
fachwissenschaftliche Projektarbeit

**Analyse der Anwendungen der agentenbasierten
Simulation im nachhaltigen Güterverkehr**

Name: Ivo Teodoruk

Matrikelnummer: 189721

Studiengang: Maschinenbau (technische Betriebsführung)

ausgegeben am: 09.10.2018

eingereicht am: 04.01.2019

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe

Betreuer: M.Sc. Jorge Luis Chicaiza Vaca

Technische Universität Dortmund

Fakultät Maschinenbau

Lehrgebiet: IT in Produktion und Logistik

<http://www.itpl.mb.tu-dortmund.de>

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Nachhaltigkeit im Güterverkehr	4
2.1	Zum Nachhaltigkeitsbegriff	4
2.2	Nachhaltigkeitsstrategien im Güterverkehr	7
2.3	Maßnahmen zur Realisierung	10
3	Grundlagen der ABS	12
3.1	Begriffsklärung und Klassifizierung von Simulationen	12
3.2	Charakteristika von ABS.....	14
3.3	Vor- und Nachteile von ABS.....	17
3.4	Simulationswerkzeuge.....	17
4	ABS in nachhaltigen Güterverkehr	20
4.1	Einsatzgebiete von ABS im Güterverkehr	20
4.2	Verwendung von ABS zur Nachhaltigkeitsbeurteilung.....	24
5	Fazit	30
	Literaturverzeichnis	32
	Abbildungsverzeichnis	36
	Abkürzungsverzeichnis	37

1 Einleitung

Der Klimawandel gehört zu den dringendsten Problemen, denen sich die Menschheit im 21. Jahrhundert stellen muss. Die Höhe der jährlichen globalen Treibhausgasemissionen, die zur Erhöhung der globalen Durchschnittstemperaturen beitragen, hat sich seit 1970 mehr als verdoppelt (The World Bank 2018). Die Gesamtemissionen nehmen außerdem laut dem neuesten IPCC-Bericht (Intergovernmental Panel on Climate Change) weiterhin zu: Zwischen 2000 und 2010 erhöhten sie sich jedes Jahr durchschnittlich um 2,2 % im Vergleich zum Vorjahr (Edenhofer u. a. 2014, S. 42). Die Verteilung der globalen Emissionen auf einzelne Sektoren ist in Abb. 1 dargestellt. Dem ist zu entnehmen, dass nahezu dreiviertel der Treibhausgasemissionen durch die Energieerzeugung, Agrikultur, sowie die industrielle Fertigung erzeugt werden. Die viertgrößte Quelle ist der Verkehrssektor mit einem Anteil von 14 %.

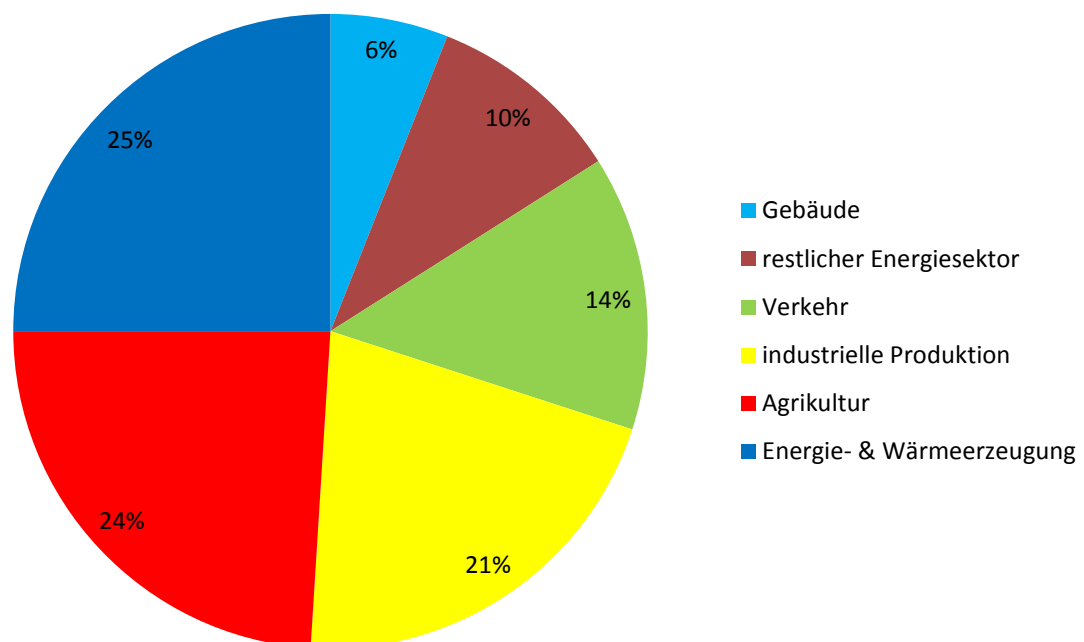


Abbildung 1: Verteilung der Treibhausgasemissionen auf einzelne Sektoren (Edenhofer u. a. 2014, S. 44)

Die verkehrsbedingten Emissionen stammen größtenteils aus dem Straßenverkehr, der mit einem Anteil von etwa 80 % weit vorne liegt. Dieser Sektor ist ebenfalls derjenige, dessen Beitrag zu den Treibhausgasemissionen am schnellsten wächst (Sims u. a. 2014, S. 606 - 607). Trotz technologischer Entwicklung, wie energieeffizientere Antriebe, steigen die Emissionen, bedingt durch das stark erhöhte Verkehrsaufkommen, weiterhin an. Dieses Phänomen lässt sich insbesondere im Güterverkehr beobachten, da die Transportleistung in diesem Sektor vom Wirtschaftswachstum abhängt. Problematisch ist dabei nicht nur das Treibhausgas CO₂, sondern auch Abgase wie Stickoxide, verschiedenste Kohlenwasserstoffe, Partikel und Feinstaub. Aus der Sicht des Klimaschutzes sind diese Stoffe unbedenklich, jedoch führen sie zu gesundheitlichen-, und ökologischen Schäden, wie beispielsweise der Versauerung von Gewässern (Umweltbundesamt 2017).

In Anbetracht dieser Probleme gewann der Umweltschutz in den letzten Jahrzehnten zunehmend an Bedeutung. Die Weltgemeinschaft hat sich bereits in den 1990er-Jahren eine nachhaltige Entwicklung zum Ziel gesetzt. Was genau „nachhaltig“ in diesem Kontext bezeichnet, wird in der Regel unterschiedlich beurteilt. Die heute verwendete gängige Definition wird auf den 1987 von einer UN-Kommission veröffentlichten Brundtland-Bericht zurückgeführt, in dem Nachhaltigkeit als die Verbindung von Umweltschutz mit Verteilungsgerechtigkeit und Wirtschaftsentwicklung dargestellt wird. Dieser Definition unterliegt auch die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, nach der jede politische Maßnahme die Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft gleichermaßen zu berücksichtigen hat.

Eine derartige Strategie hat Auswirkungen auf viele Wirtschaftssektoren. Insbesondere ist der Güterverkehr davon betroffen. Er beeinflusst alle drei der oben genannten Dimensionen, indem er durch die Verteilung wichtiger Güter die Wirtschaftsentwicklung unterstützt, zur Arbeitsteilung beiträgt, aber ebenfalls einen negativen Einfluss auf die Umwelt nimmt. Das Ziel eines nachhaltigen Güterverkehrs ist es, diese Auswirkungen auf die Umwelt derart zu reduzieren, dass weder die Gesellschaft noch die Wirtschaft infolge der durchgeführten Maßnahmen beeinträchtigt werden. Hierzu sollen jedoch Werkzeuge vorliegen, welche eine Abschätzung ermöglichen, wie nachhaltig Verkehrsnetze, Transport-

und Produktionsketten sind bzw. wie sich verschiedene, im Sinne der Nachhaltigkeit getroffene Maßnahmen auswirken. Dabei können Simulationsmethoden unterschiedlicher Art behilflich sein. Beispielhaft zu nennen ist die agentenbasierte Simulation (ABS), bei der es sich um einen neueren Modellierungs- bzw. Simulationsansatz handelt, bei dem nicht das Gesamtsystem selbst, sondern seine Komponenten und ihre Interaktion miteinander im Vordergrund steht. Die vorliegende Arbeit analysiert den Einsatz dieser Simulationsart im nachhaltigen Güterverkehr und diskutiert Vor- und Nachteile, sowie die Anforderungen, die dabei zu beachten sind.

Zu diesem Zweck werden zunächst in Kapitel 2 die Besonderheiten des nachhaltigen Güterverkehrs erörtert, sowie eine Definition des Begriffs der Nachhaltigkeit und eine Beschreibung der Nachhaltigkeitsstrategie in Deutschland in Bezug auf den Güterverkehr geschaffen. Ferner folgt in Kapitel 3 eine Darstellung der Grundlagen der ABS. Es werden wichtige Begrifflichkeiten definiert und die Charakteristika, sowie Vor- und Nachteile der agentenbasierten Simulation erläutert. Im vierten Kapitel wird beschrieben, wie ABS im nachhaltigen Güterverkehr bereits Einsatz findet, bzw. welche Besonderheiten bei der Modellierung berücksichtigt werden müssen. Das abschließende Kapitel 5 fasst die Resultate dieser Arbeit zusammen.

2 Nachhaltigkeit im Güterverkehr

Mittlerweile ist das Thema Nachhaltigkeit politisch etabliert. In Deutschland als Leitziel verfolgt, wird es auch in mehreren supranationalen Organisationen als wichtiges Ziel angegeben. Im folgenden Kapitel erfolgt zunächst eine Begriffsklärung. Es wird erklärt, was genau Nachhaltigkeit in diesem Kontext bedeutet, sowie ausgeführt, wie es sich auf den Güterverkehr auswirkt und welche Maßnahmen möglich sind, um Nachhaltigkeit im Güterverkehr zu fördern.

2.1 Zum Nachhaltigkeitsbegriff

Im deutschsprachigen Raum werden die Wurzeln des Begriffs Nachhaltigkeit auf die Forstwirtschaft zurückgeführt und ursprünglich als ein schonender Umgang mit den verfügbaren Ressourcen bezeichnet. Die grundsätzliche Idee war es, dem Wald nicht mehr Holz zu entnehmen als nachwachsen kann (Wutke 2016, S. 39). Seither wandelte sich jedoch die Bedeutung des Begriffs und wird im heutigen Sprachgebrauch im Allgemeinen folgendermaßen definiert:

„Im übergreifenden Sinne bewertet „Nachhaltigkeit“ gegenwärtiges Denken und Handeln unter dem Gesichtspunkt, die Lebenssituation der heutigen Generationen zu verbessern, ohne die Zukunftsperspektiven der kommenden Generationen zu verschlechtern.“ (Bartol u. a. 2004)

Im politischen Kontext gewann der Begriff infolge einer UN-Konferenz im Jahr 1992 zum Thema Umwelt und Entwicklung an Bedeutung. Dort wurde „sustainable development“ (nachhaltige oder dauerhafte Entwicklung) zum Entwicklungsziel der Wirtschaftsgemeinschaft gesetzt (Deiters 2007, S. 231). Entscheidend angetrieben wurde es durch eine Veröffentlichung vom Club of Rome im Jahr 1972, der die Grenze des wirtschaftlichen Wachstums aufzeichnete (Bretzke 2014, S. 13). Als Konsequenz wurde im Jahr 1987 der sog. Brundtland-Report von einer Kommission der UN veröffentlicht (UN 1987). Innerhalb dieses Berichtes wurde zum ersten Mal das Leitziel einer nachhaltigen Strategie entworfen. Es besteht darin, Umwelt- und Ressourcenschutz mit Verteilungsgerechtigkeit und einer Wirtschaftsentwicklung zu verbinden (Deiters 2007, S. 232). Diese drei Faktoren stellen das so genannte Zieldreieck der Nachhaltigkeit dar (Abb. 2). Auf

Grundlage des Brundtland-Berichts wurden im Jahr 1992 auf einer UN-Konferenz zum Thema „Umwelt und Entwicklung“ die ersten völkerrechtlich verbindlichen Maßnahmen zum Klimaschutz getroffen (Deiters 2007, S. 231; Bretzke 2014, S. 13).

Gemäß dem Nachhaltigkeitsdreieck in Abb. 2 liegen einer nachhaltigen Strategie drei Dimensionen zugrunde:

1. **Ökonomische Nachhaltigkeit:** Die Zunahme bzw. langfristige Sicherung des Wohlstandes (Wutke 2016, S. 43). Demnach soll jede Maßnahme zur Wachstumssteigerung derart geplant sein, dass weder ökologische noch soziale Faktoren langfristig im erheblichen Umfang gestört werden. Typische ökonomische Ziele sind ein hoher Beschäftigungsgrad mit einem stabilen und angemessenen Einkommen oder der Abbau regionaler Wirtschaftsgefälle (Wutke 2016, S. 44).
2. **Soziale Nachhaltigkeit:** Eine Gerechte Verteilung von Wohlstand über Generationen hinweg, sowie eine langfristige Sicherung von Sozial- und Bildungssystemen (ebd., S. 44–45). Die Ziele sind hierbei in der Regel bspw. soziale Sicherheit, Demokratie und Rechtsstaatlichkeit.
3. **Ökologische Nachhaltigkeit:** Der Schutz der Umwelt und ein schonender Umgang mit den verfügbaren Ressourcen derart, dass für nachfolgende Generationen keine Hindernisse entstehen (ebd., S. 46).

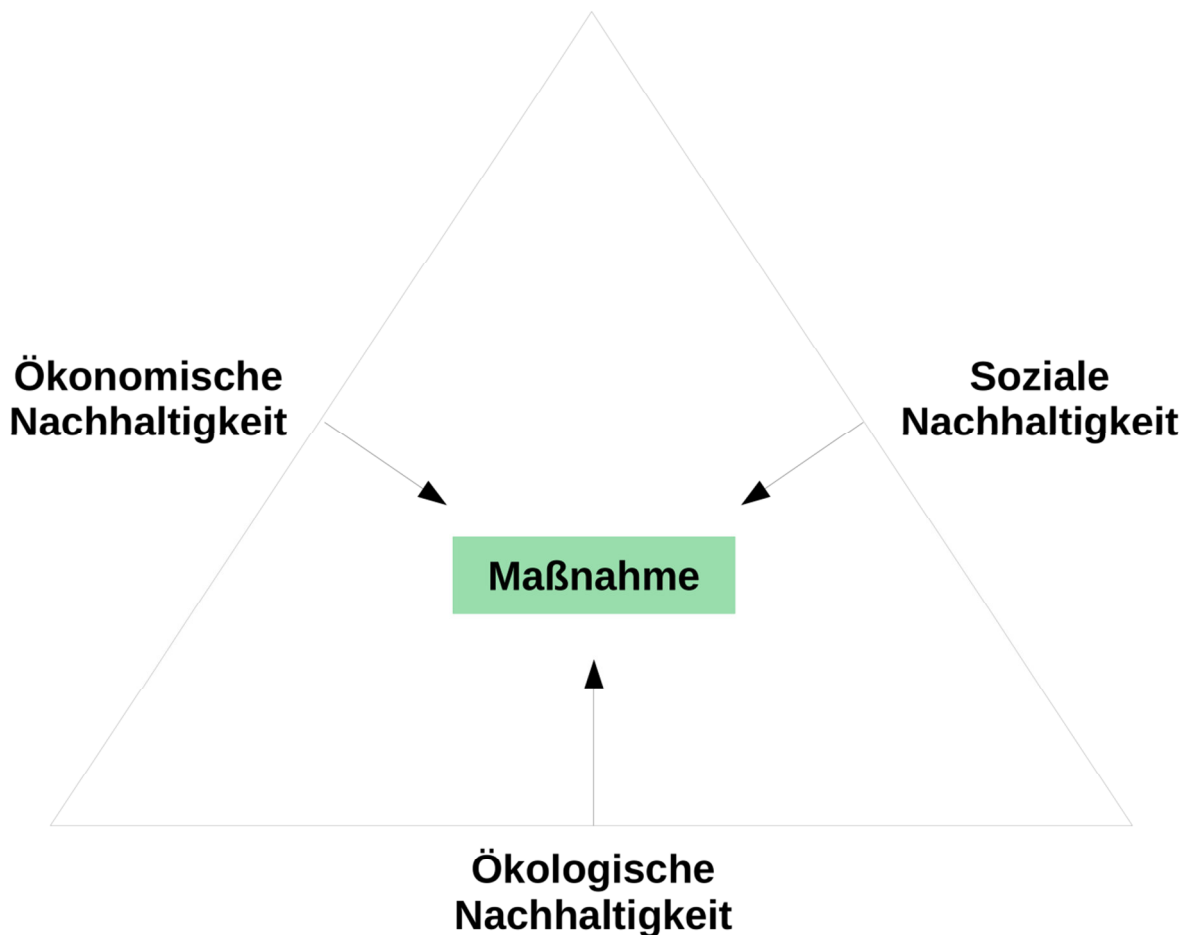


Abbildung 2: Nachhaltigkeitsdreieck (in Anlehnung an BMWi 2008)

Dieses Modell wird gelegentlich auch als das „Drei-Säulen-Modell“¹ der Nachhaltigkeit bezeichnet. Die Dimensionen gelten als gleichrangig, d. h. bei jeder Maßnahme soll eine Zielharmonie erreicht werden, sodass keiner der drei Faktoren durch die anderen zwei beeinträchtigt wird (Bretzke 2014, S. 36). Kritisiert wird, dass es unrealistisch sei, bei Entscheidungen alle drei Dimensionen mit der gleichen Gewichtung in Betracht zu ziehen bzw. Konflikte zwischen diesen zu vermeiden (ebd.). Umweltschützende Maßnahmen können beispielsweise die Wirtschaft beeinträchtigen. Ein Verbot von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren würde etwa zu Einschränkungen des Gütertransports führen. Andere Kritiker behaupten wiederum, es existiere eine natürliche Hierarchie zwischen den Dimensionen. Beispielsweise ist die soziale Dimension ohne Umwelt nicht denkbar, da überlebenswichtige Ressourcen nicht zur Verfügung stehen. Genauso kann Wirtschaft kaum ohne Ressourcen funktionieren. Aus diesem Grund besteht

¹ Die Bezeichnung geht auf eine ältere Darstellung der Verhältnisse zwischen Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft zurück, bei der die drei Dimensionen durch tragende Säulen symbolisiert wurden.

beispielsweise im „hierarchischen Nachhaltigkeitsmodell“ von Mumm (2016) eine derartige natürlich bedingte Hierarchie, wobei die Umwelt als wichtigster Faktor hervorgeht (ebd., S. 40). Das Zieldreieck der Nachhaltigkeit wird trotz Kritik und dem Vorhandensein alternativer Modelle als Grundlage für die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung in Deutschland herangezogen. Ergänzt wird es durch eine absolute Forderung nach einer Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen in globaler Perspektive, sowie nach einer Sicherung eines würdevollen Lebens für alle (Bundesregierung 2016, S. 24). Aus diesen Prinzipien leiten sich die 17 Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Development Goals, SDG) der BRD ab, die auf der Agenda 2030 der Vereinten Nationen aufbauen (Destatis 2018, S. 5). Zu diesen Zielen gehören etwa die Begrenzung bzw. Verringerung der Armut, eine umweltverträgliche, landwirtschaftliche Produktion, eine hochwertige Bildung oder die Reduktion der Treibhausgasemissionen.

2.2 Nachhaltigkeitsstrategien im Güterverkehr

Mobilität im Güterverkehr spielt in der Nachhaltigkeitsdebatte eine besondere Rolle. Dieser Sektor hat eine Bedeutung für alle drei Dimensionen des Nachhaltigkeitsdreiecks und trägt damit zur Arbeitsteilung und zum Wohlstand bei. Die Möglichkeit des Gütertransports erlaubt es, Arbeit derart zu verteilen, dass eine größtmögliche Bevölkerungsgruppe davon profitiert. Das heißt, die Produktion und die damit verbundenen Arbeitsmöglichkeiten zur Sicherung eines würdevollen Lebens sind lokal ungebunden, da Güter zwischen verschiedenen Produktionsstandorten transportiert werden können. Auf diese Weise profitiert auch die Wirtschaft vom Vorhandensein des Güterverkehrs. Ebenfalls beeinflusst der Güterverkehr die Umwelt durch Schadstoffemissionen maßgebend (ebd., S. 39).

Für einen nachhaltigen Güterverkehr sind vor allem folgende Ziele von Bedeutung (Lambrecht u. a. 2009, S. 45):

- Entkoppelung des Verkehrswachstums vom Wirtschaftswachstum (Bundesregierung 2016, S. 34)

- Realisierung einer alltagstauglichen und ressourcenschonenden Infrastruktur (ebd., S. 156)

In Deutschland ist der Güterverkehr ein besonders wichtiger Wachstumsfaktor. 1960 war der Gütertransport in der BRD etwa gleichmäßig auf Straße, Schiene und Binnenschiff verteilt (Lambrecht u. a. 2009, S. 15). Im Zeitraum zwischen 1960 und 1990 verdoppelte sich das Gütertransportaufkommen. Ein Anstieg verzeichnet sich auch nach der Wiedervereinigung (Lambrecht u. a. 2009, S. 11). Seit der Jahrtausendwende entwickelte sich der Güterverkehr schneller als der Personenverkehr. Die Mehrheit der Güter (ca. 79 %) wird auf den Straßen transportiert, während der Schienen-, Schiffs-, sowie Luftverkehr einen vergleichsweise geringen Anteil ausmachen (vgl. Abb. 3). Historisch wächst der der Sektor des Straßenverkehrs somit am schnellsten.

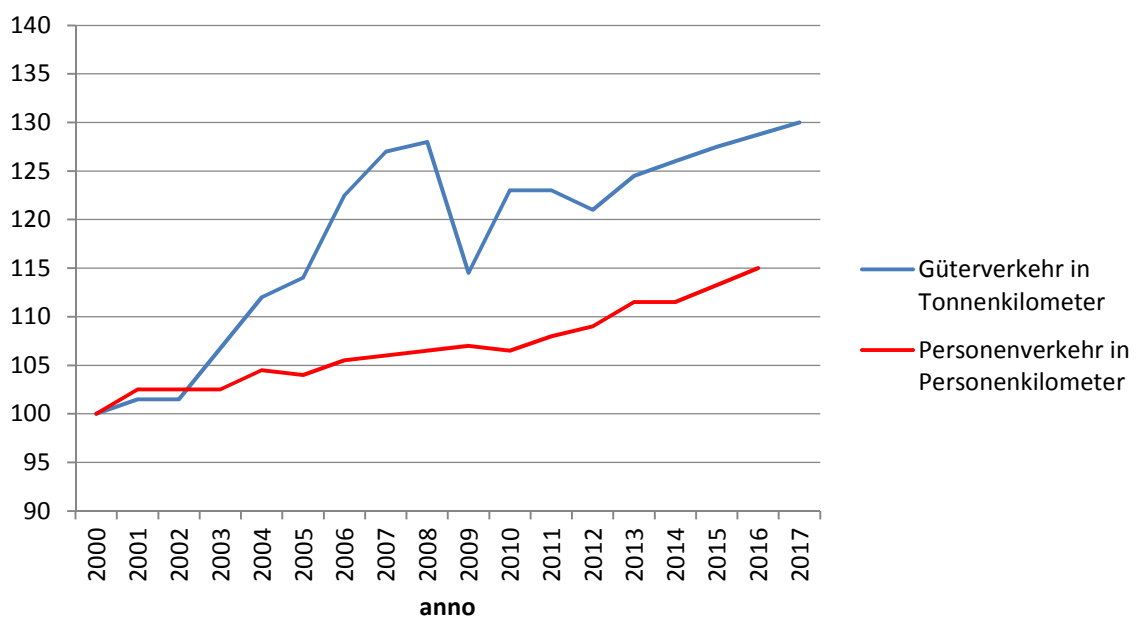


Abbildung 3: Daten zum Güterverkehr in Deutschland (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2018)

Auch in der globalen Betrachtung ergeben sich ähnliche Verhältnisse. Der Wohlstand gemessen am Bruttoinlandsprodukt (BIP) ist im Jahr 2017 im Vergleich zu 2016 um 3,8 % gestiegen. Im selben Zeitraum erhöhte sich auch das globale Transportvolumen um 3,6 % (ITF 2018). Es lässt sich schlussfolgern, dass Wirtschaftswachstum und Verkehr aneinander gekoppelt sind. Dieses Verhalten bestätigen mehrere Autoren, die historische Daten untersuchten (vgl. bspw. Pastowski 1997).

Für eine nachhaltige Entwicklung im Güterverkehr spielt daher eine Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Verkehrszunahme eine bedeutende Rolle (Deiters 2007, S. 232). Die Voraussetzungen hierfür werden allerdings unterschiedlich beurteilt. Prinzipiell stehen zur Entkoppelung zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Eine Umstrukturierung der Wirtschaft derart, dass das Wirtschaftswachstum durch diejenigen Sektoren bedingt ist, welche keinen Gütertransport erfordern, oder
2. Eine Neudefinition von Wohlstand und Wachstum, sodass diese nicht vom Bruttoinlandsprodukt (BIP) abhängen.

Alternativ kann angestrebt werden, dass die wachsende Nachfrage durch Effizienzsteigerungen im Energieverbrauch bzw. durch eine Elektrifizierung des Transports mit gleichzeitiger Entkarbonisierung der Energieerzeugung kompensiert wird. In beiden Fällen wird eine Reduzierung der Schadstoff- und Treibhausgasemissionen erreicht.

Zur Realisierung einer nachhaltigen Infrastruktur ist demnach auch die Verwendung umweltschonender Technologien erforderlich. In Deutschland gehen etwa ein Fünftel der CO₂-Emissionen auf den Verkehr zurück (Bundesregierung 2016, S. 156). Global liegt dieser Anteil bei ca. 11,2 % (Sims u. a. 2014, S. 606 – 607). Falls die richtigen Maßnahmen ergriffen werden, können nach dem Weltklimarat bis 2050 etwa 20 - 50 % der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen im Vergleich zum „Business-as-usual-Szenario“² entfallen. Dazu gehören Änderungen des Nutzungsverhaltens (z. B. kürzere Transportwege), eine kluge Verzahnung verschiedener Verkehrssysteme, sowie die Verwendung kohlenstoffärmerer und energieeffizienterer Antriebssysteme (Bundesregierung 2016, S. 156). Zusätzlich zu CO₂-Emissionen führt der Güterverkehr zu einer Lärmbelastung und zur Emission weiterer Schadstoffe wie Stick- und Schwefeloxide bzw. Partikel. Letztere tragen im Vergleich zu CO₂ höchstens in minimalem Umfang zum Klimawandel bei, sind aber vor allem aus medizinischen Gründen bedenklich und können Umweltschäden verursachen. Stick- und Schwefeloxide führen beispielsweise zur Versauerung von Gewässern (Joos 2006, S. 592).

² Zukunftsverlauf der Treibhausgasemissionen ohne zusätzliche Maßnahmen zur Reduzierung

Emissionen und Lärmbelastung stehen im engen Zusammenhang mit dem Endenergieverbrauch im Güterverkehr. Ziel der Bundesregierung ist es, diesen Verbrauch bis 2030 im Vergleich zu 2005 um 15-20 % zu reduzieren. Dazu sind jedoch zusätzliche Maßnahmen erforderlich, da nach derzeitigem Stand die Zielesetzung nicht erfüllt werden kann. Obwohl sich der Energieverbrauch pro Tonnenkilometer, d. h. die Effizienz des Transports, im Vergleich zu 2005 reduziert hat, wuchs der Gesamtenergieverbrauch durch den Güterverkehr im selben Zeitraum um 7,2 %. Für diesen Anstieg ist in erster Linie der Straßengüterverkehr verantwortlich (Bundesregierung 2016, S. 163).

2.3 Maßnahmen zur Realisierung

Das Umweltbundesamt identifiziert drei grundlegende Maßnahmen, die zur Reduzierung der Umweltbelastung durch den Güterverkehr zur Verfügung stehen (Lambrecht u. a. 2009, S. 52):

1. **Minderung der spezifischen Umweltbelastung:** Hierbei steht die Reduzierung der Emissionen und der Lärmbelastung sowie die Steigerung der Energieeffizienz einzelner Verkehrsträger im Vordergrund. Die Maßnahmen werden also durch den technologischen Fortschritt bedingt, der wiederum durch die vom Gesetzgeber vorgegebenen, festen Grenzwerte beschleunigt werden kann (ebd., S. 54).
2. **Vermeidung von Gütertransporten:** Hierbei geht es in erster Linie darum, den Gütertransport effizienter abzuwickeln. Hierfür bietet der Einsatz von Optimierungsverfahren wie Tourenplanungen oder Laderaumoptimierungen gute Potenziale, um die Transportkapazitäten besser zu nutzen bzw. Leerläufe zu vermeiden. Eine besondere Rolle spielt dabei die Organisation der Fertigung und Verteilung von Gütern. Beispielsweise kann durch die Verwendung mehrerer dezentraler Lager an Transportweg gespart werden (ebd., S. 60–65).

3. Verlagerung von Gütertransporten auf umweltgerechtere Verkehrsträger: In Bezug auf die Umweltverträglichkeit existieren Unterschiede zwischen den einzelnen Verkehrsträgern. Der Straßenverkehr führt im Vergleich zu Schienen- und Schiffsverkehr zu wesentlich höheren Emissionen (Lambrecht u. a. 2009, S. 66). Das umweltschonendste Verkehrsmittel ist hingegen die Bahn. Eine Verlagerung von Gütertransporten von der Straße auf die Schiene hätte somit automatisch eine Reduzierung der verkehrsbedingten Emissionen zur Folge. Hierbei müssen allerdings unterschiedliche Faktoren berücksichtigt werden. Beispielsweise fällt die Verlagerungsaffinität bei Transportgütern unterschiedlich aus. In Abhängigkeit von der transportierten Menge und dem Transportweg können Güter nicht beliebig von einem Verkehrsträger auf einen anderen verlagert werden. Der Schienenverkehr ist wesentlich weniger flexibel als der Straßenverkehr und die Infrastruktur weist in Deutschland aufgrund von fehlenden Investitionen technische Mängel auf. Analog dazu fehlt es dem Binnenschiffsverkehr an Flexibilität (ebd., S. 67–74). Die Verlagerung von Gütern auf die Schiene ist trotz der zuvor genannten Nachteile ein wichtiges Nachhaltigkeitsziel sowohl in Deutschland als auch international (Bieler u. a. 2016, S. 9).

3 Grundlagen der ABS

Agentenbasierte Modellierung bzw. Simulation ist ein Verfahren, das zur Analyse komplexer Systeme verwendet wird und in den letzten Jahren in verschiedenen Bereichen häufiger zum Einsatz kommt (Siegfried 2014, S. 17). Bevor die wichtigsten Merkmale dieses Verfahrens diskutiert werden, sind zunächst im nachfolgenden Abschnitt einige grundlegende Begriffe erläutert.

3.1 Begriffsklärung und Klassifizierung von Simulationen

Komplexe Systeme sind im Allgemeinen solche, die aus einer großen Anzahl heterogener und miteinander wechselwirkender Komponenten bestehen (ebd., S. 11). Dementsprechend haben sie eine große Anzahl möglicher Zustände und die einzelnen Komponenten können nach unterschiedlichen Regeln miteinander interagieren. Durch diese zwei Merkmale ist die Komplexität des Gesamtsystems bedingt. Ein wichtiges Konzept hierbei ist die sog. Emergenz. Dabei handelt es sich um ein Phänomen, bei dem sich aus dem Verhalten individueller Komponenten (Mikroebene) beobachtbare Effekte auf der Ebene des Gesamtsystems (Makroebene) ergeben (Domschke u. a. 2015, S. 236).

Ein Modell kann als eine idealisierte und vereinfachende Repräsentation eines Systems angesehen werden (Siegfried 2014, S. 12) und bildet somit in der Regel einen Teilaspekt des Gesamtsystems nach, während die restlichen Aspekte durch zielorientierte Abstraktion vernachlässigt werden (Pawlaszczyk 2009, S. 29). Ein gutes Modell soll in der Lage sein, das reale System derart nachzubilden, dass beobachtbare Effekte mit guter Genauigkeit vorhergesagt werden können. Zu diesem Zweck wird ein Modell in der Regel kontinuierlich verfeinert, indem die Modellergebnisse mit dem Verhalten des realen Systems verglichen werden, um ein besseres Abbild zu erhalten. Falls das Modell nicht mit der Realität übereinstimmt, wird es modifiziert bzw. optimiert. Auf diese Weise lässt sich die „Güte“ eines Modells kontinuierlich erhöhen. An einem erstellten Modell können schließlich je nach Rechenkomplexität analytische Verfahren oder Simulationsmethoden durchgeführt werden (Siegfried 2014, S. 12). Diese Zusammenhänge werden auch in der Abb. 4 veranschaulicht.

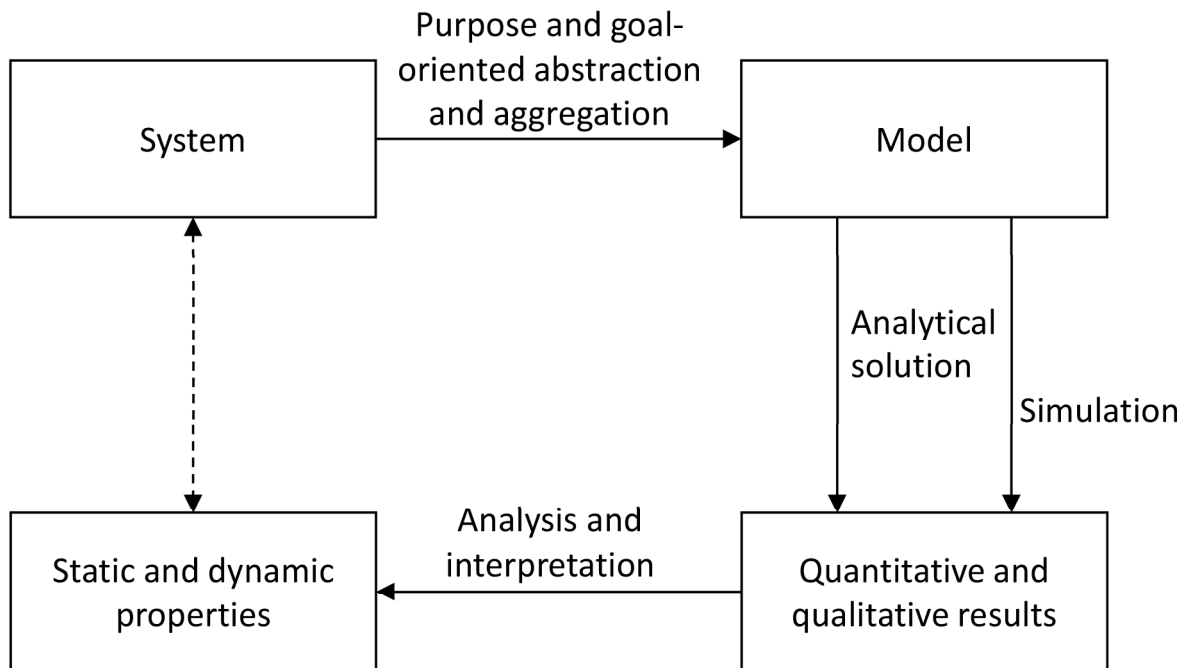


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen System, Modell und Simulation (Quelle: Siegfried 2014, S. 2)

Gemäß Domschke u. a. (2015) existieren vier Grundtypen von Simulationen (ebd., S. 234–236):

1. **Monte-Carlo-Simulation:** Dient der „Analyse statischer, stochastischer Systeme durch Stichprobenexperimente“. Es werden Stichproben möglicher Szenarien des Systems stochastisch generiert und analysiert. Monte-Carlo-Simulationen grenzen sich dadurch von den anderen drei Grundtypen ab, dass sie an statischen, d. h. nicht veränderlichen Systemen durchgeführt werden.
2. **Diskrete Simulation:** Zur Untersuchung dynamischer Systeme, deren Zustände durch zeitabhängige Variablen beschrieben werden. Die Variablen ändern sich aufgrund des Eintretens bestimmter Ereignisse an diskreten Zeitpunkten.
3. **Kontinuierliche Simulation:** Verläuft analog zu einer diskreten Simulation mit dem Unterschied, dass sich die Variablen hierbei kontinuierlich mit der Zeit ändern.

4. **Agentenbasierte Simulation (ABS):** Wird eingesetzt, wenn der Schwerpunkt der Untersuchung auf komplexe Wechselwirkungen von Systemkomponenten gelegt werden soll. Die untersuchten Modelle bestehen hierbei aus unterschiedlichen Akteuren (auch Agenten genannt), die in der Lage sind, miteinander anhand festgelegter Regeln zu interagieren. Der Systemzustand wird also nicht durch Variablen beschrieben, sondern ergibt sich aus dem Verhalten der individuellen Agenten.

Da agentenbasierte Simulation das Hauptthema dieser Arbeit ist, wird diese Simulationsart im folgenden Abschnitt näher ausgeführt.

3.2 Charakteristika von ABS

Der Agentenbegriff spielt also bei einer ABS eine zentrale Rolle. Ein Agent bezeichnet in diesem Zusammenhang „eine Einheit (Computerprogramm, Roboter,...), die sich in einer Umwelt befindet und in der Lage ist in dieser autonome Aktionen durchzuführen, um ihre Ziele zu erreichen“ (Klügl 2006). Ein Agent ist demnach durch zwei Aspekte zu charakterisieren: Einerseits verfügt er über eine Autonomie und kann verschiedene Aktionen durchführen. Andererseits kann er mit seiner Umwelt interagieren, indem er über sie Informationen sammelt (vgl. Abb. 5). Hierbei ist zu unterscheiden zwischen Reaktivität (Der Agent reagiert nur auf Zustandsänderungen seiner Umwelt) und Proaktivität (Der Agent kann aktiv und zielgerichtet seine Umwelt beeinflussen) (Pawlaszczyk 2009, S. 11). Agenten sind auch modular in dem Sinne, dass sie sich eindeutig von ihrer Umwelt abgrenzen lassen. Daraus folgt, dass ein individueller Agent zudem eindeutig identifizierbar sein soll (Macal 2010). Des Weiteren können Agenten häufig benachbarte Agenten erkennen und mit diesen interagieren, indem sie beispielsweise Aktivitäten koordinieren (Pawlaszczyk 2009, S. 12). Häufig wird auch die Fähigkeit zum Lernen als Voraussetzung gefordert. Dadurch soll ein Agent in der Lage sein, sein Verhalten anzupassen und zu verbessern (Siegfried 2014, S. 18).



Abbildung 5: Modell eines Agenten (Quelle: Pawlaszczyk 2009, S. 11)

Zusätzlich zu der Vorgabe des Agenten ist daher eine Agentenarchitektur erforderlich, die die interne Struktur und die Handlung des Agenten beschreibt (ebd., S. 19). Hierbei existieren drei Grundmodelle. Bei reaktiven Agenten läuft die Entscheidungsfindung anhand spezieller Muster ab, die durch einen bestimmten Zustand der Umwelt bedingt sind. Zu jedem Muster gehört wiederum eine Aktion, die ausgeführt werden soll (Pawlaszczyk 2009, S. 14). Deliberative Agenten sind demgegenüber in der Lage, Schlüsse anhand ihrer Kenntnisse über die Umwelt zu ziehen (ebd., S. 15). Das dritte Grundmodell stellen hybride Agenten dar, die Elemente der anderen zwei Modelle kombinieren (ebd., S. 16).

Als Umwelt wird im Kontext von ABS der gemeinsame Raum bezeichnet, in dem die verschiedenen Entitäten der Simulation miteinander interagieren. Bei solchen Entitäten kann es sich um die Agenten selbst (aktive Entitäten) oder um andere Objekte handeln, die über keine besondere Verhaltensweise verfügen (passive Entitäten) (Siegfried 2014, S. 45). Die Umwelt kann darüber hinaus durch bestimmte Variablen wie Temperatur charakterisiert werden, die wiederum einen Einfluss auf das Verhalten der Agenten haben können (Klügl 2006). Die Umwelt kann außerdem anhand verschiedener Merkmale klassifiziert werden. Sie kann etwa dynamisch oder statisch sein, je nachdem, ob sie sich während der Simulation ändert, und sie kann zugänglich bzw. unzugänglich sein, in Abhängigkeit davon, ob den Agenten vollständige oder aktuelle und zutreffende Informationen zur Verfügung stehen (Bandte 2007, S. 250).

Ein agentenbasiertes Modell ist demnach ein Modell, das Komponenten eines Systems als Agenten nachbildet (Siegfried 2014, S. 18). Es wird auch als Multiagentenmodell bezeichnet, wenn es sich dabei um mehrere Agenten handelt (Klügl 2006). Die Komponenten eines Multiagentenmodells werden in Abb. 6 veranschaulicht. Ein solcher Ansatz eignet sich für die Darstellung von Systemen, die aus mehreren heterogenen und autonomen Akteuren bestehen, bei denen individuelle Unterschiede nicht vernachlässigbar sind. ABS, bei der es um Simulationen eines agentenbasierten Modells geht, findet daher beispielsweise häufig in den Sozialwissenschaften Anwendung (Siegfried 2014, S. 19). Andere oft anzutreffende Einsatzfelder sind Marktsimulationen, Supply-Chain-Simulationen und Verkehrssimulationen (Klügl 2006), wie auch logistische Transportprozesse (vgl. Kapitel 4).

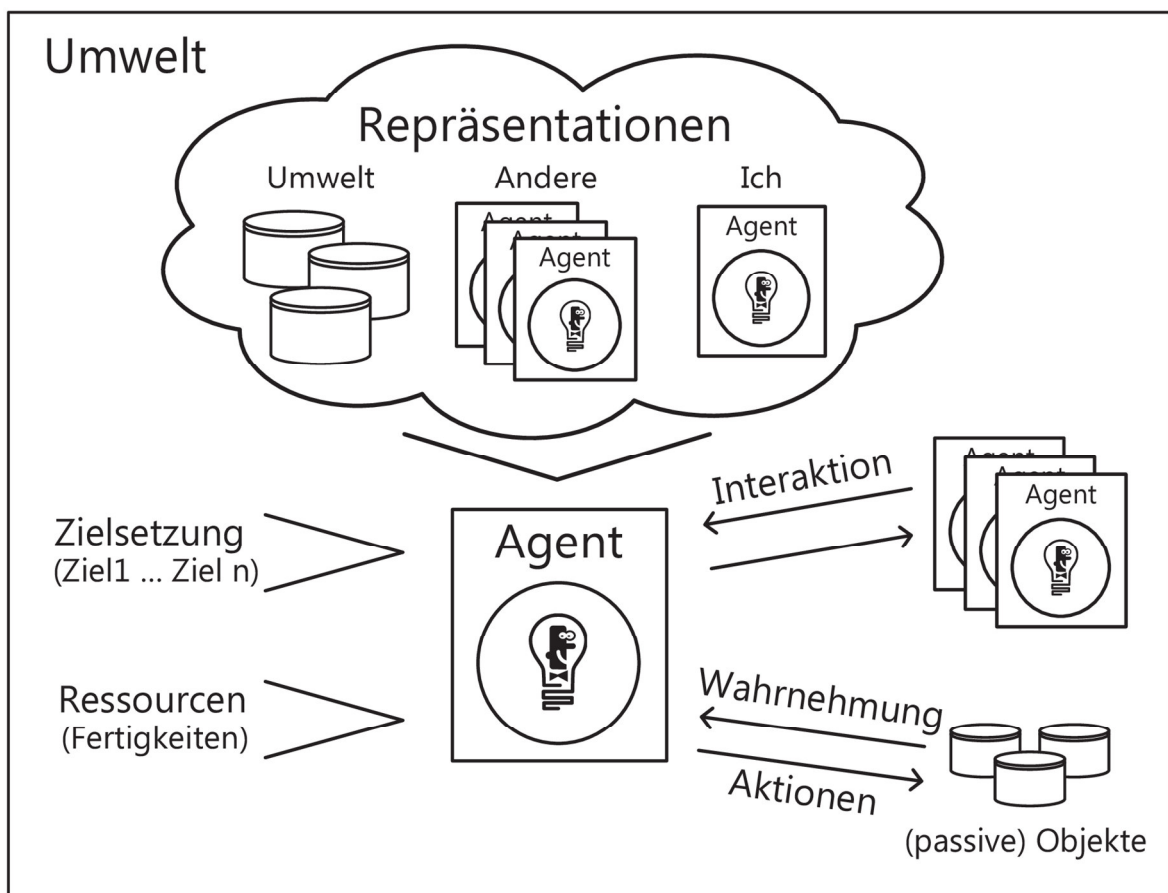


Abbildung 6: Komponenten eines Multi-Agenten-Systems (Quelle: Jung 2016, S. 52)

3.3 Vor- und Nachteile von ABS

Der womöglich größte Vorteil der agentenbasierten Simulation besteht in ihrer Einfachheit. Es ist hier nicht notwendig, das Verhalten des Gesamtsystems selbst zu modellieren. Stattdessen ist lediglich eine Beschreibung des Verhaltens der individuellen Akteure erforderlich, das in den allermeisten Fällen wesentlich einfacher und intuitiver ist. Aus diesem Grund ist ABS auch leichter zu skalieren. Die Komplexität der Modellierung nimmt mit der Größe des Systems zu. Da bei ABS lediglich die Verhaltensweise der Agenten simuliert werden, lassen sich somit auch große Systeme einfacher modellieren, als bei anderen Simulationstypen. Des Weiteren ist ABS ebenfalls flexibler, da die Modellanpassung lediglich durch die Veränderung der Komplexität der Agenten erfolgt. Es müssen nur beispielsweise das Verhalten, die Interaktionsregeln oder der Grad an Rationalität modifiziert werden. Zudem eignet sich ABS zur Untersuchung von Emergenz in komplexen Systemen. (Siegfried 2014, S. 24; Pawlaszczyk 2009, S. 45–46).

Nachteilig ist, dass der Rechenaufwand wesentlich höher ist als bei anderen Simulationsarten, da das mikroskopische Verhalten einzelner Agenten detaillierter simuliert werden muss. Außerdem ist die Beziehung zwischen Mikro- und Makroebene aufgrund von Emergenz nicht ohne weiteres klar. Daraus resultierend ist es in manchen Fällen nicht einfach, den richtigen Detailgrad zu finden, was dazu führen kann, dass das Modell zu komplex wird. Aufgrund der fehlenden Verbindung zwischen Mikro- und Makroebene ist es zudem häufig unklar, welches Mikroverhalten zu einem bestimmten Makroeffekt führt (Siegfried 2014, S. 25).

3.4 Simulationswerkzeuge

Nach Bandte (2007) müssen Softwares für agentenbasierte Simulationen folgende Bedingungen erfüllen:

- **Transparente Regel- und Prozessdarstellung:** Die Darstellung von Regeln und Prozessen soll in einer transparenten und nachvollziehbaren Weise erfolgen.

- Unterstützung bei der Identifikation, Manipulation und Dokumentation der getroffenen Abstraktionen: Bewirkt eine Vereinfachung und fördert die Nachvollziehbarkeit des verwendeten Modells. Die dabei zum Einsatz kommenden Abstraktionen sollen gut dokumentiert sein, damit Aussagen über die Güte des Modells getroffen werden können.
- Ferner soll die Möglichkeit zur Validierung und Verifizierung des Modells gegeben sein. Zudem sollen Softwares beispielhaft durch Visualisierungsofferten einen unterstützenden Beitrag zur Ergebnisinterpretation liefern.

Die derzeit verfügbaren Werkzeuge für agentenbasierte Simulationen sind vielfältig. Es existieren jedoch signifikante Unterschiede, was den Funktionsumfang dieser Werkzeuge betrifft. Es kann sich dabei um einfache visuelle Entwicklungswerkzeuge mit eingeschränkter Funktionsauswahl oder um komplette Simulationsbibliotheken zur Erstellung agentenbasierter Simulationen handeln. Gemäß Pawlaszczyk (2009) und Bandte (2007) lassen sich vier Klassen unterscheiden (Pawlaszczyk 2009, S. 57–58; Bandte 2007, S. 258–259):

1. Es existieren mehrere Simulationsanwendungen, die als Simulations-Frameworks fungieren. Es werden Basisklassen bereitgestellt, die die Modellerstellung unterstützen. Häufig werden auch zusätzliche Module zur Konfiguration, Steuerung und Auswertung von Simulationsinstanzen verwendet. Beispiele hierfür sind SWARM oder CROMAS.
2. Visuelle Entwicklungsumgebungen bieten Unterstützung bei der Modellerstellung und Simulation. Beispiele sind AgentSheets oder StarLogo.
3. Einige klassische Simulationswerkzeuge wurden inzwischen um Funktionalitäten zur agentenbasierten Modellierung und Simulation erweitert, z. B. MATLAB oder Mathematica.

4. Bandte (2007) erwähnt, dass auch einige General-purpose-Programmiersprachen wie JAVA oder C++ als Simulationswerkzeug einsetzbar sind. In diesem Fall muss jedoch das Modell vom Grunde aus entworfen werden und es kann nicht auf vorgegebene Module gesetzt werden. Eine Ausnahme bildet dabei die Programmiersprache Python. Bei Python ist ein Framework für agentenbasierte Modellierung verfügbar (Mesa 2018). Der Vorteil dieser Methode besteht in der Unabhängigkeit, da diese Sprachen auf allen Plattformen verwendbar sind.

Es gilt dabei zu beachten, dass nicht alle der Softwares für jedes beliebige Einsatzfeld nützlich sein können. SWARM soll den Nutzer beispielsweise bei Artificial-Life-Modellen unterstützen. CROMAS ist speziell im Hinblick auf Anwendungen in sozialwissenschaftlichen Fragestellungen entwickelt worden.

4 ABS im nachhaltigen Güterverkehr

Im vorgehenden Kapitel wurde bereits festgestellt, dass sich ABS vor allem bei der Simulation solcher Systeme als vorteilhaft erweist, die sich aus mehreren heterogenen und autonomen Akteuren zusammensetzen. Diese Eigenschaft lässt sich auch in den Lieferketten des Güterverkehrs beobachten. Güter werden an einem bestimmten Standort produziert. In manchen Fällen ist die Produktion zudem ausgelagert, d. h. Teile eines Endproduktes werden an unterschiedlichen Standorten von unterschiedlichen Akteuren gefertigt. Die Einzelteile werden dann zu den Standorten bzw. das Fertigprodukt zu den Konsumenten geliefert. An dieser Kette ist eine große Zahl an unterschiedlichen Agenten beteiligt. Dementsprechend gelten die im vorigen Kapitel aufgeführten Vor- und Nachteile einer agentenbasierten Modellierung gleichfalls für den Güterverkehr.

Da ABS innerhalb des Güterverkehrs bereits Anwendung findet, sind im Folgenden die wichtigsten Einsatzgebiete und der Bezug zur Nachhaltigkeit diskutiert.

4.1 Einsatzgebiete von ABS im Güterverkehr

Eine Reihe von Beispielen zum Einsatz von ABS im Güterverkehr wird von Pawlaszczyk (2009) bereitgestellt. Dort werden die folgenden Einsatzfelder erwähnt (ebd., S. 55–56):

- Dynamische Fahrzeugroutenführung, Untersuchung koordinationsbasierter Steuerung in Transportumgebungen, dezentrale Transportüberwachung im Schienenverkehr, Routenoptimierung im Frachtverkehr
- Simulation selbststeuernder, logistischer Prozesse, Simulation dezentraler Sensornetze
- Holonische Agentensimulation im Rahmen der Transportplanung, Untersuchung von Zugverspätungen, Intermodale Transportsimulation, Transportnetzsimulation, agentengestütztes Flottenmanagement.

Viele Studien beziehen sich auf den städtischen Güterverkehr. So entwickeln beispielsweise Suksri u. a. (2013) ein Framework zur Modellierung des dynamischen Verhaltens unterschiedlicher Beteiligten der städtischen Güterdistribution, um eine Evaluation verschiedener strategischer Maßnahmen zu ermöglichen. Analog stellen Anand u. a. (2016) ABM als eine ideale Alternative dar, um die Interaktion zwischen heterogenen Beteiligten der Stadtlogistik zu modellieren. Zenezini u. a. (2018) stellen ein agentenbasiertes Modell vor, um die Auswirkungen von Innovation auf den Güterverkehr beschreiben zu können. Knaak u. a. (2006) verwenden ABS zur Untersuchung alternativer logistischer Konzepte mit dem Ziel, die nachhaltige Mobilität zu fördern. Hellingrath u. a. (2010) beschreiben, wie Multi-Agenten-Systeme zur Produktions- und Logistikplanung eingesetzt werden können. Gumzej u. a. (2017) zeigen an einem einfachen Beispiel, wie sich ABS für die Simulation der Lieferkette eignet. Sie kommen zum Ergebnis, dass ABS in der Lage ist, das Wachstum sowie das Verhalten der Partner in der Lieferkette zu modellieren und Leistungsindikatoren, wie die Qualität zu optimieren. Jung (2016) entwickelt ein agentenbasiertes Verfahren für die dynamische Steuerung multimodaler Transporte in industriellen Logistiknetzwerken.

Bei den obigen Studien geht es um Transportnetzwerke. ABS eignet sich jedoch auch beispielsweise für die Analyse von Verkehrsverhalten auf den Straßen. Zur Simulation und Untersuchung von Straßenverkehrsflüssen als emergente Phänomene, die sich aus dem Verhalten einzelner Fahrer ergeben, entwickeln beispielsweise Benhamza u. a. (2010) ein agentenbasiertes Modell. Eine ähnliche Modellierung führen Ghadai u. a. (2016) durch. Hierbei handelt es sich zwar um allgemeine Modelle von Verkehrssystemen, d. h. sie beziehen sich nicht speziell auf den Güterverkehr, sie lassen jedoch auch auf diesen anwenden.

Im Folgenden soll hier kurz ein agentenbasiertes Modell genauer vorgestellt werden, um die Funktionsweise bzw. die Komplexität eines derartigen Modells zu verdeutlichen. Der Transportation And Production Agent-based Simulator (TAPAS) von Holmgren u. a. (2012) dient zur Simulation der Auswirkungen unterschiedlicher verkehrs- und infrastrukturbezogener Maßnahmen. Die Architektur des Simulationsmodells besteht aus zwei Ebenen:

1. Der physikalische Simulator umfasst alle physischen Entitäten. Dazu gehören alle Fahrzeuge, die Verkehrsinfrastruktur und Fertigungsanlagen. Das Transportnetz wird durch einen gerichteten Graphen (N, L) modelliert. Die Knoten können Konsumenten, Produzenten oder Terminals darstellen. An einem Produzentenknoten werden bestimmte Güter in variablen Losen gefertigt, wobei die Kosten von dem Zeitpunkt der Fertigung abhängen. Die Zulieferung wird in TAPAS durch eine Menge von Fahrzeugen verwirklicht, die jeweils einstellbare Eigenschaften wie Ladekapazität, Höchstgeschwindigkeit, Kraftstofftyp, Emissionen usw. haben. Der Kraftstoffverbrauch wird in Abhängigkeit von der Ladungsmenge berechnet. Verschiedene Verkehrsträger (Lkw, Schiff, Bahn) können modelliert werden. An einem Terminalknoten werden sowohl die Dauer als auch die Kosten von Be- und Entladevorgängen modelliert.
2. Der Entscheidungsträgersimulator modelliert Entscheidungsträger der Transportkette als Agenten. Erfasst werden sechs Akteure der Transportkette:
 - a) Konsumenten befinden sich an den einzelnen Konsumentenknoten und sind zuständig für die Bestellung von Produkten unter Berücksichtigung der Lagerhaltungs- und Bestellkosten.
 - b) Der Koordinator der Transportkette ist verantwortlich für die Verwaltung von Bestellungen von Konsumenten. Er generiert Vorschläge (Kombinationen aus bestelltem Produkt und Transportmethode) und schickt diese an den Konsumenten, der sich für die optimale Variante entscheidet.
 - c) Der Produktkäufer ist zuständig für die Findung von Produkten auf Anfrage des Koordinators.

- d) Produktionsplaner befinden sich an den Produktionsknoten und planen dort den Produktionsablauf. Sie stellen dem Produktkäufer Informationen über die dort hergestellten Güter und ihre Herstellungsdauer bereit, der diese für die Produktfindung verwendet.
- e) Der Transportkäufer soll eine Lösung zur Auslieferung der Produkte an den Konsumenten finden, indem der kürzeste bzw. kostengünstigste Transportweg unter Berücksichtigung gewisser Nebenbedingungen berechnet wird.
- f) Der Transportplaner stellt den Besitzer einer Fahrzeugflotte dar und verteilt einzelne Fahrzeuge auf Transportaufgaben.

Diese Rollen werden modelliert, da sie in allen Transportketten auffindbar sind. Zusätzliche Akteure wie Terminal- oder Lagerverwalter sind in TAPAS Bestandteile des physikalischen Simulators.

Abb. 7 bietet einen Überblick über diese Komponenten und ihre Wechselwirkungen. Holmgren u. a. (2012) verdeutlichen die Funktionsweise dieses Modellframeworks an einem Beispiel, auf welches im nachfolgenden Abschnitt eingegangen wird.

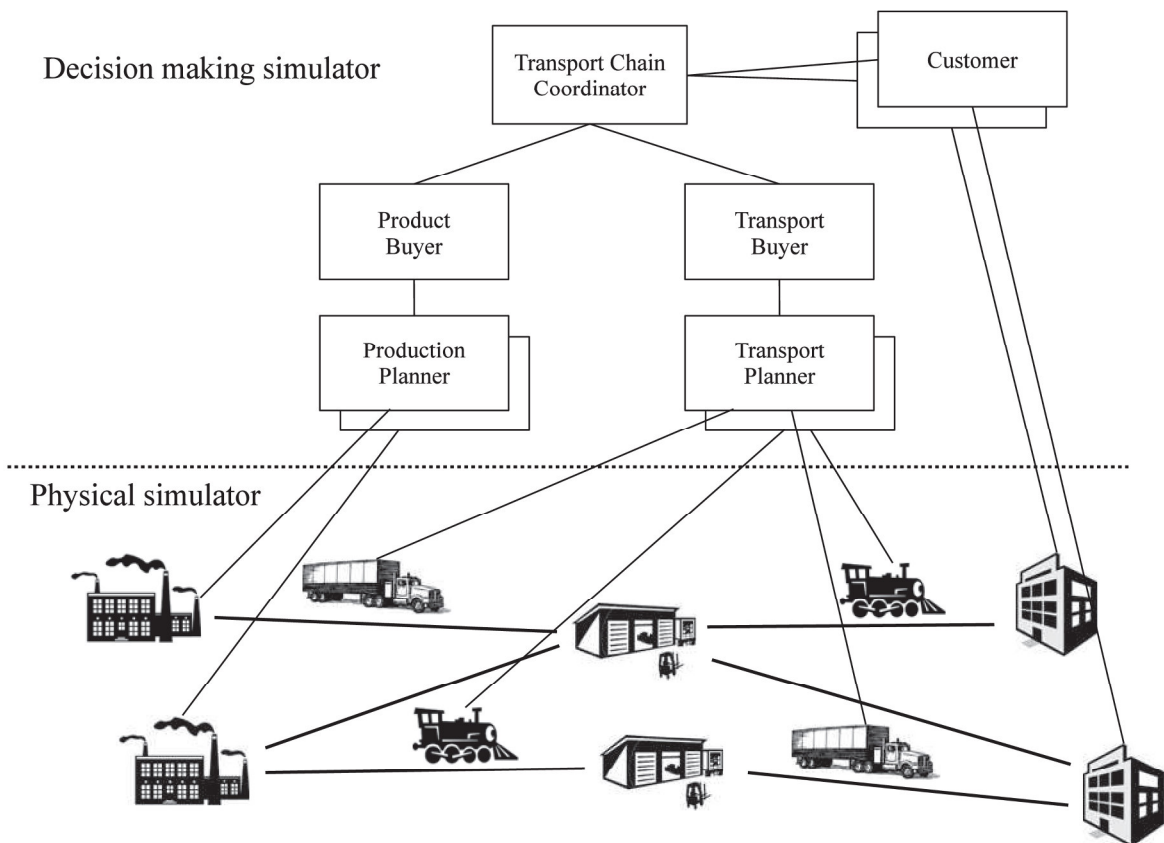


Abbildung 7: Überblick über die Komponenten von TAPAS (Quelle: Holmgren u. a. 2012)

4.2 Verwendung von ABS zur Nachhaltigkeitsbeurteilung

In vielen der oben erwähnten Anwendungsfälle lässt sich ein möglicher Bezug bzw. Beitrag zur Nachhaltigkeit feststellen. Das Ziel der Nachhaltigkeit im Güterverkehr besteht darin, die Umweltbelastung auf ein Minimum zu reduzieren. Hierfür eignen sich mehrere Maßnahmen, bspw.:

- die Erhöhung der Effizienz des Gütertransports (kürzere Transportwege, Vermeidung von Leerläufen, bessere Kapazitätsplanung, energieeffizientere Fahrzeuge),
- die Verbesserung der Produktionsplanung (mehr dezentrale und lokale Fertigung) oder
- die Verlagerung des Transports auf umweltverträglichere Verkehrsträger (vor allem Bahn).

ABS kann in erster Linie verwendet werden, um die Effektivität dieser Maßnahmen bzw. deren Auswirkungen auf betriebswirtschaftliche Faktoren abzuschätzen. Dies ist auch der von Holmgren u. a. (2012) angegebene Zweck von TAPAS. Analog schlägt Jung (2016) vor, das von ihm entwickelte System als entscheidungsunterstützendes System zu nutzen (ebd., S. 238). Mit anderen Worten lässt sich die Realisierbarkeit eines nachhaltigen Güterverkehrskonzeptes nachweisen oder widerlegen. In dieser Hinsicht kann ABS ein wichtiges Werkzeug für politische Entscheidungsträger sein, um geeignete und erreichbare Ziele zu finden.

So untersuchen Holmgren u. a. (2012) an einem Beispiel von Gütertransport zwischen verschiedenen baltischen und nordeuropäischen Staaten die Auswirkungen von drei unterschiedlichen Maßnahmen: eine Streckensteuer für Lkw, eine CO₂-Steuer und die Verlagerung des Transports auf die Schiene (durch Hinzunahme einer neuen Strecke) (ebd., S. 14). TAPAS ermöglicht es zu berechnen, wie sich aufgrund dieser Einzelmaßnahmen die Transportrouten ändern. Es können für die Nachhaltigkeit relevante Größen, wie Modal Split, durchschnittlicher CO₂-Ausstoß oder durchschnittliche Transportkosten berechnet werden. Anhand dieser Resultate wird ein Vergleich zwischen den einzelnen Szenarien möglich. Holmgren u. a. (ebd.) kommen etwa zum Schluss, dass eine Kilometersteuer oder eine CO₂-Steuer in der Höhe von 0,30 EUR/kg am effektivsten ist.

Um derartige Vergleiche zu ermöglichen, muss eine ABS jedoch einige Voraussetzungen erfüllen. In erster Linie muss das Modell im Sinne der Definition in Abschnitt 3.1 gut sein, d. h. es muss die Realität mit guter Genauigkeit beschreiben, indem es das Verhalten des realen Systems voraussagt.

Hierfür ist eine geeignete Modellierung des Verhaltens auf der Mikroebene erforderlich. Die unterschiedlichen Akteure und Entscheidungsträger entlang der Transportkette müssen, wie in TAPAS, vertreten sein und ihr Verhalten muss entsprechend abgebildet werden. Da die Güte eines agentenbasierten Modells weitgehend von der Genauigkeit seiner Mikroebene abhängt, ist dabei zu beachten, dass die Agentenarchitektur so konstruiert wird, dass sie dem realen Verhalten der modellierten Akteure ähnelt. Zum Beispiel werden Entscheidungsträger in TAPAS durch Agenten modelliert, die lokale Kosten

minimieren (ebd., S. 16). Dies ist insofern wirklichkeitsnah, dass reale Entscheidungsträger aufgrund des Wettbewerbsdrucks von Konkurrenten gezwungen sind, optimal zu handeln. Das bedeutet wiederum eine Minimierung von Kosten bzw. eine Maximierung von Gewinnen. Es sind dabei drei Punkte zu nennen:

- Durch die Modellierung von Entscheidungsträgern als kostenminimierende Automaten wird das Auftreten möglicher Fehlentscheidungen nicht erfasst. Letztere können aber beispielsweise durch fehlende Information oder durch menschliches Versagen passieren. Da solche Fehlentscheidungen eher stochastischer Natur sind, können sie nicht einfach in die Modelle eingebaut werden.
- Unberücksichtigt bleiben potentielle Entscheidungen von Akteuren, die nicht aufgrund der typischen betriebswirtschaftlichen Motivationen anfallen. Andere Faktoren, die ebenfalls bei der Entscheidungsfindung beachtet werden müssen, sind etwa Pünktlichkeit oder Zuverlässigkeit. Insbesondere bei Akteuren, die im Sinne einer nachhaltigen Mobilität handeln, müssten Überlegungen über die Dimensionen Umwelt und Gesellschaft ebenfalls in den Entscheidungsprozess einfließen. Es ist also die Modellierung eines Entscheidungsträgers als kostenminimierender Agent nicht in jedem Fall vertretbar. Eine Alternative besteht nach Holmgren u. a. (2012) darin, Entscheidungsträger als Agenten zu modellieren, die ihre Aktionen gemäß einfacher Regeln im Sinne moralischer Grundsätze planen. Ebenfalls besteht die Möglichkeit, solche Überlegungen als Kosten in der Rechnung zu berücksichtigen. Verlässlichkeit und Pünktlichkeit können durch interne Organisationskosten, Umweltverträglichkeit durch externe Kosten im Sinne einer CO₂-Steuer dargestellt werden.

- Die Risikobereitschaft von realen Akteuren wird von Agenten, die einfache Regeln befolgen, nicht in ausreichendem Maß erfasst. Reale Akteure können dazu neigen, sich für eine nicht optimale Maßnahme zu entscheiden, wenn dies langfristig zu Vorteilen führen kann.

Anders ausgedrückt werden in Simulationsmodellen vorwiegend nur solche Akteure gut modelliert, die optimal, d. h. rational im wirtschaftlichen Sinne, handeln. Für hiervon abweichende Fälle eignet sich der Einsatz dynamischer Agentenverhalten, also Agenten mit einer gewissen Lernfähigkeit. Beispielsweise wären Konsumentenagenten in TAPAS dadurch in der Lage, Grundlagerbestände eines bestimmten Produkts anzupassen, wenn es ihnen an diesem Produkt häufiger mangelt (ebd., S. 16).

Dieser Modellansatz könnte auch in der Simulation des nachhaltigen Güterverkehrs Vorteile bringen. Es wurde bereits erwähnt, dass ABS sich für die Untersuchung der Auswirkungen bestimmter umweltschützender Maßnahmen eignet. Es kann analysiert werden, wie eine Maßnahme den Ablauf des Güterverkehrs beeinflussen würde. Es können also z. B. Machbarkeitsanalysen durchgeführt werden. In der Realität wäre zu erwarten, dass Akteure ihr Verhalten (z. B. ihre Produktions- und Transportplanung oder die Art der verwendeten Fahrzeuge) an die neuen Bedingungen anpassen. In Modellen mit statischem, unveränderlichem Agentenverhalten muss diese Änderung des Verhaltens vom Anwender der Simulation manuell durchgeführt werden. Wenn also mögliche Reaktionen auf eine Maßnahme, die im Simulationsmodell einer Veränderung der Umwelt entspricht, untersucht werden sollen, so muss der Anwender mehrere Simulationen für unterschiedliche Agentenverhalten durchführen und selber ermitteln, welche Verhaltensweise unter den neuen Rahmenbedingungen optimal ist. Das kann aufgrund der Komplexität des untersuchten Systems ein zeitaufwendiger Prozess sein. Beim Einsatz von dynamischem Agentenverhalten passen sich hingegen Agenten aus Gründen ihrer Fähigkeit zum Lernen selbst an die veränderten Umweltbedingungen an. Die Notwendigkeit einer manuellen Anpassung ihres Verhaltens entfällt. In diesem Sinne bietet ABS nicht nur für politische, sondern auch für logistische und industrielle Entscheidungsträger Potenziale, da es ihnen ermöglicht wird, optionale Reaktionen auf zukünftige

Maßnahmen zu untersuchen und darunter die optimalste Reaktion zu ermitteln. Es ist also möglich, sich frühzeitig auf verändernde Umstände vorzubereiten und an solche anzupassen. Mithilfe von dynamischem Agentenverhalten reduziert sich hierbei der Aufwand durch das nicht erforderliche manuelle Anpassen des Verhaltens individueller Agenten und das Simulieren verschiedener Szenarien.

Zusätzlich zu den internen Faktoren wie die Agentenarchitektur ist es für die Erstellung eines guten Modells auch notwendig, externe Einflussfaktoren zu erfassen. Dazu gehören beispielsweise die Verkehrs- oder Witterungsbedingungen, da sie den Transportablauf wesentlich beeinflussen können.

In diesem Sinne ist das Auftreten von Verkehrsstaus im Straßenverkehr ein weiterer Aspekt, der in Simulationen berücksichtigt werden muss. Diese gilt es in einem nachhaltigen Güterverkehr zu vermeiden, da sie die Umwelt in einem größeren Umfang belasten und einen unnützen Verbrauch energetischer Ressourcen darstellen (Bretzke 2014, S. 40). Auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht sind Verkehrsstaus unerwünscht, da sie zu einer Steigerung der Kosten führen. Eine für den nachhaltigen Straßenverkehr relevante agentenbasierte Modellierung muss daher diesen Sachverhalt berücksichtigen und die Routen von Transportfahrzeugen derart planen, dass Verkehrsstaus möglichst gemieden werden. Dies ist jedoch aus rechentechnischer Sicht problematisch, da hierfür zusätzlich zum Güter- auch der Personenverkehr ins Modell einfließen muss. Wird Letzterer ebenfalls auf der Mikroebene modelliert, so erhöht sich die Rechenkomplexität erheblich. Dieses Problem lässt sich jedoch umgehen, indem der Verkehr stattdessen auf der Makroebene anhand von Daten zum Mobilitätsverhalten nachgebildet wird (Hofer u. a. 2018). So doch besteht die Gefahr, dass eventuell auftretende Staus nicht vorhergesagt werden, da die Abschätzung ihres Auftretens statistisch anhand von Verkehrsdaten erfolgt.

Ein weiterer Faktor, der den Verkehrsablauf beeinflussen kann, ist die Witterung. Witterungseffekte wie Regen oder Schnee wirken sich auf den Verkehrsfluss aus. Nässe oder vereiste Straßenoberflächen führen dazu, dass Fahrzeuge sich langsamer fortbewegen bzw. dass die Kapazitäten nicht in vollem Umfang ausgenutzt werden können. Aus Sicherheitsgründen werden LKWs bei schlechtem Wetter oft weniger beladen, als bei gutem Wetter. Grund dafür ist

einerseits der niedrigere Reibkontakt zwischen Fahrbahn und Reifenoberfläche bzw. die verschlechterten Sichtverhältnisse. Andererseits haben hohe Windgeschwindigkeiten den gleichen Effekt auf den Verkehr. Schlechtes Wetter beeinflusst zudem den Schienenverkehr negativ. Schienenstrecken können überfluten oder verschneit sein, das wiederum zu Verzögerungen im Verkehrsablauf führen kann. Bei starker Hitze können sich darüber hinaus Schienenelemente aufgrund thermischer Ausdehnung von Metallen verformen (Leviäkangas u. a. 2011). Problematisch ist der Witterungseinfluss auf den Verkehr vor allem aus der Perspektive, dass der Klimawandel die Wahrscheinlichkeit von extremen Wettervorkommen erhöht und damit den Güterverkehr negativ beeinflusst. Auch das hebt somit die dringende Notwendigkeit der Umstellung auf eine nachhaltige Mobilität hervor. Aus diesem Grund ist die Berücksichtigung der Witterung auch bei der agentenbasierten Simulation im Güterverkehr notwendig. Dazu stellen Stahel u. a. (2014) verschiedene Ansätze vor, wie reguläre und irreguläre Wettereffekte in einer agentenbasierten Simulation berücksichtigt werden können. Im Fall eines regulären Wetterereignisses soll dabei untersucht werden, ab welchem kritischen Punkt der Güterverkehrsfluss signifikant beeinträchtigt wird und wie er dadurch umgelenkt werden kann. Beim Auftreten von irregulären Wetterereignissen soll nach alternativen Routen gesucht werden, um den Transport zu gewährleisten.

5 Fazit

Diese Arbeit untersuchte die Möglichkeiten des Einsatzes agentenbasierter Simulation im nachhaltigen Güterverkehr. Zur Erfassung des Begriffes der Nachhaltigkeit wurde die Definition der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung herangezogen, deren Wurzeln auf die deutsche Forstwirtschaft und den Brundtland-Report zurückgehen. Laut derer, ist eine nachhaltige Maßnahme eine solche, die Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft gleichrangig betrachtet. Diese Dimensionen werden in dem Zieldreieck der Nachhaltigkeit veranschaulicht. Speziell im Bereich des Güterverkehrs sind also zur Verringerung der Umweltbelastung die Treibhausgas- und Schadstoffemissionen, sowie die Lärmbelästigung zu reduzieren. Die CO₂-Emissionen des Güterverkehrs gelten in Deutschland als einer der Hauptfaktoren, die zum anthropogenen Klimawandel beitragen. Weitere Emissionen, wie Stick- und Schwefeloxide bzw. Partikel sind aus medizinischen Gründen unerwünscht. Mögliche Maßnahmen zur Realisierung dieser Ziele bestehen beispielsweise in der Erhöhung der Energieeffizienz, der Reduzierung des Verkehrs oder der Verlagerung des Gütertransports auf alternative umweltverträglichere Verkehrsmittel (z. B. Bahn).

Agentenbasierte Simulationen sind in der Lage, verschiedene Elemente des Güterverkehrs wie Transportnetze oder Logistikketten adäquat abzubilden. An diesen großen, komplexen Systemen sind unterschiedliche Akteure beteiligt. Mithilfe der Modellierung dieser Akteure als Agenten können zwei wichtige Ziele erreicht werden: Zum einen kann die Effektivität möglicher, nachhaltiger Maßnahmen abgeschätzt werden, wie es von Holmgren u. a. (2012) demonstriert wird und zum anderen kann ermittelt werden, inwieweit bestimmte Maßnahmen, wie die Einführung einer CO₂-Steuer oder der Ausbau der Schieneninfrastruktur, dazu beitragen können, die Nachhaltigkeitsziele zu erreichen. Durch Akteure als nachgebildete, lernfähige Agenten ist zudem untersuchbar, wie sich ihr Verhalten infolge eingeführter Maßnahmen verändert. Daraus lassen sich für Entscheidungsträger der Logistik und der Industrie mögliche Handlungsoptionen zur Maßnahmenanpassung herleiten.

Die Voraussetzung dafür ist, dass das agentenbasierte Modell die realen Systeme ordnungsgemäß abbildet und alle wichtigen Variablen erfasst. Das reale Verhalten unterschiedlicher Akteure, die Kosten, sowie externe Einflüsse, wie Witterung und Verkehrsbedingungen, müssen korrekt modelliert werden. Zwar verkomplizieren sie das Modell und erhöhen den Rechenaufwand, sind aber letztlich für eine korrekte Darstellung der Realität unentbehrlich.

In Anbetracht dieser Überlegungen lässt sich festhalten, dass sich agentenbasierte Modellierung und Simulation für den Einsatz im nachhaltigen Güterverkehr eignet. Trotz einiger Nachteile können verfeinerte und detaillierte Modelle dabei helfen, die Nachhaltigkeit im Güterverkehr zu fördern.

Literaturverzeichnis

- ANAND, Nilesh u. a., 2016. *Framework for Modelling Multi-stakeholder City Logistics Domain Using the Agent based Modelling Approach*. Transp. Res. Procedia. 16, 4–15.
- BANDTE, Henning, 2007. *Komplexität in Organisationen* [Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2006]. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.
- BARTOL, Arne u. a., 2004. *Der aktuelle Begriff – Nachhaltigkeit*. Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages. (06/2004).
- BENHAMZA, Karima u. a., 2010. *Agent-based modeling for traffic simulation*.
- BIELER, Cuno u. a., 2016. *Szenarien für einen nachhaltigen Güterverkehr in Deutschland*. Schlussbericht. CargoBeamer AG.
- BMWI, 2008. *Infografik: Zieldreieck der Nachhaltigkeit* [online] [besucht am 2018-12-14]. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Wirtschaft/zieldreieck-der-nachhaltigkeit.html>.
- BRETZKE, Wolf-Rüdiger, 2014. *Nachhaltige Logistik: zukunftsfähige Netzwerk- und Prozessmodelle*. 3. Aufl. Berlin ; Heidelberg: Springer Vieweg.
- BUNDESREGIERUNG, 2016. *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie: Neuauflage 2016*.
- DEITERS, Jürgen, 2007. *Güterverkehr zwischen Wachstum und Nachhaltigkeit*. In: NOBIS, Claudia u. a. (Hrsg.). *Wirtschaftsverkehr: alles in Bewegung?* Mannheim: Verl. MetaGIS-Infosysteme, S. 229–244.
- DESTATIS, 2018. *Nachhaltige Entwicklung in Deutschland: Indikatorenbericht 2018*. Statistisches Bundesamt.
- DOMSCHKE, Wolfgang u. a., 2015. *Einführung in Operations Research*. 9., überarb. u. verb. Aufl. Berlin [u. a.]: Springer Gabler.

- EDENHOFER, Ottmar u. a., 2014. *Technical Summary*. In: EDENHOFER, Ottmar u. a. (Hrsg.). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change ; Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge [u. a.]: Cambridge Univ. Press, S. 33–107.
- GHADAI, Priyadarsini u. a., 2016. *A Study on Agent Based Modelling for Traffic Simulation*. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. 7(2), 932–936.
- GUMZEJ, Roman u. a., 2017. *Modellierung und Simulation von Lieferketten*. In: HALANG, Wolfgang A. u. a. (Hrsg.). *Logistik und Echtzeit: Echtzeit 2017*. Berlin: Springer Vieweg, S. 79–88.
- HELLINGRATH, Bernd u. a., 2010. *Integrierte agentenbasierte Produktions- und Logistikplanung in der Supply Chain*. *KI - Künstliche Intelligenz [online]*. 24(2), 115–122.
- HOFER, Christian u. a., 2018. *Including traffic jam avoidance in an agent-based network model*. *Computational Social Networks*. 5, 5-1–5-12.
- HOLMGREN, Johan u. a., 2012. *TAPAS: A multi-agent-based model for simulation of transport chains*. *Simul. Modell. Pract. Theory*. 23, 1–18.
- ITF, 2018. *Key Transport Statistics: 2017 Data*. Internationale Transport Forum.
- JOOS, Franz. *Technische Verbrennung: Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen*. Berlin ; Heidelberg: Springer, 2006.
- JUNG, Heiko, 2016. *Konzept einer agentenbasierten Transportsteuerung: für komplexe, dynamische und multimodale Logistiknetzwerke*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing. Dissertation, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015.
- KLÜGL, Franziska, 2006. *Multiagentensimulation*. *Informatik-Spektrum*. 29(6), 412–415.
- KNAAK, Nicolas u. a., 2006. *An Agent-Based Simulation Tool for Modelling Sustainable Logistics Systems*.

- LAMBRECHT, Martin u. a., 2009. *Strategie für einen nachhaltigen Güterverkehr*. Dessau-Roßlau. Umweltbundesamt.
- LEVIÄKANGAS, Pekka u. a., 2011. *Extreme weather impacts on transport systems*. VTT WORKING PAPERS 168. VTT Technical Research Centre of Finland.
- MACAL, C. M. u. a., 2010. *Tutorial on agent-based modelling and simulation*. Journal of Simulation. 4, 151–162
- MESA, 2018. *Mesa: Agent-based modeling in Python 3+* [online] [besucht am 2018-12-10]. Abgerufen unter: <https://mesa.readthedocs.io/en/master/>
- MUMM, Gerrit, 2016. *Die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie: Grundlagen - Evaluationen - Empfehlungen*. Wiesbaden: Springer VS. Dissertation, Freie Universität Berlin, 2016.
- PASTOWSKI, Andreas, 1997. *Decoupling economic development and freight for reducing its negative impacts*. Wuppertal Papers 79.
- PAWLASZCZYK, Dirk, 2009. *Skalierbare agentenbasierte Simulation: Werkzeuge und Techniken zur verteilten Ausführung agentenbasierter Modelle*. Dissertation. Technische Universität Ilmenau.
- PLEHWE, Dieter, 2016. *Güterverkehr und Logistik: Zielkonflikte nachhaltigen Wachstums im Straßen- und Schienenverkehr*. In: SCHWEDES, Oliver u. a. (Hrsg.). Handbuch Verkehrspolitik. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer VS, S. 323–349.
- SIEGFRIED, Robert, 2014. *Modeling and Simulation of Complex Systems: A Framework for Efficient Agent-Based Modeling and Simulation*. Wiesbaden: Springer Vieweg. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2014.
- SIMS, Ralph u. a., 2014. *Transport*. In: EDENHOFER, Ottmar u. a. (Hrsg.). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change ; Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge [u. a.]: Cambridge Univ. Press, S. 599–670.
- STAHEL, Alexander u. a., 2014. *Modeling impacts of weather conditions in agent-based transport microsimulations*. ETH Zurich Research Collection.

- SUKSRI, Jintawadee u. a., 2013. *Developing a Conceptual Framework for the Evaluation of Urban Freight Distribution Initiatives*. *Procedia: social and behavioral sciences*. 39, 321–332.
- THE WORLD BANK, 2018. *Total greenhouse gas emissions (kt of CO2 equivalent)* [online] [besucht am 2018-11-24]. Abgerufen unter: <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.GHGT.KT.CE>.
- UMWELTBUNDESAMT, 2017. *Emissionen des Verkehrs* [online] [besucht am 2018-11-24]. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs>.
- UN, 1987. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. United Nations.
- UNEP, 2017. *The Emissions Gap Report 2017*. Nairobi. United Nations Environment Programme.
- WUTKE, Sebastian, 2016. *Entwicklung eines Gestaltungsmodells zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeit bei der Ausschreibung und Vergabe logistischer Leistungen im Straßengüterverkehr*. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2016.
- ZENEZINI, Giovanni u. a., 2018. *Modelling Urban Logistics Business Ecosystems: An Agent-based Model Proposal*.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verteilung der Treibhausgasemissionen auf einzelne Sektoren (Edenhofer u. a. 2014, S. 44)	1
Abbildung 2: Nachhaltigkeitsdreieck (in Anlehnung an BMWi 2008)	6
Abbildung 3: Daten zum Güterverkehr in Deutschland (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2018)	8
Abbildung 4: Zusammenhang zwischen System, Modell und Simulation (Quelle: Siegfried 2014, S. 2)	13
Abbildung 5: Modell eines Agenten (Quelle: Pawlaszczyk 2009, S. 11).....	15
Abbildung 6: Komponenten eines Multi-Agenten-Systems (Quelle: Jung 2016,S. 52)	16
Abbildung 7: Überblick über die Komponenten von TAPAS (Quelle: Holmgren u. a. 2012).....	24

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ABM	Agentenbasierte Modellierung
ABS	Agentenbasierte Simulation
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BRD	Bundesrepublik Deutschland
bzw.	beziehungsweise
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
d.h.	das heißt
ebd.	ebendort
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
S.	Seite
SDG	Sustainable Development Goal
TAPAS	Transportation And Production Agent-based Simulator
u.a.	und andere
UN	United Nations
UNEP	United Nations Environmental Programme
vgl.	vergleiche

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Projektarbeit selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde noch nicht anderweitig zu Prüfungszwecken vorgelegt.

Ort, Datum

Unterschrift