

# Agentenbasierte Verkehrssimulation mit psychologischen Persönlichkeitsprofilen (AVeSi)

(Förderkennzeichen 17028X11)

R. Herpers, P. Becker  
S. Seele, D. Scherfgen, T. Saitov

Publisher: Dean Prof. Dr. Wolfgang Heiden

University of Applied Sciences Bonn-Rhein-Sieg,  
Department of Computer Science

Sankt Augustin, Germany

July 2015

Technical Report 03-2015



**Hochschule  
Bonn-Rhein-Sieg**  
University of Applied Sciences

---

ISSN 1869-5272

**Copyright © 2015, by the author(s).** All rights reserved. Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. To copy otherwise, to republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission.

**Das Urheberrecht des Autors bzw. der Autoren ist unveräußerlich.** Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Das Werk kann innerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes (UrhG), *German copyright law*, genutzt werden. Jede weitergehende Nutzung regelt obiger englischsprachiger Copyright-Vermerk. Die Nutzung des Werkes außerhalb des UrhG und des obigen Copyright-Vermerks ist unzulässig und strafbar.

Uniform Resource Name [urn:nbn:de:hbz:1044-opus-15912](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:1044-opus-15912)  
URN-Resolver at the German National Library <http://nbn-resolving.de>

## **Kurzfassung**

*Der Einsatz von Agentensystemen ist vielfältig, dennoch sind aktuelle Realisierungen lediglich in der Lage primär regelkonformes oder aber „geskriptetes“ Verhalten auch unter Einsatz von randomisierten Verfahren abzubilden. Für eine realistische Repräsentation sind jedoch auch Abweichungen von den Regeln notwendig, die nicht zufällig sondern kontextbedingt auftreten. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde ein realitätsnaher Straßenverkehrssimulator realisiert, der mittels eines detailliert definierten Systems für kognitive Agenten auch diese irregulären Verhaltensweisen generiert und somit ein realistisches Verkehrsverhalten für die Verwendung in VR-Anwendungen simuliert. Durch das Erweitern der Agenten mit psychologischen Persönlichkeitsprofilen, basierend auf dem „Fünf-Faktoren-Modell“, zeigen die Agenten individualisierte und gleichzeitig konsistente Verhaltensmuster. Ein dynamisches Emotionsmodell sorgt zusätzlich für eine situationsbedingte Adaption des Verhaltens, z. B. bei langen Wartezeiten. Da die detaillierte Simulation kognitiver Prozesse, der Persönlichkeitseinflüsse und der emotionalen Zustände erhebliche Rechenleistungen verlangt, wurde ein mehrschichtiger Simulationsansatz entwickelt, der es erlaubt den Detailgrad der Berechnung und Darstellung jedes Agenten während der Simulation stufenweise zu verändern, so dass alle im System befindlichen Agenten konsistent simuliert werden können. Im Rahmen diverser Evaluationsiterationen in einer bestehenden VR-Anwendung – dem FIVIS-Fahrradfahrsimulator des Antragstellers – konnte eindrucksvoll nachgewiesen werden, dass die realisierten Konzepte die ursprünglich formulierten Forschungsfragestellung überzeugend und effizient lösen.*

## **Danksagung**

Das Forschungsprojekt „Agentenbasierte Verkehrssimulation mit psychologischen Persönlichkeitsprofilen“ (AVeSi) wurde durch das Förderprogramm FHprofUnt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 17028X11 gefördert.

## **Vorbemerkung**

Dieser Bericht entspricht inhaltlich im Wesentlichen dem Schlussbericht, der dem Projektträger Jülich zum Nachweis der Förderung vorgelegt wurde. Ausgenommen sind lediglich verfahrensspezifische und administrative Angaben des Forschungsprojektes.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
1.1	Aufgabenstellung.....	5
1.2	Voraussetzungen.....	8
1.3	Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Beginn des Vorhabens .....	8
2	Erzielte Ergebnisse und Vergleich mit der Zielstellung.....	10
2.1	Simulationsumgebung .....	11
2.1.1	Verkehrsmittelenkonzept .....	11
2.1.2	Routenfindung.....	13
2.1.3	Definition einer Straßennetzwerkrepräsentation .....	13
2.1.4	Definition einzelner Klassen und Subklassen der Verkehrsteilnehmer .	15
2.1.5	Persistente Agenten durch mesoskopische Verkehrssimulation.....	16
2.1.6	Mikro-Meso-Link .....	17
2.1.7	Virtuelle Wahrnehmung .....	20
2.2	Schnittstellenanbindung .....	22
2.2.1	Kommunikation zw. Grundsystem und 3D-Darstellung.....	22
2.2.2	Abbildung Verkehrsgraph auf 3D-Darstellung.....	22
2.3	3D-Darstellung.....	23
2.3.1	Erstellen neuer Szenarien.....	23
2.3.2	Fahrzeug-/Personenmodelle.....	24
2.4	Agentenprofile .....	25
2.5	Test und Integration.....	26
2.5.1	Evaluierungen.....	27
2.5.2	Prototyp.....	40
3	Veröffentlichungen.....	40

4	Studentische Projekte und Abschlussarbeiten .....	42
	Quellenverzeichnis .....	42

# 1 Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung

Straßenverkehrssimulatoren werden heute im Bereich der Verkehrserziehung und -schulung, aber auch in der Computer-/Videospiegelindustrie eingesetzt. Sie stellen, historisch gesehen, eine bereits fortgeschrittene Simulationstechnologie dar, die von Gewerbetreibenden und Industrieunternehmen schon vor vielen Jahren aufgegriffen wurde und erfolgreich vermarktet wird. Als ein herausragendes Beispiel aus dem Bereich der Spielindustrie kann die Spielereihe „Grand Theft Auto“ (GTA)<sup>1</sup> genannt werden, welche seit 1997 vermarktet wird. Jedoch bleibt dort weitgehend unbeachtet, wie ein gewisser „Nichtdeterminismus“ in einen überwiegend regelbasierten Ablauf, wie er im Straßenverkehr im Allgemeinen angenommen wird, integriert werden kann.

Aktuelle Agentensysteme beinhalten entweder fest „geskriptete“ Abläufe oder sind vollständig regelbasiert, so dass lediglich ein absolut regelkonformes Verhalten abgebildet wird. Dies entspricht jedoch nicht der Realität im Straßenverkehr oder auch in Multiplayer-gestützten Computerspielen. Auch wenn sich der Großteil der Verkehrsteilnehmer „näherungsweise“ regelkonform verhält, gibt es immer wieder Situationen, in denen diese Regeln absichtlich oder unabsichtlich verletzt werden. Beispiele hierfür sind das Überschreiten, aber auch systematische Unterschreiten der Höchst- bzw. Regelgeschwindigkeit, Parken in zweiter Reihe von Lieferfahrzeugen, Falschparken, zu dichtes Auffahren etc. Diese Abweichungen sind zudem häufig vom Charakter des Fahrers und von anderen Umständen (z. B. Zeitdruck) abhängig.

Gerade diese „alltäglichen“ Regelverletzungen sind für einen hohen Realitätsgrad von Verkehrssimulationen jedoch zwingend notwendig. Es hat sich herausgestellt, dass durch ein psychologisches Persönlichkeitsprofil eine individuelle Variabilität, so wie sie in der Realität ebenfalls vorhanden ist, abbilden lässt, da es jedem Agenten einen individuellen Charakter zuweist. Damit kann beispielsweise eine individuelle Risikoneigung modelliert werden, was letztlich zu einer erhöhten Variabilität des Verhaltens in vergleichbaren Situationen und somit zu einem Nichtdeterminismus führt.

Im Rahmen dieses Projektes wurde deshalb ein realitätsnaher Straßenverkehrssimulator entwickelt, der mittels eines detailliert definierten Agentensystems ein realistisches Verkehrsverhalten für die Verwendung in VR-Anwendungen simuliert. Die

---

<sup>1</sup> Rockstar Games, 1997-2013

Agenten wurden hierbei mit einem psychologischen Persönlichkeitsprofil versehen, um so ein realistischeres Fahrverhalten abzubilden, als es mit bisherigen Verkehrssimulationen möglich ist.

Gegenstand dieses Forschungsprojektes war außerdem die Untersuchung der Fragestellung, wie viele Agenten gleichzeitig auf einer gegebenen Visualisierungsplattform verwaltet und berechnet werden können. Der VR-basierte Simulator bildet ein globales System ab, wozu eine Vielzahl von autonomen und persistenten Agenten berücksichtigt wurde. Dabei ist es notwendig, dass die Aktionen der Agenten auch weiterhin beibehalten und weiter vorausberechnet werden, wenn sie sich nicht im Blickfeld bzw. in der Nähe des Betrachters befinden. Üblicherweise werden bei mikroskopischen Simulationen lediglich auf Basis der Betrachterposition Agenten erzeugt und anschließend gelöscht, sobald sie das Blickfeld für eine gewisse Zeit verlassen. Dies schränkt den Realismusgrad einer Simulation deutlich ein. Ein Beispiel hierzu ist, dass ein langsamer Verkehrsteilnehmer überholt wird und deshalb für eine bestimmte Zeit aus dem visuellen Feld des Benutzers verschwindet, sich aber anschließend von hinten wieder annähert, weil der Benutzer an einer roten Ampel warten muss. Würde dieser andere Teilnehmer gelöscht, sobald er sich kurzzeitig außerhalb des visuellen Feldes befindet, führt dies zu Inkonsistenzen.

Um eine Berechnung aller Agentenpositionen in Echtzeit zu ermöglichen, muss jedoch die *exakte* Berechnung der Agentenposition und deren Verhalten lediglich im Umfeld des Betrachters durchgeführt werden; im restlichen System sind grobe Schätzungen durchaus ausreichend. Dabei sollen nicht nur diverse Pkw durch entsprechende Agenten abgebildet werden, sondern zumindest im Sichtbereich auch z. B. Lkw, öffentliche Verkehrsmittel, Motorräder, Fußgänger und Fahrradfahrer. Zur Erleichterung und Optimierung der Berechnungen der Simulationen mussten in die grundsätzlich mikroskopische Ansicht (d. h. jeder Agent wird individuell behandelt) auch Elemente von mesoskopischen Simulationen eingebunden werden (d. h. individuelle Agenten werden als Pakete durch ein warteschlangenbasiertes Verkehrsnetz transportiert – s. Abschnitt 2.1.5). So kann gewährleistet werden, dass in einem bestimmten Sichtbereich das Verhalten jedes Agenten unter Einbeziehung sämtlicher anderer Teilnehmer detailliert und exakt in Echtzeit berechnet werden kann.

Das konkrete Anwendungsszenario dieses Forschungsprojektes besteht primär in der Straßenverkehrssimulation für die Verkehrserziehung, wie sie seit 2006 im Rahmen des Fahrradsimulationsprojektes des Zuwendungsempfängers (siehe <http://vc.h-brs.de/fivis>) durchgeführt wird. Das FIVIS-Projekt stellt somit die Evaluationsumgebung bereit, in der das hier bearbeitete Projekt getestet wurde. Darüber hinaus erschließen sich diverse andere Anwendungsmöglichkeiten von allgemeiner Verkehrserziehung (d. h. Verkehrssimulationen, wie sie beispielsweise in



Fahrschulen eingesetzt werden) über Simulationen zur Verkehrsplanung bis hin zu Computerspielen mit autonomen intelligenten Agenten. Gerade in der Computerspieleindustrie wird intensiv nach intelligenten Agentensystemen gesucht, die in Echtzeit berechnet werden können und eine intelligente Lösung des Problems des Determinismus bzw. Nichtdeterminismus von autonom agierenden Einheiten darstellen. Ein Beispiel dazu ist der Markt für Computerspiele, in denen Autoverkehr simuliert wird (siehe z. B. GTA). Hier wird üblicherweise eine nichtglobale Simulation verwendet, d. h. Agenten werden wieder aus dem Spiel entfernt, sobald sie den Sichtbereich des Spielers verlassen haben. Grundsätzlich stellen Entwicklungen von nichtdeterministischen Agentenprofilen jedoch auch für viele andere Spielkonzepte neue innovative Verbesserungen dar, da auch dort Agenten (z. B. als potentielle Gegner) eingesetzt werden, die sich abgesehen von einem randomisierten Auftreten stets deterministisch verhalten. Dies mindert die Attraktivität von Spielen, insbesondere wenn sie bereits mehrfach gespielt worden sind und die Stellen, an denen Agenten potentiell erscheinen können, bereits bekannt sind.

Ein Ziel dieses Forschungsprojektes war deshalb eine prototypische Straßenverkehrssimulation für eine 3D-Darstellung in Echtzeit zu entwickeln, die in das vom Zuwendungsempfänger entwickelte FIVIS-System integriert und dort evaluiert wird. FIVIS ist eine immersive Fahrradsimulationsumgebung, die u. A. zur Verkehrserziehung genutzt wird. Um hier eine möglichst hohe Lernwirkung zu erzielen, ist eine möglichst realitätsgetreue Verkehrssimulation notwendig.

Agenten, die sich nicht in oder nahe dem Sichtbereich des Benutzers befinden, können weniger detailliert berechnet werden, wodurch die benötigte Rechenzeit deutlich verringert werden kann („Level of Detail-Ansatz“). Eine besondere Herausforderung war die Verbindung der Mikrosimulation mit den mesoskopischen Elementen, in der Simulation als „Mikro-Meso-Link“ bezeichnet (s. Abschnitt 2.1.6).

Eine Mikrosimulation mit einer größeren Zahl von Agenten ist stets mit einem hohen Bedarf an Rechenleistung verbunden. Durch den Mikro-Meso-Link kann eine Simulationsumgebung geschaffen werden, die die zur Verfügung stehende Rechenleistung nicht gleichmäßig auf die Agenten verteilt, sondern gezielt für die Agenten einsetzt, die sich in der Umgebung bzw. im Sichtbereich des Benutzers befinden. Hierdurch wurde es möglich, die für die Simulation von realistischen Szenarien notwendige Rechenleistung deutlich zu reduzieren.

Wichtig war ebenfalls die Entwicklung und Abbildung verschiedener Klassen von Agenten (Pkw, Lkw, Bus etc.), die zusätzlich zum ihnen zugeordneten psychologischen Persönlichkeitsprofil ein unterschiedliches Verhalten des Agenten bewirken. So soll ein Busfahrer grundsätzlich ein anderes Verhalten im Straßenverkehr zeigen

als ein Fahrradfahrer, auch wenn ggf. das Persönlichkeitsprofil identisch ist (beispielsweise auf Grund der Größe des Fahrzeugs, der Verantwortung für die Fahrgäste etc.). Dieses Verhalten korrekt und realistisch abzubilden und es mit einem Modell der Persönlichkeitspsychologie geeignet zu verbinden, war ein wichtiges Forschungsziel.

Das Verhalten von Verkehrsteilnehmern ändert sich ebenfalls je nach Umgebung und aktueller Situation. So ist das Verkehrsverhalten in einer Großstadt zu unterscheiden von dem in eher ländlichen Gegenden mit viel Überlandverkehr und des Weiteren vom Verhalten auf Autobahnen. Auch ist das Verkehrsverhalten in bergigen Gegenden anders als in weitläufigem Flachland. Da die Projektlaufzeit jedoch zeitlich begrenzt ist, wurde dieser Umgebungseinfluss nicht umfassend untersucht. Im AVeSi-Projekt wurde deshalb die Entwicklung und Evaluierung der Verfahren, Methoden und Modelle vorerst für den Verkehr in einer urbanen Umgebung durchgeführt, die im Hinblick auf das Verkehrstraining für Fahrradfahrer am interessantesten erscheint.

## **1.2 Voraussetzungen**

Bereits vor Beginn des Forschungsprojektes wurde beim Zuwendungsempfänger der Fahrradfahrsimulator FIVIS entwickelt. Es bestand also bereits ein funktionierendes System, das für das AVeSi-Forschungsprojekt als Testumgebung für Evaluationszwecke verwendet werden konnte. Außerdem konnte so auf eine bestehende Sammlung von 3D-Modellen für die Präsentation des neuen Systems zurückgegriffen werden (z. B. eine urbane Umgebung, verschiedene Fahrzeuge, Fußgänger etc.). Weitere Voraussetzungen waren nicht vorhanden.

## **1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Beginn des Vorhabens**

Verfügbare Verkehrssimulationen behandeln die Thematik entweder auf makroskopischer und analytischer Ebene oder mikroskopisch, aber lokal eingeschränkt [3], [4], [5], [6], [7], [8].

Eine mikroskopische Simulation beschreibt das Verhalten individueller Verkehrsteilnehmer, insbesondere die tatsächliche Position im Straßenverkehr sowie das Verhalten in Bezug auf Verkehrsregeln. Viele solcher Systeme sind jedoch lokal eingeschränkt, d. h. Verkehrsteilnehmer, die sich nicht im Betrachtungsfeld befinden, werden auch nicht berechnet. Verkehrsteilnehmer werden abhängig von ihrer Entfernung zum Betrachter erzeugt oder entfernt. Dies ermöglicht jedoch keine realitätsgetreue Darstellung des Verkehrs, da essentielle Parameter wie z. B. die Verkehrsdichte extern berechnet werden müssen. Des Weiteren besteht bei vielen solchen Simulatoren lediglich eine eingeschränkte Interaktionsmöglichkeit. Bei UC-win [9] beziehen beispielsweise die Verkehrsteilnehmer den Benutzer nicht in ihr Verhalten

ein; so passen sie nicht ihre Geschwindigkeit an und bremsen nicht, wenn eine Kollision mit dem Benutzer abzusehen ist, d. h. die Verkehrsteilnehmer verhalten sich streng regelbasiert.

Eine Einbeziehung des Benutzers wird jedoch im Bereich der Computerspiele eingesetzt, so zum Beispiel im erfolgreichen Spiel „GTA IV“.<sup>2</sup> Hier wird auf sämtliches Verhalten des Benutzers reagiert, jedoch nur in bedingtem Rahmen. So werden z. B. Verkehrsregeln von Agenten grundsätzlich nicht verletzt (streng regelbasiertes Verhalten mit ersten Ansätzen von Abweichungen, die offensichtlich jedoch randomisiert sind). Auch ist die Berechnung der Simulation stark begrenzt – oft ist es ausreichend, dass ein Agent den Sichtbereich des Spielers kurzzeitig verlässt, um aus dem Spiel entfernt zu werden. Dies kann zu irritierenden Situationen führen, z. B. wenn der Spieler sich umdreht, sich kurze Zeit später wieder zurückdreht und eine völlig andere Verkehrssituation mit völlig neuen Teilnehmern vorfindet.

Das klassische Mikrosimulationsmodell für den Straßenverkehr ist das Nagel-Schreckenberg-Modell [3]. Es ist zwar geeignet, wichtige Verkehrsparameter für Schnellstraßen zu prognostizieren und beinhaltet eine stochastische Komponente in Form einer „Trödelwahrscheinlichkeit“, ist aber für die Nachbildung eines realistischen Verhaltens in einer urbanen Umgebung viel zu ungenau. Insbesondere beschränkt es sich auf den Kfz-Verkehr, bildet hier verschiedene Fahrzeugtypen (typischerweise Pkw und Lkw) ab und wird insbesondere zur Simulation des Verkehrs auf Autobahnen benutzt. So basiert beispielsweise das Verkehrsinformationssystem „autobahn.NRW“ [10] auf einem angepassten Nagel-Schreckenberg-Modell.

Für andere Simulationssysteme (SUMO [11], TRANSIMS [12], MITSIMLab [13], DRACULA [14], VISSIM [15], AIMSUN [16]) gilt ähnliches. Generell ist das Bestreben dieser Modelle, durch die Simulation Aussagen über wichtige verkehrstechnische Größen treffen zu können. Im Gegensatz dazu wird in diesem Projekt eine möglichst realistische Simulation des Verkehrs für eine immersive 3D-Umgebung angestrebt. Hierfür waren keine speziellen Mikrosimulationsmodelle bekannt, die in einem integrierten Modell neben Kraftfahrzeugen speziell Fahrradfahrer und Fußgänger mit berücksichtigen. Von PTV existiert ein System<sup>3</sup>, welches Fußgänger berücksichtigt. Die Integration von psychologischen Komponenten im Rahmen des dort genutzten Social Force-Modells verbleibt jedoch unklar.

---

<sup>2</sup> Rockstar Games, 2013

<sup>3</sup> PTV Viswalk: <http://vision-traffic.ptvgroup.com/de/produkte/ptv-viswalk/>

Vergleichbares gilt für die Integration von speziellen Verkehrsteilnehmern, wie ÖPNV-Bussen, Müllabfuhr sowie Paketzusteller. Gerade diese Klassen von Verkehrsteilnehmern bewirken häufig Störungen im Verkehrsfluss, die zu besonderer Aufmerksamkeit und ggf. zu kritischen Situationen führen, die für eine Verkehrssimulationsanwendung zu Trainingszwecken von besonderer Bedeutung sind. Die im Modell enthaltenen psychologischen Faktoren sind dabei eine deutliche Abgrenzung zu allen anderen Modellen. Diese Faktoren sollen es ermöglichen, dass nicht nur der Verkehr aggregiert realitätsnah simuliert wird, sondern auch das Verhalten jedes einzelnen Agenten.

Wie nun konkret die psychologischen Persönlichkeitsprofile nach einer geeigneten Modellierung in der Simulation operationalisiert werden, ist integraler Gegenstand des hier beschriebenen Forschungsprojektes. Für die Durchführung solcher Mikrosimulationen wird eine hohe Rechenleistung benötigt, typischerweise kommen hierbei wie bei TRANSIMS [12] Clustersysteme zum Einsatz.

Eine makroskopische, analytische Simulation beschäftigt sich nicht mit dem individuellen Verhalten einzelner Verkehrsteilnehmer und bildet diese auch nicht ab. Auch die spezifizierten Positionen individueller Verkehrsteilnehmer werden nicht berücksichtigt. Stattdessen wird die allgemeine Verkehrsdichte berechnet und beschrieben. Diese Art der Simulation ist recht weit verbreitet und sehr fortgeschritten, jedoch lässt sie keine Interaktion durch den Benutzer als Verkehrsteilnehmer zu und ist daher in ihrer klassischen Ausprägung für eine Verwendung in einer VR-basierten Umgebung ungeeignet. Nichtsdestotrotz lassen sich einzelne Konzepte zur Abbildung verschiedener Vorgänge im Straßenverkehr auch für diese Anwendung nutzen. Eine Reihe von Beispielen für solche Simulationen findet man in [17]. Die Klasse der mesoskopischen Verkehrssimulationen liegt zwischen den mikroskopischen und makroskopischen Modellen. Ziel ist es wichtige mikroskopische Eigenschaften zu erhalten, jedoch diese Details ausreichend zu abstrahieren, um Skalierbarkeit zu erreichen. Ein bekanntes Beispiel ist das FastLane Modell [18], das die Grundlage für die Verkehrssimulation in MATSim bildet [19].

## **2 Erzielte Ergebnisse und Vergleich mit der Zielstellung**

An dieser Stelle werden die Ergebnisse des Projekts detailliert aufgeführt. Zum Vergleich mit der Zielstellung des Projektantrags entsprechen die folgenden Abschnitte den ursprünglich geplanten Arbeitspaketen des Antrags. Die Arbeitspakete werden jeweils bezüglich der tatsächlichen Umsetzung kommentiert. Ein zusätzliches Arbeitspaket ergab sich durch die Integration eines kognitiven Modells zur Wahrnehmung (s. Abschnitt 2.1.7), welches im Antrag nicht vorgesehen war.

## 2.1 Simulationsumgebung

Eines der wichtigsten Ziele von Beginn an war die Integration der Verkehrssimulation in den existierenden Fahrradfahr-Simulator FIVIS. Um die Interoperabilität der beiden Systeme zu gewährleisten wurde das Visualisierungssystem des Fahrradfahr-Simulators von Grund auf erneuert und in Verbindung mit dem hier beschriebenen Forschungsprojekt konzipiert. Als Grundlage wurde die Unity Engine<sup>4</sup> gewählt, da sie einen einfachen Zugang erlaubt, ein Multi-Screen-Setup unterstützt und in der Grundversion kostenlos nutzbar ist. Durch die Integration der entwickelten Verkehrssimulation in die Unity-Umgebung, die auch für FIVIS verwendet wird, konnten die beiden Systeme problemlos kombiniert und die Verbindung zwischen Visualisierung und Simulation ohne aufwändige Schnittstellendefinition realisiert werden.

### 2.1.1 Verkehrsagentenkonzept

Die zu entwickelten Verkehrsagenten sollten die folgenden Eigenschaften besitzen:

- Erweiterbar mit einem psychologischem Persönlichkeitsprofil für individualisierbares Verhalten
- Einhaltung von Verkehrsregeln
- Bewältigung spezieller Verkehrsszenarien
- Trennung von Entscheidungen und Fahrphysik
- Trennung von Verstand und Körper
- Realistisches Fahrverhalten
- Realistische Wahrnehmung

Um die Anforderungen erfüllen zu können, wurde in der finalen Version eine modulare Architektur für die Agenten entwickelt (siehe Abbildung 1). Ein Agent kann demnach entweder stationär oder beweglich sein. Damit sich ein Benutzer in der virtuellen Welt bewegen kann und andere Agenten mit ihm interagieren und kommunizieren können, ist er als ein Spezialfall eines mobilen Agenten in der Architektur modelliert. Alle anderen Agenten sind „künstliche Agenten“ (ArtificialAgent), die in der Grundform (rein regelbasiert), mit statischem Persönlichkeitsprofil, oder mit dynamischem Persönlichkeitsprofil inklusive Emotionen instanziiert werden können (s. Abschnitt 2.4). Jeder künstliche Agent verfügt über einen Verstand, der eine Konfiguration kognitiver Module für Navigation, Entscheidungen, Wahrnehmung und Zustände (Memory) enthält. Auf das Wahrnehmungsmodul wird in Abschnitt 2.1.7 noch genauer eingegangen. Das Einhalten von Verkehrsregeln wird durch die Navigation und

---

<sup>4</sup> <http://www.unity3d.com>

„Strategien“ realisiert. Die Anzahl verfügbarer Strategien kann beliebig erweitert werden. Neben Strategien für Standardsituationen können auch spezielle Abläufe für Spezialfälle implementiert werden, z. B. das Verhalten an einer unregelmäßigen Kreuzung, wenn aus jeder Richtung ein Fahrzeug heranzieht.

Zusätzlich besitzt jeder Agent einen Körper, der festlegt, wie der Agent in der virtuellen Welt aktuell verkörpert ist. Dabei kann ein Agent nicht nur unterschiedliche Körper besitzen (Pkw, Fahrrad, Bus etc.), sondern kann diese auch während der Simulation austauschen. D. h. ein Pkw-Fahrer könnte beispielsweise anhalten, sein Auto verlassen und seine Fahrt später mit einem Fahrrad fortsetzen.

Jedes Fahrzeug besitzt zwei unterschiedliche Simulationsstufen, eine mikroskopische Repräsentation und eine vereinfachte Form (s. auch Abschnitt 2.1.6). In der vereinfachten Form beschränkt sich die Unterscheidung der Verkehrsteilnehmer zum Großteil auf die visuelle Repräsentation (d. h. das 3D-Modell des Agenten), daher ist es nicht notwendig unterschiedliche Klassen für unterschiedliche Fahrzeugagenten vorzusehen. Die mikroskopisch simulierten Fahrzeuge beinhalten zusätzlich eine physikalische Komponente, die mit der in Unity integrierten Physikengine simuliert wird.

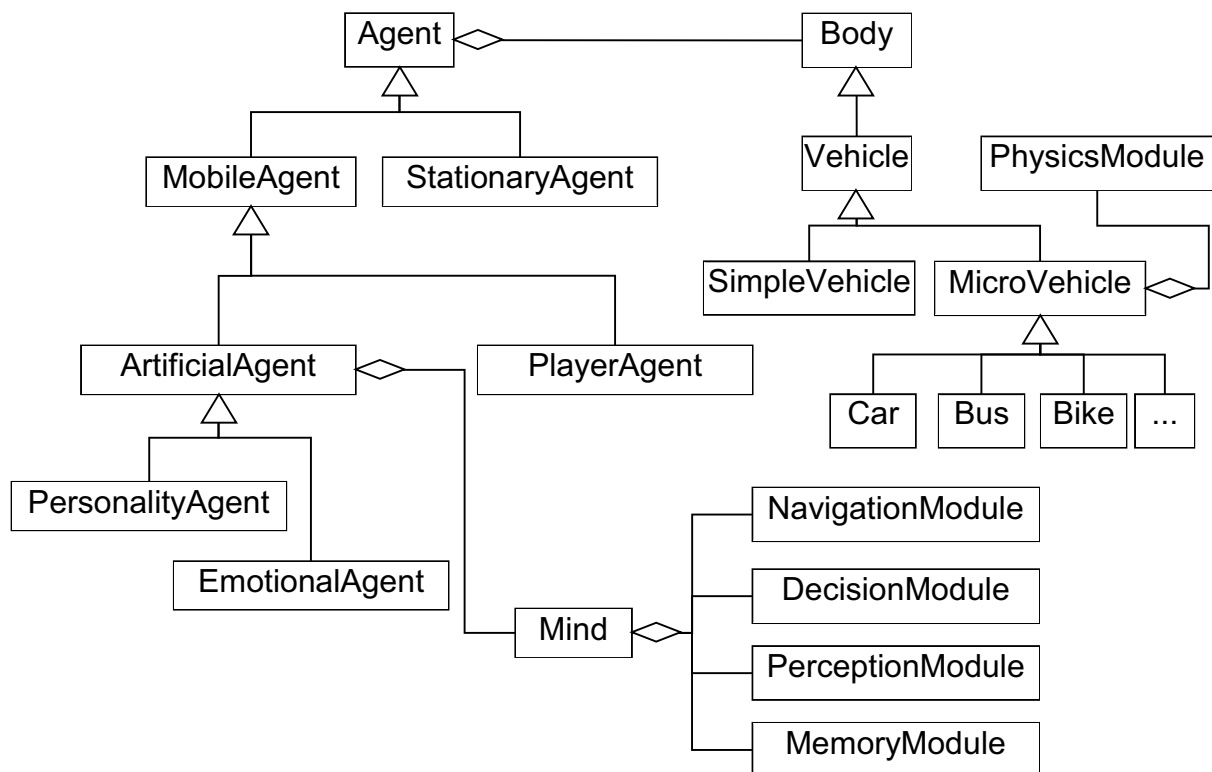


Abbildung 1: Auszug aus der in AVeSi konzipierten Architektur für Verkehrsagenten. Wichtig sind die Trennung zwischen Denkprozessen (Mind) und der physikalischen Darstellung des Agenten sowie der modulare Aufbau.

## 2.1.2 Routenfindung

In der aktuellen Realisierung sind zwei Navigationsmodule für Fahrzeugagenten (Pkw, Bus, Fahrrad etc.) umgesetzt worden. Ein Modul wählt aus der Anzahl ausgehender Verbindungen einer Straße zufällig, welche Straße als nächstes befahren wird. Diese Routenfindung konnte schnell umgesetzt werden, ist allerdings unrealistisch. Durch die zufällige Auswahl kann es vorkommen, dass Agenten im Kreis fahren (z. B. durch mehrfaches Rechtsabbiegen), was einen Benutzer irritieren würde. Eine weitere Modulvariante bietet die Möglichkeit, feste Routen als eine Liste von Straßen manuell zu definieren. Dieses Modul erlaubt die Abbildung fester Routen für Linienverkehr wie Busse. Ein Modul, welches eine Route dynamisch berechnet wäre grundsätzlich erstrebenswert, war aber für die bisher berücksichtigten Anwendungsfälle nicht notwendig.

## 2.1.3 Definition einer Straßennetzwerkrepräsentation

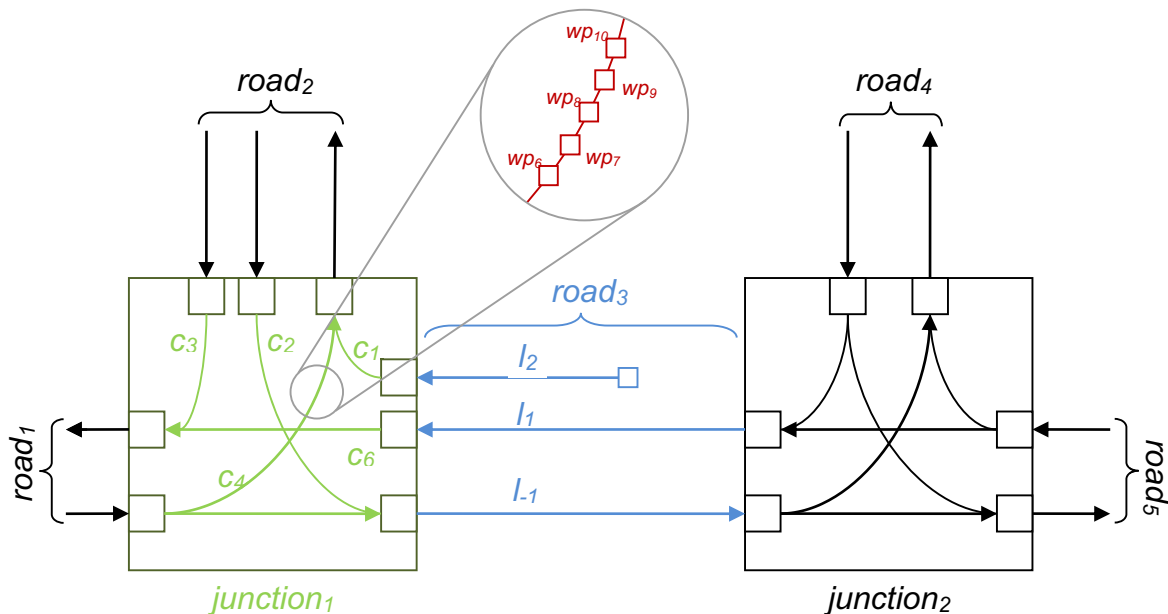
Für die Navigation der Verkehrsagenten wird zusätzlich zur Szenengeometrie (d. h. den Straßen, Bürgersteigen etc.) eine Repräsentation des Straßennetzes benötigt, die die Semantik der Verkehrswege wiedergibt und es den Agenten somit ermöglicht, sich im virtuellen Straßenverkehr zu orientieren. Der OpenDRIVE-Standard der Firma VIRES Simulationstechnologie GmbH<sup>5</sup> wurde diesbezüglich als sinnvolle und zukunftssichere Grundlage identifiziert. Mit der Trian3D Builder Software der Firma TrianGraphics<sup>6</sup> können außerdem nicht nur Inhalte für benötigte virtuelle Szenarien generiert werden, sondern gleichzeitig ermöglicht die Software den Export einer passenden Beschreibung in ein OpenDRIVE-konformes Format. Dieses Exportformat wurde in den definierten Arbeitsablauf zur Erstellung von Simulationsumgebungen integriert. Mit diesem erweiterten Ablauf ist es möglich nahezu beliebige Verkehrsszenarien innerhalb kürzester Zeit automatisch zu erstellen (s. Abschnitt 2.3.1).

Das Grundelement der Beschreibung sind Wegpunkte, die zu Segmenten zusammengefasst werden können. Die Reihenfolge und Positionen der Wegpunkte bestimmen dabei den geometrischen Verlauf des Segments. Sie können mit Hilfe des definierten Ablaufs automatisch anhand einer OpenDRIVE-Beschreibung erzeugt oder, wenn die 3D-Geometrie ohne OpenDRIVE-Informationen besteht, mit Hilfe eines entwickelten Editorwerkzeugs manuell platziert werden. Es existieren zwei verschiedene Segmenttypen: Spuren und Verbindungen. Spuren können wiederum zu

---

<sup>5</sup> <http://www.opendrive.org/>

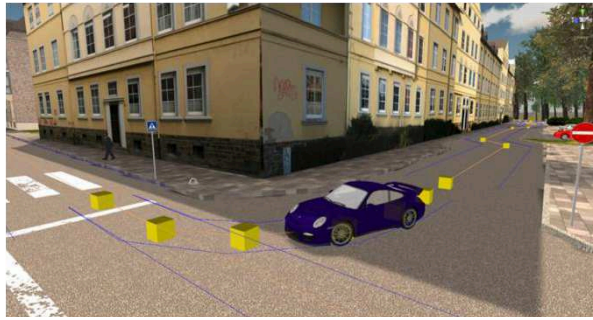
<sup>6</sup> <http://www.triangraphics.de/index.php?1=Referenzen&2=Trian3D%20Builder&l=ger>



**Abbildung 2:** Beispielhafte Darstellung einer Straßennetzwerksrepräsentation einer Straße eingerahmt von zwei T-Kreuzungen. Spuren werden zu einer Straße zusammengefasst. Gleichgerichtete Spuren einer Straße werden nach außen aufsteigend indiziert. Das Vorzeichen beschreibt die Fahrtrichtung relativ zur Beschreibungsrichtung der Straße. Die dritte Straße (blau markiert) enthält eine rechte Spur ( $l_1$ ), die Kreuzung 1 mit Kreuzung 2 durchgehend verbindet, und 2 linke Spuren. Die Abbiegespur ( $l_2$ ) beginnt erst im Lauf der Straße. Kreuzungen sind Verbindungen zugeordnet, die alle Wege über die Kreuzung beschreiben. Die Spur  $l_2$  ist beispielsweise über die Verbindung  $c_1$  der Kreuzung 1 (grün markiert) mit Straße 2 verbunden. Die Grundlage für die Richtung und Geometrie eines Segments (Spur oder Verbindung) ist eine sortierte Liste von Wegpunkten. Dies ist beispielhaft für die Verbindung  $c_4$  verdeutlicht.

Straßen zusammengefasst werden. Verbindungen beschreiben, wie ein Verkehrsteilnehmer von einer Spur einer Straße auf eine Spur einer angeschlossenen Straße gelangen kann. Da Straßen über Kreuzungen verbunden sind, beschreiben Verbindungen alle möglichen Wege über die Kreuzung, der sie zugeordnet sind. Semantische Informationen über das Straßennetzwerk können zusätzlich auf den verschiedenen Ebenen hinterlegt werden. So enthalten Spuren beispielsweise Informationen über die Länge der Spur, Nachbarschaftsbeziehungen zu den anderen Spuren der gleichen Straße und Geschwindigkeitsbegrenzungen. Wegpunkte können nicht nur interne Informationen repräsentieren (z. B. das Ende der Spur), sondern können auch externe Systeme oder Objekte referenzieren, damit diese in das Fahrverhalten mit einbezogen werden können (z. B. Lichtsignalanlagen, Verkehrsschilder, Fußgängerüberwege, Hindernisse). Eine schematische Übersicht über die entwickelte Repräsentation ist in Abbildung 2 beispielhaft dargestellt. Die Straßennetzrepräsentation wird ebenfalls für das Hinterlegen von Verkehrsregeln verwendet, so werden zum Beispiel Vorfahrtsregeln als Tabelle einer Kreuzung zugeordnet. Aus der Tabelle lässt sich ablesen, welche Verbindung zwischen





(a)



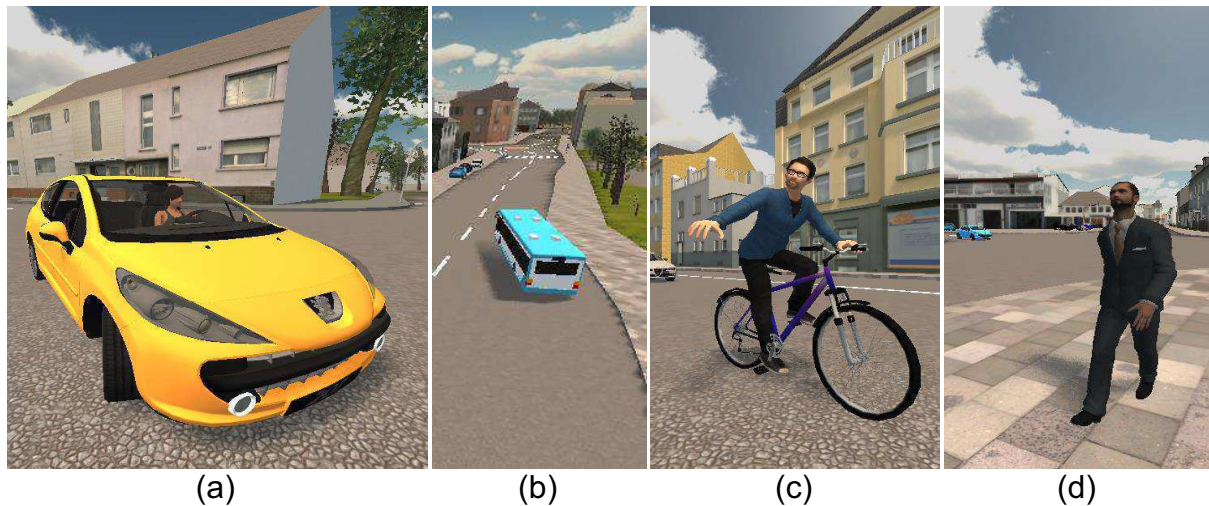
(b)

**Abbildung 3: Simulierte Agenten auf der entwickelten Straßennetzwerkrepräsentation.** Bild (a) zeigt einen mikroskopisch simulierten Agenten, der Wegpunkten (gelbe Würfel) auf einer Verbindung zwischen zwei Spuren zeigt. In (b) ist die mesoskopische Ansicht des Netzwerks zu sehen. Die grünen Würfel zeigen, wo sich eine Kreuzung befindet. Agenten werden durch farbige Kugeln auf den Straßenabschnitten (gelbe Linien) zwischen den Kreuzungen dargestellt. Die Visualisierung des Netzwerks dient in dieser Form lediglich der Evaluierung und der Verifikation und ist im regulären Simulatorbetrieb nicht sichtbar.

eingehenden Spuren Priorität über welche anderen Verbindungen hat. Zusätzlich beinhaltet das Konzept die Möglichkeit, die modellierten Straßenelemente auf einer weiteren Abstraktionsebene zu repräsentieren. In der entstandenen Implementierung beinhaltet diese eine Repräsentation von Straßen und Kreuzungen für die mesoskopische Simulationsebene (siehe Abschnitt 2.1.5). Abbildung 3 zeigt, wie Agenten in der Simulationsumgebung auf dem definierten Straßennetzwerk simuliert werden. Weitere Details zur Straßennetzwerkrepräsentation sind in [V6], [V8], [V10], [V11] und [S5] zu finden.

#### 2.1.4 Definition einzelner Klassen und Subklassen der Verkehrsteilnehmer

Dank der komponentenbasierten Agentenarchitektur (s. Abschnitt 2.1.1 und Abbildung 1) können einzelne Klassen und Subklassen mit geringem Aufwand in die Simulation integriert werden. Die Definition eines separaten Agentenkörpers mit den entsprechenden Eigenschaften erlaubt es zudem, dass Agenten ihre Art der Fortbewegung während der Simulation ändern können. Da sich ein Agent seiner Komponente für die Fortbewegung bewusst ist, können auch spezifische Verhaltensmuster mit dem Fortbewegungsmittel assoziiert werden. Zum Beispiel könnte sich ein Agent vorsichtiger verhalten, wenn er anstatt eines Pkw einen Bus fährt, weil er in diesem Fall die Verantwortung für eventuell transportierte Passagiere trägt. Zum aktuellen Zeitpunkt wurden 4 unterschiedliche Agententypen beispielhaft realisiert: Pkw, Bus, Fahrradfahrer und Fußgänger (s. Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Vier unterschiedliche Fortbewegungsmittel, die für Verkehrsagenten prototypisch realisiert wurden: Pkw (a), Bus (b), Fahrrad (c) und Fußgänger (d). Bei allen Varianten handelt es sich jeweils nicht um unterschiedliche Agentenimplementierungen, sondern lediglich um andere Fortbewegungen und Repräsentationen mit den jeweils dazu gehörigen Komponenten (z. B. angepasste Komponenten für Navigation).

### 2.1.5 Persistente Agenten durch mesoskopische Verkehrssimulation

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde untersucht, welche Verkehrsmodelle sich für die Simulation der Verkehrsagenten eignen, die sich nicht im unmittelbaren Umfeld des Benutzers befinden. In klassischen VR-Anwendungen werden Agenten, die den direkten sichtbaren Bereich des Benutzers verlassen, aus der Simulation entfernt, insbesondere um Ressourcen zu sparen. Ziel in diesem Forschungsprojekt war jedoch ein persistentes System abzubilden, bei dem alle Agenten zu jedem Zeitpunkt simuliert werden. Um den geforderten Realismus zu erreichen, müssen Agenten im Umfeld des Benutzers sehr detailliert und mit hohem Rechenaufwand

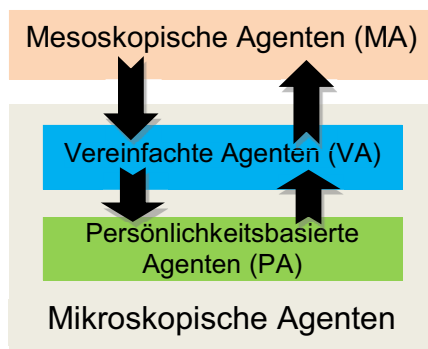
simuliert werden. Um dennoch ein echtzeitfähiges System entwickeln zu können, muss der Detailgrad für Agenten, die sich nicht im Benutzerumfeld befinden, drastisch verringert werden. Der anfängliche Ansatz für diese Problematik sah vor, auf makroskopische Verkehrsmodelle zurückzugreifen, die den Verkehr mit nur wenigen, aggregierten Werten simulieren, z. B. Verkehrsdichte, -fluss und Durchschnittsgeschwindigkeiten. Dadurch kann auf die detaillierte Modellierung und Berechnung von Verhalten verzichtet werden, wie es bei mikroskopischen Verkehrssimulationen der Fall ist. Gleichzeitig ist es jedoch notwendig, jederzeit einen Übergang von der aggregierten zur detaillierten Simulation zu gewährleisten. Untersuchungen eines implementierten Partikelsystems auf Basis des makroskopischen Lightham-Whitham-Richards (LWR) Modells zeigten, dass dieser Ansatz aufgrund fehlender Details in makroskopischen Modellen nicht für die Anwendung im Projekt geeignet ist [V5].

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde anstatt einer makroskopischen eine mesoskopische Verkehrssimulation für nicht sichtbare Agenten entwickelt [V7]. Mesoskopische Verkehrssimulationen kombinieren Eigenschaften aus mikroskopischen und makroskopischen Modellen, um einerseits wichtige Informationen (z. B. die Persönlichkeit eines Agenten) zu erhalten, jedoch gleichzeitig Skalierbarkeit durch Detailabstraktion zu erreichen. Die entwickelte Simulation basiert auf dem FastLane Modell [18], einem Warteschlangenmodell, das bereits in der Verkehrssimulation/-planung Verwendung findet. Das Modell wurde für die Anwendung im Projektkontext angepasst und implementiert. Dafür wird das Straßennetzwerk (s. Abschnitt 2.1.3) in abstrahierter Form durch Knoten (Kreuzungen) und Kanten (Straßen zwischen zwei Kreuzungen) repräsentiert. Fahrzeuge werden nach dem Vorbild der Warteschlangentheorie als Pakete in Priority-Queues durch das Netzwerk transportiert. Die Knoten dienen dabei als Bedienstationen, die Fahrzeuge von eingehenden auf ausgehende Kanten so umleiten, dass ein plausibler Verkehrsfluss entsteht. Die Performanz des implementierten Systems wurde in verschiedenen Testszenarien überprüft (s. Abschnitt 2.5.1). Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die mesoskopische Simulation für die angestrebten Agentenzahlen und Netzwerkgrößen vernachlässigbar wenig zusätzliche Rechenleistung beansprucht [V7].

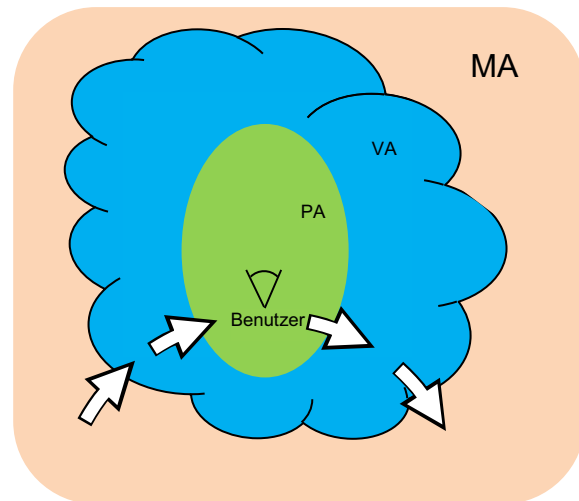
Die implementierte mesoskopische Simulation ist nicht Teil der in Abschnitt 2.1.1 vorgestellten Agentenarchitektur. Der Grund dafür ist die unterschiedliche Herangehensweise der beiden Simulationen. In der mikroskopischen Schicht wird die Simulation von den Agenten getrieben. Das bedeutet, dass der Straßenverkehr durch das Handeln und die Interaktion der vorhandenen Agenten zu Stande kommt. Im Gegensatz dazu nehmen die Agenten in der mesoskopischen Sicht nur eine passive Rolle ein, da sie von der Simulation wie Pakete durch das Netzwerk „geschoben“ werden. Aus diesem Grund besitzen mesoskopische Agenten lediglich eine Referenz auf das dazu passende mikroskopische Agentenobjekt. Durch diese Referenz können spezifische Informationen (z. B. Persönlichkeitsprofil, emotionaler Zustand, Fortbewegungsmittel inklusive Eigenschaften wie Farbe und Marke) jederzeit wiederhergestellt werden.

### **2.1.6 Mikro-Meso-Link**

Um eine konsistente Simulation einer kompletten virtuellen Szene zu ermöglichen, wurden die entwickelten mikroskopischen und mesoskopischen Ansätze kombiniert. Da die mesoskopische Simulation keine visuelle Repräsentation besitzt, dürfen mit diesem Ansatz nur Bereiche simuliert werden, die der Benutzer nicht sehen kann. Da es trotzdem vorkommen kann, dass ein Benutzer in der virtuellen Umgebung relativ weit sehen kann, kann die Echtzeitanforderung selbst mit der mesoskopischen



(a)



(b)

Abbildung 5: Die Simulation der Agenten besteht aus einem mikroskopischen und einem mesoskopischen Anteil. Ziel ist es, vor allem realistische Verkehrsagenten zu simulieren. Dies geschieht unter anderem durch das Hinzufügen von Persönlichkeitsprofilen. Diese persönlichkeitsbasierten Agenten (PA) stellen den höchsten Detail- und damit Realitätsgrad dar. Um Berechnungskapazitäten einzusparen, werden PA jenseits eines festgelegten Radius um den Benutzer durch das Deaktivieren rechenintensiver Prozesse vereinfacht (VA). In Bereichen, die der Benutzer nicht sehen kann, findet ein weiterer Transfer in die abstraktere mesoskopische Simulationsebene statt. Die Transfers sind in (a) abstrakt und in (b) räumlich dargestellt. Der für den Benutzer sichtbare Bereich ist dabei nicht konstant, sondern abhängig von der aktuellen Position in der virtuellen Szene und der Blickrichtung.

Simulationsebene nicht immer erfüllt werden. Aus diesem Grund wurde ein weiterer Agententyp definiert, der lediglich über eine visuelle Repräsentation verfügt, d. h. physikalische Eigenschaften, Persönlichkeit, Emotionen und kompliziertere Entscheidungsprozesse haben keinen Einfluss auf das Verhalten und werden daher nicht fortlaufend simuliert. Durch diesen Schritt wird ebenfalls Rechenkapazität eingespart. Da die Position der Agenten in jedem Frame neu berechnet wird, handelt es sich hierbei ebenfalls um eine mikroskopische Simulation.

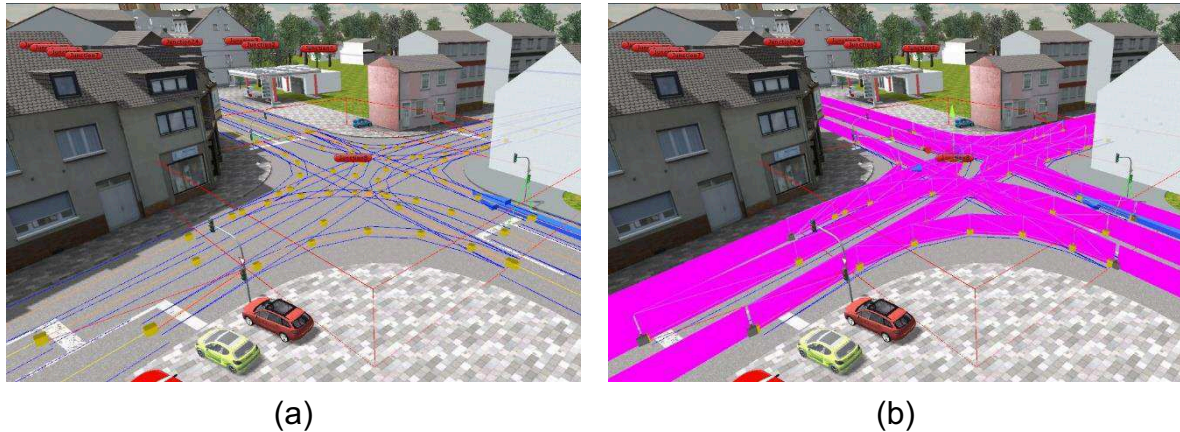
Das Hauptproblem bei der Kombination der Ansätze besteht darin herauszufinden, wann Agenten von einer Simulationsebene in die andere transferiert werden müssen, ohne dass der Benutzer den Wechsel bemerkt. Eine Übersicht der Transfers ist in Abbildung 5 dargestellt. Da persönlichkeitsbasierte Agenten (PA) und vereinfachte Agenten (VA) jeweils mikroskopisch simuliert werden und über die gleiche visuelle Repräsentation verfügen, kann der Wechsel zwischen beiden Typen zu einem beliebigen Zeitpunkt durchgeführt werden, d. h. sobald ein PA einen gewissen Radius um den Benutzer verlässt, werden alle nicht weiter benötigten Bestandteile deaktiviert. Der Benutzer könnte gegebenenfalls einen Unterschied im Verhalten der Agenten feststellen. Aus diesem Grund sollte der Übergang nicht zu nah am Benutzer geschehen. Der Transfer der vereinfachten Agenten in die mesoskopische Simulation

darf erst dann erfolgen, wenn der Agent für den Benutzer nicht mehr sichtbar ist. Wann welcher Bereich der Simulationsumgebung für einen Benutzer sichtbar ist, kann jedoch nicht pauschal bzw. vorab festgestellt werden, vor allem weil Sichtbarkeitstests zur Laufzeit äußerst rechenintensiv sein können. Letzteres würde dem Sinn einer mesoskopischen Simulation zum Einsparen von Rechenkapazität widersprechen.

Aus diesem Grund wird die Sichtbarkeit nicht zur Laufzeit berechnet, sondern im Voraus. Dazu wird die gesamte virtuelle Szene in Gitterzellen aufgeteilt. Anschließend wird für jede Zelle des Gitters in einem Offline-Prozess ermittelt, welche Kreuzungen von dort aus sichtbar sind; diese werden dann in einer Liste gespeichert. Die Sichtbarkeit wird durch ein strahlbasiertes Verfahren ermittelt. Dabei ergeben sich drei grundlegende Probleme:

- (1) Abhängig von der Größe der Zelle können unterschiedliche Objekte von unterschiedlichen Positionen in der Zelle sichtbar sein.
- (2) Um die Sichtbarkeit für einen Punkt zu testen, müssen Strahlen in jede Richtung verfolgt werden, was nur mit unendlich vielen Strahlen möglich wäre.
- (3) Kreuzungen und Straßen haben keine explizite visuelle Darstellung und keine physikalische Repräsentation in der Szene. Sie können daher nicht von den Strahlen getroffen werden.

Die Probleme (1) und (2) werden durch einen probabilistischen Ansatz gelöst, d. h. es wird von zufälligen Punkten innerhalb der Zelle ein Strahl in eine zufällige Richtung ausgesendet. Die Anzahl der Punkte (und Richtungen) kann im Vorfeld definiert werden. Da die Berechnung nicht zur Laufzeit stattfindet, kann diese Zahl auch relativ groß gewählt werden, so dass eine ausreichende Annäherung an das wahre Ergebnis erreicht werden kann. Problem (3) wird dadurch gelöst, dass in einem Vorverarbeitungsschritt Geometrie für Straßen und Kreuzungen erzeugt wird, die orthogonal zur Ausrichtung der Straße/Kreuzung ausgerichtet ist. Für das Erzeugen der Geometrie wird die wegpunktbasierte Straßennetzwerkrepräsentation verwendet (s. Abschnitt 2.1.3). Abbildung 6 zeigt einen Kreuzungsbereich mit und ohne Hilfsgeometrie. Trifft ein Strahl die Hilfsgeometrie einer Kreuzung, wird sie zur Liste der aktuell getesteten Zelle hinzugefügt. Trifft ein Strahl die Geometrie einer Straße, werden deren Start- und Endkreuzung der Liste hinzugefügt. Nach der Sichtbarkeitsberechnung wird die Geometrie wieder entfernt. Zur Laufzeit werden die Listen aller Zellen in einem Bereich um den Benutzer zusammengefügt, um eine Liste aller sichtbaren Kreuzungen für die aktuelle Zelle, in der sich der Benutzer befindet, zu ermitteln. Alle sichtbaren Kreuzungen erhalten in der mesoskopischen Simulation einen Indikator, der anzeigt, ob sie momentan im Sichtfeld des Benutzers liegen oder

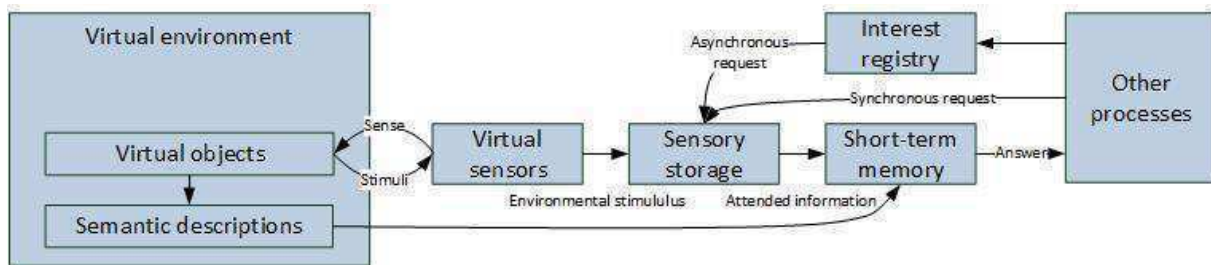


**Abbildung 6: Kreuzungsbereich in der virtuellen Umgebung.** In (a) ist die semantische Verkehrsnetzwerkrepräsentation sichtbar, die den Agenten anzeigt, wo sich Fahrspuren und Wege auf der Geometrie der Straße befinden und zusätzlich weitere Informationen über das Netzwerk zur Verfügung stellen (z.B. Geschwindigkeitsbegrenzung, Spurbreite, etc.). In (b) wurde die Straßennetzwerkrepräsentation verwendet, um für jede Spur und jeden Weg über die Kreuzung eine zusätzliche Geometrie zu erzeugen, die für die strahlenbasierten Sichtbarkeitstests verwendet werden kann (magentafarbene Objekte).

nicht. Alle zusammenhängenden Kreuzungen ergeben dann einen oder auch mehrere Bereiche, in dem alle Agenten mikroskopisch simuliert werden müssen. Verlässt ein Agent eine Kreuzung in Richtung des nicht sichtbaren Bereichs, kann er auf die mesoskopische Simulationsebene transferiert werden, ohne dass der Benutzer den Übergang wahrnimmt.

### 2.1.7 Virtuelle Wahrnehmung

Glaubwürdiges Verhalten virtueller Entitäten setzt die Modellierung und Simulation einer glaubwürdigen Wahrnehmung voraus [19]. Aus diesem Grund wurde die Wahrnehmung als eine kognitive Komponente des beschriebenen Agentenkonzepts untersucht. Als Ergebnis entstand ein generisches Framework zur Simulation des Wahrnehmungsprozesses virtueller Agenten, das in der ursprünglichen Zielstellung nicht vorgesehen war (s. Abbildung 7). Das Framework soll Agenten eine Menge von Umgebungsinformationen liefern, dessen sich ihr Gegenstück in der realen Welt ebenfalls bewusst wäre oder sein könnte. Der Gesamtprozess der Wahrnehmung wird in drei Teilprozesse untergliedert: Sinneswahrnehmung, Gedächtnis und Abfrage. Die Sinneswahrnehmung wird durch eine Menge virtueller Sensoren simuliert, die wahrnehmbare Signale oder Objekte in der virtuellen Umgebung aufnehmen. In diesem Prozess findet noch keine Filterung statt, d. h. zunächst werden alle von den Sensoren wahrnehmbaren Informationen aufgenommen und hinterlegt. Durch eine Schnittstellenanbindung können beliebige Sensoren implementiert und sogar zur Laufzeit ausgetauscht werden. Da das Ziel eine gesteigerte Glaubhaftigkeit ist, sollten Sensoren allerdings in dieser Hinsicht implementiert werden. Als Prototyp wurden zwei

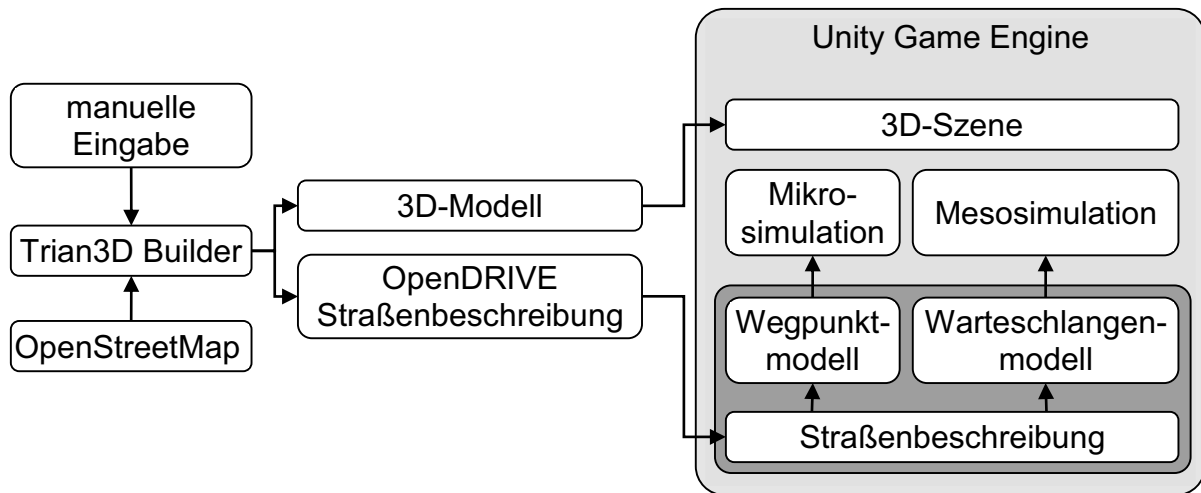


**Abbildung 7: Framework für die Simulation der Wahrnehmung virtueller Agenten.** Virtuelle Sensoren nehmen Stimuli von virtuellen Objekten aus der virtuellen Umgebung wahr. Alle Stimuli werden in einem sensorischen Kurzzeitgedächtnis abgelegt. Dieser Teil ist der Umgebungsstimulus. Sobald einem Stimulus Aufmerksamkeit durch höhere kognitive Prozesse gewidmet wird, werden die semantischen Informationen des Ursprungsobjekts des Stimulus im Kurzzeitgedächtnis hinterlegt. Diese Abfrage von Informationen geschieht über eine Schnittstelle und kann sowohl synchron als auch asynchron erfolgen. (Bildquelle: [V15]).

visuelle Sensoren entwickelt, die Probleme wie Verdeckung und Sichtweite abbilden können (siehe auch Abschnitt 2.5.1).

Ein Gedächtnismodell aus der Psychologie mit verschiedenen Hierarchieebenen wurde integriert. Das verwendete Modell basiert auf den Ausführungen von Peters und O'Sullivan [20], die ihr Modell auf einer Theorie der Psychologen Atkinson und Shiffrin aufbauen. Während das Originalmodell drei Speicherebenen vorsieht (sensorisches Kurzzeitgedächtnis, Kurzzeitgedächtnis und Langzeitgedächtnis), wurden hier nur die ersten beiden Ebenen integriert, da ein Langzeitgedächtnis für die Anwendung im Projekt nicht notwendig war.

Aktuell interessante oder notwendige Informationen können über eine Schnittstelle vom Gedächtnis abgefragt werden. Im sensorischen Kurzzeitgedächtnis werden alle Sinneswahrnehmungen aller virtuellen Sensoren für einen sehr kurzen Zeitraum gespeichert. Erst wenn einem gespeicherten Stimulus Aufmerksamkeit durch einen Zugriff über die Informationsschnittstelle gewidmet wird, wird der Eintrag in das Kurzzeitgedächtnis kopiert. Stammt der Stimulus von einem dynamischen Objekt (z. B. einem anderen Agenten), werden die dazugehörigen Informationen nur aktualisiert, wenn der Ursprung des Stimulus noch einmal wahrgenommen wurde. Durch diese Maßnahme wird erreicht, dass Informationen veralten können, wenn sie nicht aktualisiert werden. Dadurch können Fehleinschätzungen im Entscheidungsprozess modelliert werden. Weitere Details zu diesem Ansatz finden sich in [V13] und [V15] und [S8].



**Abbildung 8: Arbeitsablauf zur Generierung neuer Szenarien.** Ein Szenario wird in der Trian3D Builder Software manuell oder anhand von OpenStreetMap-Daten automatisch erstellt. Die Software generiert aus den Daten ein 3D-Modell und eine Straßenbeschreibungsdatei im OpenDRIVE-Dateiformat. Beide Formate werden in die Simulationsumgebung (Unity) importiert.

## 2.2 Schnittstellenanbindung

Der ursprüngliche Antrag sah zwei separate Systeme für Visualisierung und Simulation vor. Daher wurde davon ausgegangen, dass die Schnittstelle zwischen beiden Systemen mit entsprechendem Aufwand definiert werden müssen. Die folgenden Abschnitte zeigen, welche Maßnahmen geplant und welche im Projekt tatsächlich realisiert wurden.

### 2.2.1 Kommunikation zw. Grundsystem und 3D-Darstellung

Da sowohl das Grundsystem und die 3D-Darstellung von Beginn an in der gleichen Entwicklungsumgebung (Unity Game Engine) implementiert wurden, war eine Kommunikation der beiden Systeme bereits gegeben und musste nicht explizit im Projekt entwickelt werden.

### 2.2.2 Abbildung Verkehrsgraph auf 3D-Darstellung

Wie in Abschnitt 2.1.3 erwähnt, wurde ein Arbeitsablauf entwickelt, der mit Hilfe der Software Trian3D Builder sowohl die 3D-Geometrie für das Straßennetzwerk generiert, als auch die dazugehörige semantische Beschreibung auf Basis des OpenDRIVE-Standards. Eine im Projekt entwickelte Software wandelt die OpenDRIVE-Beschreibung in einem Offline-Prozess in die entwickelte semantische Straßennetzwerksrepräsentation um. Durch diesen Prozess ergibt sich eine automatische Abbildung des Verkehrsgraphen auf die 3D-Darstellung. Abbildung 8 zeigt einen Überblick des definierten Ablaufs.



Durch die vorherigen Arbeiten des Zuwendungsempfängers war schon ein sehr detailliertes und realitätsgetreues 3D-Modell eines Teils der Stadt Siegburg vorhanden. Dieses Modell wird auch im bereits entwickelten FIVIS-Fahrradfahrsimulator für Verkehrserziehungszwecke verwendet. Da die in AVeSi entwickelte Verkehrssimulation ebenfalls für den Fahrradfahrsimulator verwendet werden soll, war die Verwendung des bestehenden Modells als Testumgebung naheliegend. Da dieses Modell allerdings schon erstellt war und eine erneute Modellierung in der Trian3D-Software vermieden werden sollte, musste der Verkehrsgraph manuell an die Straßengeometrie des Modells angepasst werden. Zu diesem Zweck wurde ein Werkzeug für den Editor der Unity Game Engine entwickelt, welches die manuelle Anpassung eines Verkehrsgraphs durch die semi-automatische Erstellung von Netzwerkelementen effizient ermöglicht. So können beispielsweise alle Spuren einer Straße gleichzeitig erzeugt oder Verbindungen zwischen Spuren automatisch generiert werden. Die Genauigkeit einer solchen manuellen Abbildung hängt von der Genauigkeit ab, mit welcher die erstellende Person arbeitet. Die Richtigkeit wird allerdings durch ein implementiertes Validierungssystem im Editor der Simulationsumgebung weitgehend sichergestellt.

## **2.3 3D-Darstellung**

Eine realistische Simulation, in die ein Benutzer eintauchen kann, basiert neben dem im Projekt angestrebten realistischen Verhalten vor allem auch auf einer realistischen Darstellung. Aus diesem Grund sollten als Teil des Forschungsprojektes virtuelle Szenarien und Welten entstehen, die der realen Welt entsprechen. Zusätzlich sollten realistische 3D-Modelle für die Verkehrsagenten erstellt und integriert werden. Im Folgenden wird zu den erreichten Ergebnissen Stellung genommen.

### **2.3.1 Erstellen neuer Szenarien**

Für die Erstellung neuer Szenarien für das AVeSi-Projekt, aber auch für den FIVIS-Fahrradfahrsimulator, sind zwei Dinge erforderlich. Für die visuelle Darstellung wird ein dreidimensionales Modell einer urbanen Umgebung mit Häusern, Straßen, Bürgersteigen, Vegetation etc. benötigt. Für die Verkehrssimulation ist eine semantische Straßennetzwerksbeschreibung, wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben, notwendig, die an das 3D-Modell der Straße angepasst ist. Für die automatische Erzeugung beider Aspekte wurde ein Arbeitsablauf entwickelt, der mit Hilfe von OpenStreetMap-Daten, der Software Trian3D Builder von TrianGraphics und einer eigens entwickelten Softwarebibliothek zur Generierung des Straßennetzwerks aus OpenDRIVE-Daten ein neues Szenario generieren kann [V6] (s. Abbildung 8). Die Trian3D Builder Software generiert dabei ein 3D-Modell der Szene inklusive der Straßengeometrie und gleichzeitig eine Straßenbeschreibung nach dem OpenDRIVE-Standard. Das 3D-Modell kann direkt in die Simulationsumgebung (Unity) geladen

werden. Mit der entwickelten Softwarebibliothek wird aus der OpenDRIVE-Straßenbeschreibung eine wegpunktbasierte Straßennetzwerkbeschreibung für die Simulation mikroskopischer Agenten (s. Abschnitt 2.1.1) und ein warteschlangenbasiertes Modell für die mesoskopische Simulation (s. Abschnitt 2.1.5) erzeugt. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass sowohl die visuelle als auch die semantische Repräsentation der Szene aus den gleichen Ausgangsdaten erzeugt werden. Im Gegensatz zu einer manuellen Anpassung ist damit die Konsistenz beider Darstellungen gewährleistet. Das Problem ist jedoch, dass die Ausgangsdaten entsprechend fehlerfrei sein müssen, um brauchbare Ergebnisse zu erzielen (vgl. [V8]). Falls bereits ein 3D-Modell vorhanden ist oder die visuelle Qualität der automatischen Generierung nicht ausreicht, gibt es die Möglichkeit, das wegpunktbasierte Straßennetzwerk manuell zu erstellen. Dies ist generell ein zeitintensiver und fehleranfälliger Arbeitsschritt, der jedoch durch die Implementierung eines Werkzeugs für den Editor von Unity erheblich erleichtert werden konnte (vgl. Abschnitt 2.2.2). Das warteschlangenbasierte Modell für die mesoskopische Simulation wird zum Beginn der Simulation automatisch aus dem wegpunktbasierten Modell generiert. Die Korrektheit einer manuell erstellten Beschreibung wird weitgehend durch ein implementiertes Validierungssystem sichergestellt.

### **2.3.2 Fahrzeug-/Personenmodelle**

Die Hochschule Bonn-Rhein-Sieg und besonders der Fachbereich Informatik zielen vor allem auf die technische Ausbildung von Studierenden. Das Erstellen von 3D-Inhalten, wie Fahrzeuge und Personen, ist jedoch ein künstlerischer Prozess. Durch den fehlenden Zugang zu entsprechenden Studiengängen konnten keine qualifizierten Hilfskräfte oder Mitarbeiter für diese Aufgabe gewonnen werden. Zusätzlich wurde die Priorität dieses Arbeitspakets als vergleichsweise gering eingestuft, so dass als Konsequenz kaum Ressourcen dafür eingesetzt wurden. Stattdessen wurde zum Großteil auf frei verfügbare Modelle und Animationen aus zurückgegriffen. Dennoch ist die Quantität der Fahrzeugtypen in der aktuellen Simulation gering, da es schwierig ist, verfügbare 3D-Modelle zu finden, die den Anforderungen des Projekts entsprechen. Zum Beispiel müssen Pkw-Modelle eine relativ niedrige Anzahl an Dreiecken besitzen, um die Frameraten beim Rendern nicht zu sehr zu beeinflussen. Gleichzeitig müssen Sie realistisch aussehen und über einen modellierten Innenraum verfügen. Da 3D-Modelle von Automobilen fast ausschließlich für die Synthese von hochqualitativen Bildern verwendet werden, die ein hohes Maß an Detailgrad voraussetzen, besitzen übliche Dreiecksgitter mehr als das Zehnfache an Dreiecken im Vergleich zu in diesem Forschungsprojekt brauchbaren Modellen.

## 2.4 Agentenprofile

Indem Agenten ein Persönlichkeitsprofil zugewiesen wird, von dessen Konfiguration das Verhalten des Agenten abhängt, lässt sich einerseits ein konsistentes Verhalten über die gesamte Simulation hinweg erreichen. Andererseits können dadurch Agenten mit unterschiedlichen Persönlichkeiten und damit unterschiedlichem Verhalten simuliert werden. Beides trägt zu einer glaubhafteren Simulation bei, da die gesamte Agentenpopulation diversifiziertes Verhalten zeigt, jeder individuelle Agent jedoch seiner „Person“ entsprechendes Verhalten zeigt. Wie bereits im Projektantrag beschrieben, wurde das Fünf Faktoren Modell (FFM) als Modell für das psychologische Persönlichkeitsprofil gewählt. Das FFM beschreibt eine Persönlichkeit mit Hilfe von fünf Persönlichkeitsfaktoren oder -dimensionen: Offenheit für neue Erfahrungen, Gewissenhaftigkeit, Extraversion, Verträglichkeit und Neurotizismus. Das Modell findet nicht nur in der Persönlichkeitsforschung eine breite Anwendung, sondern zum Beispiel auch im Forschungsgebiet virtueller Agenten. Der Vorteil des Modells ist, dass sich die fünf Faktoren nicht überschneiden, wodurch sich ein Großteil der Bevölkerung gut abdecken lässt. Zusätzlich hat sich das Modell als konsistent über Interviews, Selbstbeschreibungen, Beobachtungen und über verschiedene Sprachen hinweg erwiesen [21].

Damit nicht nur das Modell aus der Psychologieliteratur, sondern auch Erkenntnisse, die auf dem Modell basieren, genutzt werden können, wurde im Forschungsprojekt ein Verfahren entwickelt mit dem Ergebnisse aus beliebigen Persönlichkeitsstudien auf eine Repräsentation in der implementierten Agentenarchitektur abgebildet werden können. Auf dieser Grundlage wurde eine Studie von Herzberg zum Verkehrsverhalten in die Simulation integriert. Von insgesamt fünf Persönlichkeitsprototypen wurden drei in die Simulation integriert, weil sie in der Studie mit Unfallhäufigkeiten und -schwere korreliert werden konnten [2]. Die integrierten Prototypen sind „Overcontrolled“, „Undercontrolled“ und „Resilient“.

Um eine Abbildung zwischen dem psychologischen Modell, dem Agentenprofil und dem Verhalten des Agenten zu schaffen, wurde das Konzept von aufgabenspezifischen Verhaltensparametern eingeführt. Aus einer psychologischen Studie zum menschlichen Verhalten verschiedener Persönlichkeitsprototypen in bestimmten Situationen können ein oder mehrere Parameter definiert werden, die sich aus dem Persönlichkeitsprofil des Agenten ableiten lassen und die in den entsprechenden Situationen das gewünschte Verhalten generieren. Als Beispiel wurde ein Höflichkeitsfaktor definiert, der bei Überholvorgängen berücksichtigt wird. Je höflicher ein Agent ist, desto mehr bezieht er den Nachteil anderer Agenten, die durch seine Aktion beeinflusst würden, in seine Entscheidung mit ein. Der Parameter wurde so definiert, dass er mit den Verhaltensmustern der drei Persönlichkeitsprototypen aus

der Herzberg-Studie übereinstimmt. D. h. Fahrer der Klasse „Undercontrolled“ weisen den niedrigsten Höflichkeitswert auf und Fahrer aus der Klasse „Resilient“ den höchsten Wert.

Durch das Hinzufügen von Persönlichkeitsprofilen ist zwar eine Grundlage für nachvollziehbares Agentenverhalten gegeben, aber da sich die Persönlichkeit nicht ändert, kann sich auch das Verhalten eines Agenten in einer bestimmten Situation nicht ändern. Dies kann zu unglaubwürdigem Verhalten führen, wenn das generierte Verhalten die Situation nicht lösen kann. Durch das Hinzufügen eines dynamischen Aspekts mit Hilfe von positiven und negativen Emotionen basierend auf dem PANAS-Modell [22] und dem AD ACL Test [23] kann das Verhalten an die aktuelle Situation angepasst werden, um beobachtbare Entscheidungen der Agenten plausibler abzubilden. Damit wahrgenommene Emotionen das Verhalten beeinflussen können, verändern sie die eigentlich statische Persönlichkeit des Agenten, da die Verhaltensparameter aus der Persönlichkeit abgeleitet werden. Dies entspricht zwar nicht der Realität, da sich die Persönlichkeit eines Menschen nicht oder nur über einen langen Zeitraum ändert, aber es erlaubt die zuvor vorhandenen Mechanismen so gut wie unverändert beizubehalten und das optionale Deaktivieren von Emotionen für Vergleiche oder bestimmte Situationen. Die Korrelation zwischen dem FFM und der Wahrnehmung von Emotionen wurde dabei auf die Ergebnisse aus [24] gestützt. Die Erweiterung des Persönlichkeitsmodells mit Stimmungen, wie ursprünglich im Antrag vorgesehen, wurde nicht umgesetzt. Der Grund sind die mittel- bis langfristigen Veränderungen von Stimmungen, die während einer Simulationssitzung nicht von einem Benutzer beobachtet werden können. Die Beobachtung kurzlebiger Verhaltensänderungen ist wahrscheinlicher. Diese können durch das integrierte Emotionsmodell abgebildet werden. Die entwickelte Agentenarchitektur (s. Abschnitt 2.1.1) wurde durch entsprechende Agententypen erweitert. Von der Klasse der künstlichen Agenten (d. h. Agenten, die nicht einen Benutzer repräsentieren) wurde jeweils eine Klasse für persönlichkeitsbasierte Agenten und emotionale Agenten unterschieden. Diese unterscheiden sich lediglich in der internen Profilkomponente. Persönlichkeitsbasierte Agenten besitzen ein statisches FFM-Persönlichkeitsprofil und emotionsbasierte Agenten besitzen ein vom statischen Profil abgeleitetes und um Emotionen erweitertes dynamisches FFM-Persönlichkeitsprofil. Für weitere Details siehe [V9], [V12], [V14] und [S3].

## **2.5 Test und Integration**

Zur Verifikation, dass die realisierten Ansätze die Zielstellung des Forschungsprojektes erfüllen, wurden verschiedene Evaluierungsansätze entwickelt. Die Durchführung der Experimente und deren Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt für die jeweiligen Teilsysteme präsentiert. Zusätzlich sollte durch die Entwicklung eines

Prototyps geprüft werden, ob die Integration des realisierten Systems in eine VR-Umgebung grundsätzlich machbar ist. Dies ist in Abschnitt 2.5.2 beschrieben.

## 2.5.1 Evaluierungen

Die im Forschungsprojekt entstandenen Ergebnisse (siehe Abschnitte 2.1 bis 2.4) wurden weitgehend isoliert evaluiert. In den folgenden Abschnitten werden die jeweiligen Ansätze sowie deren Durchführung beschrieben und die beobachteten Ergebnisse erörtert.

**Evaluation der Mesoskopischen Simulation** Der Grund, eine weniger detaillierte Simulationsebene zu implementieren, war es Rechenkapazität einzusparen, um eine interaktive Erfahrung zu ermöglichen. Um zu zeigen, dass dieses Ziel erreicht werden konnte, wurden drei unterschiedliche Performanztests durchgeführt. Zunächst wurde das System isoliert untersucht; in einem alleinstehenden Szenario und innerhalb des angestrebten Simulationsszenarios. In der alleinstehenden Umgebung konnten selbst 100 000 Mesoagenten in einem Straßennetzwerk mit über 600 Kreuzungen mit interaktiven Frameraten simuliert werden. Anschließend wurden sechs verschiedene Konfigurationen in der virtuellen Umgebung getestet. Für das Testszenario wurde die gleiche virtuelle Stadt verwendet, die Hauptbestandteil des FIVIS-Fahrradfahrsimulators ist. Die verschiedenen Konfigurationen wurden separat simuliert und es wurde aufgezeichnet welche Rechenzeit für die einzelnen Frames

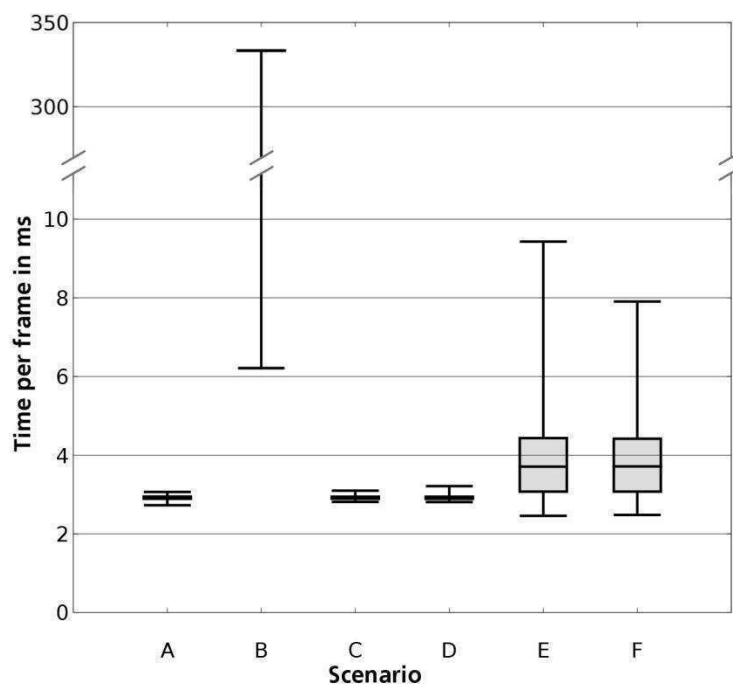
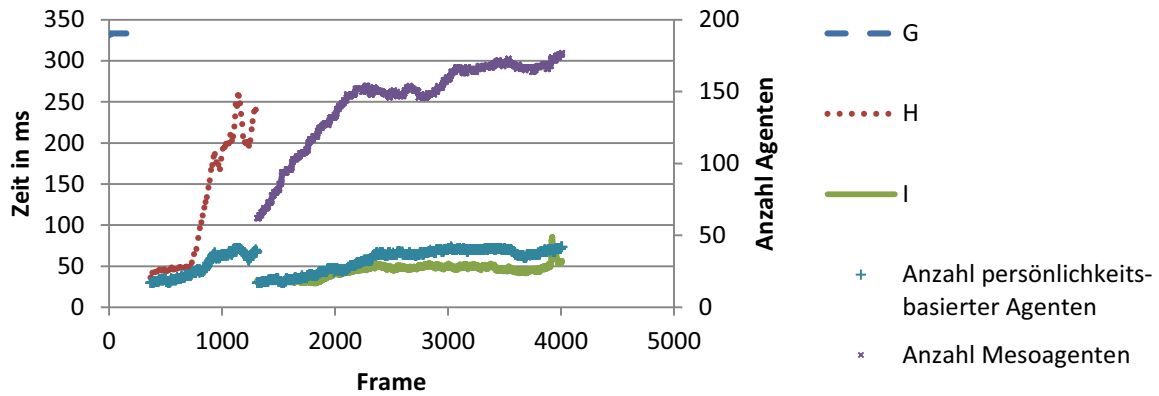


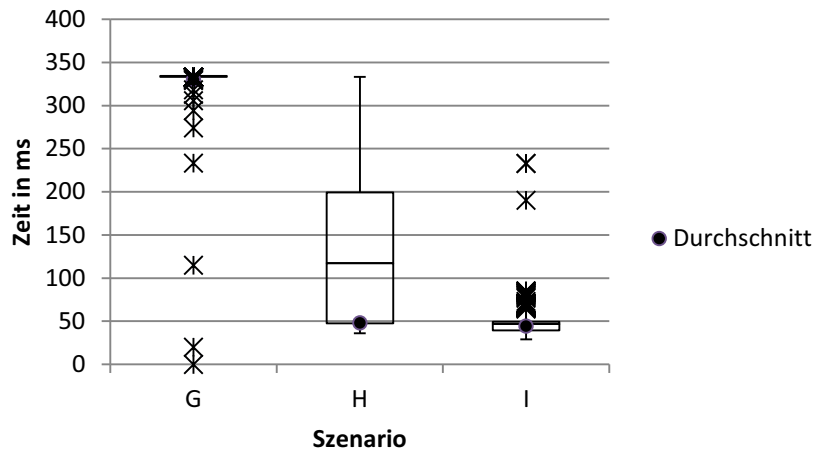
Abbildung 9: Berechnungsdauer für einzelne Frames in Millisekunden für unterschiedliche Testszenarien. A: Referenzszenario; B: Simulation mit 200 Mikroagenten (Median: 333,333 ms); C: Simulation mit 200 Mesoagenten; D: Simulation mit 500 Mesoagenten; E: Simulation mit 20 Mikro- und 180 Mesoagenten; F: Simulation mit 20 Mikro- und 480 Mesoagenten.

benötigt wurde. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt. Da interaktive Frameraten angestrebt wurden, sollte die Berechnung eines Frames maximal 33,33 Millisekunden betragen (30 Frames pro Sekunde). Im Referenzszenario (Szenario A) wurde die Simulationsumgebung ohne Verkehrsagenten gestartet, d. h. bessere Ergebnisse als 2,9 ms pro Frame (342 fps) können nicht erreicht werden. Im Vorfeld wurde ermittelt, dass ca. 500 Agenten in der gegebenen Szene benötigt werden, um Verkehrsflüsse während des Berufsverkehrs zu erzeugen. Da eine Benutzung der Simulation bei Berufsverkehr nur in speziellen Szenarien interessant ist, wurde eine Agentenanzahl von 200 für plausible Verkehrsflüsse angestrebt. Aus diesem Grund wurden zwei Szenarien mit 200 mikroskopischen und 200 mesoskopischen Agenten definiert, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. In Abbildung 9 ist zu erkennen, dass die durchschnittliche Berechnung eines Frames bei 200 Mikroagenten (Szenario B) mit 333,33 ms weit mehr als die geforderten 33,33 ms benötigt. Im Vergleich dazu ist bei 200 Mesoagenten (Szenario C) kaum ein Unterschied zum Referenzszenario erkennbar. Anschließend wurde getestet, ob die zuvor festgelegte maximale Anzahl von 500 Agenten mit dem mesoskopischen Ansatz mit mehr als 30 fps simuliert werden kann (Szenario D). Wie ebenfalls in Abbildung 9 zu erkennen ist, gibt es auch in diesem Szenario kaum einen Unterschied zum Referenzszenario. Letztendlich wurde ein hybrider Ansatz getestet, der jeweils 20 Mikroagenten und 180 (Szenario E) bzw. 480 Mesoagenten (Szenario F) simuliert. Beide Fälle erzeugen sehr ähnliche Ergebnisse, bei denen die Berechnung der Frames deutlich über dem Referenzszenario und den Szenarien C und D liegen. Dies legt nahe, dass die Mikroagenten den größten Anteil am Leistungsverlust haben. Weitere Details zu diesen Ergebnissen finden sich in [V7].

Abschließend wurde eine Evaluierung durchgeführt, mit der das gesamte Transfersystem mit allen Simulationsebenen überprüft wurde. Hierfür wurden drei unterschiedliche Konfigurationen mehrfach hintereinander ausgeführt und die Zeit für die Berechnung der einzelnen Frames aufgezeichnet. In Abbildung 10 sind die Berechnungszeiten für einen Testlauf mit allen Szenariokonfigurationen zu sehen. Zusätzlich ist auch die Anzahl der Agenten in den unterschiedlichen Simulationsebenen zu jedem Zeitpunkt der Simulation dargestellt. Die Gesamtzahl der Agenten betrug ebenfalls 200. Abbildung 11 zeigt die Daten des gleichen Testlaufs als Verteilung. In Szenario G fanden keine Transfers statt, d. h. 200 Agenten wurden zu jedem Zeitpunkt mikroskopisch und mit maximalem Detailgrad simuliert. Wie im vorangegangenen Test konnten zu keinem Zeitpunkt interaktive Frameraten erreicht werden. In Szenario H wurde die Option aktiviert, dass Mikroagenten in vereinfachter Form simuliert werden können, wenn sie den Bereich um die Kamera verlassen. Zu Beginn der in Abbildung 10 gezeigten Simulation des Szenarios H wurden 17 Agenten detailliert simuliert, die restlichen 183 in der vereinfachten Form. Durch diese



**Abbildung 10: Berechnungsdauer für einzelne Frames in Millisekunden und die Anzahl der Agenten in unterschiedlichen Simulationsebenen für unterschiedliche Testszenarien: Nur persönlichkeitsbasierte Agenten (G), persönlichkeitsbasierte und vereinfachte Agenten (H) und alle drei Agententypen (I). Der Begriff persönlichkeitsbasierte Agenten beschreibt hierbei die mikroskopischen Agenten mit dem höchsten simulierten Detailgrad.**



**Abbildung 11: Verteilung der Berechnungsdauer aus Abbildung 10.**

Änderung konnte die Berechnungsdauer bereits auf 36 ms reduziert werden. Im dargestellten Testlauf war die Kamera an einer großen Ampelkreuzung positioniert. Aus diesem Grund steigt die Anzahl detailliert simulierter Agenten auf bis zu 41. Abbildung 10 zeigt, wie die steigende Agentenzahl die Berechnungsdauer der jeweiligen Frames direkt beeinflusst. Insgesamt konnte die Berechnungsdauer im Vergleich zu Szenario G um 65% gesenkt werden, wenn der Median von 117,3 ms pro Frame betrachtet wird. Der Durchschnittswert von 48,5 ms erlaubt bereits eine interaktive Simulation, auch wenn er die angestrebten 33,3 ms übersteigt. In Szenario I wurden alle Transfers aktiviert, d. h. Agenten in unmittelbarer Umgebung der Kamera (des Benutzers) werden detailliert simuliert, weiter entfernte, jedoch sichtbare,

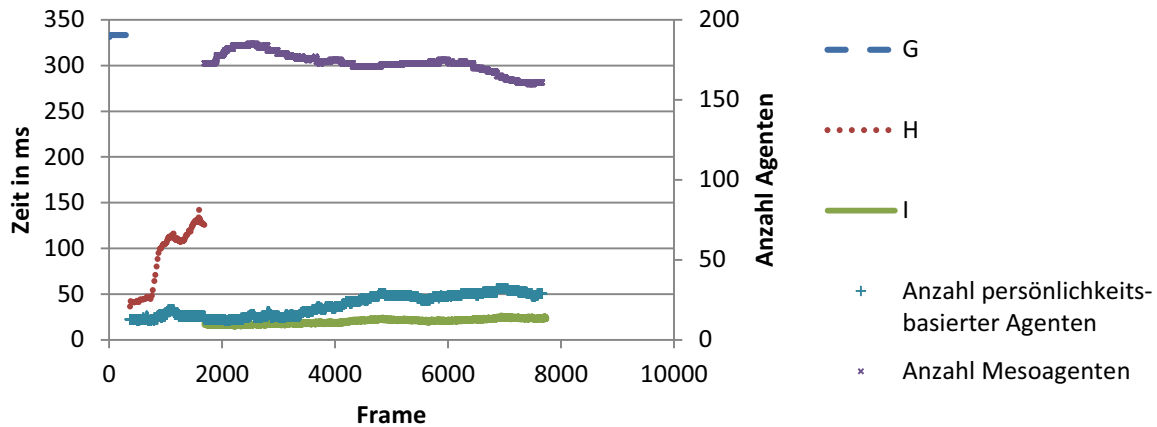


Abbildung 12: Berechnungsdauer für einzelne Frames in Millisekunden und die Anzahl der Agenten in unterschiedlichen Simulationsebenen für unterschiedliche Testszenarien wie in Abbildung 10 für einen weniger stark befahrenen Bereich der simulierten Stadt. Mit der Kombination aller Agententypen kann die Berechnungsdauer unter den angestrebten Wert von 33,33 ms gesenkt werden.

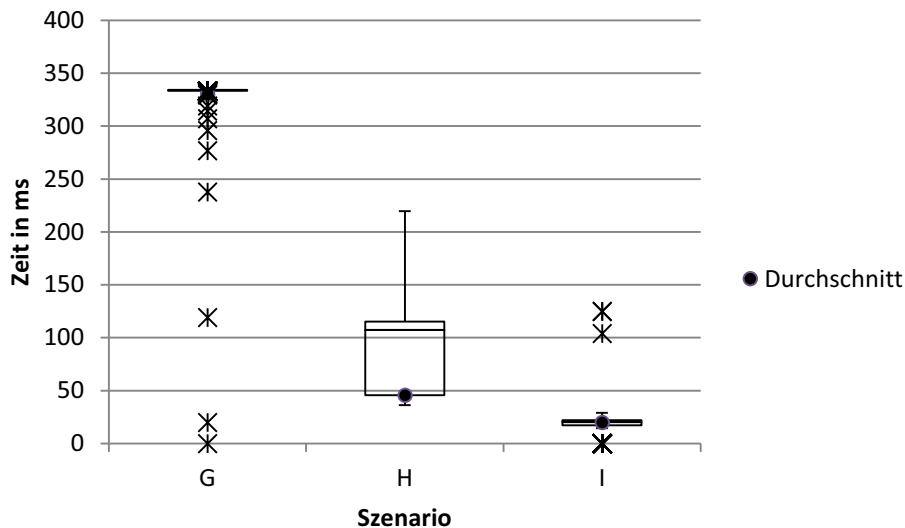


Abbildung 13: Verteilung der Berechnungsdauer aus Abbildung 12.

Agenten werden mit weniger Details simuliert und nicht sichtbare Agenten werden mesoskopisch und ohne visuelle Repräsentation simuliert. Wie auch in Szenario H betrug die Anzahl der detailliert simulierten Agenten 17. Da insgesamt nur 138 Mikroagenten (17 mit maximalen Details, 121 vereinfacht) neben den 62 Mesoagenten simuliert wurden, konnte die Berechnungsdauer auf 29 ms im ersten Frame reduziert werden. Der Median für die Berechnungsdauer über die gesamte Simulation des Szenarios betrug 47 ms und der Durchschnittswert 44 ms. Diese Werte liegen zwar immer noch über dem geforderten Wert, aber sie zeigen, wie auch in Abbildung 10 zu



sehen, dass eine steigende Anzahl an detaillierten Agenten die Framerate nicht mehr so stark beeinflusst und dass die Berechnungsdauer wesentlich weniger variiert.

In einem weiteren Test, in dem die Kamera an einer weniger großen Kreuzung platziert wurde, konnten mit Hilfe der unterschiedlichen Simulationsebenen Berechnungszeiten unter 33,33 ms erreicht werden (s. Abbildung 12 und Abbildung 13).

Um die geforderten Zeiten für die meisten auftretenden Fälle einhalten zu können, müssen weitere Optimierungsmechanismen implementiert werden, die die erzeugte Rechenlast dynamisch reduzieren, z. B. durch die Verteilung der Berechnungen der detaillierten Mikroagenten auf mehrere Frames oder die dynamische Anpassung des Gebiets in dem Agenten mit maximaler Detailstufe berechnet werden.

**Evaluierung der synthetischen Wahrnehmung** Zur Evaluation des entwickelten Wahrnehmungsmoduls (s. Abschnitt 2.1.7) wurden zwei Evaluationsansätze entwickelt und durchgeführt. Im ersten Ansatz wurde die Leistung der implementierten virtuellen Sensoren hinsichtlich Genauigkeit und Performanz untersucht. Zur Untersuchung der Genauigkeit wurde ein fiktives Szenario definiert, in dem ein Agent die Szene über das implementierte Perzeptionsmodell wahrnimmt. In Blickrichtung des Agenten wurden wahrnehmbare Würfel randomisiert positioniert, so dass diverse Verdeckungen entstanden. In Abbildung 14 ist ein Beispiel für einen Versuchsaufbau aus Sicht des Agenten dargestellt. Der Agent nahm die Testszene nacheinander mit unterschiedlichen Sensorkonfigurationen wahr (s. Tabelle 1). Gleichzeitig wurden die Ausführungszeiten der Sensoren und die Anzahl der Speichereinträge über eine gewisse Zeitdauer hinweg aufgezeichnet. Der Verfall von Einträgen im Sensorspeicher des Agenten wurde auf 0,5 ms festgelegt. Alle Sensoren besitzen eine Sichtweite von 100 m und einen Sichtwinkel von 120°. Konfiguration A und B nutzten einen strahlbasierten Sensor, der die Sichtbarkeit von Objekten durch das Verfolgen eines

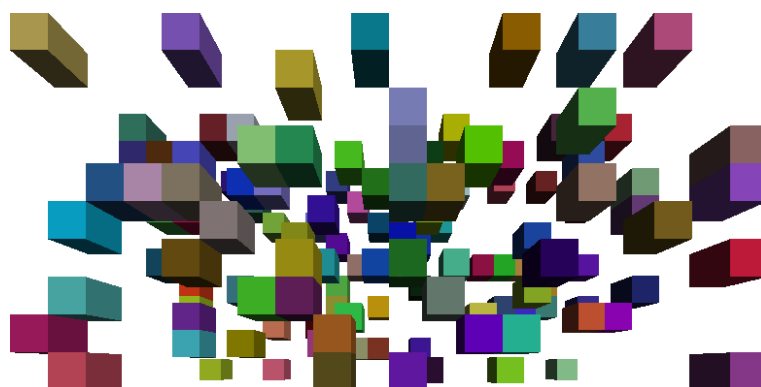


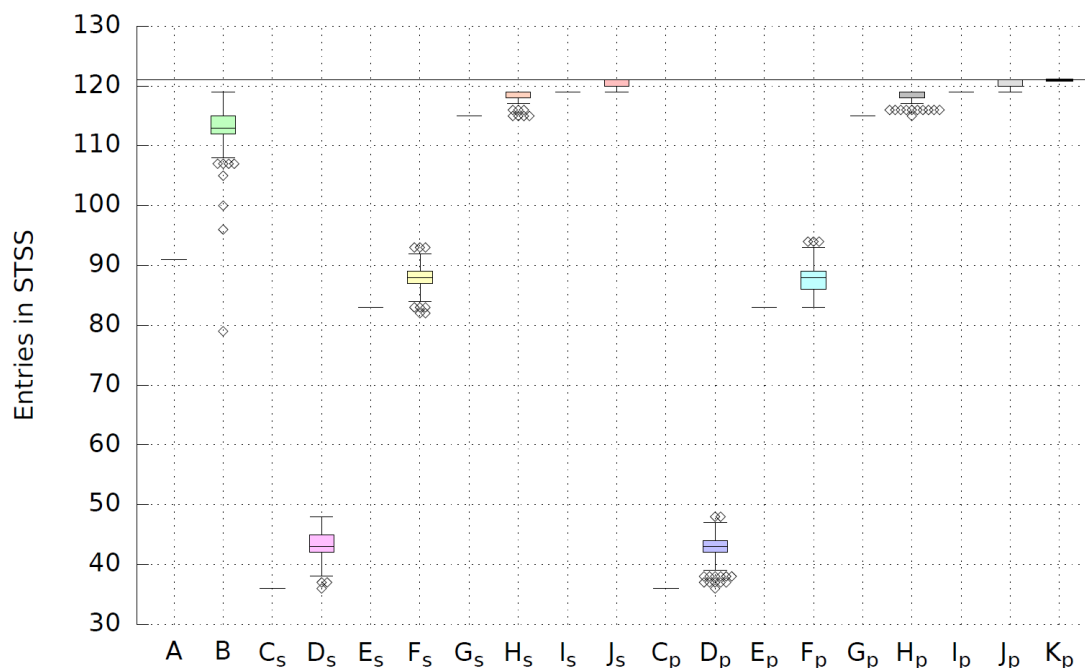
Abbildung 14: Szene zur Evaluation der virtuellen Sensoren. In der Szene befinden sich 137 Blöcke, von denen 121 nicht vollständig verdeckt sind. (Bildquelle: [V15])

Tabelle 1: Evaluierte Sensorkonfigurationen (Sichtweite: 100 m, Sichtwinkel 120°). (Quelle: [V15])

ID	Konfiguration	ID	Konfiguration
A	Strahlbasiert, ohne Massepunkte		
B	Strahlbasiert, mit Massepunkten		
C	16x16 px, kein Tremor	D	16x16 px, Tremor 0,3°
E	32x32 px, kein Tremor	F	32x32 px, Tremor 0,3°
G	64x64 px, kein Tremor	H	64x64 px, Tremor 0,3°
I	128x128 px, kein Tremor	J	128x128, Tremor 0,3°
K	256x256 px, kein Tremor		

Strahls durch die Szene prüft. Während A beim Verdeckungstest nur den Ursprung des Würfelobjektes (Mittelpunkt) nutzte, verwendete B neun definierte Massepunkte (einen im Ursprung und jeweils einen in jeder Ecke des Würfels). Für die Konfigurationen C bis K wurde ein Sensor verwendet, der ein gering aufgelöstes Bild aus Sicht des Agenten erzeugt, in dem jedes wahrnehmbare Objekt durch einen eindeutigen Farbwert repräsentiert ist (Falschfärbungssensor). Dabei wurden jeweils Paare von Konfigurationen mit der gleichen Bildauflösung untersucht; einmal mit einer festen Kamera und einmal mit einem Tremor von 0,3° pro Wahrnehmungsschritt<sup>7</sup>. Um festzustellen, welche Objekte vom Agenten gesehen werden können, müssen alle Pixel des generierten Bildes ausgewertet werden. Kommt der Farbwert eines Objekts im Bild vor, gilt es als sichtbar. Diese Auswertung wurde in den Konfigurationen C bis J jeweils sequentiell und parallelisiert durchgeführt. Für die in K verwendete Auflösung war eine sequentielle Auswertung nicht mehr möglich. Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse für die Untersuchung der Genauigkeit. Es ist ersichtlich, dass eine naive Implementierung des strahlbasierten Ansatzes in bestimmten Situationen (wie der gewählten Evaluationsszene) nicht annähernd korrekte Ergebnisse produziert. Lediglich 91 der 121 sichtbaren Würfel konnten erkannt werden. Das Prüfen von Massepunkten kann das Ergebnis deutlich verbessern, verursacht allerdings einen zusätzlichen Aufwand in der Entwicklung, da Massepunkte für Objekt (in der Regel per Hand) definiert werden müssen. Dafür spielt die Größe der Objekte bei diesem Ansatz keine Rolle, sondern lediglich der Abstand zwischen den Massepunkten der Objekte in der Szene. Beim Falschfärbungsansatz ist die Größe der Objekte ein wichtiger Faktor. Bei zu geringer Auflösung (Konfiguration C/D und E/F) werden weniger Objekte erkannt als mit dem strahlbasierten Ansatz. Der Grund dafür ist, dass jeder Pixel die Farbe von nur genau einem Objekt annehmen kann. Wenn mehr als ein Objekt den Pixel überlappen, entscheidet der Renderprozess, welches Objekt repräsentiert wird.

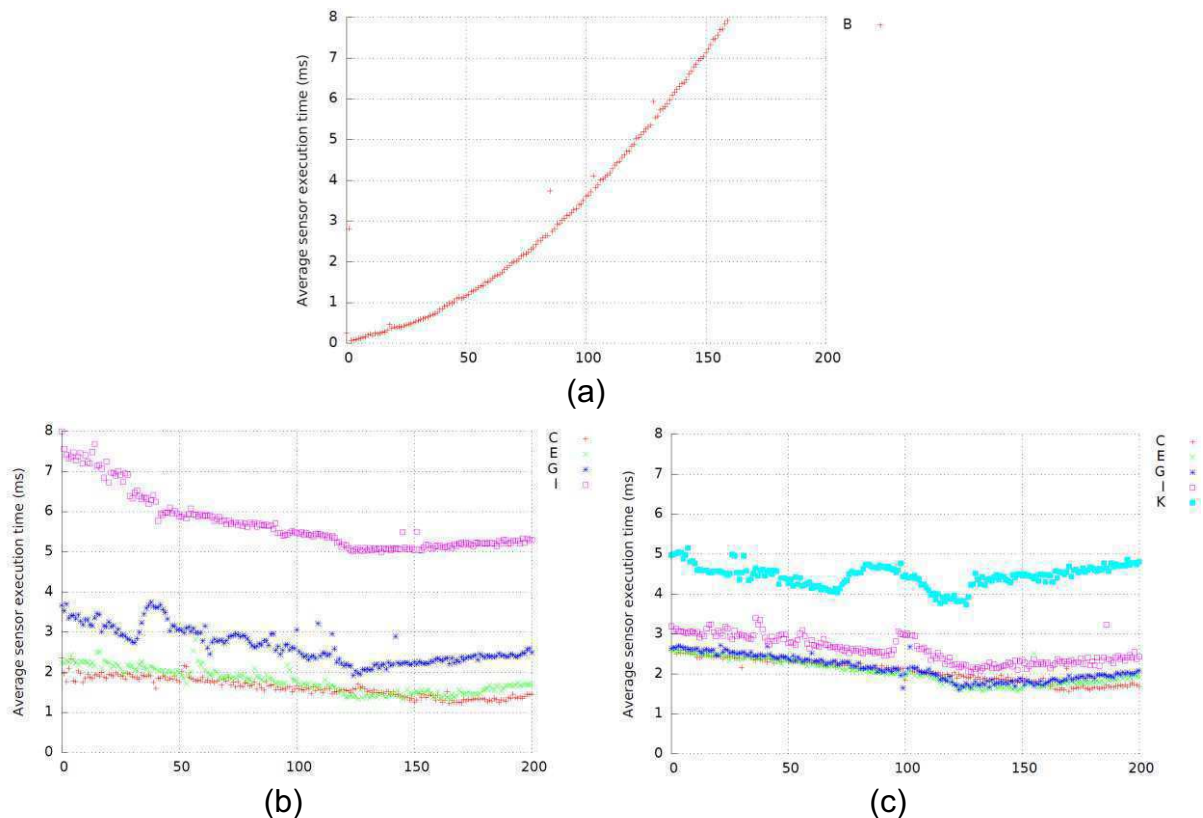
<sup>7</sup> Der Tremor verursacht, dass die Kamera in jedem Wahrnehmungsschritt um den festgelegten Wert rotiert wird. Wird der Tremor auf einen Wert  $\alpha$  festgelegt, beträgt die Rotation der Kamera:  $0^\circ, -\alpha, 0^\circ, \alpha, 0^\circ, -\alpha, \dots$



**Abbildung 15: Ergebnisse der Sensorgenauigkeitsanalyse. 121 der 137 Würfel waren nicht vollständig verdeckt (horizontale Linie). Für die Konfigurationen C bis K ist durch s (sequentiell) und p (parallel) angedeutet, wie das Falschfärbungsbild ausgewertet wurde. Gezeigt sind die Einträge nach jedem Wahrnehmungsschritt im Sensorspeicher für jede geprüfte Sensorkonfiguration. Varianz in den unterschiedlichen Szenarien entsteht durch die zufällige Auswahl von Massepunkten in B und das Hinzufügen des Tremors in D bis J. (Bildquelle: [V15])**

Dieses Problem kann durch das Hinzufügen eines Tremors ein wenig verbessert werden. Die Ergebnisse verbessern sich jedoch mit steigender Auflösung des generierten Bildes. Für das gewählte Szenario konnten mit einer Auflösung von 128x128 Pixel schon fast alle Objekte wahrgenommen werden (I). Mit Hilfe des Tremors (J) konnten selbst mit dieser Auflösung alle 121 Objekte erkannt werden. Wenn die Auflösung hoch genug ist, wird auch der Tremor nicht mehr benötigt, um das korrekte Ergebnis zu erzielen (K). Allerdings steigt mit wachsender Auflösung auch der Berechnungsaufwand.

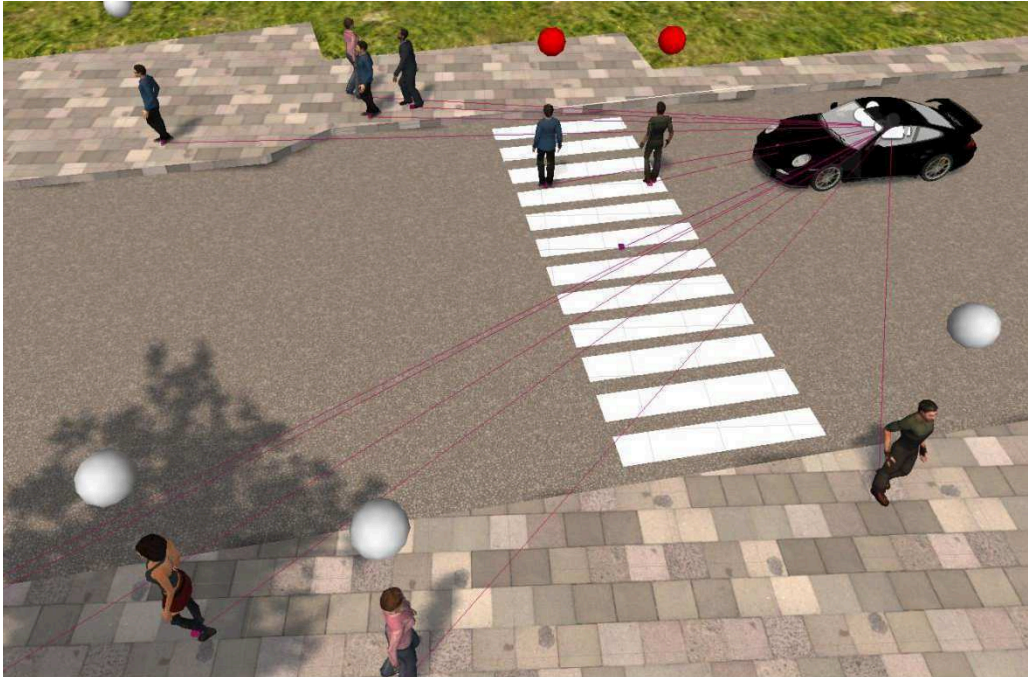
Zur Ermittlung der Performanz wurden der Szene nacheinander Würfel hinzugefügt. So konnte geprüft werden, welchen Einfluss die Anzahl wahrnehmbarer Objekte auf die Berechnungsdauer des Wahrnehmungsprozesses hat. Die Ergebnisse sind in Abbildung 16 dargestellt. Für den strahlbasierten Ansatz muss für jedes wahrnehmbare Objekt jeweils genau ein Strahl verfolgt werden. Ab einer Anzahl von etwa 80 steigt der Berechnungsaufwand annähernd linear, d. h. die Laufzeit hängt allein von der Anzahl der zu prüfenden Objekte ab. Im zweiten Ansatz ist die Auswirkung der Anzahl der Objekte, außer in wenigen Ausnahmefällen, vernachlässigbar. Stattdessen hängt die Berechnungsdauer vor allem von der Texturgröße ab. Durch die Verwendung paralleler Auswertungsmechanismen kann dieser Steigerung deutlich entgegen gewirkt werden.



**Abbildung 16: Durchschnittliche Sensorberechnungszeiten in Millisekunden im Verhältnis zu wahrnehmbaren Objekten. Die dargestellten Ansätze sind: strahlbasiert (a), basierend auf Falschfärbungsbildern mit sequentieller Auswertung (b) und paralleler Auswertung (c).**

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der strahlbasierte Sensor und der Falschfärbungssensor vielversprechende Ergebnisse liefern. Das beste Verhältnis von Performanz zu Präzision liefert der strahlbasierte Sensor unter Verwendung von Massepunkten. Der genutzte Ansatz hat jedoch den Nachteil, dass die Massepunkte semantisch modelliert sein müssen, was einen erheblichen Mehraufwand im Designprozess bedeuten kann. Der Falschfärbungssensor liefert bei ausreichend dimensionierter Textur die Ergebnisse mit der höchsten Präzision. Allerdings stellt sich die Frage, ob die benötigte Rechenleistung auch bei größeren Mengen von Agenten noch interaktive Szenarien erlaubt. Unabhängig davon kann mit beiden Ansätzen eine beliebige Präzision erzielt werden. Diese hängt jedoch immer von der Konfiguration bzw. der Modellierung ab. So ist beim strahlbasierten Ansatz die Anzahl und die Verteilung der Massepunkte entscheidend, während beim falschfärbungsbasierten Ansatz die Dimensionen der Textur ausschlaggebend sind.

Durch den zweiten Evaluationsansatz sollten die Nutzbarkeit des Perzeptionskonzeptes in konkreten Szenarien gezeigt und gleichzeitig die Grenzen des aktuellen Systems erkundet werden. Dazu wurde ein konkretes Szenario definiert, das zwei



**Abbildung 17: Evaluationsszenario mit Fußgängerüberweg. Die Strahlen vom Fahrzeug (Agent) deuten an, welche Objekte der Agent wahrgenommen hat. (Bildquelle: [V13])**

typische Situationen aus dem Straßenverkehr beinhaltet. Ein als Agent simuliertes Fahrzeug fährt einen definierten Straßenabschnitt entlang, auf dem zunächst eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h gilt. Nach einigen Metern wird durch ein Verkehrsschild am Straßenrand angezeigt, dass die erlaubte Höchstgeschwindigkeit auf 30 km/h abgesenkt wird. Anschließend trifft der Agent auf einen Fußgängerüberweg, der in unregelmäßigen Abständen von verschiedenen Fußgängern gekreuzt wird. In Abbildung 17 ist der Abschnitt des Szenarios dargestellt, der den Fußgängerüberweg enthält. Durch die Implementierung passender Verhaltensweisen auf Basis der wahrgenommenen Objekte konnten Agenten das Szenario den Vorgaben entsprechend bewältigen. Verschiedene Modifikationen am Szenario sollten anschließend die Grenzen des Systems experimentell untersuchen. Realisierte Änderungen waren die Anpassungen der Geschwindigkeiten von Fußgängern und des Agenten, die Erweiterung des Szenarios durch ein verdeckendes Objekt sowie die Einschränkung der Sichtweite durch Nebel.

Generell konnte festgestellt werden, dass die Realisierung von Lösungsmechanismen für gegebene Szenarien durch die Verwendung des Perzeptionsmoduls erleichtert wird. So müssen Entwickler beispielsweise nicht wissen, wie die „korrekten“ Objekte aus der virtuellen Umgebung akquiriert werden, da dieser Teil vom Modul übernommen wird. Über die realisierte Schnittstelle können Daten aus der Umgebung auf einfache Weise angefragt werden. Bei der Variation des Szenarios entsprachen die beobachteten Ergebnisse weitgehend den Erwartungen. Welche Geschwindig-

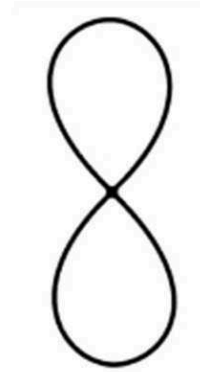
keitsbereiche abgedeckt werden können, hängt primär von der Realisierung der Entscheidungsprozesse ab. Verdeckung kann weitgehend simuliert werden, die Genauigkeit hängt jedoch von der Präzision der verwendeten Sensoren ab. Sichteinschränkungen können ebenfalls abgebildet werden, aktuell ist die Entscheidung, ob ein Objekt sichtbar ist oder nicht, jedoch binär. Bereits vorgesehene Parameter könnten in Zukunft für kontinuierliche Übergänge sorgen. Die detaillierten Ergebnisse sind in [S8] dokumentiert.

**Evaluierung der Persönlichkeitsprofile** Zur Überprüfung der Parametrisierung der simulierten Agentenprofile, wurde auf Basis des Fahrradsimulators ein Simulator für Pkw entwickelt. Ziel war es, Probanden bei der Fahrt mit dem Simulator zu beobachten und deren Verhalten aufzuzeichnen. In einer separaten Simulation wurde versucht, mit Hilfe evolutionärer Algorithmen eine Profilbelegung zu ermitteln, mit der das Verhalten von realen Fahrern in der Verkehrssimulation möglichst genau nachgeahmt werden kann. Dazu wurde zusätzlich eine effiziente Implementierung des Fahrermodells zur Auswertung der gewonnenen Verhaltensdaten entwickelt, die auf Grafikhardware parallel ausgeführt werden kann.

Auf diese Weise konnte das Persönlichkeitsprofil eines Fahrers eingegrenzt werden. Die Präzision hängt einerseits von der Einflussstärke des entsprechenden Persönlichkeitszuges auf das Verhalten im Verkehr und andererseits vom Umfang der gesammelten Daten und der Menge der Ereignisse während der virtuellen Fahrt ab.

Ein weiteres Ziel war es die aufgenommenen Daten mit dem Verhalten des Agentenmodells zu vergleichen und auf diese Weise das Modell zu evaluieren, um Ansatzpunkte für dessen Weiterentwicklung zu liefern. Dazu wurden die Aktionen von Probanden mit denen von Agenten mit ihren inferierten Profilen auf Unterschiede durchsucht und nach Kontext gruppiert. In diesen Kontextgruppen, auch Situationen genannt, zeigten die Probanden eine größere Bandbreite von Fahrstrategien als das Agentenmodell. Die große Menge aufgezeichneter Verhaltensdaten konnte automatisiert auf eine überschaubare Menge reduziert werden, ohne relevante Information zu verlieren. Beispiele für identifizierte Strategien der Probanden sind das langsame Zurollen auf eine Warteposition, das starke Beschleunigen vor einer Engstelle um diese vor dem Gegenverkehr zu passieren, langsames Fahren bei engerer Spur und langsames Vortasten bei unübersichtlicher Verkehrslage.

Einige dieser Strategien und Verhaltensweisen wurden im Anschluss an die Evaluierung in das Modell integriert, wie das Anpassen der Geschwindigkeit an Situation, Persönlichkeit und emotionalen Zustand. Weitere Details zu dieser Studie sind in [V16] und [S7] zu finden.

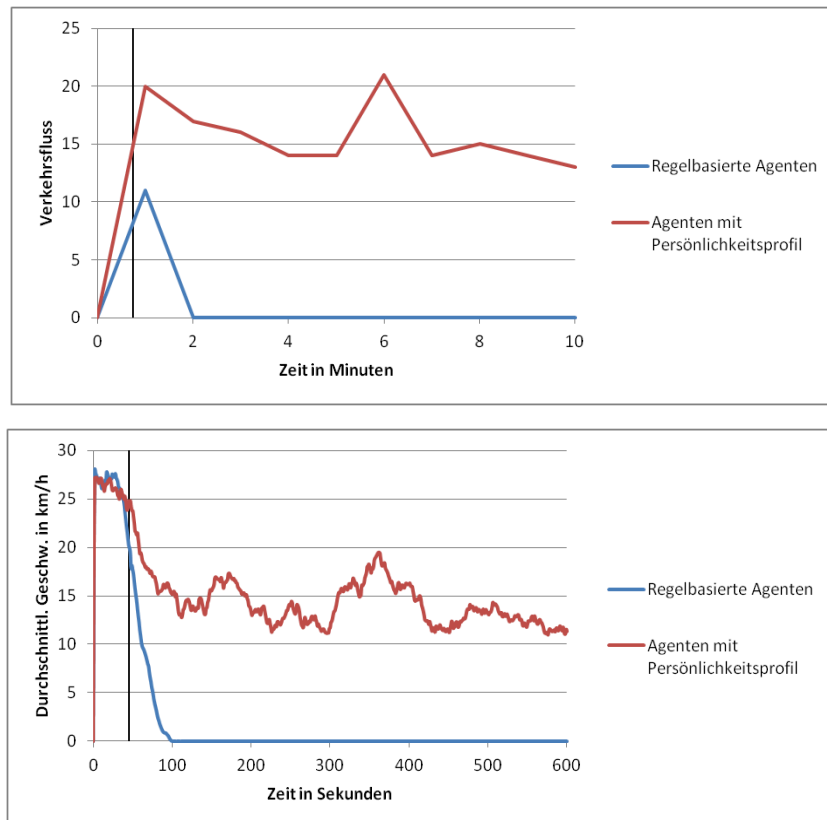


**Abbildung 18:** Zur Untersuchung von Agenten mit psychologischen Persönlichkeitsprofilen wurde eine geschlossene Straße mit einer Kreuzung, an der „rechts vor links“-Regelung gilt, entworfen. Die farbigen Fahrzeuge kodieren die psychologischen Persönlichkeitsprototypen: undercontrolled (rot), overcontrolled (blau), resilient (gelb). In der abgebildeten Situation tritt ein Fahrer der Resilient-Gruppe sein Vorfahrtsrecht ab (angedeutet durch das Vorfahrtszeichen). Nun kann der Fahrer zu seiner Linken fahren, was die blockierende Situation auflöst.

**Evaluierung der emotionsbeeinflussten Agenten** Die mikroskopische Agentenarchitektur und im Speziellen das damit erzeugte persönlichkeitsbasierte und emotionsbeeinflusste Verhalten wurden mit zwei gestaffelten Versuchen in drei Szenarien evaluiert. Im ersten Versuch wurde ein Szenario realisiert, in dem es unter Verwendung von rein regelbasierten Agenten zum vollständigen Erliegen des Verkehrs kommt. Dazu wurde eine Vierwegekreuzung mit „rechts vor links“-Verkehrsregelung modelliert. Die von der Kreuzung ausgehenden Straßen münden in die gleiche Kreuzung, um ein geschlossenes System zu erzeugen. Zum Beginn der Simulation werden die Agenten zufällig auf der ca. 1 km langen Strecke verteilt.

Im Anschluss folgen sie der Straße, bis sie auf die Kreuzung treffen. Dort angekommen wird zufällig entschieden, ob der Agent rechts oder links abbiegt oder geradeaus fährt. Anhand der Vorfahrtsregel wird entschieden, ob der Agent weiterfahren kann oder auf einen anderen Agenten warten muss. In diesem Szenario kann es zu einer Situation kommen, in der keiner der Agenten weiter fahren darf, da jeder auf einen anderen warten muss (Deadlock). Bei 35 Fahrzeugen im System, was lediglich 6,6% der maximalen Kapazität der Straße entspricht, kommt es im Durchschnitt bereits nach 26 Sekunden zur Blockierung, die im Anschluss zum Stillstand des Verkehrs führt. Der Aufbau des Szenarios ist in Abbildung 18 dargestellt.

Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, wird das Fahrverhalten von Verkehrsteilnehmern aufgrund ihrer Persönlichkeiten mit drei Prototypen charakterisiert werden: „Resilient“, „Overcontrolled“ und „Undercontrolled“. Die Einteilung in diese Prototypen wurde in die Simulationssoftware mit Hilfe eines Höflichkeitsparameters integriert und sobald es zu einem blockierenden Zustand kommt, wird aufgrund der Parameterwerte der beteiligten Agenten entschieden, welcher Agent auf sein Vorfahrtsrecht verzichtet.



**Abbildung 19: Ein Vergleich zwischen regelbasierten Agenten und dem erweiterten Modell mit psychologischen Persönlichkeitsprofilen. Die Simulationen wurden über einen Zeitraum von 10 Minuten aufgezeichnet. Der erste blockierende Zustand trat nach 45 Sekunden auf (vertikale schwarze Linie). Der Verkehrsfluss (Anzahl Fahrzeuge pro Minute) auf der Kreuzung (oben) und die durchschnittliche Geschwindigkeit aller Fahrzeuge in der Simulation (unten) wurden gemessen.**

Abbildung 19 zeigt den Vergleich zwischen den beiden Modellen. Während der Verkehr nach dem Auftreten der ersten blockierenden Situation an der Kreuzung nach 45 Sekunden zum Stillstand kommt, sorgt die Erweiterung durch persönlichkeitsbasierte Entscheidungen dafür, dass der Verkehr weiter fließen kann. Weitere Details hierzu können in [V2] und [S3] nachgelesen werden.

Nachdem die Persönlichkeitskomponente grundlegend evaluiert wurde, sollte die dynamische Komponente der Emotionen im zweiten Test untersucht werden. Als Beispielszenario wurden jeweils eine einseitig und eine beidseitig verengte Straße simuliert (s. Abbildung 20). Die Simulation wurde je mit Agenten durchgeführt, die strikt die Verkehrsregeln befolgen, mit Agenten mit statischem Persönlichkeitsprofil und mit Agenten mit dynamischem Persönlichkeitsprofil durch Emotionen. Im Fall der einseitig verengten Fahrbahn müssen Fahrzeuge hinter einem Hindernis warten, bis sich im Gegenverkehr eine Lücke ergibt, die groß genug ist, ein sicheres Vorbeifahren am Hindernis zu ermöglichen. Ist dieses Sicherheitskriterium durch stetigen Gegenverkehr nicht erfüllt, entscheidet sich keiner der rein regelbasierten und persönlichkeits-



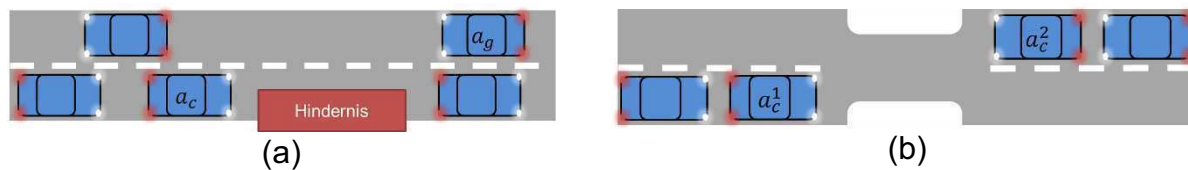


Abbildung 20: Schema des einseitig (a) und beidseitig (b) verengten Beispielszenarios.

basierten Agenten zur Vorbeifahrt, da ein erhebliches Risiko entstehen würde. Dieses Verhalten führt jedoch zu unrealistischen Wartezeiten und wäre für einen Beobachter nicht plausibel.

Stattdessen sorgt das Warten hinter dem Hindernis bei den erweiterten Agenten für negative Emotionen, die die ansonsten statische Persönlichkeit des Agenten beeinflussen. Somit kann z. B. die akzeptierte Lücke im Gegenverkehr, die ein Agent für das Vorbeifahren am Hindernis wählt, mit steigender negativer Emotion immer kleiner werden. Dies führt bis zu dem Punkt, an dem der Agent losfährt und sogar in Kauf nimmt, dass der Gegenverkehr durch seine Aktion zum Bremsen gezwungen wird. Der Agent ist also bereit immer mehr Risiko in Kauf zu nehmen. Auf der anderen Seite haben die erweiterten Agenten die Möglichkeit, aus Höflichkeit wartenden Agenten das Fahren durch Vergrößerung der Lücke zum Vordermann und Signalisieren zu ermöglichen. Beide Fälle sind Beobachtungen, die man in der Realität in einer solchen Situation erwarten würde und sorgen daher für plausibleres Verhalten. Im Fall der beidseitigen Verengung (s. Abbildung 20 (b)) ist das Vorfahrtsrecht nicht in der Straßenverkehrsordnung geregelt. Daher muss es zwischen zwei Agenten, die in entgegen gesetzter Richtung unterwegs sind und sich zeitgleich an der Verengung treffen, ein Absprache darüber geben, wer als erstes das Hindernis passiert. Hier kann es, ähnlich zum Szenario mit der Vierwegekreuzung, zu einer Deadlocksituation kommen, die den Verkehr in der Simulation zum Erliegen bringt. Staut sich der Verkehr an dieser Engstelle, sorgt auch hier eine verlängerte Wartezeit einzelner Agenten dazu, dass sie nicht immer wieder dem Gegenüber die Vorfahrt gewähren, sondern sie sich irgendwann selbst nehmen. Auch dies entspricht eher dem Verhalten, das ein Beobachter in der Realität erwarten würde. Durch die Umsetzung konnte an den Verengungen sogar ein typisches Verhalten im Straßenverkehr nachgebildet werden: Warten mehrere Fahrzeuge hinter dem Hindernis und der erste in der Schlange kann nach einiger Wartezeit das Hindernis umfahren, folgen einige wartende Fahrzeuge einfach, ohne dass ihnen vom Gegenverkehr explizit die Vorfahrt gewährt wurde (Mitzugseffekt). In den Veröffentlichungen [V9], [V12] und [V14] sowie in [S3] sind weitere Details zu dieser Evaluierung zu finden.

## 2.5.2 Prototyp

Ein Ziel des Forschungsprojektes war die Integration der Projektergebnisse in ein bestehendes VR-System. Konkret handelt es sich dabei um den FIVIS-Fahrradfahrsimulator. Dieser wird ebenfalls am Institut für Visual Computing der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (weiter-)entwickelt und existiert bereits als Prototyp. Da der Fahrradfahrsimulator zu Beginn des Forschungsprojektes AVeSi mit Hilfe der Unity Game Engine von Grund auf neu implementiert wurde, konnten die Entwicklungen im hier beschriebenen Projekt darauf abgestimmt werden. Aus diesem Grund konnte die Integration effizient und ohne größeren Mehraufwand durchgeführt werden.<sup>8</sup> Zusätzlich entstand für eine Präsentation auf dem Tag der Forschung der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg am 5.12.2013 ein eigenständiger Demonstrator, der den Ablauf der Verkehrssimulation und den Wechsel zwischen den verschiedenen Simulationsebenen veranschaulicht (vgl. Abschnitte 2.1.1, 2.1.5 und 2.1.6).

## 3 Veröffentlichungen

- [V1] S. Seele, T. A. Dettmar, R. Herpers, C. Bauckhage und P. Becker, „Cognitive Aspects of Traffic Simulations in Virtual Environments,“ in *Tagungsband ASIM/GI-Fachgruppentreffen STS/GMMS, Workshop Simulation technischer Systeme - Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation*, Wien, 2012.
- [V2] S. Seele, R. Herpers und C. Bauckhage, „Cognitive Agents for Microscopic Traffic Simulations in Virtual Environments,“ in *Entertainment Computing – ICEC 2012*, S. 318-325, 2012.
- [V3] S. Seele, T. A. Dettmar, R. Herpers, C. Bauckhage und P. Becker, „Cognitive Aspects of Traffic Simulations in Virtual Environments,“ in *Simulation Notes Europe (SNE) Special Issue: Simulation of Traffic Systems - Technical Systems*, Volume 22, Number 2, S. 83-88, August 2012.
- [V4] S. Seele, R. Herpers, C. Bauckhage und P. Becker, „Cognitive Agents with Psychological Personality Profiles for Traffic Simulations in Virtual Environments,“ in *Tagungsband Sommertreffen Verkehrssimulation 2012, ASIM Mitteilungen, aus der Reihe: ASIM Mitteilungen*, 143, ASIM, Köln, 2012.
- [V5] T. Dettmar, S. Seele, R. Herpers, P. Becker, „Multi-Level Traffic Simulations for Virtual Environments,“ in *Tagungsband Sommertreffen*

---

<sup>8</sup> Eine zeitliche Verzögerung von 3 Monaten entstand lediglich durch eine Lücke in der Personalbesetzung.

- Verkehrssimulation 2012, ASIM Mitteilungen, *aus der Reihe: ASIM Mitteilungen*, 143, ASIM, Köln, 2012.
- [V6] T. Haubrich, S. Seele, R. Herpers, Martin E. Müller und P. Becker, „Semantic Road Network Models for Rapid 3D Traffic Scenario Generation,“ in *Tagungsband ASIM/GI-Fachgruppentreffen STS/GMMS, Workshop Simulation technischer Systeme - Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation*, Wien, 2013.
- [V7] T. A. Dettmar, S. Seele, R. Herpers, P. Becker und C. Bauckhage, „Efficient Mesoscopic Simulations for Persistent Agents in 3D-Applications and Games,“ in *Proceedings of the 5th Int. Conf. on Games and Virtual Worlds for Serious Applications (VS-Games)*, 2013.
- [V8] T. Haubrich, „Konzeption einer Verkehrsnetzrepräsentation für kognitive Agenten in virtuellen Umgebungen,“ Technical Report der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Fachbereich Informatik, ISSN 1869-5272, online: <https://opus.bib.hochschule-bonn-rhein-sieg.de/frontdoor/index/index/docId/13>, 2013.
- [V9] F. Krueger, S. Seele, R. Herpers und P. Becker, „Dynamic Emotional States based on Personality Profiles for Adaptive Agent Behavior Patterns,“ Technical Report der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Fachbereich Informatik, ISSN 1869-5272, online: <http://opus.bib.hochschule-bonn-rhein-sieg.de/opus-3.3/volltexte/2013/16/>, 2013.
- [V10] T. Haubrich, S. Seele, R. Herpers, M.E. Müller und P. Becker, „Integration of Road Network Logics into Virtual Environments,“ in *Proceedings of IEEE Virtual Reality*, 2014.
- [V11] T. Haubrich, S. Seele, R. Herpers, M.E. Müller und P. Becker, „A Semantic Road Network Model for Traffic Simulations in Virtual Environments: Generation and Integration,“ in *Proceedings of the IEEE Virtual Reality SEARIS Workshop*, 2014.
- [V12] F. Krueger, S. Seele, R. Herpers, C. Bauckhage und P. Becker, „Adaptive Decision Making in Microsimulations of Urban Traffic in Virtual Environments,“ *Entertainment Computing – ICEC 2014*, Poster, 2014.
- [V13] T. Haubrich, S. Seele, R. Herpers, C. Bauckhage und P. Becker, „Synthetic Perception for Intelligent Virtual Agents,“ in *Proceedings of the Computer-Human Interaction in Play (CHI Play)*, Work-in-Progress Paper, 2014.
- [V14] F. Krueger, S. Seele, R. Herpers, C. Bauckhage und P. Becker, „Dynamic Emotional States Based on Personality Profiles for Adaptive Agent Behavior Patterns,“ in *11. Workshop Virtuelle Realität und Augmented Reality der GI-Fachgruppe VR/AR*, 2014.
- [V15] T. Haubrich, S. Seele, R. Herpers, C. Bauckhage und P. Becker, „Modeling Sensation for an Intelligent Virtual Agent's Perception Process,“ erscheint in *Intelligent Virtual Agents*, 2015.
- [V16] S. Kampmann, S. Seele, R. Herpers, C. Bauckhage und P. Becker, „Automatic Mapping of Human Behavior Data to Personality Model Parameters for Traffic Simulations in Virtual Environments,“ erscheint in *Computational Intelligence and Games*, 2015.

## 4 Studentische Projekte und Abschlussarbeiten

- [S1] T. A. Dettmar. „Macroscopic Traffic Simulations for Virtual Environments,“ Masterprojekt, Mai 2012.
- [S2] T. A. Dettmar. „Queuing Models for Traffic Simulations in Virtual Environments,“ Masterarbeit, März 2013.
- [S3] F. Krueger. „Persönlichkeitsprofile für Mikrosimulationen des Straßenverkehrs in virtuellen Umgebungen,“ Masterarbeit, März 2013.
- [S4] S. Kampmann. „Machine Learning based Driver Behavior in Traffic Simulations for Virtual Environments,“ Masterprojektarbeit, Juni 2013.
- [S5] T. Haubrich. „Konzeption einer Verkehrsnetzrepräsentation für kognitive Agenten in virtuellen Umgebungen,“ Masterprojektarbeit, Juli 2013; auch als Technical Report der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Fachbereich Informatik, ISSN 1869-5272, online: <http://opus.bib.hochschule-bonn-rhein-sieg.de/opus-3.3/volltexte/2013/15/>, 2013.
- [S6] X. Chen. „Implementierung von Vorfahrtsregeln in der semantischen Straßennetzwerkrepräsentation SeRoNet,“ DAAD RISE Praktikum , Juli 2013.
- [S7] S. Kampmann. „Inference based Model Analysis for Traffic Simulations in Virtual Environments,“ Masterarbeit, April 2014.
- [S8] T. Haubrich. „ Entwicklung eines synthetischen Perzeptionsprozesses,“ Masterarbeit, Mai 2014.
- [S9] B. Buhr. „Workflow zur Integration realistischer Fußgängeranimationen in das AVeSi-Projekt,“ Praxisprojekt Bachelor, Mai 2014.
- [S10] F. Beauchemin. „Implementierung eines Editorwerkzeugs zur Erstellung von Straßennetzwerken,“ DAAD RISE Praktikum, August 2014.
- [S11] N. Jörgensen. „Entwicklung eines physikalisch basierten Fahrzeugmodells für virtuelle Umgebungen,“ Bachelorarbeit, Dezember 2014.

## Quellenverzeichnis

- [1] R. D. Garrity und J. Demick, „Relations Among Personality Traits, Mood States, and Driving Behaviors,“ *Journal of Adult Development*, Bd. 8, Nr. 2, pp. 109-118, 2001.
- [2] P. Y. Herzberg, „Beyond "accident-proneness": Using Five-Factor Model prototypes to predict driving behavior,“ *Journal of Research in Personality*, Bd. 6, Nr. 43, pp. 1096-1100, 2009.
- [3] K. Nagel und M. Schreckenberg, „A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic,“ *Journal de Physique I France*, Bd. 2, Nr. 12, pp. 2221-2229, 1992.
- [4] Q. Yang und H. Koutsopoulos, „A Microscopic traffic Simulator for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems,“ *Transportation Research Part C, Emerging Technologies*, Bd. 4, Nr. 3, pp. 113-129, 1996.

- [5] T. Schulze, „Urban Traffic Simulation With Psycho-Physical Vehicle-Following Models,“ *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, pp. 1222-1229, 1997.
- [6] U. Klein, T. Schulze und S. Strassburger, „Traffic Simulation Based on the High Level Architecture,“ *Proceedings of the 30th Conference on Winter Simulation*, pp. 1095-1104, 1998.
- [7] P. Ehlert und L. Rosenkrantz, „Microscopic Traffic Simulation With Reactive Driving Agents,“ *Proceedings of ITSC 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems ITSC-01*, p. 860, 2001.
- [8] P. Hidas, „ARTEMiS Overview,“ 2004. [Online]. Available: [http://www.civeng.unsw.edu.au/staff/peter\\_hidas](http://www.civeng.unsw.edu.au/staff/peter_hidas). [Zugriff am 16 11 2010].
- [9] Ucin, „UC-win/Road,“ [Online]. Available: <http://vr.forum8.co.jp/english>. [Zugriff am 16 11 2010].
- [10] G. Stüben, „Verkehrslage in NRW,“ Ministerium für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, [Online]. Available: <http://www.autobahn.nrw.de>. [Zugriff am 16 11 2010].
- [11] D. Krajzewics, G. Hertkorn, C. Rössel und P. Wagner, „SUMO (Simulation of Urban Mobility) - An Open-Source Traffic Simulation,“ *Proceedings of the 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling (MESM2002)*, pp. 183-187, 2002.
- [12] K. Nagel, P. Stretz, M. Pieck, R. Donnelly und C. L. Barrett, „Transims,“ [Online]. Available: <https://code.google.com/p/transims/>. [Zugriff am 11 05 2015].
- [13] Q. Yang, H. Koutsopoulos und M. Ben-Akiva, „A Simulation Laboratory for Evaluating Dynamic Traffic Management Systems,“ *Transportation Research Record*, Nr. 1710, pp. 122-130, 2000.
- [14] R. Liu, „Dracula Microscopic Traffic Simulation,“ Institute for Transport Studies, University of Leeds, Leeds, 1994.
- [15] M. Fellendorf und P. Vortisch, „Validation of the Microscopic Traffic Flow Model VISSIM in Different Real-World Situations,“ *Transportation Research Board*, 2001.
- [16] T. S. S. (TSS), „Aimsun,“ Transport Simulation Systems (TSS), [Online]. Available: [www.tss-bcn.com](http://www.tss-bcn.com). [Zugriff am 11 05 2015].
- [17] D. Helbing, *Verkehrsdynamik - Neue physikalische Modellierungskonzepte*, Springer, 1997.
- [18] C. Gawron, *Simulation-based traffic assignment*, Köln: Universität Köln, 1998.
- [19] B. M. Blumberg, *Old Tricks, New Dogs: Ethology and Interactive Creatures*. PdD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [20] C. Peters und C. O'Sullivan, „Synthetic Vision and Memory for Autonomous Virtual Humans,“ *Computer Graphics Forum*, Nr. 21, pp. 743-752, 2002.
- [21] D. L. Schacter, D. T. Gilbert und D. M. Wegner, *Psychology*, New York: Worth, 2011.

- [22] D. Watson und L. A. Clark, „Development and Validation of Brief Measures of Positive and Negative Affect: The PANAS scales,“ *Journal of Personality and Social Psychology*, Bd. 54, Nr. 6, pp. 1063-1070, 1988.
- [23] R. E. Thayer, „Activation-Deactivation Adjective Check List: Current Overview and Structural Analysis,“ *Psychological Reports*, Bd. 58, pp. 607-614, 1986.
- [24] D. Watson und L. A. Clark, „On traits and temperament: general and specific factors of emotional experience and their relation to the five-factor model,“ *Journal of Psychology*, Bd. 60, Nr. 2, pp. 441-76, 1992.