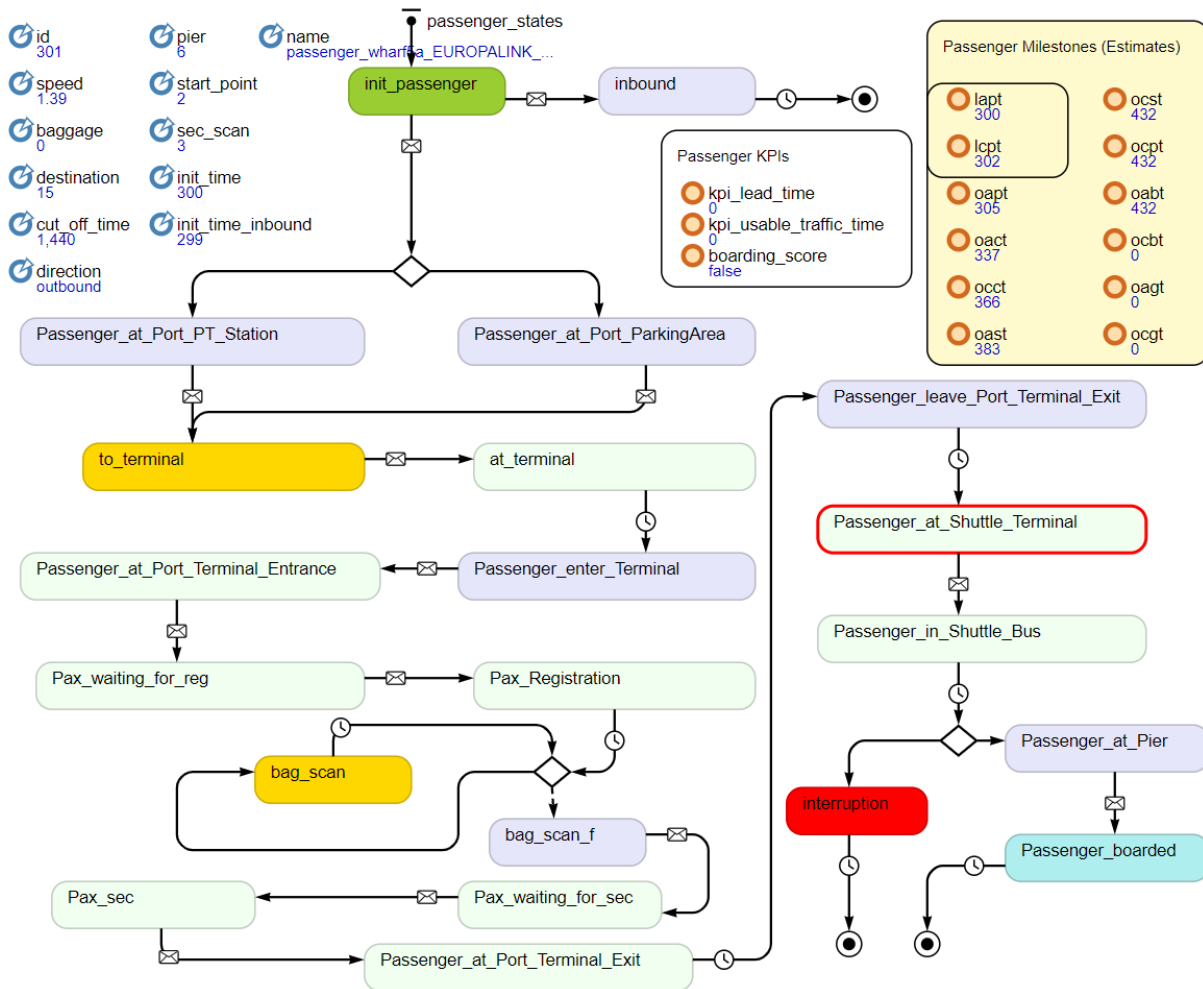


Abbildung 4: Prozessabbildung der Passagiere

Abbildung 4 zeigt das State Chart-Diagramm einer Person während eines Simulationslaufes. Jeder der als abgerundetes Rechteck dargestellte Status markiert einen Prozess beziehungsweise das Erreichen eines Prozesses. Jede modellierte Person nutzt dabei ein eigenes Statechart. Der Prozessablauf beginnt mit dem ersten Status *init_passenger* (dargestellt in grün). Dort findet die Initialisierung der Person mit seinen individuellen Attributen beim Starten des Simulationsmodells statt. Ein wichtiges Attribut ist dabei die *init_time*, die den Zeitpunkt wann die Person die Simulation betritt, festlegt. Ist dieser Zeitpunkt erreicht, wird der Person die Nachricht „init_Pax“ gesendet. Im Diagramm wird die Nachricht durch einen Briefumschlag dargestellt. Mit dem Empfang dieser Nachricht erreicht die Person den nächsten Status, in diesem Fall eine Fallunterscheidung zwischen *Passenger_at_Port_PT_Station* und *Passenger_at_Port_ParkingArea* je nachdem mit welchem Verkehrsmittel der Hafen erreicht wurde. In jeweils einem dieser beiden Status wird die Person im Netzwerkmodell, welches die Topologie des Hafens beschreibt, injiziert. Dort bewegt sie sich entlang festgelegter Routen auf dem Gelände. Ist das

Ende einer solchen Route erreicht, wird wieder eine Nachricht an die Person geschickt und ein neuer Status erreicht. So werden die ganzen Prozesse der Person vom Erreichen des Hafens bis zum Betreten des Schiffes modelliert. Entsprechende Status in lavendel markieren sogenannte „Injizierungspunkte“ an denen die Person auf eine Kante in der Netzwerktopologie gesetzt wird. Mit den in hellgrün markierten Status werden die entsprechenden Meilensteine gesetzt, auf die im Folgenden noch eingegangen wird. Die gelben Status markieren lediglich Prozessstationen, es werden an dieser Stelle keine Meilensteine protokolliert. Erreicht die Person zur passenden Zeit (der Ablegezeit des Schiffes) den Pier, kann sie das Schiff betreten und erreicht über die blauen Status den finalen Zustand. Kommt es zu einer Störung und erreicht die Person das Schiff nicht, wird der Zustand *Interruption* generiert und über den roten Status wird der finale Zustand erreicht, der mit der „Interruption of Cut of Time“ gleichzusetzen ist. In der Abbildung hat die Person den Status *Passenger_at_Shuttle_Terminal*, der besagt, dass diese Person am Terminal-Ausgang auf den Shuttle-Bus zum Pier wartet. Rechts oben sind die erreichten Meilensteine in fortlaufenden Minuten ab 0:00 Uhr dargestellt. Bisher nicht erreichte Meilensteine haben den Wert 0 (Der Meilenstein LAPT hat in diesem Fall den Wert 300, was 5:00 Uhr entspricht.). Diese Meilensteine werden zur Berechnung der Key Performance Indikatoren direkt in der Simulation verwendet, welche im nächsten Kapitel vorgestellt und beschrieben werden.

3 MANAGEMENT UND KPI'S

Zur Bestimmung und Bewertung der Gesamtsimulation werden Key Performance Indikatoren (KPIs) bestimmt. Dabei werden jedem Agenten einzelne KPIs zugewiesen. Unter Agenten werden Passagiere aber auch Frachtcontainer oder einzelne LKWs, die komplett auf eine Fähre fahren, verstanden. Die Berechnung der KPIs erfolgt auf Basis der beschriebenen Meilensteine, die den Start- und Endpunkt eines Prozesses im Umschlagmanagement definieren.

3.1 MEILENSTEINE

Meilensteine teilen den gesamten Umschlagsprozess in einzelne Abschnitte mit jeweils einem Start- und Endpunkt. Für die Passagierprozesse am Hafen wurden die in Tabelle 5 dargestellten Meilensteine definiert.

Meilenstein	Bedeutung
LAPT – Landside Agent at Port Time	Agent hat das Hafengelände (landseitig) erreicht. Das kann zum Beispiel der Bahnhof oder Parkplatz sein.
LCPT – Landside Checked at Port Time	Agent wurde auf dem Hafengelände registriert.
OAPT – Outbound Agent at Port Time	Agent hat das Terminal erreicht.
OACT – Outbound Agent at Check In Time	Agent bereit zur Registrierung.
OCCT – Outbound Checked at Check In Time	Agent wurde registriert.
OAST – Outbound Agent at Security Time	Agent bereit zur (Sicherheits-)Überprüfung.
OCST – Outbound Checked at Security Time	Agent wurde überprüft
OCPT – Outbound Checked at Port Time	Agent hat die Prozesse am Hafenterminal abgeschlossen.
OABT – Outbound Agent at Bus Stop Time	(optional) Agent hat die Haltestelle für den Shuttlebus erreicht.
OCBT – Outbound Checked at Bus Stop Time	(optional) Agent hat den Shuttlebus betreten.
OAGT – Outbound Agent at Pier Time	Agent ist am Pier angekommen.
OCGT – Outbound Checked at Pier Time	Agent hat das Schiff betreten.

Tabelle 5: Meilensteine

So bedeutet zum Beispiel der Meilenstein OAGT (Outbound Agent at Gate (Pier/Plattform) Time), dass der Agent am Pier bereitsteht. Die Bestimmung und Benennung der Meilensteine orientiert sich an

dem aus den Projekten *Optimode.net* und *Transition* [5] bekannten Schema: Der erste Buchstabe definiert die Modalität des Verkehrsträgers, der zweite Buchstabe den Prozessstatus und der dritte Buchstabe zeigt den eigentlichen Prozess an. Der letzte Buchstabe definiert den Wertebereich des Meilensteins.

3.2 KEY PERFORMANCE INDIKATOREN (KPI)

Setzt man diese Meilensteine in Relation zueinander, lassen sich daraus Indikatoren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit ermitteln. Es kann unter anderem die Dauer eines Prozesses durch den Start- und Endpunkt definiert werden. Nimmt man dazu zum Beispiel als Meilenstein den LAPT (Landside Agent at Platform Time), der den Zeitpunkt beschreibt, wann der Agent am (Güter-)Bahnhof des Hafens eingetroffen ist, kann man die Verweilzeit (Lead-Time) des Agenten bestimmen, diese Zeit entspricht der Differenz von SAGT und LAPT. Tabelle 6 zeigt die zu erfassenden KPIs und deren Berechnungsvorschrift auf Basis von Meilensteinen und wie sie sich mathematisch berechnen lassen.

Name	Beschreibung	Berechnung
Umschlaggeschwindigkeit		Berechnet sich aus den An- und Ablege Zeiten der Schiffe dividiert durch die Mengenangabe der Fracht $\rightarrow \frac{\max[OCGT] - \min[OCPT]}{\text{count}(Agents)}$
Container Dwell Time (CDT)	Durchlaufzeit Container. Wie lange verweilt ein Container auf dem Hafengelände?	(Container wird vom Stellplatz verladen) – (Container wird am Stellplatz abgestellt) $\rightarrow [SCCT - SCPT]$
Truck Visit Time (TVT)	Misst die Länge der Zeit, die ein LKW braucht um einen Container auf- oder abzuladen	(LKW verlässt das Hafengelände) – (LKW betritt das Hafengelände) \rightarrow Bei RoRo: $[SCGT - LATI]$
Gate moves	Indikator für Ein- und Ausfahrten aus dem Hafen	$\text{count}(ATB)$ und $\text{count}(ATD)$ über Betrachtungszeitraum
Interruption of Cut of Date (Fracht)	Kann der finale Zeitpunkt für das Eintreffen der Fracht nicht gehalten werden? (Vgl. Boarding Score)	Berechnung ist vergleichbar mit der Bestimmung der „chain_broken“ aus Transition $\rightarrow OAPT > [(ATD - X) \geq \text{Cut_of_Date}]$
Boarding Score (Passagiere)	Erreichen die Passagiere rechtzeitig zum gegebenen Ablegezeitpunkt den Pier?	Berechnung ist vergleichbar mit der Bestimmung der „chain_broken“ aus Transition $\rightarrow OAPT > [(ATD - X) \geq \text{Cut_of_Date}]$
Lead Time (outbound)	Durchlaufzeit für Personen (vgl. CDT). Betrifft je nach Hafen Fähren und Kreuzfahrtschiffe.	(Person ist zum Einsteigen bereit - „Ready for Boarding) – (Person betritt Terminal) $\rightarrow [OAGT - LAPT]$
Lead Time (inbound)	Durchlaufzeit für Personen (vgl. CDT). Betrifft je nach Hafen Auto, Bus und Zug.	(Person steht am (Bus)-Bahnhof) – (Person verlässt Schiff) $\rightarrow [LAPT - IAGT]$

Tabelle 6: KPI Beschreibung und Berechnung (Meilensteine aus [9])

Die KPIs können damit für jeden einzelnen Agenten aus der Gesamtsimulation ermittelt werden. Durch Aggregation der KPIs aller Agenten können entsprechende Indikatoren für das gesamte System oder auch spezielle Teilbereiche sowie zeitliche Dimensionierungen erstellt werden.

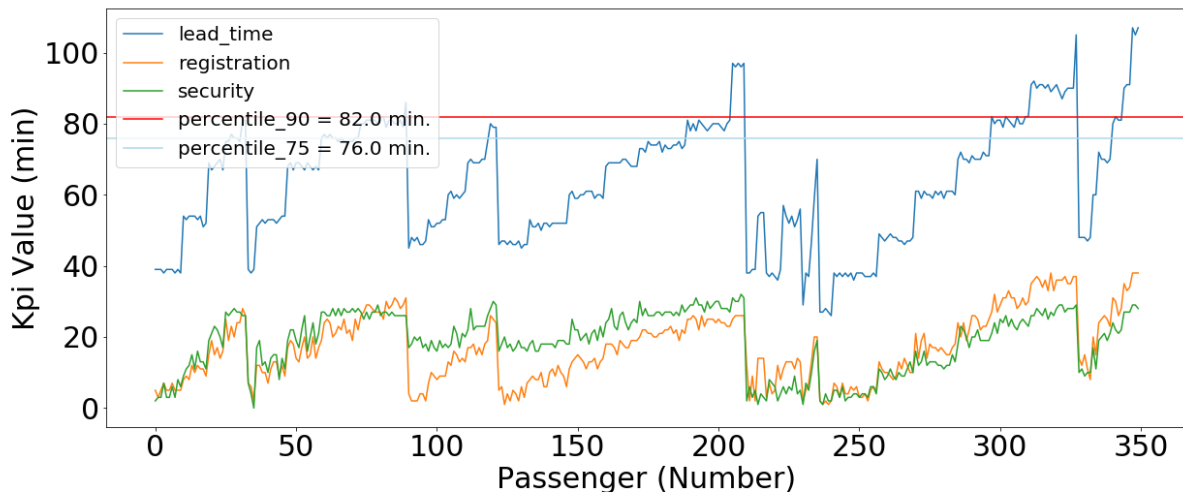


Abbildung 5: Darstellung des KPIs Lead Time

Abbildung 5 zeigt die berechneten Werte des KPIs „Lead Time (outbound)“ aller Passagiere und beschreibt die Durchlaufzeit vom Betreten des Terminals bis zum Einchecken auf der Fähre. Dabei liegt die Durchlaufzeit der Personen zwischen 30 und 85 Minuten, wobei 90% nicht länger als 82 und 75 Personen weniger als 76 Minuten brauchen. Anhand der Verläufe der einzelnen Graphen ist gut zu erkennen, wie die Durchlaufzeit der Passagiere zunimmt und bis zum Ablegen des Schiffes ein lokales Maximum erreicht wird. Im Anschluss kommt es zur Zurücksetzung der Werte für die Durchlaufzeit, um dann wieder bis zum nächsten Ablegen zu steigen. In grün und orange ist die „Lead Time“ auf die beiden Prozesse der Registrierung und Sicherheitsüberprüfung angegeben, die erwartungsgemäß beide eine ähnliche Charakteristik wie die gesamte Dauer aufweisen.

3.3 MANAGEMENT

Zur Unterstützung des Managements werden die KPIs der Agenten ausgewertet und geben Auskunft über den Zustand des gesamten Systems. Der Input der Passagierdaten erfolgt dabei im direkten Austausch mit SUMO und AnyLogic. Erreichen die Passagiere/Objekte eine bestimmte Position in der SUMO-Simulation, so werden sie an die Passagiersimulation übergeben.

id	transport_type	transport_name	src_location	dst_location	scheduled_dep	scheduled_arr
1	ship	ferry_wharf3_URD	7308	7259	20.09.2021 18:45	20.09.2021 23:59
2	ship	ferry_wharf4_FINNTIDE	7302	7282	20.09.2021 13:28	20.09.2021 13:33
27	train	train1	7293	7295	20.09.2021 14:00	20.09.2021 14:02
28	train	train2	7294	7293	20.09.2021 15:00	20.09.2021 17:00
2598	person	passenger_wharf7_PETERPAN_on_3	7271	3040	20.09.2021 05:45	20.09.2021 07:10
2599	person	passenger_wharf7_PETERPAN_on_30	7274	7272	20.09.2021 05:38	20.09.2021 05:40
5867	container	container_parkingArea_train1_5	7293	7295	20.09.2021 11:28	20.09.2021 14:02
5868	container	container_parkingArea_train1_6	7277	7278	20.09.2021 11:06	20.09.2021 11:26

Tabelle 7: Schnittstellentabelle - sumo_transport

Tabelle 7 zeigt einen Ausschnitt der Schnittstellentabelle sumo_transport zwischen der in Kapitel 2.3 beschriebenen vehikelbasierten Simulation sowie der Passagiersimulation als Input zur Bestimmung der Meilensteine und der KPIs (siehe Kapitel 3). Sie enthält die in Tabelle 1 beschriebenen Daten. Entsprechend der Ankunftszeiten werden die Agenten in der Passagiersimulation erzeugt und durchlaufen die in Abbildung 4 dargestellten Prozesse.

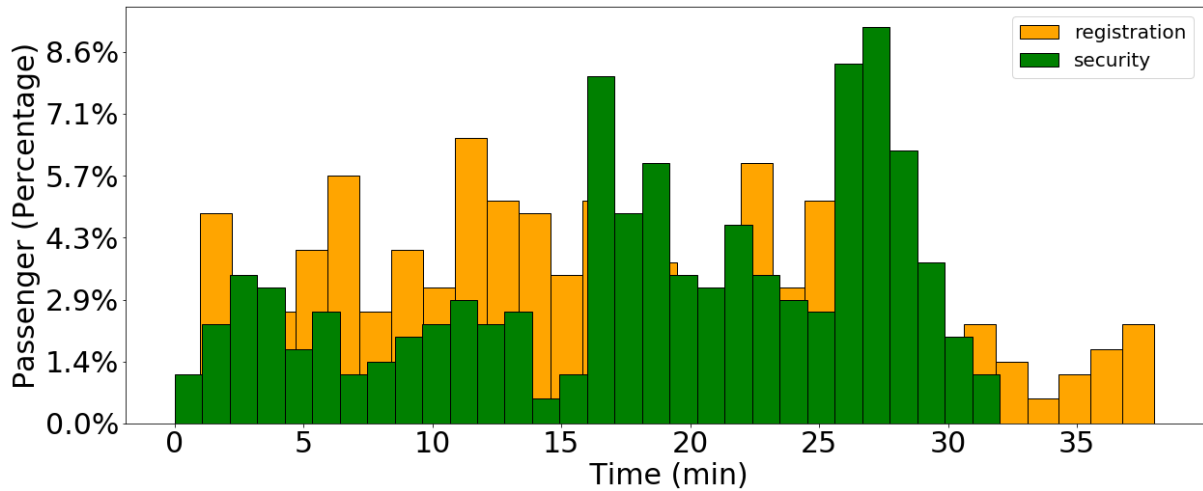


Abbildung 6 : Prozessdauer

Neben den personenbezogenen Key Performance Indikatoren können auch Prozess KPIs bestimmt werden, die Auskunft darüber geben, wie die Prozessdauern einzelner Stellen und Gruppierungen über den Betrachtungszeitraum sind. So zeigt Abbildung 6 die Verteilung der Verweilzeiten an der Registrierung und der Sicherheitsüberprüfung über den gesamten Betrachtungszeitraum an. Während die Dauer bei der Registrierung relativ gleich bis zum Maximum von 37 Minuten verteilt ist, liegt bei der Sicherheitsüberprüfung der Schwerpunkt der Verweilzeit für die Passagiere zwischen 17 und 27 Minuten.

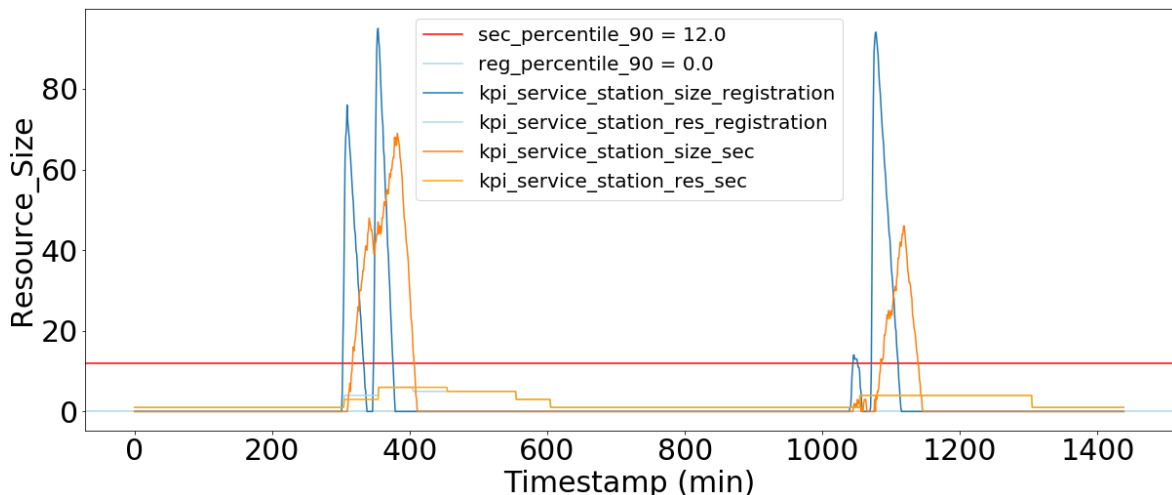


Abbildung 7: Auslastung und Bereitstellung der Ressourcen

Abbildung 7 stellt die Auslastung der Ressourcen im Vergleich zur Ressourcenbereitstellung (geöffnete Bedienstellen) über die Zeit dar. Die zwei Peaks der Ankunftszeiten der Passagiere sind gut zu erkennen. Daran ausgerichtet ist die Ressourcenbereitstellung, für die ein maximaler Wert von 6 Bedienstellen, sowohl für die Registrierung als auch für die Sicherheitsüberprüfung ermittelt wurde.

Es ist davon auszugehen, dass bei einer breiteren Verteilung der Passagierankünfte ein geringeres Maximum bestimmt werden kann. Damit zeigt die Kopplung der Simulationen deutlich, wie sich verkehrliche Veränderungen auf das gesamte System auswirken, indem deren Auswirkungen direkt kenntlich gemacht werden. Ebenso können mögliche Lösungsansätze wie zum Beispiel die Bereitstellung zusätzlicher Ressourcen direkt als Eingangsparameter implementiert werden, das Ergebnis einer solchen Entscheidung stände umgehend zur Verfügung.

4 FAZIT UND AUSBLICK

Es wurde gezeigt, wie die einzelnen Simulationskomponenten zu einem gemeinsamen intermodalen System über eine Datenbank gekoppelt wurden. Dabei wurden ebenfalls die einzelnen Simulationen mit AnyLogic und SUMO und deren Szenarien vorgestellt. Mit dem simulierten Gesamtsystem können wichtige Meilensteine generiert werden, aus denen sich wiederum KPIs und Bewertungsindikatoren berechnen lassen. Veränderungen im Ablauf können eingespielt und deren Auswirkungen erfasst werden. Das Resultat getroffener Entscheidungen wiederum kann direkt erfasst werden.

Im Folgeprojekt, genannt *FuturePorts*, wird die Entwicklung eines Digital Twins fortgesetzt und die Erfassung der Meilensteine soll direkt aus realen Systemen erfolgen, die an einem Seehafen installiert werden, um dann die KPIs zu berechnen. Es wird erwartet, dass sich so die Leistungsfähigkeit von intermodalen Seehäfen besser bewertbar machen lässt und sich so eine Steigerung der Leistungsfähigkeit ergibt.

LITERATUR

- [1] I4Port, unter: <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/i4port-haefen-werden-zu-intelligenten-und-informativen-knotenpunkten> (abgerufen am 27.07.2021)
- [2] Jung, Martin und Rudolph, Florian und Claßen, Axel B. und Pick, Andreas und Noyer, Ulf (2018) SIMULATING A MULTI-AIRPORT REGION TO FOSTER INDIVIDUAL DOOR-TO-DOOR TRAVEL. In: *2017 Winter Simulation Conference, WSC 2017*, Seiten 2518-2529. Omnipress. Winter Simulation Conference, 3.-6. Dez. 2017, Las Vegas, USA. ISBN 978-153863428-8. ISSN 0891-7736
- [3] Noyer, Ulf und Rudolph, Florian und Jung, Martin (2018) Simulating a multi-airport region on different abstraction levels by coupling several simulations. *SUMO User Conference 2018*, 14.-16. Mai 2018, Berlin. ISSN 2516-2330
- [4] Grunewald, Erik und Rudolph, Florian (2020) Intermodal connection management with passengers' trajectories. Transport Research Arena 2020 (Conference cancelled), 27.-30. Apr. 2020, Helsinki, Finnland.
- [5] Engler, Evelin und Banyś, Paweł und Grunewald, Erik und Gewies, Stefan (2018) TRAJECTORY-BASED MULTIMODAL TRANSPORT MANAGEMENT FOR RESILIENT TRANSPORTATION. *Transport Problems*, 2018 (1), Seiten 81-96. The Silesian University of Technology, Faculty of Transport. ISBN 1896-0596. ISSN 1896-0596. Volltext nicht frei.
- [6] Pablo Alvarez Lopez, Michael Behrisch, Laura Bieker-Walz, Jakob Erdmann, Yun-Pang Flötteröd, Robert Hilbrich, Leonhard Lücken, Johannes Rummel, Peter Wagner, and Evamarie Wießner. "[Microscopic Traffic Simulation using SUMO](#)". IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), 2018.
- [7] OpenStreetMap, unter: <https://www.openstreetmap.de/> (abgerufen am 14.07.2021)
- [8] LHG, Terminal Skaninavienkai, unter: <https://www.lhg.com/index.php?id=19> (abgerufen am 14.07.2021)
- [9] <https://www.hafen-hamburg.de/de/news/hhla-containerterminals-erhalten-container-terminal-quality-indicator-ctqi---34358> (abgerufen am 07.09.2021)
- [10] Anylogic unter: <https://www.anylogic.com> (abgerufen am 09.09.2021)
- [11] Optimode.net unter: <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/optimodenet> (abgerufen am 09.09.2021)