

# **Entwicklung eines anwendungsorientierten Bausteinkastens zur Simulation kombinierter Transportmodelle mittels autonomer Fahrzeuge**

## ***Development of an Application-Based Object Library for the Simulation of Combined Transport Systems Using Shared Autonomous Vehicles***

Johannes Staritz, Marvin Auf der Landwehr, Maik Trott, Christoph von Viebahn,  
Hochschule Hannover, Hannover (Germany), Johannes.Staritz@hs-hannover.de,  
marvin.auf-der-landwehr@hs-hannover.de, maik.trott@hs-hannover.de, christoph-  
von.viebahn@hs-hannover.de

**Abstract:** This paper presents an approach to develop region-specific simulation models for quantifying and evaluating the traffic-related, environmental, and economic implications of combined passenger and freight transportation via shared autonomous vehicles (SAV). Based on a broad literature review, conceptual peculiarities, interdependencies and characteristics were derived and transferred into a conferrable, agent-based object library. Finally, to ensure its usefulness and credibility, an initial evaluation of the object library was carried out by developing and visually validating a simulation-prototype for a rural area in Hanover, Germany.

## **1 Einleitung**

Mobilität und Logistik stoßen angesichts gesamtgesellschaftlicher Herausforderungen wie dem Klimawandel, dem demografischen Wandel oder der zunehmenden Urbanisierung sowohl in urbanen als auch in ruralen Gebieten an ihre Grenzen (Moerner 2019; Rodrigue et al. 2020). Angesichts der mit diesen Entwicklungen einhergehenden Implikationen für Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, gilt es, neueste technische Errungenschaften intelligent zu nutzen und innovative Ansätze für Mobilitäts- und Transportlösungen zu erschließen. Zur Lösung mobilitätsbezogener Herausforderungen entstehen seit geraumer Zeit verschiedene Konzeptansätze, die sich sogenannter geteilter autonomer Fahrzeuge (Shared Autonomous Vehicle, SAV) bedienen (Narayanan et al. 2020). Aufgrund ihrer einzigartigen Betriebscharakteristika versprechen autonome Fahrzeuge hohe Effizienzgewinne, die sich sowohl in wirtschaftlichen (z. B. Profit) als auch gesellschaftlichen (z. B. Verkehrsbelastung) Zielgrößen widerspiegeln und entsprechend nicht nur in mobilitätsbezogenen Lösungsansätzen Betrachtung finden, sondern auch im Bereich der Gütertransporte (Monios und Bergqvist 2019; Yu et al. 2020). Trotz der evidenten,

individuellen Potentiale wurden kombinierte Transportmodelle mittels geteilter autonomer Fahrzeuge bislang jedoch selten untersucht (Beirigo et al. 2018; Meyer und Shaheen 2017). Solche Modelle kombinieren Mobilität und Logistik und stellen durch den simultanen Transport von Gütern und Personen einen vielversprechenden und potenziell von der jeweiligen Raumtopologie unabhängigen Ansatz zur Lösung akuter Probleme dar. Durch diverse Spezifika der betroffenen Akteure, Handlungsfelder und Betriebsstrukturen wird in einem solchem System jedoch ein hohes Maß an Wechselwirkungen, Zielkonflikten und konzeptionellem Planungsbedarf verursacht. Aufgrund dieser Komplexität auf Konzeptions- und Umsetzungsebene eignen sich daher insbesondere dynamische Computersimulationen zur Abbildung und Analyse solcher Konzepte (Auf der Landwehr et al. 2020). Simulationen werden häufig bei logistischen und mobilitätsbezogenen Fragestellungen und Systemen eingesetzt, da sie die Möglichkeit bieten, real nicht existente Zusammenhänge, Interdependenzen mit analytisch nicht abbildbarer Komplexität, mehrere Gestaltungsvarianten eines Systems sowie das langfristige Systemverhalten zu analysieren (Wenzel 2018). Hierdurch können sowohl potenzielle, konzeptinduzierte Fehlerquellen frühzeitig identifiziert als auch Investitionsbedarfe bspw. in Flotte und Infrastruktur, adäquat abgeschätzt werden.

## 2 Problemstellung

Mobilitätskonzepte, die SAV einsetzen, verbinden meist die Komponenten Nachfrage, Routing, Flotte, Fahrzeugzuordnung, Fahrzeugneuverteilung und elektrische Flottenbeladung (Narayanan et al. 2020). Konzeptionelle Überlegungen für einen kombinierten Transport aus Paketen (Logistikaufträgen) und Personen (Mobilitätsaufträgen) legen nahe, die Komponenten Distributionszentren bzw. Depots sowie Halte- bzw. Auslieferungspunkte zu ergänzen. In Abhängigkeit vom jeweiligen Transportmodell und dessen Untersuchungsrahmen treten die genannten Komponenten in variierenden Ausprägungen auf, wodurch sich die zugrundeliegenden Annahmen der jeweiligen Konzepte teilweise stark unterscheiden (Narayanan et al. 2020). Da sich diese Annahmen für gewöhnlich auf die jeweiligen, im beispielhaften Anwendungsgebiet vorliegenden Rahmenbedingungen stützen bzw. sich auf Erhebungsdaten dieser Gebiete beziehen, sind die einzelnen (Simulations-) Szenarien jedoch nicht mit davon abweichenden Bedingungen wie verändertem Nachfrageniveau, unterschiedlichen räumlichen Strukturen oder einem verändertem Kundenverhalten wie bspw. höherer oder niedrigerer Akzeptanz von Wartezeit kompatibel. Aufgrund fehlender Referenzmodelle mangelt es bei Konzeption und Simulation außerdem häufig an geeigneten Orientierungspunkten (Hyland und Mahmassani 2017). Bei simulationsgestützten Ansätzen zeigt sich in der Praxis, dass konzeptionell komplexe Konstrukte, zu denen auch kombinierte Transportmodelle zählen, oft nur ineffizient oder in Teilsegmenten in den Modellen abgebildet werden (Clausen et al. 2019).

## 3 Lösungsansatz

Angesichts mangelnder Referenzmodelle und um die evaluative Übertragbarkeit zwischen verschiedenen Raumstrukturen zu gewährleisten, besteht das Ziel dieser Arbeit darin, einen anwendungsorientierten Bausteinkasten zur Simulation kombinierter Transportmodelle mittels SAV zu konzipieren und dessen

Anwendbarkeit an einem beispielhaften Simulationsprototypen zu demonstrieren. Aufgrund des breiten Methodenspektrums und des Bedarfs zur Implementierung mikroskopischer, nur mittelbar mit dem Verkehr zusammenhängender Zielgrößen (z. B. Profitabilität, Kosten) erfolgt die Umsetzung der Bausteine in der Software AnyLogic (v. 8.7.2) und nicht in einem spezifischen Verkehrssimulationstool.

Konkret ergeben sich eine Reihe spezifischer Anforderungen für ein entsprechendes Simulationsmodell. So sollten die einzelnen Elemente sowohl einfach in Bedienbarkeit und Handhabung sein, als auch schnell erstellt und flexibel an veränderte Rahmenbedingungen und Datenlagen angepasst werden können. Die Nutzung der bereitgestellten, standardisierten Bausteine sollte außerdem Einstiegshürden senken. Zuletzt müssen die Simulationsergebnisse sowohl aussagefähig als auch vergleichbar sein (Wenzel 2018). Ein vielversprechender Lösungsansatz für die geschilderte Problemstellung ist die Entwicklung von Simulationsbausteinen, deren Eingangsparameter variiert werden können, sodass Abweichungen im Rahmen des kombinierten Transportmodells einfach darstellbar sind. Nach Verbraeck et al. (2002) lassen sich Simulationsbausteine als eigenständige, interoperable, wiederverwendbare und austauschbare Einheit definieren, die ihre interne Struktur kapseln und nützliche Dienste oder Funktionen für ihre Umgebung über genau definierte Schnittstellen bereitstellen. Um eine zielgerichtete, zweckdienliche Entwicklung von Simulationsbausteinen zu gewährleisten, muss zunächst der inhaltliche Rahmen des zugrundeliegenden Einsatzgebietes eruiert werden (Verbraeck und Valentin 2008). Die getroffenen Annahmen und Ausprägungen bilden die Grundlage für die spätere Simulationsanwendung und werden deshalb nachfolgend im Detail beschrieben. Dies dient zum einen dazu, ein Verständnis der Funktionsweise des kombinierten Transportkonzepts zu gewährleisten und zum anderen, um zu verdeutlichen welche Eingangsparameter für die Bausteine von Nöten bzw. an welchen Stellen diese zu implementieren sind.

Beim Fahrzeugrouting beziehen sich die relevanten konzeptionellen Überlegungen zum einen auf die Zeit, die ein Kunde bereit ist an der Abholhaltestelle auf ein SAV zu warten. Zum anderen besteht im Rahmen der Fahrzeugführung die Möglichkeit sensible Zonen (z. B. Naturschutzgebiete, Baustellen), welche sowohl in ländlichen als auch in urbanen Räumen existieren, vor dem Hintergrund ökonomischer, ökologischer oder sozialer Zielaspekte zu umfahren (Narayanan et al. 2020). In Bezug auf die Kundenwartezeiten legen qualitative Erhebungen nahe (z. B. Martinez und Viegas 2017), dass der Kunde bereit ist, an der Abholhaltestelle etwa fünf Minuten auf ein SAV zu warten. Die herangezogenen Wartezeiten sind variabel und können dynamisch in den Simulationsbausteinen angepasst werden. Hierbei ist jedoch immer die Fahrtzeit zwischen Depot und der am weitest entfernten Haltestelle zu beachten, die über einen bidirektionalen A\* Punkt-zu-Punkt Distanzalgorithmus automatisch als Mindestanforderung an die maximale Wartezeit bestimmt wird.

Das hier vorgestellte Konzept sieht zentrale Depots vor, weshalb die Flotte zu Beginn der Simulation dort initialisiert wird (Ma et al. 2017). Die Depots selbst werden als Black-Box mit uneingeschränkter Verlade- und Lagerkapazität für Sendungselemente (z. B. Pakete) modelliert. Die Anzahl (Integer) der zentralen Depots sowie deren geografische Standorte (Koordinaten) können vom Anwender frei gewählt werden. Während des operativen Betriebes wird von einer Zielhaltestelle direkt die Starthaltestelle des nächsten Auftrages angefahren. Zweimal täglich und außerhalb der Hauptverkehrszeiten muss für Reinigung, Reparatur, Wartung und Beladung mit

Paketen für Logistikaufträge in das Depot zurückgekehrt werden (Hyland und Mahmassani 2017). Fahrzeuge, die sich in einem vom Anwender spezifizierten Radius vom Depot befinden, können optional innerhalb dieses Radius immer über das Depot geleitet werden, um weitere Logistiksendungen aufzunehmen und im weiteren Fahrverlauf zuzustellen. Die Flottengröße, also die im System des Szenarios befindliche Fahrzeuganzahl kann dynamisch über das Serviceversprechen, das gegenüber den Kunden gegeben wird (z. B. Wartezeiten), bestimmt werden oder vom Anwender für die Durchführung verschiedener Was-wäre-wenn-Analysen und Optimierungsansätze parametrisch gewählt werden.

Damit kombinierter Transport gewährleistet wird, erfolgt der Transport von Mobilitäts- und Logistikaufträgen simultan im selben SAV (Beirigo et al. 2018). Sowohl die Passagierkapazität (Mobilitätsaufträge) als auch Lagerkapazität (Logistikaufträge) der Fahrzeuge hängt primär von der Fahrzeugkonzeption und der Beschaffenheit der zu transportierenden Güter ab (Narayanan et al. 2020). Um ein entsprechend vielfältiges Einsatzspektrum zu gewährleisten, können dieses Parameter innerhalb der Bausteine frei parametrisiert werden. Die Zuordnung von Mobilitäts- und Logistikaufträgen zu einem SAV lässt sich bei Modellen, die unter Verwendung des Bausteinkastens implementiert werden, auf drei verschiedene Weisen initiieren (vgl., Narayanan et al. 2020). So kann die Neuordnung je nach Untersuchungskontext und Anwenderpräferenz gemäß eines *k*-Nearest-Neighbour Algorithmus\* erfolgen (vgl., Dudani 1976), bei dem die Fahrzeuge basierend auf einer Distanzmatrix (wird bei Initialisierung der Simulation berechnet) immer dem nächstgelegenen Mobilitätsauftrag zugeordnet werden. Die zweite Auswahlmöglichkeit impliziert die optimierte Zuordnung auf Basis eines Reinforcement Learning Algorithmus\* (vgl., Zhang et al. 2020), bei dem die Fahrzeugagenten im Routingnetzwerk vor jedem Simulationsdurchlauf auf Basis der prognostizierten Nachfrage auf die Minimierung von Strecken und Wartezeiten trainiert werden. Die dritte Möglichkeit bietet ein lokales meta-heuristisches Suchverfahren (vgl., Groër et al. 2010), bei dem je nach Anwenderspezifikation aus einer Reihe von generierten Zuordnungslösungen die mit der (1) kürzesten Fahrtzeit oder (2) kürzesten Fahrtstrecke für den entsprechenden Auftrag gewählt wird. Angesichts stark variierender Effizienz verschiedener Routinglösungen unter veränderten Kontextbedingungen (z. B. Hyland und Mahmassani 2017) und im Sinne einer guten Übertragbarkeit des Bausteinkastens, werden dem Anwender hier drei unterschiedliche Routingansätze zur Auswahl gestellt. Neu- oder Umverteilung der SAV im Untersuchungsgebiet wird konzeptionell dann notwendig, wenn sich aufgrund unterschiedlicher Nachfrageschwerpunkte die Fahrzeuge in bestimmten Gebieten sammeln und es dadurch unmöglich wird, Mobilitätsaufträge innerhalb der vorgegebenen Servicezeiten zu bedienen (Brendel et al. 2017). Die Neuverteilung der SAV erhöht im Allgemeinen zwar die insgesamt im System gefahrene Strecke, verbessert jedoch auch die Reaktionszeiten auf Mobilitätsaufträge und somit die Wirtschaftlichkeit des Konzepts (Fagnant und Kockelman 2014). Der hier vorgestellte Bausteinkasten sieht eine Umverteilung der SAV dann vor, wenn sich die Fahrzeuge entweder an einer Haltestelle befinden, an der nach den Nachfragedaten innerhalb eines Zeitraums von 60 Minuten keine weiteren Aufträge zu erwarten sind oder wenn es im Untersuchungsgebiet Haltestellen gibt, die aufgrund der ungleichmäßigen Fahrzeugverteilung nicht innerhalb der angestrebten Servicezeiten bedient werden können. Die Umverteilung ist für das Konzept auch dahingehend von hoher Relevanz

als das sie auch dafür genutzt wird SAV für die Aufnahme von Paketen zum zentralen Depot zu führen.

Zur elektrischen Beladung der Fahrzeuge legen bestehende Untersuchungen nahe (z. B. Brendel et al. 2017; Narayanan et al. 2020), eine Systematik zu nutzen, bei der die Aufladung direkt an einer Haltestelle oder einem Depot stattfindet, sobald die Wartezeit des Fahrzeuges dort einen Zeitraum von fünf Minuten übersteigt. Die Ladeinfrastruktur wird in den Bausteinen in beiden Fällen ebenfalls als Black-Box modelliert. Der Ladezyklus beginnt nach Ablauf der fünf Minuten und endet sobald ein neuer Auftrag eingeht. Fällt der Ladestand eines SAV nach Beendigung eines Mobilitätsauftrages unter einem vom Simulationsnutzer festgesetzten Prozentsatz (Min. 10 %, Max. 80 %), wird das Fahrzeug als nicht mehr verfügbar angesehen und kehrt zum nächstgelegenen Ladepunkt zurück. Ausgehend von bisherigen Forschungsarbeiten beträgt die Reichweite der elektrifizierten SAV 175 Kilometer mit einer durchschnittlichen Wiederaufladezeit von 30 Minuten (Chen et al. 2016; Martinez und Viegas 2017). Der letzte Bestandteil des Transportmodells sind die Halte- bzw. Auslieferungspunkte für Personen und Logistiksendungen. Diese können je nach Anwendungskontext frei vom Anwender verteilt werden (Moerner 2019). Ergänzend wird davon ausgegangen, dass zusätzlich zur Infrastruktur für die elektrische Beladung der Flotte auch geeignete Vorrichtungen für Entladung und Zwischenlagerung der Pakete sowie für einen komfortablen Zu- und Ausstieg der Passagiere vorhanden sind. Diese Haltestelle können vom Anwender selbst über die entsprechenden Koordinaten spezifiziert oder automatisch vom Simulationssystem festgelegt werden. In letzterem Fall muss der Anwender lediglich die gewünschte Anzahl an Haltestellen vorgeben, sodass diese bei der Simulationsinitialisierung über das Streckennetz des Untersuchungsgebietes gleichverteilt wird. Die parametrisierte Mobilitätsnachfrage wird über die Entfernung der Haltestellen zu den individuellen Nachfragelokationen (distanzbasierter A\* Punkt-zu-Punkt Algorithmus) in individuelle Nachfrageerwartungswerte für jede Haltestelle überführt und dient als Grundlage für die Routing- und Umverteilungsprozesse.

## 4 Umsetzung und Demonstration

Zur Umsetzung des bausteinbasierten Lösungsansatzes wurde in Anlehnung an die Systematik des BPMN 2.0-Modells (Allweyer 2016) zunächst ein Gesamtprozess (s. Abb. 1) konzipiert, der die zuvor genannten Konzeptionsbestandteile modelliert. Als Kernelemente dieses Gesamtprozesses wurden drei interdependente Subprozesse identifiziert, die als Bausteine dargestellt und in dem Bausteinkasten zusammengefasst werden. Zu den wichtigsten Eigenschaften eines Bausteins zählt, dass er übertragbar bzw. wiederverwendbar sein muss (Verbraeck und Valentin 2008). Daher wurden die Subprozesse so konzipiert, dass sie sowohl unter gleichen Rahmenbedingungen als auch unter veränderten Annahmen auf andere kombinierte Transportmodelle übertragen werden können.

Wie in Abb. 1 dargestellt beginnt der Gesamtprozess mit der Initialisierung der SAV-Flotte am Depot. Anschließend werden Mobilitäts- und Logistikaufträge generiert, die auf der Nachfrage der einzelnen Haltestellen basieren. Dieser Nachfrage wiederum liegen nutzerspezifizierte Mobilitätsdaten zugrunde, aus denen Erwartungswerte gebildet und über eine Liste in das System eingespeist werden. Nächster Prozessschritt ist die Fahrzeugdisposition sowie Zuteilung der Aufträge auf die SAV-

Flotte durch die Haltestellen. Handelt es sich bei einem zugeteilten Auftrag um einen Mobilitätsauftrag, wird das SAV zur Ausgangshaltestelle dieses Auftrags geroutet und der Auftrag bearbeitet. Das Fahrzeug nimmt also an der Starthaltestelle des Auftrags Passagiere auf und bringt diese zur gewünschten Zielhaltestelle. Liegen in dem Quadranten, in der sich das SAV zu diesem Zeitpunkt befindet, keine weiteren Aufträge vor, erfolgt eine Umverteilung der Fahrzeuge in Quadranten mit höherer Nachfrage. Routing und Auftragsbearbeitung finden dann von Neuem statt.

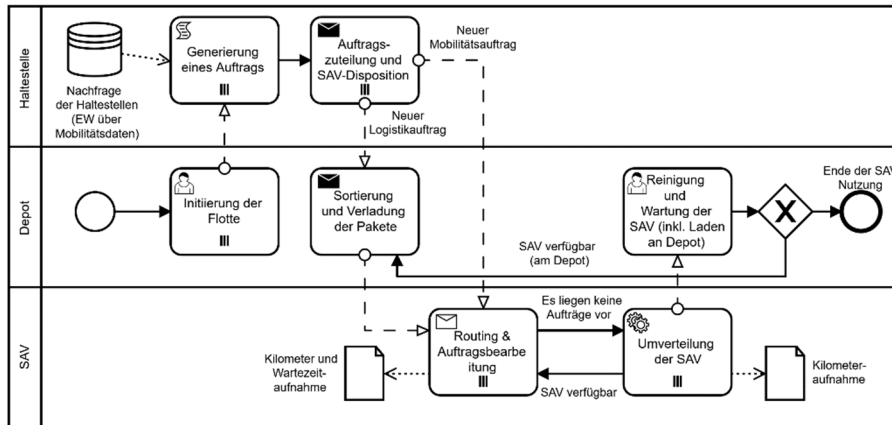


Abbildung 1: Darstellung des Gesamtprozesses in Anlehnung an BPMN 2.0

Zweimal am Tag wird ein SAV nicht umverteilt (zeitgesteuerte Bedingung mit den Parametern Uhrzeit, Auftragslage, Zeit seit letzter Wartung und verbliebenes Sendungsvolumen), sondern stattdessen für Reinigung, Wartung, elektrische Beladung und Sendungsaufnahme zum Depot zurückgeführt. Hier endet die SAV-Nutzung oder es erfolgt die Sortierung und Verladung der Pakete mit anschließender Auslieferung im Rahmen der Auftragsbearbeitung. Handelt es sich bei der anfänglichen Auftragszuteilung um einen Auftrag vom Typ "Logistik", setzt die Sortierung und Verladung der Pakete schon dann ein und die Fracht wird anschließend direkt vom Depot zum Bestimmungsort verbracht. Der Gesamtprozess verfügt über variable Eingangsparameter. Diese gelten über die Grenzen eines Bausteins hinaus und können vom Anwender angepasst werden. Dazu zählen die geografische Spezifikation des Untersuchungsgebietes mittels eines Open Streetmap Netzwerkes, die Anzahl und Größe der Quadranten, in die dieses Gebiet unterteilt ist, die Zahl und ggf. Lokation der Depots und Haltestellen sowie die Kapazität und Geschwindigkeit der SAV. Ebenfalls bausteinübergreifend wirken sich die logistik- und mobilitätsbezogene Nachfrage und die maximalen Kundenwartezeiten aus. Wie der Abb. 1 zu entnehmen ist, beinhaltet der Bausteinkasten sieben Bausteine, von denen nachfolgend beispielhaft die Konzeption und Implementierung des Bausteins *Routing und Auftragsbearbeitung* erläutert wird. Der Subprozess *Routing und Auftragsbearbeitung* beginnt mit der Bedingung, dass das SAV verfügbar ist. Anschließend erfolgt die Prüfung, ob sich das SAV am zentralen Depot oder an einer der Haltestellen befindet. Ist ersteres der Fall, werden Pakete eingeladen, deren Zielhaltestellen alle im selben Quadranten liegen. Die Logistikaufträge werden dabei durch den Erwartungswert (kummulierte Logistknachfrage der Haushalte in

Reichweite einer Haltestelle auf Basis der Daten eines Kourrier-Express-Paket-Dienstleisters) der einzelnen Haltestellen in eine Liste überführt. Anschließend wartet das SAV auf eingehende Mobilitätsaufträge. Befindet sich das Fahrzeug hingegen an einer der Haltestellen, wartet es direkt auf den Eingang von Mobilitätsaufträgen. Sind keine Mobilitätsaufträge vorhanden, wird geprüft, ob der aktuelle Zeitpunkt innerhalb eines Zeitfensters mit hohem Mobilitätsauftragsvolumen liegt, wobei der Schwellenwert für den Erwartungswert zur Abgrenzung von Zeitfenstern mit hohem Volumen über einen Parameter vom Nutzer bestimmt werden kann. Liegt ein Zeitfenster mit Mobilitätsersparungswerten über dem Schwellenwert vor, wird keine Verteilung von Logistikaufträgen vorgenommen, sondern stattdessen weiter auf Mobilitätsaufträge gewartet. Liegt der aktuelle Zeitpunkt jedoch außerhalb eines solchen Zeitfensters, wird geprüft, ob Logistikaufträge vorliegen. Ist dem nicht so, endet der Subprozess. Sind hingegen Logistikaufträge vorhanden, wird das Routingnetzwerk aktualisiert und auf vom Anwender definierte sensible Zonen hin untersucht. Während des darauffolgenden Transports der Pakete zur Zielhaltestelle werden diese sensiblen Zonen dann aufgrund einer dynamischen Routinganpassung umfahren. Ist das Paket ausgeliefert, wartet das SAV erneut auf eingehende Mobilitätsaufträge. Sind während das SAV an Haltestelle oder Depot wartet Mobilitätsaufträge vorhanden bzw. gehen diese ein, wird ebenfalls eine Aktualisierung des Routingnetzwerks hinsichtlich sensibler Zonen vorgenommen. Bei der anschließenden Fahrt zur Starthaltestelle des Mobilitätsauftrags werden diese Zonen dann umgangen. An der nächsten Haltestelle angekommen kommt es dann zu Zu- bzw. Ausstieg der Passagiere. Hat das SAV zusätzlich zu Passagieren auch Sendungen geladen, die für die Haltestelle bestimmt sind an der sich das SAV zu diesem Zeitpunkt befindet, werden auch diese ausgeladen. Nachdem dies geschehen ist, oder für den Fall, dass sich keine Sendungen an Bord befinden, die die aktuelle Haltestelle zum Bestimmungsort haben, wird in den umliegenden Quadranten nach weiteren Mobilitätsaufträgen gesucht, die den gleichen Quadranten wie der soeben zugestiegene Mobilitätsauftrag zum Ziel haben. Sind entsprechende Aufträge vorhanden, wird erneut das Routingnetzwerk aktualisiert und die beschriebenen Prozessschritte wiederholen sich. Liegen in näherer Umgebung hingegen keine Mobilitätsaufträge vor, wird geprüft, ob an Bord des SAV ein weiterer Mobilitätsauftrag befindlich ist. Falls dem so ist, fährt das SAV zur Zielhaltestelle dieses Anschlussauftrags. Ist dort kein Mobilitätsauftrag vorhanden, erfolgt eine Prüfung, ob der aktuelle Zeitpunkt unmittelbar nach einem Zeitfenster mit hohem Mobilitätsaufkommen liegt und ob das Depot bisher maximal einmal pro Tag aufgesucht wurde. Treffen beide Bedingungen zu, ist das SAV nun nicht mehr verfügbar und fährt zum Depot, wo der Subprozess endet. War das SAV bisher jedoch bereits zweimal am selben Tag am Depot oder liegt der aktuelle Zeitpunkt unmittelbar vor oder in einem Hochfrequenzzeitfenster, endet der Subprozess ohne die Fahrt zum Depot und der Subprozess *Umverteilung der SAV* beginnt. Abb. 2 zeigt das Implementierungsbeispiel für den Baustein *Routing und Auftragsbearbeitung* in der Simulationssoftware AnyLogic. Die Bausteine wurden mittels einer agentenbasierten Modellierungsmethodik (ABM) im Rahmen von Verhaltensdiagrammen umgesetzt und weisen an den entsprechenden Schnittstellen wechselseitige Interdependenzen zu anderen relevanten Bausteinen auf (z. B. wird über den in Abb. 2 erkennbaren Zustand „starteUmverteilung“ per Nachrichtenübermittlung das Verhaltensdiagramm des Umverteilungsbausteins initiiert). Die Bausteine wurden in Form Agentenklassen als wiederverwendbare Objektbibliotheken in AnyLogic gespeichert.

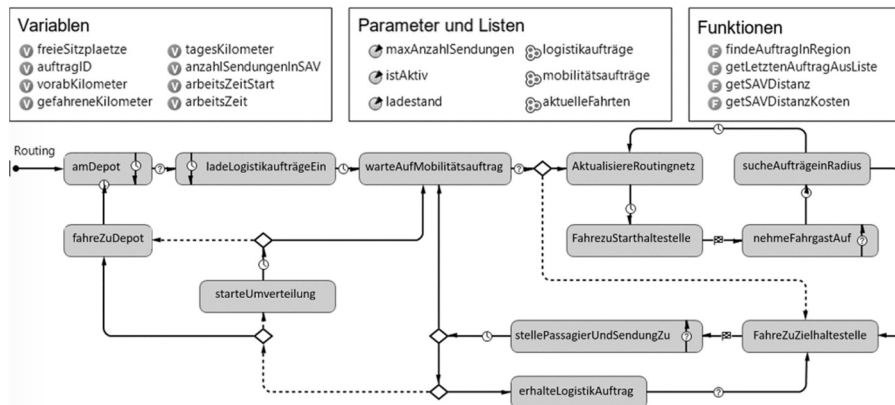


Abbildung 2: Beispiel eines Bausteins für den Auftragsprozess in AnyLogic

Zur Demonstration und Evaluation des Bausteinkastens wurden die Bausteine der vorgestellten Logik des Gesamtprozesses folgend für die Entwicklung eines Simulationsmodells für kombinierte Verkehre im Raum Hannover entwickelt. Einen exemplarischen Ausschnitt aus dem entwickelten Simulationsmodell zeigt Abb. 3.



Abbildung 3: Beispielmodell für kombinierten Verkehr im Raum Hannover

Der angewendeten Modellierungslogik der Simulationsbausteine folgend wurde die Simulation als agentenbasiertes Modell umgesetzt. Auf diese Weisen können die wechselseitigen Abhängigkeiten der einzelnen Systementitäten (z. B. SAV, Passagiere und Sendungen) abgebildet und imitiert werden, wodurch letztendlich die globale Systemdynamik mithilfe von Netzwerkeffekten reproduziert wird, die sich aus den modellierten Agenteninteraktionen ergeben. Dieser Ansatz ist besonders geeignet, um Verhaltensinflüsse und Komponenten mit geografischem Bezug widerzuspiegeln (Heppenstall et al. 2012). Der Hauptvorteil von ABM im Rahmen unserer Studie ist seine immanente Fähigkeit, emergent aufkommende Verhaltensweisen zu erfassen, die von den Eigenschaften der einzelnen Agenten entkoppelt sind und vom Modellierer noch nicht in ihrer Gänze durchdrungen wurden. Dies sichert die Übertragbarkeit der Bausteine.



## 5 Fazit und Ausblick

Die hier vorgestellten Bausteine sowie deren beispielhafte Implementierung in AnyLogic dienen als ein Ansatzpunkt für die simulationsgestützte Darstellung kombinierter, autonomer Transportsysteme mittels geteilter autonomer Fahrzeuge. Es wurde sowohl ein konzeptioneller Rahmen als auch ein Vorschlag für die Simulation solcher Modelle entwickelt. Hiervon profitieren potenziell nicht nur Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, sondern auch Anwendung und Implementierung in der planerischen Praxis. Aufbauend auf den vorliegenden Ergebnissen sind weitere Untersuchungen im Bereich kombinierter Verkehre vorgesehen, die die konzeptionelle und simulationsgestützte Betrachtung des Transportsystems erweitern und bisher nur oberflächlich betrachtete Aspekte vertiefen und kontextabhängig quantifizieren.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich beim Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur (BMVI) für die finanzielle Unterstützung und beim Projektträger TÜV Rheinland für die Betreuung des Projektes „Kombinom“ unter dem Förderkennzeichen FKZ 19F1072B.

## Literatur

- Allweyer, T.: BPMN 2.0: Introduction to the Standard for Business Process Modelling. Norderstedt: Books on Demand 2016.
- Auf der Landwehr, M.; Trott, M.; Viebahn, C. von: Waste of Time and Money? Constructing an Applicability Framework for Organizational Use of Simulation Studies and Digital Twins. In: George, J.F.; Paul, S.; De', R.; Karahanna, E.; Sarker, S.; Oestreicher-Singer, G. (Hrsg.): Proceedings of the 41st International Conference on Information Systems (ICIS), Virtual Conference, 13.-16. Dezember 2020.
- Beirigo, B.; Schulte, F.; Negenborn, R.: Integrating People and Freight Transportation Using Shared Autonomous Vehicles with Compartments. IFAC-PapersOnLine 51 (2018) 9, S. 392–397.
- Brendel, A.B.; Nastjuk, I.; Lichtenberg, S.; Kolbe, L.M.: Adapting Carsharing Vehicle Relocation Strategies for Shared Autonomous Electric Vehicle Services. In: Kim, Y.J.; Agarwal, R.; Lee, J.K. (Hrsg.): Proceedings of the 38<sup>th</sup> International Conference on Information Systems (ICIS), Seoul (South Korea), 10.-13. Dezember 2017.
- Chen, T.D.; Kockelman, K.M.; Hanna, J.P.: Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions. Transportation Research Part A: Policy and Practice 94 (2016), S. 243-254.
- Clausen, U.; Brueggenolte, M.; Kirberg, M.; Besenfelder, C.; Poeting, M.; Gueller, M.: Agent-based simulation in logistics and supply chain research. In: Clausen, U.; Langkau, S.; Kreuz, F. (Hrsg.): Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic: Literature review and analysis: Springer 2019, S. 45–59.
- Dudani, S. A.: The distance-weighted k-nearest-neighbor rule. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 4 (1976), S. 325-327.

- Fagnant, D.J.; Kockelman, K.M.: The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 40 (2014), S. 1–13.
- Groër, C.; Golden, B.; Wasil, E.: A library of local search heuristics for the vehicle routing problem. *Mathematical Programming Computation* 2 (2010), S. 79-101.
- Heppenstall, A.; Crooks, A.; See, L. M.; Batty, M.: *Agent-based models of geographical systems*. Dordrecht: Springer Netherlands; 2012. 760 p.
- Hylland, M. F.; Mahmassani, H.S.: Taxonomy of shared autonomous vehicle fleet management problems to inform future transportation mobility. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2653 (2017), S. 26–34.
- Ma, J.; Li, X.; Zhou, F.; Hao, W.: Designing optimal autonomous vehicle sharing and reservation systems: A linear programming approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 84 (2017), S. 124–141.
- Martinez, L. M.; Viegas, J. M.: Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban mobility system: An agent-based model applied to the city of Lisbon, Portugal. *International Journal of Transportation Science and Technology* 6 (2017) 1, S. 13-27.
- Meyer, G.; Shaheen, S.: *Disrupting Mobility: Impacts of Sharing Economy and Innovative Transportation on Cities*: Springer International Publishing 2017.
- Moerner, M. von: Demand-oriented mobility solutions for rural areas using autonomous vehicles. In: Coppola, P.; Esztergár-Kiss, D. (Hrsg.): *Autonomous Vehicles and Future Mobility*. Amsterdam, Netherlands, Oxford, United Kingdom, Cambridge, United States: Elsevier 2019, S. 43–56.
- Monios, J.; Bergqvist, R.: The transport geography of electric and autonomous vehicles in road freight networks. *Journal of Transport Geography* 80 (2019).
- Narayanan, S.; Chaniotakis, E.; Antoniou, C.: Shared autonomous vehicle services: A comprehensive review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 111 (2020), S. 255–293.
- Rodrigue, J.-P.; Comtois, C.; Slack, B.: *The geography of transport systems*. London, New York: Routledge 2020.
- Verbraeck, A.; Saanen, Y.; Stojanovic, Z.; Valentin, E.; van der Meer, K.; Meijer, A.; Shishkov, B., 2002: What are building blocks? In: Verbraeck, A.; Ajantha Dahanayake (Hrsg.): *Building Blocks For Effective Telematics Application Development And Evaluation*. Delft University of Technology, S. 8–21.
- Verbraeck, A.; Valentin, E.C.: Design guidelines for simulation building blocks. In: 2008 Winter Simulation Conference, Miami, FL, USA, 2008, S. 923–932.
- Wenzel, S.: Simulation logistischer Systeme. In: Tempelmeier, H. (Hrsg.): *Modellierung logistischer Systeme*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg 2018, S. 1-34.
- Yu, S.; Puchinger, J.; Sun, S.: Two-echelon urban deliveries using autonomous vehicles. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 141 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102018>.
- Zhang, K.; He, F.; Zhang, Z.; Lin, X.; Li, M.: Multi-vehicle routing problems with soft time windows: A multi-agent reinforcement learning approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 121 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102861>.