

**Bergische Universität Wuppertal**  
**Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen**  
**Lehr- und Forschungsgebiet**  
**„Computersimulation für Brandschutz und Fußgängerverkehr“**

Bachelor-Thesis

**Simulation der Räumung einer Versammlungsstätte  
mit Pathfinder**

Eingereicht am	01. Oktober 2018
Eingereicht von	Hannes Rathje
Studiengang	Sicherheitstechnik

1. Prüfer	Prof. Dr. Armin Seyfried
2. Prüfer	Dr. Stefan Holl

## **Erklärung des Verfassers**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne die Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die eingereichte elektronische Fassung entspricht der eingereichten Druckfassung vollständig.

Ort, Datum

Unterschrift:

Köln, 29. September 2018

---

## **Danksagung**

In diesem Rahmen möchte ich einen Dank an alle Personen richten, die durch persönliche und fachliche Unterstützung an dieser Arbeit beteiligt sind.

Besonderer Dank gilt dabei Herrn Professor Armin Seyfried, Herrn Dr. Stefan Holl sowie der Arbeitsgruppe des Lehr- und Forschungsgebiets mit dem Forschungszentrum Jülich. Meinem Betreuer Gregor Jäger danke ich für die hilfreichen Ratschläge, die sehr gute Betreuung und dass er jederzeit für Rückfragen und Klärungen zur Verfügung stand.

## **Kurzfassung**

Nach dem Stand der Technik werden im Rahmen von Sondernachweisen ingenieurmäßige Verfahren angewendet, um Personenströme bei Gebäuderäumungen abzubilden. In der vorliegenden Arbeit wird dazu mit der Software Pathfinder von Thunderhead Engineering die Räumung einer Versammlungsstätte in verschiedenen Variationen simuliert. So wird untersucht, welche Anforderungen an den Anwender der Software gestellt werden und auf welche Hilfsmittel, Annahmen und Richtwerte bei solchen Sondernachweisen zurückgegriffen werden kann. Es wird ein Einblick in die vorhandenen Normungen und Vorgaben sowie den Berechnungen zugrundeliegenden Modelle gegeben. Anhand einer statistischen Auswertung der ausgegebenen Ergebnisse des Programms soll festgestellt werden, inwieweit Nutzereingaben diese beeinflussen. Es wird untersucht, an welchen Stellen gegebenenfalls noch Regulierung in Bezug auf Vorgaben oder die Dokumentation des Anwenders notwendig ist, um eine Repräsentativität solcher Simulationsergebnisse zu gewährleisten. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung werden außerdem den grafischen Auswertungsmöglichkeiten der Software gegenübergestellt.

## **Abstract**

### **Evacuations of a place of public assembly with Pathfinder**

According to the state of the art, building clearances are evaluated on the basis of engineering procedures to predict the flow of pedestrians. In this work, the Software Pathfinder by Thunderhead Engineering is used to simulate evacuations of a place of public assembly in different variations. It is examined which requirements result for the user of the software and which assumptions and guideline values can be used for such verifications. An insight into existing handbooks and standards is provided as well as the needed calculation models. On the basis of a statistical evaluation of the output files of Pathfinder it should be determined to what extent the users input influences the results. It will be analyzed if regulation regarding to specifications and documentation is necessary in order to ensure representativeness of simulation results. Furthermore the results of the statistical evaluation will be compared with the graphical results of the software.

## Inhaltsverzeichnis

Erklärung des Verfassers .....	I
Danksagung .....	II
Kurzfassung.....	III
Abstract .....	IV
Inhaltsverzeichnis .....	V
1 Einleitung.....	1
2 Begriffe und Grundlagen.....	3
2.1 Der Begriff Versammlungsstätte .....	3
2.1.1 Rechtliche Einordnung .....	3
2.1.2 Versammlungsstätten im Sinne der MVStättVO.....	3
2.2 Stand von Technik und Wissenschaft.....	4
2.2.1 Unbestimmte Rechtsbegriffe .....	4
2.2.2 Anerkannte Regeln der Technik.....	5
2.2.3 Stand der Technik .....	5
2.3 Angewandte Methoden .....	6
2.3.1 Predtetschenski und Milinski .....	7
2.3.2 John Fruin .....	8
2.3.3 Ulrich Weidmann .....	8
2.3.4 Nelson und Mowrer .....	8
3 Durchführung der Simulationen .....	10
3.1 Untersuchte Geometrie.....	10
3.1.1 Auswahl und Erstellung einer Geometrie .....	10
3.1.2 Auswahl von vier Modellen.....	12
3.2 Anwendung der Software.....	14
3.2.1 Beschreibung der Software .....	14

3.2.1.1	Pathfinder.....	14
3.2.1.2	Pathfinder Results.....	17
3.2.2	Struktur und Vorgehensweise .....	19
3.2.2.1	Erstellen der Eingabedateien für die Simulationen.....	19
3.2.2.2	Vergleichende Simulationen zum Einfluss der Reaktionszeit.....	19
3.2.2.3	Untersuchungen zum Einfluss des Geschwindigkeitsgrenzwertes.....	20
3.2.2.4	Automatische Vervielfältigung der Eingabedateien .....	21
3.2.3	Ausgabe der Messwerte aus den Simulationen .....	22
3.2.4	Statistische Methodik .....	23
3.2.5	Grafische Auswertung mit Pathfinder Results .....	25
3.3	Zusammenfassende Übersicht der Eingabedaten und Parameter .....	26
4	Ergebnisse der Untersuchungen .....	27
4.1	Darstellung der Ergebnisse.....	27
4.1.1	Deskriptive Darstellung der Gesamtergebnisse .....	27
4.1.2	Simulationen ohne Reaktionszeiten .....	27
4.1.3	Simulationen mit Reaktionszeiten .....	30
4.1.4	Simulationen bei variiertem Geschwindigkeitsgrenzwert.....	33
4.1.5	Gegenüberstellung der statistischen und grafischen Auswertung der Agentenzahlen je Ausgang .....	35
4.2	Auswertung.....	37
4.2.1	Einfluss der Reaktionszeit .....	37
4.2.2	Einfluss des Geschwindigkeitsgrenzwertes.....	38
4.3	Diskussion der Gesamtergebnisse .....	39
4.4	Verknüpfung der Ergebnisse mit dem Stand von Technik und Wissenschaft .....	39
5	Fazit.....	40
6	Ausblick .....	41

7	Literaturverzeichnis.....	VIII
8	Abbildungsverzeichnis .....	XIII
9	Tabellenverzeichnis .....	XV
A.	Anhangverzeichnis .....	XVI



# 1 Einleitung

Zu einem zentralen Element bei der Planung von Veranstaltungen hat sich die Sicherheit der Besuchenden entwickelt. Schäden von Personen gilt es unbedingt zu verhindern, so fordern es schließlich auch Schutzziele des Baurechts. Doch es bleiben die Fragen, wie sich Sicherheit dabei messbar machen lässt und wie die Rettung oder sichere Evakuierung von großen Personenzahlen gewährleistet werden kann. Neben Veranstaltungen treten diese Fragestellungen stets dort in den Vordergrund, wo große Personenzahlen aufgrund der Nutzung eines Gebäudes oder einer Anlage zu erwarten sind. Anwendungsgebiete reichen von Sportstadien und Kinos zu Gebäuden des Alltags wie Schulen, Bürogebäuden oder Einkaufszentren bis hin zu Hotels oder Kreuzfahrtschiffen.

Zur Abbildung von Personenströmen und zur Beurteilung von Gefahren und Risiken im Zuge einer Räumung werden immer häufiger ingenieurmäßige Verfahren und Methoden herangezogen. Die Entwicklung dieser Ingenieurverfahren im Laufe des letzten Jahrhunderts erstreckt sich von anerkannten Handbüchern mit entsprechenden Handrechenverfahren hin zu computerbasierten Räumungssimulationen mit dreidimensionaler Darstellung von Personen in Gebäuden. Für die Berechnung von Personenströmen sind zwei unterschiedliche Modellansätze hervorgegangen, die zur Bestimmung von Räumungszeiten herangezogen werden.

Vorhandene Handrechenverfahren wie das Modell von *Predtetschenski* und *Milinski* (Kapitel 2.3.1) betrachten nicht die einzelnen Personen eines Kollektivs, sondern verstehen die Personenmenge als ein zusammenhängendes Objekt, dessen Bewegung von charakteristischen Eigenschaften wie der mittleren Dichte und Geschwindigkeit abhängig ist. Rückschlüsse auf die einzelnen Personen sind bei derartigen makroskopischen Modellen nicht möglich.

Demgegenüber stehen die mikroskopischen Modelle, welche eine Betrachtung der einzelnen Personen und deren individueller Bewegungen erlauben. Aufgrund der steigenden Anzahl an personengebundenen Parametern wie Gehgeschwindigkeit, Größe oder simulierter Verhaltensweisen steigen die enthaltenen Informationen und die Anzahl der Freiheitsgrade dieser Systeme an. Die Komplexität dieser mikroskopischen Modelle erfordert den Einsatz von entsprechenden Computerprogrammen [1].

In der vorliegenden Arbeit wird ein solches Computerprogramm zur Räumung einer Versammlungsstätte verwendet. Es erfolgt eine Beschreibung des Umgangs mit der Software (Kapitel 3.2), der notwendigen Hintergründe und Modelle (Kapitel 2) und eine Untersuchung von Eingabeparametern auf deren Auswirkung anhand der entstehenden Ergebnisse (Kapitel 4).

Untersucht wird, welche Anforderungen an den Anwender resultieren und auf welche Hilfsmittel, Annahmen oder Richtwerte bei solchen Sondernachweisen zurückgegriffen werden kann. Dazu wird betrachtet, welche rechtlichen Vorgaben und Normungen vorhanden sind und inwieweit durchgeführte Simulationen ein nachvollziehbares und repräsentatives Ergebnis liefern können. Es soll festgestellt werden, ob Räumungssimulationen insofern objektiv sind, dass Nutzereingaben keine oder nur geringe Einflüsse auf die entstehenden Ergebnisse darstellen.

Für diese Untersuchungen werden ausgegebene Ergebnisse der Simulationssoftware Pathfinder von Thunderhead Engineering in einer statistischen Auswertung betrachtet und auch den visuellen Auswertungsmöglichkeiten des Simulationsprogramms gegenübergestellt.

## **2 Begriffe und Grundlagen**

### **2.1 Der Begriff Versammlungsstätte**

#### **2.1.1 Rechtliche Einordnung**

In Deutschland folgt das Baurecht der Unterteilung in die Rechtsgebiete des öffentlichen Rechts und des Privatrechts. Als Teil des öffentlichen Baurechts regelt das Bauordnungsrecht durch Vorschriften unter anderem die Errichtung von Gebäuden respektive baulicher Anlagen oder die bauliche Art der Nutzung von Grundstück und Bebauung. Die Kompetenz des Bauordnungsrechts liegt, dem föderalen Aufbau der Bundesrepublik folgend, bei den einzelnen Bundesländern. Mittelpunkt sind die Landesbauordnungen sowie flankierend Sonderbauverordnungen, welche länderspezifische Unterschiede aufweisen.

Zur allgemeineren Betrachtung lassen sich die sogenannte „Musterbauordnung“ (MBO) [2] und, beispielhaft für Sonderbauten, die „Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten“ (Muster-Versammlungsstättenverordnung MVStättVO) [3] heranziehen. Diese sind von der Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Ordnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Bundesländer (abgekürzt ARGEBAU) im Rahmen der Bauministerkonferenz erarbeitet worden, um eine einheitliche Grundlage für Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Länder zu bilden [4]. Gemäß § 1 der Musterbauordnung gelten die getroffenen Regelungen zunächst generell für bauliche Anlagen und Bauprodukte. Der Begriff „Versammlungsstätte“ wird in § 2 Abs. 4 MBO Anlagen und Räumen besonderer Art und Nutzung und somit den Sonderbauten zugewiesen. Für solche Sonderbauten können besondere Anforderungen im Sinne des § 51 MBO resultieren. Für Versammlungsstätten sind diese in der MVStättVO festgelegt. Entsprechende Sonderbau- oder Versammlungsstättenverordnungen finden sich in der jeweiligen Gesetzgebung der Länder.

#### **2.1.2 Versammlungsstätten im Sinne der MVStättVO**

Nach der Begriffsbestimmung des § 2 Abs. 1 MVStättVO sind als Versammlungsstätten bauliche Anlagen oder Teile von diesen zu verstehen, die für die gleichzeitige Anwesenheit vieler Menschen bei Veranstaltungen bestimmt sind. Räume für Veranstaltungen wie beispielsweise Studios, Aulen oder Hörsäle werden als Versammlungsräume definiert. Genauere Kriterien werden bereits im Anwendungsbereich der Vorschrift in § 1 MVStättVO herausgestellt. Durch die Verordnung beschrieben werden demnach Bau und Betrieb von

- Versammlungsstätten mit Versammlungsräumen für mehr als 200 Besucher je Versammlungsraum oder insgesamt mehr als 200 Besuchern bei gemeinsamen Rettungswegen,
- Versammlungsstätten im Freien mit Szenenflächen und einer Kapazität von mehr als 1.000 Besuchern sowie
- Sportstadien mit einer Kapazität von mehr als 5.000 Besuchern.

Zur Bestimmung, ob es sich bei einem betrachteten Gebäude um eine solche Versammlungsstätte im Sinne der Verordnung handelt, ist also weiter eine Kenntnis oder Bestimmung der Anzahl an Besuchern nötig. Ist diese nicht in den Bauvorlagen festgelegt, beschreibt § 1 Abs. 2 MVStättVO die Ermittlung der maximalen Besucherzahl in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Flächen. Hierbei sind

- für Sitzplätze an Tischen ein Besucher je Quadratmeter Grundfläche des Versammlungsraumes,
- für Sitzplätze in Reihen zwei Besucher je Quadratmeter Grundfläche des Versammlungsraumes,
- für Stehplätze auf Stufenreihen zwei Besucher je laufendem Meter Stufenreihe,
- bei Ausstellungsräumen ein Besucher je Quadratmeter Grundfläche des Versammlungsraumes sowie
- für sonstige Stehplätze mindestens zwei Besucher je Quadratmeter Grundfläche

anzunehmen. Die Regelungen gelten hierbei nur für Flächen, die durch Besucher tatsächlich erreicht werden können.

Die Anwendung der MVStättVO auf den Bau und Betrieb der Versammlungsstätte ist somit primär von der Art und Nutzung sowie der zu erwartenden Besucherzahl abhängig. Teil dieser Arbeit ist die Erarbeitung einer modellhaften Versammlungsstätte innerhalb des Anwendungsbereichs dieser Verordnung zur Untersuchung mit der Software Pathfinder.

## **2.2 Stand von Technik und Wissenschaft**

### **2.2.1 Unbestimmte Rechtsbegriffe**

Im Baurecht werden, wie in vielen anderen Rechtsgebieten, immer häufiger Formulierungen wie der „Stand der Technik“ in Gesetzestexten und Verordnungen verwendet. Flankierend dienen so technische Regeln zur Erfüllung von Schutzzielen aus der Gesetzesebene. Für die Begriffe des Stands der Technik oder der anerkannten Regeln der Technik

sind keine bindenden Definitionen von den gesetzgebenden Instanzen vorgenommen worden. Sie gelten daher als „unbestimmte Rechtsbegriffe“ [5], deren Konkretisierung anhand von themenbezogenen technischen Regeln in diesem Kapitel dargestellt werden soll. Außerdem werden wissenschaftliche Erkenntnisse und deren Bezüge zum geltenden Baurecht zur möglichst vollständigen aktuellen Darstellung des Themengebiets aufgezeigt.

### 2.2.2 Anerkannte Regeln der Technik

Problematisch wird der Umgang mit geltendem Recht an den Stellen, an denen die Erfüllung der definierten Schutzziele nicht eindeutig messbar ist. Geben die Bauordnungen und Sonderbauvorschriften Angaben zu notwendigen Breiten und maximalen Lauflängen bei Rettungswegen vor, fehlen zum Beispiel vergleichbare Vorgaben für Räumungszeiten. Hier sind unter anderem DIN-Normen und Richtlinien als anerkannte Regeln der Technik für Richtwerte heranzuziehen.

In Bezug auf die Simulation von Räumungen, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt werden, sind vor allem

- die Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen des RiMEA e. V. (RiMEA-Richtlinie) [6],
- der Leitfaden „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb) [7] und bezogen auf Versammlungsstätten
- der Leitfaden „Veranstaltungssicherheit“ der Branddirektion München [8]

zu nennen. Diese werden in dieser Arbeit angewendet.

### 2.2.3 Stand der Technik

Von den anerkannten Regeln der Technik wird der Stand der Technik unterschieden. Während anerkannte Regeln der Technik bereits im Fachgebiet bekannt und bewährt sind, ist der Stand der Technik noch nicht allgemein anerkannt [5]. Bezogen auf die Räumungssimulationen erarbeitet der DIN-Normenausschuss Bauwesen derzeit die DIN 18009-2 „Brandschutzingenieurwesen - Räumungssimulation und Personensicherheit“. Das Arbeitsdokument [9] wurde für die Bearbeitung dieser Arbeit zur Verfügung gestellt und findet ebenfalls Anwendung. Es ist jedoch entsprechend von den anerkannten Regeln der Technik in Kapitel 2.2.2 zu trennen.

Der Stand der Technik stellt einen Einflussfaktor auf die Veränderungen im Baurecht dar. Ein für diese Arbeit relevantes Beispiel ist die Art der Bestimmung von notwendigen Rettungswegbreiten, die in Sonderbauvorschriften wie der Muster-Versammlungsstättenverordnung von Juni 2005 (MVStättV) [10] vorgeschrieben war und in der derzeit gültigen Muster-Richtlinie über bauaufsichtliche Anforderungen an Schulen (MschulbauR) [11] noch verankert ist. Diese Vorschriften folgten einem Entwurf zur Normung von Zuschauertribünen (DIN EN 13200) mit einer Mindestbreite von 1,20 m für Rettungswege, für maximal 200 darauf angewiesene Personen [12]. Eine Erhöhung der Personenzahl bis zur nächsten vollen Hundert war nur bei 0,60 m Staffelungen der Rettungswegbreite vorgesehen. Die 0,60 m Module folgten einer durchschnittlichen Schulterbreite einer erwachsenen Person [13]. Entsprechend den Regelungen in den Musterverordnungen übernahmen die Länder die Staffelung in Modulen in ihre Sonderbauverordnungen.

Wissenschaftliche Arbeiten und Experimente konnten den Zusammenhang, dass die Bemessung der Rettungswege in einer solchen modularen Steigerung erfolgen muss, nicht bestätigen [12] [13] und widersprechen einer Staffelung teilweise [14] [15]. Als Folge dessen hat die ARGEBAU in § 7 Abs. 3 S. 2 im zweiten Halbsatz der aktuellen MVStättVO 2014 die lineare Interpolation der Rettungswegbreite gestattet. Eine Mindestbreite von 1,20 m bleibt für Rettungswege bestehen.

Dieses Beispiel zeigt den Einfluss des Stands der Technik auf das Baurecht. Die Prozesse der Umsetzung sind jedoch träge. Die Umsetzung der MVStättVO 2014 auf die Länderebene ist noch nicht vollständig erfolgt (vgl. beispielsweise Niedersachsen [16]). Entsprechend werden in dieser Arbeit noch die Staffelungen der Rettungswegbreiten in 0,60 m Modulen berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.1.2).

### 2.3 Angewandte Methoden

In diesem Kapitel soll ein Überblick über die für diese Arbeit wesentlichen mathematischen Modelle und Methoden gegeben werden. Die Darstellung erfolgt in chronologischer Reihenfolge der Veröffentlichungen. Grundlage dafür ist die Kenntnis der verwendeten Größen Geschwindigkeit, Fluss und Dichte.

Die Geschwindigkeit  $v$  wird als Verhältnis aus zurückgelegtem Weg und der dafür benötigten Zeiteinheit verstanden. Sie hat die Einheit m/s.

Der Fluss  $J$  beschreibt zunächst die Anzahl an Personen, die pro Zeiteinheit passieren

$$J = \frac{\Delta N}{\Delta t} \left[ \frac{\text{Personen}}{\text{s}} \right]$$

und kann als spezifischer Fluss  $J_s$  auch linear zur Breite einer Betrachtungsstelle dargestellt werden. Der spezifische Fluss  $J_s$  ergibt sich als Quotient aus dem Fluss  $J$  und der Breite  $b$ . Er kann ebenfalls als Quotient aus Geschwindigkeit und Fläche berechnet werden [17].

In makroskopischen Modellen kann der Fluss aufgrund der nichtzählbaren Personen pro Zeiteinheit alternativ ähnlich dem Fluss eines Fluids bestimmt werden. Der Fluss kann über Dichte, Geschwindigkeit und Breite in der resultierenden Einheit Personen pro Sekunde abgebildet werden [15]:

$$J = \rho \times v \times b$$

Die Dichte  $\rho$  beschreibt die Anzahl an Personen  $N$  je betrachteter Fläche  $A$ :

$$\rho = \frac{N}{A} \left[ \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2} \right]$$

### 2.3.1 Predtetschenski und Milinski

Ein umfassendes Handbuch zur Berechnung von Personenströmen wurde von *Predtetschenski* und *Milinski* entwickelt [18]. Es beschreibt makroskopische Berechnungsmethoden, die aus etwa 800 Beobachtungen resultierten [17]. Unterschieden werden dabei komfortable Bedingungen, Normalbedingungen und Gefahrenbedingungen für die Bewegung [18]. Ausgehend von einem Platzbedarf der Einzelpersonen in  $\text{m}^2$  wird die Dichte  $D$  als Belegungsgrad beschrieben. Diese ergibt sich aus dem Verhältnis der summierten Flächen der einzelnen Personen zu der vom Personenstrom eingenommenen Gesamtfläche. Sie entspricht damit der Einheit  $\text{m}^2/\text{m}^2$ . Das Produkt der Dichte und der Geschwindigkeit des Personenstroms wird als Bewegungsintensität bezeichnet. Aus den Berechnungsmethoden resultieren Fundamentaldiagramme, die einen Zusammenhang der Bewegungsintensität von der beschriebenen Dichte für die verschiedenen Bedingungen aufzeigen (vgl. Abbildung 2.3.1-1) [17] [18].

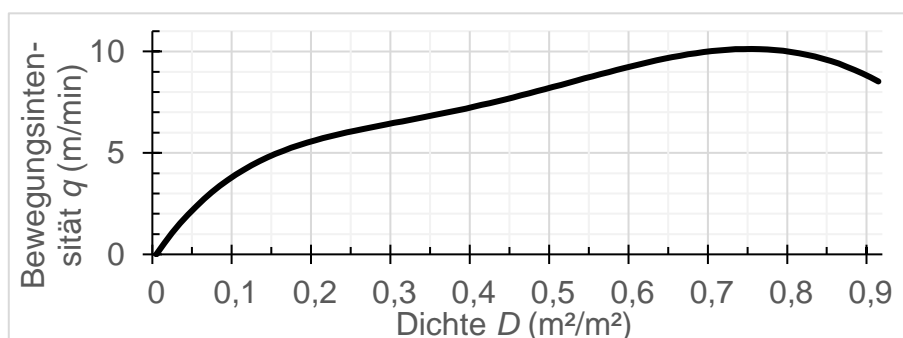


Abbildung 2.3.1-1: Fundamentaldiagramm resultierend aus den Berechnungsmethoden nach *Predtetschenski* und *Milinski* für horizontale Wege bei Normalbedingungen unter Berücksichtigung einer maximalen Dichte von  $D = 0,92$  (eigene Darstellung nach [17] [18])

### 2.3.2 John Fruin

Als weiteres Handbuch ist die Veröffentlichung „pedestrian planing and design“ von *Fruin* [19] zu nennen. Inhalt ist die Planung von Verkehrsanlagen durch die Beschreibung der Grundlagen des Gehens. Ein zentrales Ergebnis sind die Durchschnittswerte für freie Gehgeschwindigkeiten von Männern mit 1,37 m/s und Frauen mit 1,29 m/s, welche *Fruin* aus seinen Studien ableitete. In Abhängigkeit der Dichte, der den Fußgängern zur Verfügung stehenden Fläche und des spezifischen Flusses definiert *Fruin* qualitative Abstufungen als „Level of Service“. Diese Abstufungen dienen der Beschreibung von Bewegungsmöglichkeiten der einzelnen Personen und können zum Beispiel aufzeigen, wann individuelle Gehgeschwindigkeiten eingeschränkt werden und Konflikte zwischen Fußgängern entstehen. Eine Einordnung in die Abstufungen kann anhand des spezifischen Flusses  $J_s$  erfolgen [17] [19]. So ist eine Bewertung von baulichen Anlagen möglich.

### 2.3.3 Ulrich Weidmann

*Weidmann* veröffentlichte eine Literaturlauswertung zu transporttechnischen Eigenschaften des Fußgängerverkehrs [20]. Diese Literaturstudie liefert anzunehmende Gehgeschwindigkeiten, zusammengefasste grundlegende Eigenschaften und Wechselwirkungen von Fußgängern. Auf die Erkenntnisse wird in heutigen anerkannten Regeln der Technik [6] sowie im Stand der Technik [20] weiterhin verwiesen. Als Mittelwert der Literaturlauswertung von *Weidmann* resultiert für die Gehgeschwindigkeit ein anzunehmender Wert von 1,34 m/s. Die Abhängigkeit dieser Geschwindigkeit von der Personendichte stellt *Weidmann* durch die Funktion

$$v = 1,34 \text{ m/s} \times \left(1 - e^{-1,913 \times \frac{1}{\rho \times m^2} - \frac{1}{5,4}}\right)$$

dar. Der spezifische Fluss wird als Produkt der Dichte und dieser Geschwindigkeit berechnet [17].

### 2.3.4 Nelson und Mowrer

Ein weiteres relevantes Handbuch ist das „SFPE Handbook of Fire Protection Engineering“ der Society of Fire Protection Engineers (SFPE) [21]. Auch dieses stellt Annahmen und Berechnungsmethoden für Räumungssimulationen dar. Aus den Ergebnissen von *Predtetschenski /Milinski* [18] und *Fruin* [19] sowie als Überarbeitung des Kapitels „Movement of People“ von *Pauls* [22] in der vorangegangenen Ausgabe des Handbuchs von 1995 fassen *Nelson* und *Mowrer* 2002 eine neue Berechnungsmethode zusammen [17]. Als Einfluss der Dichte auf die Gehgeschwindigkeit gilt demnach



$$v = 1,40 - 0,3724 \times \tilde{\rho}$$

als linearer Zusammenhang für Dichten zwischen  $0,54 \text{ m}^{-2}$  und  $3,76 \text{ m}^{-2}$ . Die Dichte  $\tilde{\rho}$  wird dabei einheitenlos als  $\rho \times \text{m}^2$  betrachtet [17]. Für kleinere Dichten weisen *Nelson* und *Mowrer* den Fußgängern eine freie Gehgeschwindigkeit von  $v_0 = 1,2 \text{ m/s}$  zu. Bei Dichten oberhalb des genannten Wertebereichs ist demnach keine Bewegung mehr möglich. Der Zusammenhang ist in der nachstehenden Abbildung dargestellt.

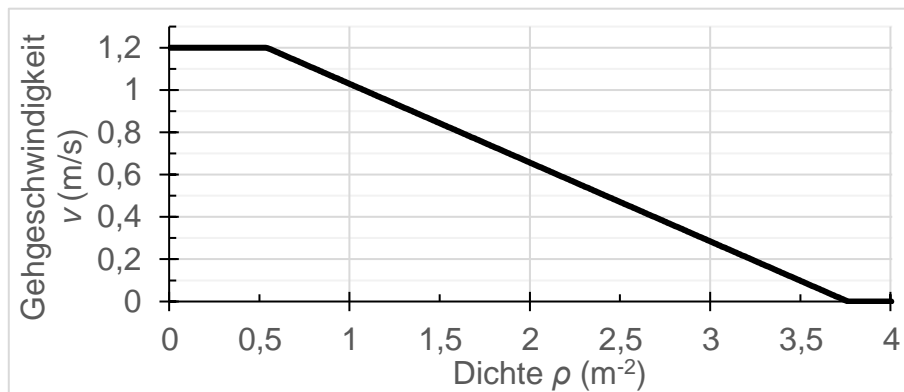


Abbildung 2.3.4-1: Fundamentaldiagramm des SFPE Handbuchs nach *Nelson* und *Mowrer* in eigener Darstellung

Die Annahmen und Berechnungsmethoden des SFPE Handbuchs sind unter anderem Grundlage der Simulationssoftware Pathfinder, die in dieser Arbeit verwendet wird.

### **3 Durchführung der Simulationen**

In diesem Kapitel wird zunächst dargestellt, wie ein Grundriss einer Versammlungsstätte ausgewählt und erstellt wurde (Kapitel 3.1). Anschließend wird ein Einblick in die Anwendung der Simulationssoftware Pathfinder und ihrer Programmmodule gegeben sowie die Überführung der erstellten Geometrie und ihrer untersuchten Variationen in die Simulation beschrieben (Kapitel 3.2). Anschließend wird eine Zusammenfassung der gewählten Einstellungen und Eingabeparameter (Kapitel 3.3) zur Nachvollziehbarkeit der Simulationen gegeben.

#### **3.1 Untersuchte Geometrie**

In Kapitel 2.1 wurde dargestellt, welche Kriterien an eine bauliche Anlage gestellt werden, damit sie als Versammlungsstätte in den Anwendungsbereich der MVStättVO fällt. Da die durchgeführten Simulationen mit Pathfinder die Räumung einer Versammlungsstätte untersuchen sollen, muss die zugrunde gelegte Gebäudegeometrie einer solchen Versammlungsstätte entsprechen.

##### **3.1.1 Auswahl und Erstellung einer Geometrie**

Zur Auswertung der verwendeten Simulationssoftware in Hinblick auf den Einfluss der ihr zugrundeliegenden Modelle und Parameter ist es zielführend, den Einfluss der Geometrie auf den Räumungsverlauf möglichst gering zu halten. Komplexe Grundrisse mit mehreren Räumen und Etagen sind nur bedingt geeignet, da eine Auswertung sehr detailliert erfolgen müsste. Durch die wachsende Zahl an Einflussfaktoren nähme die Anzahl an durchzuführenden Simulationsdurchläufen für repräsentative Ergebnisse mit Rückschlüssen auf die Software zu. Es soll eine Art von Versammlungsstätte gefunden werden, deren Grundriss und Ausgestaltung durch die gültigen Vorschriften nahezu vorgegeben ist und die sich auf eine Ebene beschränkt. Zur Untersuchung des Gehverhaltens und von Stauungen wird eine Geometrie gewählt, welche vorgeschrieben bereits Hindernisse enthält.

Ausgehend von einer Versammlungsstätte im Freien mit Szenenfläche und mehr als 1.000 Besuchern im Sinne des § 1 MVStättVO (Kapitel 2.1.2) wird ein ebenerdiger Grundriss gewählt. Zur Veranschaulichung könnte es sich zum Beispiel um eine Open-Air-Bühne ähnlich einem Festivalgelände mit eingezäunter Zuschauerfläche handeln. Übersteigt für solche Versammlungsstätten die mögliche Besucherzahl vor der Szenenfläche

den Wert von 5.000 Besuchern ist § 29 MVStättVO anzuwenden. Hier wird unter anderem in Absatz 2 die Anordnung von sogenannten Abschränkungen zur Ausbildung von Stehplatzbereichen beschrieben, welche nur von den Seiten aus zugänglich sind. Eine Abschränkung wird als 2,00 m breiter Gang ausgebildet, der von Absperrgittern begrenzt wird. In der Geometrie werden entsprechende Bühnenabsperrgitter an den Rückseiten angeordnet. Die weitere Begrenzung der Abschränkungen erfolgt mit Polizeigittern. Der innerhalb entstehende Gang dient ausschließlich Sanitäts- und Ordnungsdiensten. Durch diese Abschränkungen werden entsprechend Absatz 1 des § 29 MVStättVO die Szenenfläche vom Besucherraum getrennt sowie nach Absatz 2 innerhalb des Besucherraums mindestens 10,00 m tiefe Blöcke vor der Szenenfläche ausgebildet. Zu den Seiten darf der Abstand außerhalb der Breite der Szenenfläche auf eine Resttiefe von mindestens 5,00 m verringert werden. Ziel ist eine Ausbildung hintereinander gestaffelter Blöcke mit gesicherten Zwischenbereichen, in denen Ordnerpersonal und zuständige Behörden, wie zum Beispiel der Rettungsdienst, agieren können [13].

Als einheitliche Basis für die Simulationen wird eine CAD-Zeichnung einer solchen Versammlungsstätte erstellt. Das Erstellen in CAD ist von Vorteil, da exakte Maße und Orientierungs- bzw. Führungslinien eine hohe Genauigkeit bieten. Einzelne Elemente lassen sich dabei in fiktiven Schichten (genannt Layer) gruppieren.

Die Erarbeitung der Geometrie erfolgt orientiert am Leitfaden zur Veranstaltungssicherheit für Feuerwehr, Sicherheitsbehörde und Polizei sowie Veranstalter und deren Sicherheitsdienstleister [8]. Insbesondere die Auswahl der Gittertypen und daraus folgend die Maße von Polizeigittern und Bühnenabsperrgittern sowie deren Anordnung als Abschränkungen werden in die CAD-Zeichnung (s.a. Anhang 1) übernommen. Die Tiefe der ausgebildeten Stehplatzblöcke von 10,00 m wird entsprechend dem Leitfaden auf der vollen Breite des Bereiches, welcher von den Sichtlinien vor der Szenenfläche aufgespannt wird, eingehalten (s. Abbildung 3.1.1-1). Der seitliche Abstand der Abschränkungen von mindestens 5,00 m ist ebenso berücksichtigt.

Aus den Layern der CAD-Datei können die Elemente des Bühnenaufbaus, die aus der Auftrittfläche hervorgehenden Sichtlinien und die dargestellten Gittertypen mit den eingeschlossenen Gängen für Sanitäts- und Ordnungsdienste als Gruppen aktiviert oder deaktiviert werden. Beim Import in die Projektdatei der Simulationssoftware wird auf den Hintergrund dieser Vorgehensweise eingegangen (Kapitel 3.2.2.1). Die erstellte Geometrie enthält nun die notwendigen Informationen für das weitere Vorgehen.

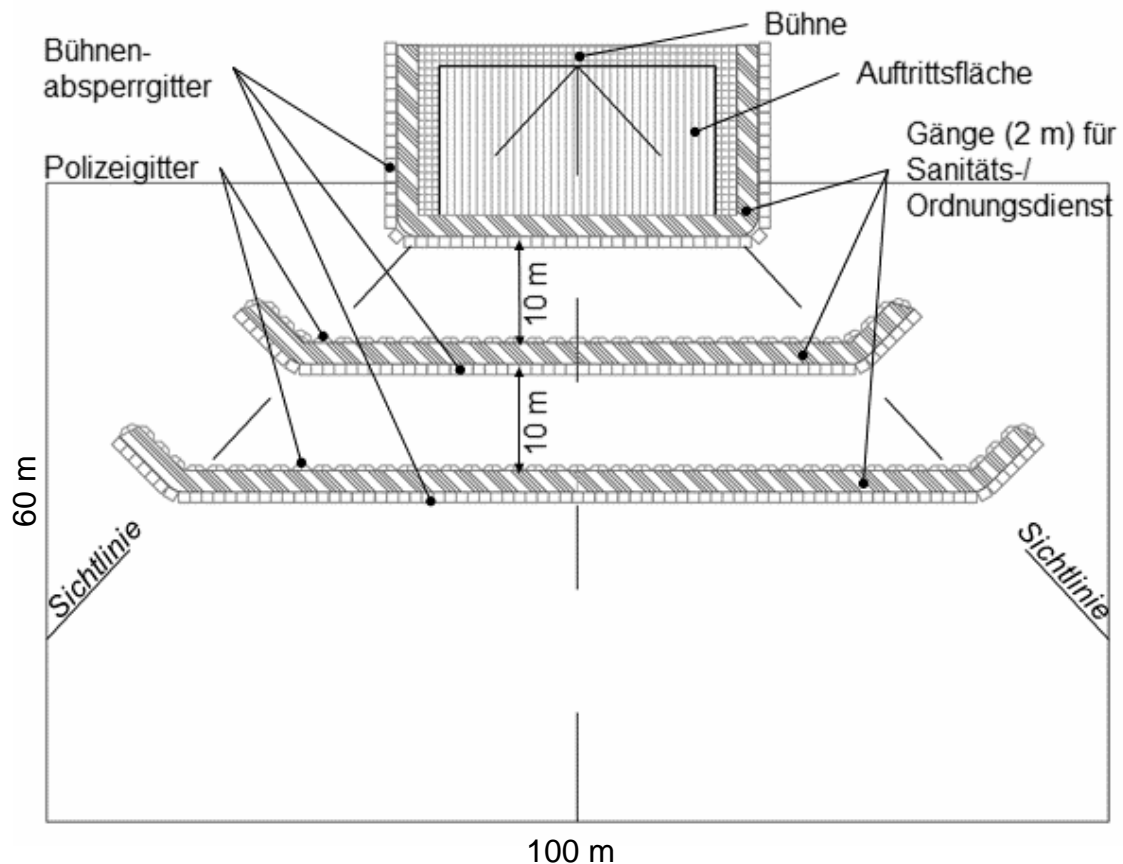


Abbildung 3.1.1-1: Erstelltes CAD-Modell mit Abschränkungen nach § 29 MVStättVO orientiert am Leitfaden für Veranstaltungssicherheit [8]

Da die Anordnung der Rettungswege die angestrebten Laufwege innerhalb der Simulationen verändert und der Einfluss der Geometrie zur Analyse der Software minimiert werden soll, werden unterschiedliche Anordnungen von Rettungswegen in mehreren Modellen vorgenommen. Die resultierenden Variationen werden im nächsten Kapitel kurz erläutert. Insgesamt erstreckt sich die für Besucher zugängliche Versammlungsfläche auf 60 m × 100 m abzüglich der Abschränkungen.

### 3.1.2 Auswahl von vier Modellen

Die Grundfläche der Veranstaltungsfläche beträgt 6.000 m<sup>2</sup> (60 m × 100 m). Die für Besucher zugängliche Fläche wird mit 5.500 m<sup>2</sup> angenommen und ergibt sich nach Abzug der für Besucher unzugänglichen Flächen (Gänge für Sanitäts- und Ordnungsdienste). Die Anzahl der Besucher wird mit 11.000 Personen nach § 1 Abs. 2 S. 4 MVStättVO und Bezug auf § 1 Abs. 2 S. 1 Halbsatz 2 MVStättVO angenommen (vgl. Kapitel 2.1.2). Die Bemessung der Rettungswege erfolgt nach den Vorgaben des § 7 MVStättVO. Für die Versammlungsstätte im Freien wird eine notwendige Gesamttretungsbreite von

$$11.000 \text{ Besucher} \times \frac{1,20 \text{ m}}{600 \text{ Personen}} = 22,00 \text{ m Rettungsbreite}$$

ermittelt, die durch Ausgänge aus der Veranstaltungsfläche gegeben sein muss. Es wird eine Gesamttrettungswegbreite von 24,00 m zugrunde gelegt. Dies berücksichtigt die in einzelnen Versammlungsstättenverordnungen noch geforderte Staffelung bei der Ermittlung der Rettungswegbreite. Die Staffelung ist, wie in Kapitel 2.2.3 erläutert, in der aktuellen Fassung der MVStättVO entfallen. Die Rettungswegbreite wird entsprechend dem § 6 Abs. 5 MVStättVO möglichst gleichmäßig auf die angenommenen Ausgänge verteilt. Es werden drei Modelle mit verschiedener Anordnung von acht Ausgängen je 3,00 m lichter Breite (Modelle 1 bis 3) sowie ein viertes Modell mit vier Ausgängen von jeweils 6,00 m lichter Breite erstellt (Modell 4).

Diese Ausgänge werden in den Modellvariationen möglichst gegenüberliegend angeordnet, um der Anforderung des § 6 Abs. 2 MVStättVO zu entsprechen. Die resultierende symmetrische Anordnung ist sinnvoll, da anzunehmen ist, dass Personen die in der Nähe befindlichen Ausgänge nutzen [23]. Die Anordnung erfolgt primär an den kurzen Seiten der rechteckigen Geometrie. Die so gestalteten vier Variationen der Versammlungsfläche sind in Abbildung 3.1.2-1 dargestellt.

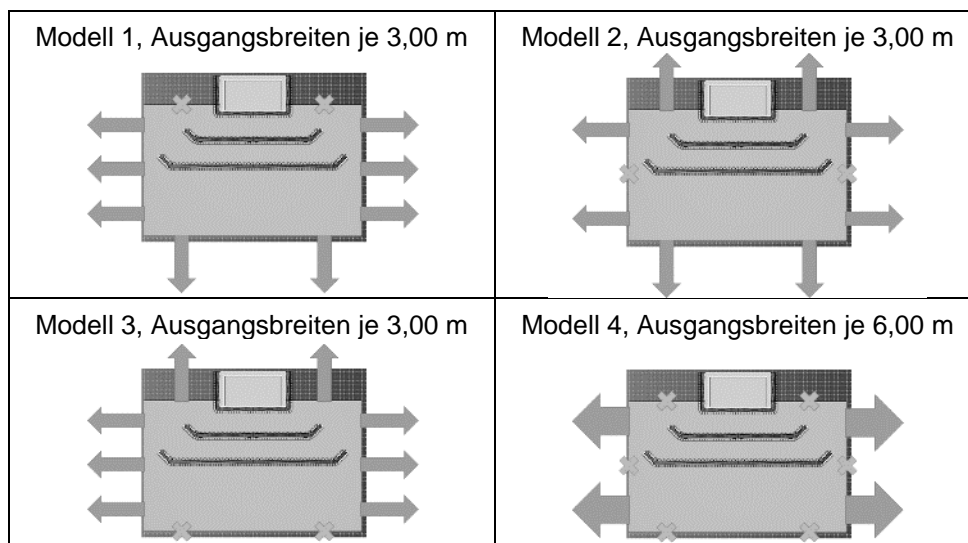


Abbildung 3.1.2-1: Übersicht der Anordnung und Breite der zur Verfügung stehenden Rettungswege in den vier erstellten Modellvariationen

Um eine einheitliche Arbeitsgrundlage für die späteren Simulationen zu erhalten, werden alle genannten Ausgänge in die erstellte CAD-Datei eingefügt. Je nach Modellvariation werden für nicht zur Verfügung stehende Ausgänge später Modifikationen mit der Simulationssoftware vorgenommen.

## 3.2 Anwendung der Software

### 3.2.1 Beschreibung der Software

Nach der Vorstellung der zu simulierenden Geometrie mit den gewählten Variationen folgt eine Beschreibung der Software Pathfinder sowie der benötigten Eingabeparameter. Grundfunktionen und vom Programm verwendete Modelle werden insoweit vorgestellt, dass im Folgenden getroffene Eingaben sowie die Struktur und Vorgehensweise bei den Simulationen transparent und reproduzierbar sind. Das Erstellen der benötigten Eingabedateien wird beschrieben. Die Namen der beschriebenen Funktionen oder Menüpunkte werden in ihrer englischen Bezeichnung an den entsprechenden Stellen in Klammern aufgezeigt.

Die verwendete Simulationssoftware Pathfinder ist ein vom amerikanischen Entwickler Thunderhead Engineering kommerziell vertriebenes Programm zur mikroskopischen Analyse von Personenbewegungen innerhalb von erstellten Modellen. Die Software richtet sich an professionelle Anwender und bietet im Hauptprogramm eine grafische Benutzeroberfläche zur Erstellung und Ausführung von Simulationen mit Zugriff auf die notwendigen Parameter. Für diese Arbeit stellte der Entwickler eine gesonderte Lizenz für Studiums- und Bildungszwecke zur kostenlosen Nutzung für einen sechsmonatigen Zeitraum zur Verfügung. Die Erstellung der Eingabedateien und die Durchführung der Simulationen erfolgt mit der englischsprachigen, zum Erarbeitungszeitraum dieser Arbeit aktuellsten Originalversion (Versionsnummern: Pathfinder 2018.3.0730 x64, Pathfinder Results 2018.1.0729 x64).

Neben dem Hauptmodul „Pathfinder“ steht nach der Installation ein zweites Softwaremodul zur 3D-Visualisierung von Simulationsergebnissen namens „Pathfinder Results“ zur Verfügung. Die zugrundeliegenden Mechanismen werden anhand der Benutzerdokumentationen sowie Veröffentlichungen des Herstellers auf dessen Internetauftritt zusammengefasst. Mit diesen gegebenen Informationen wird im Folgenden ein Einblick in die Funktionsweise der Softwaremodule gegeben.

#### 3.2.1.1 Pathfinder

Die simulierten Personen werden in Pathfinder *occupants* genannt. Zur Abgrenzung der Eigenschaften gegenüber realen Personen wird fortan für die simulierten Fußgänger die Bezeichnung „Agenten“ verwendet. Die Darstellung der Agenten kann vom Anwender ausgewählt werden, erfolgt bei Standardeinstellungen jedoch in Form von aufrechten Zylindern, deren Blickrichtung durch eine Pfeilkontur indiziert wird. Die Darstellungsform

stellt nicht den Flächenbedarf der Agenten dar, sondern dient der Visualisierung und unterliegt der Auswahl des Nutzers. Die Darstellung hat keinen Einfluss auf die Simulation.

Jeder Agent ist über spezifische Eigenschaften innerhalb des Modells definiert. Dazu gehören unter anderem eine eindeutige Position, veränderbare Verhaltensweisen sowie die Zugehörigkeit zu einer Profilgruppe. Fundamentale Größen wie Körpermaße oder Gehgeschwindigkeiten werden innerhalb der Profilgruppen verschieden verteilt. Eine Kenntnis dieser Eigenschaften ist zur Interpretation und Auswertung der Simulationen von zentraler Bedeutung. Die wesentlichen Einstellungsmöglichkeiten und deren Hintergründe werden nachstehend erläutert.

Grundlegend ist zunächst die Auswahl eines Modus, in dem Pathfinder die Simulation ausführen soll. Die Software unterscheidet die Modi „SFPE“ und „Steering“ (Dialogfenster Simulation Parameters – Behavior – Behavior Mode) mit welchen Interaktionen und Gehverhalten der Agenten vorgegeben werden. Der SFPE-Modus verwendet hierfür die Annahmen des Engineering Guide to Human Behavior in Fire [24] und liefert, in Abhängigkeit dieser, sehr ähnliche Ergebnisse zu dem Verfahren nach *Nelson* und *Mowrer* [25]. Die Ergebnisse werden im Wesentlichen durch den Mechanismus der Wartezeiten an Türen bestimmt. Die Gehgeschwindigkeiten werden durch einen dichteabhängigen Faktor verändert (s. Abbildung 3.2.1-1) [26]. Der Faktor ist dabei auf ein Minimum von 15 % begrenzt, um ein „Steckenbleiben“ der Agenten zu verhindern [26, S.75].

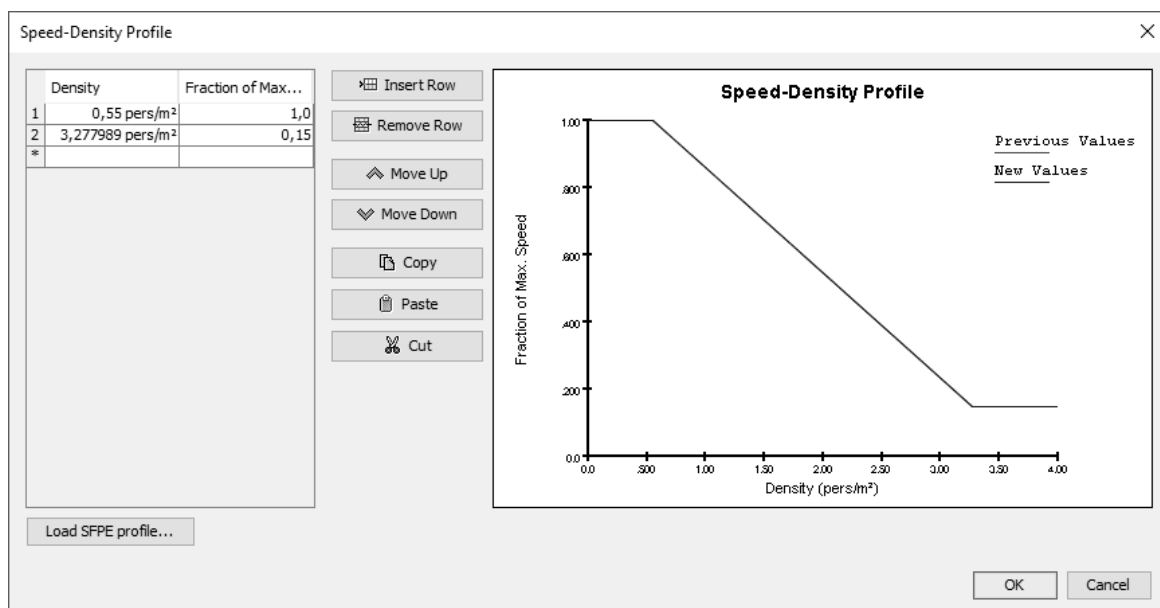


Abbildung 3.2.1-1: Abhängigkeit des Faktors der Geschwindigkeitsänderung (Fraction of Max. Speed) von der Dichte (Density) in den Profileinstellungen von Pathfinder

Der Steering-Modus ist eine Eigenentwicklung des Herstellers und bestimmt die Bewegungen durch ein Bestreben der Agenten, Kollisionen untereinander oder mit Hindernissen zu vermeiden. Pathfinder versucht das menschliche Verhalten, wie es aus experimentellen Untersuchungen hervorgeht, besser abzubilden. Während Wartezeiten an Türen im Modell nach SFPE Handbuch durch eine Verringerung des Flusses entstehen (aufgrund verringerter Breite, vgl. Kapitel 2.3.4), wird im Steering-Modus das menschliche Verhalten nachgestellt [26]. Durch die geringere Breite in Engstellen sinkt der Abstand zwischen den Agenten, so dass diese aufgrund des genannten Bestrebens verlangsamen. Der Körperdurchmesser der Agenten beträgt hierbei 45,58 cm in zylindrischer Darstellung als Durchschnittswert für männliche und weibliche Personen nach *Pheasant* und *Haslegrave* [27]. Mit diesem künstlichen Verhalten werden bei einer vorgegebenen Gehgeschwindigkeit von 1,19 m/s vergleichbare Ergebnisse zu den Werten des SFPE Handbuchs erreicht (vgl. Abbildung 3.2.1-2) [25]. Dieser Modus ist als Standard in Pathfinder integriert und wurde für die Simulationen in dieser Arbeit verwendet.

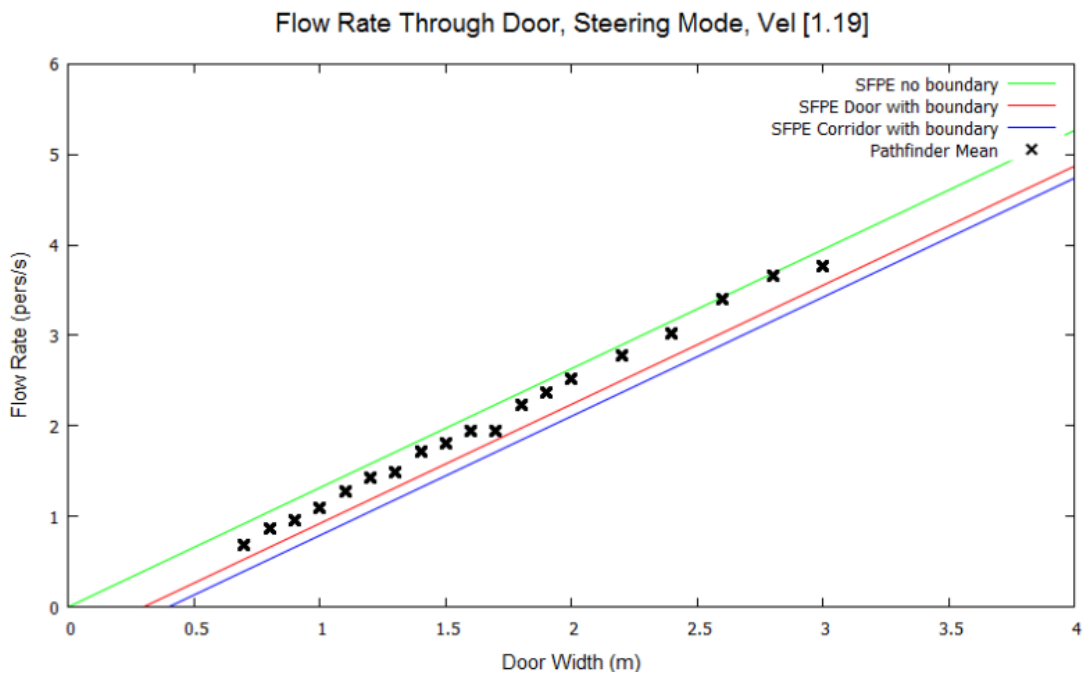


Abbildung 3.2.1-2: Messergebnisse des Steering-Modus bei einer vorgegebenen Gehgeschwindigkeit von 1,19 m/s im Vergleich zu entsprechenden Werten des SFPE Handbuchs – dargestellt ist der Personenfluss in Metern pro Sekunde in Abhängigkeit der Durchgangsbreite in Metern (Grafik entnommen aus [25, S.26])

In der Veröffentlichung des Herstellers zur Verifikation und Validierung werden die Modi auf die Reproduzierbarkeit von experimentellen und rechnerischen Fundamentaldiagrammen untersucht. Die Vergleiche zeigen korrekte Berechnungen [25].

Neben der Auswahl eines Simulationsmodus unterteilen sich die grundlegenden Eigenschaften der Agenten innerhalb der Simulationen in Parameter von Profilen (Profiles) und



Verhaltensweisen (Behaviors). Aus den Profilen werden den Agenten nach wählbaren Verteilungsmodellen alle benötigten Eigenschaften zugeordnet. Maßgebende Eingaben sind unter anderem Gehgeschwindigkeit, Größe und Durchmesser der Agenten. In dieser Arbeit wurden die Standardwerte verwendet. Eine vollständige Darstellung dieser Standardeinstellungen für das Agentenprofil ist in Anhang 2 aufgeführt.

Verhaltensweisen lassen sich zu einzelnen Agenten, Gruppen von Agenten oder der gesamten Population zuordnen. Diese Verhaltensweisen setzen sich aus einer editierbaren Abfolge von definierbaren Aktionen der Agenten zusammen. Es kann beispielsweise als Aktion festgelegt werden, ob die Routen von Agenten über Zwischenziele führen oder Agenten verzögert reagieren. Ist einem Agent eine solche Verhaltensweise zugeordnet, kann dieser die Geometrie erst verlassen, wenn alle ihm inhärenten Aktionen beendet sind [26]. In späteren Simulationen im Rahmen dieser Arbeit werden solche Verhaltensweisen zum Beispiel genutzt, um den Agenten Reaktionszeiten zuzuweisen. Hierbei erhalten die Agenten gleichverteilt eine Verzögerung (Initial Delay), bevor die Aktion der Suche nach einem Ausgang („Goto Any Exit“) startet. Somit verweilen die Agenten in ihrer Ausgangsposition, bis die spezifische Reaktionszeit erreicht ist.

#### 3.2.1.2 Pathfinder Results

Pathfinder bietet mit dem Softwaremodul Pathfinder Results Möglichkeiten zur visuellen Darstellung des Simulationsablaufes in Einzelbildern oder Videos. Eine Aufzeichnung der Räumungssimulation wird dabei mit farbigen Konturen als Skalen unterlegt, so dass jeder beliebige Zeitpunkt grafisch untersucht werden kann. Zur Darstellung können folgende Konturen erstellt werden:

- Density: zeigt die Dichte momentane Dichte in Agenten pro Quadratmeter
- Level of Service (Queuing, Stairway, Walkway): bildet eine Kontur der Level of Service nach *Fruin* (vgl. Kapitel 2.3.2)
- Speed: stellt die aktuelle Gehgeschwindigkeit der Agenten als Skala dar
- Normalized Speed: stellt die Gehgeschwindigkeit jedes Agenten im Verhältnis zu seiner maximalen Gehgeschwindigkeit dar
- Time to Exit: bildet die verbleibende Zeit bis zum Erreichen des Ausgangs durch den Agenten bezogen auf seine aktuelle Position ab
- Usage [Instantaneous]: zeigt die aktuelle Nutzung der Fläche durch Agenten
- Usage [Accumulated]: stellt die Summe der Flächennutzung bis zum Betrachtungszeitpunkt dar [28]

Als Beispiel zeigt die nachstehende Abbildung 3.2.1-3 die relativen Gehgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt  $t = 160$  s einer Simulation des Modells 1 mit Reaktionszeit.

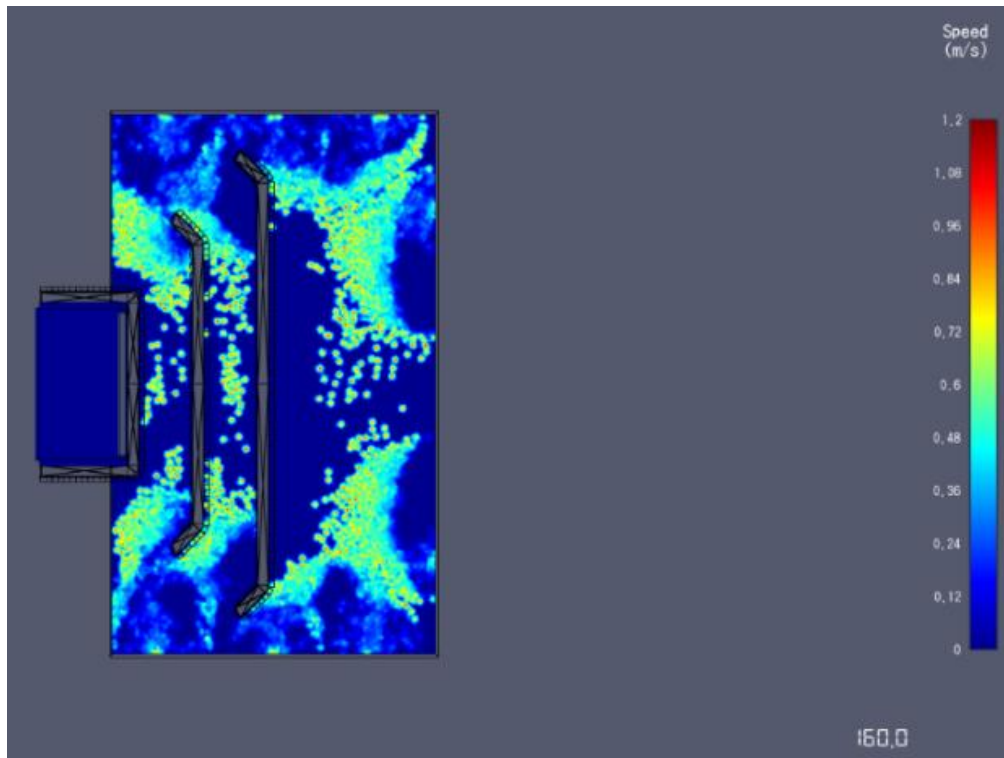


Abbildung 3.2.1-3: Exemplarische Darstellung der Gehgeschwindigkeit in m/s (Speed) in einem Simulationsthroughgang Zeitpunkt 160,0 s in Pathfinder Results

Im Gegensatz zu den anderen Konturen bildet die kumulierte Nutzung (Usage [Accumulated]) eine Zusammenfassung des bisherigen Simulationsverlaufs ab. Die Konturen der Nutzung werden in Einzelbildern (engl. Frames  $f$ ) erfasst und zeigen die Nutzung im Sinne der Dauer, die eine Fläche durch Agenten betreten wurde. Die Maxima bzw. Scheitelpunkte aus diesen Einzelbildern werden als Kontur über den folgenden Zusammenhang erstellt

$$v_x = \sum_{f=x-n+1}^x v_f (t_f - t_{f-1}),$$

wobei  $x$  den momentanen Betrachtungszeitpunkt darstellt (nach [28, S.73]). Die je Einzelbild  $f$  zum Zeitpunkt  $t_f$  neu resultierenden Maxima oder Scheitelpunkte (engl. Vertex)  $v_x$  überschreiben stets nur geringere Werte des vorangegangenen Einzelbildes (vom Zeitpunkt  $t_{f-1}$ ). So wird die maximale Nutzung der Flächen in Sekunden bestimmt und als Kontur in Summe abgebildet [28].

Zum späteren Vergleich mit statistischen Auswertungen wird diese Kontur betrachtet. Sie erlaubt eine Darstellung der Zeitspannen, die die Agenten in den verschiedenen Bereichen der Geometrie verweilen.

### **3.2.2 Struktur und Vorgehensweise**

#### **3.2.2.1 Erstellen der Eingabedateien für die Simulationen**

Zur Durchführung von vergleichenden Simulationen werden einheitliche Eingabedateien mit Pathfinder erstellt. Die benötigten Layer der Modellgeometrie aus der CAD-Zeichnung werden dazu in Pathfinder importiert. Pathfinder verfügt über eine Funktion zur automatischen Erkennung von Flächen als Räume. Die zugänglichen Bereiche der Versammlungsstätte können durch Ausschluss des Layer der Sanitäts- und Ordnungsgänge übernommen werden (vgl. Kapitel 3.1.1). Die Programmfunktion erkennt die verbleibenden Flächen zwischen den Linien als Räume und fügt diese der Projektdatei hinzu. Eine exakte Überführung aus der CAD-Dateien ist somit gegeben. Die Räume lassen sich anschließend in Pathfinder editieren und das Hinzufügen von Personen, Hindernissen, Türen oder Treppen ist möglich.

Für die Simulationen der Räumung der Versammlungsstätte werden zunächst alle in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Ausgänge zum Modell hinzugefügt. Da in dieser Arbeit nicht berücksichtigt ist, zu welchem Zeitpunkt der Veranstaltung eine Räumung nachgestellt werden soll, wird auf eine Ausrichtung der Besucher in Richtung der Szenenfläche verzichtet. Für die spätere statistische Auswertung werden 11.000 Agenten (vgl. Kapitel 3.1.2) in zufälliger Anordnung gleichmäßig auf die Veranstaltungsfläche verteilt. Die Agenten erhalten die Standardvorgaben der Software in Bezug auf ihre Routenwahl, Gehgeschwindigkeiten und Körpermaße (s. Kapitel 3.2.1.1).

#### **3.2.2.2 Vergleichende Simulationen zum Einfluss der Reaktionszeit**

Ein Eingabeparameter, der in den vergleichenden Simulationen der Modelle untersucht wird, ist die Reaktionszeit der Agenten. Analysiert wird ihr Einfluss auf die resultierenden Räumungszeiten und auftretende Stauungen in verschiedener Hinsicht. Zur Festlegung einer plausiblen Reaktionszeit wird die Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen herangezogen. Sie beschreibt eine Vorgehensweise zur Ermittlung der Reaktionszeiten anhand von Kategorien. Die Auswahl der Reaktionszeit erfolgt nach Anhang 2 Tabelle 4 der RiMEA-Richtlinie [6, S.53] unter der Berücksichtigung der Nutzungsart als Versammlungsstätte. Nach Anhang 2 Tabelle 6 [6, S.54] erfolgt eine Einordnung in die Unterkategorie B1 für Gebäude mit einem einfachen, offenen und eingeschossigen Grundriss mit sichtbaren und direkt ins Freie führenden Ausgängen. Aufgrund der Veranstaltungsgröße ist davon auszugehen, dass für die Veranstaltung ein geprüftes Sicherheitssystem zu erarbeiten wäre, so dass für das Brandschutzmanagement nach Tabelle

7 die Kategorie M1 [6, S.55] gewählt wird. Hieraus resultiert eine Spannweite der Reaktionszeit von 30 s bis 150 s [6, S.56]. Diese wird den Agenten der erstellten Population zugewiesen. Die mit Reaktionszeiten ergänzte Eingabedatei wird separat abgespeichert. Zur Erstellung der je vier Modellvariationen aus Kapitel 3.1.2 werden nicht zu berücksichtigenden Ausgänge aus den Eingabedateien entfernt und die resultierenden Dateien separat gesichert. Insgesamt liegen zu jeder Variation nun Eingabedateien mit und ohne Reaktionszeit vor, welche zum Vergleich simuliert werden.

### 3.2.2.3 Untersuchungen zum Einfluss des Geschwindigkeitsgrenzwertes

Innerhalb der Voreinstellungen in Pathfinder lässt sich eine Auswahl treffen, unter welchem Geschwindigkeitsgrenzwert (Jam Velocity) sich ein Agent in einer Stauung befindet. Durch eine Beschreibung der den Simulationen zugrunde gelegten Fundamentaldiagramme und Methoden wird innerhalb einer Räumungsanalyse noch nicht dargelegt, unter welcher Schwelle eine Gehgeschwindigkeit einer Stauung zugeordnet wird. Dass eine Kenntnis dieser Größe zur Interpretation der Messdaten jedoch sinnvoll ist, soll die folgende fiktive Messreihe in Abbildung 3.2.2-1 aufzeigen. Betrachtet man hierbei für die abgebildeten Geschwindigkeitsgrenzwerte von 0,3 m/s und 0,6 m/s die vom Graphen eingeschlossenen, resultierenden Flächen fällt auf, dass der Anteil der Stauzeiten an der Gesamtzeit bei einer höheren Geschwindigkeitsschwelle entsprechend zunimmt. Ein höherer Geschwindigkeitsgrenzwert führt also zu einer Zunahme von Stauungen in der Auswertung derselben Messreihe. Weiter werden durch Verschiebung der Schwelle unter Umständen einzelne kleinere Stauungen zu einer größeren zusammengefasst.

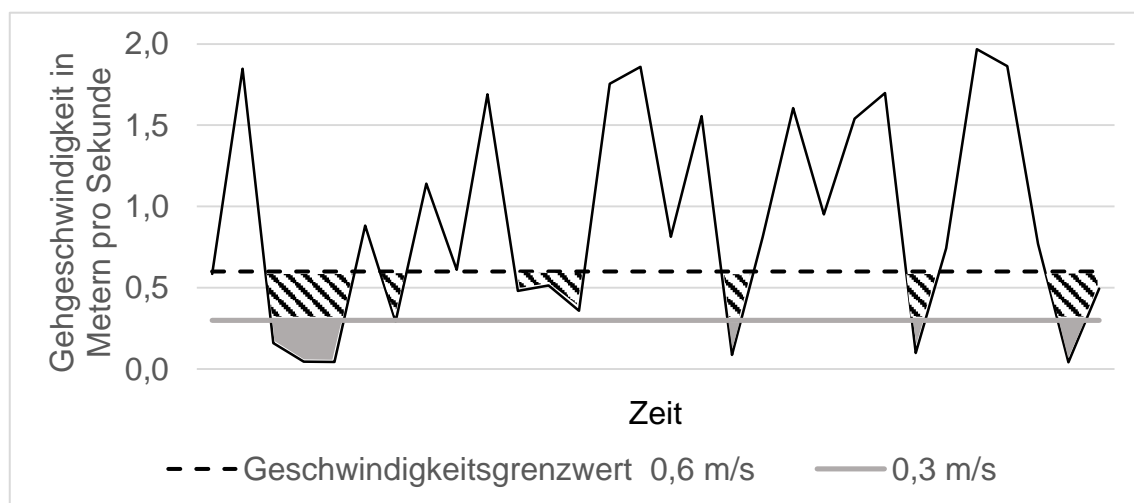


Abbildung 3.2.2-1: Beispielhafte Darstellung des Verlaufes der Gehgeschwindigkeit einer Person über eine aufgezeichnete Zeitspanne zur Gegenüberstellung der resultierenden Flächenanteile durch zwei verschiedene Geschwindigkeitsgrenzwerte

Durch die Wahl des Geschwindigkeitsgrenzwertes hat der Anwender also Einfluss auf die in den Ergebnissen abgebildeten Stauungen. Dieser Einfluss der vom Nutzer veränderbaren Eingangsgröße soll ausgehend von der Standardeinstellung mit Geschwindigkeitsgrenzwerten in den Abstufungen

- 0,6 m/s,
- 0,5 m/s,
- 0,4 m/s,
- 0,3 m/s und
- 0,25 m/s (Pathfinder Standardeinstellung)

untersucht werden. Entsprechende Eingabedateien mit verändertem Geschwindigkeitsgrenzwert werden auf Basis der ersten Modellvariation mit Reaktionszeiten erstellt.

#### **3.2.2.4 Automatische Vervielfältigung der Eingabedateien**

Für eine valide Vergleichbarkeit und Interpretation der mikroskopischen Entfluchtungsanalyse werden je zehn Simulationsdurchgänge für die Modellvariationen vorbereitet (orientiert an Kapitel 8.3 des Arbeitsdokuments zur DIN18009-2 [9]). Mit der verwendeten Softwareversion Pathfinder 2018.3 lassen sich über ein ausführbares Skript definierte Anzahlen von Eingabedateien auf Grundlage der erstellten Musterdateien automatisiert generieren und deren Simulationen als Stapelverarbeitung starten. Hierbei werden die Parameter der Populationen mit den Softwarefunktionen „Randomize“ bzw. „Randomize Occupants“ variiert [29]. Die Auswirkungen dieser Funktionen werden im Folgenden erläutert.

#### Randomize

Im Modell verfügt jeder Agent über einen individuellen Ausgangspunkt, an dem er mit den Parametern aus seiner Profilverteilung platziert wird. Diese zugewiesenen Parameter ändern sich grundsätzlich nicht, es sei denn das zugrundeliegende Profil, dessen Verteilungsmodelle oder der individuelle Ausgangspunkt des Agenten werden manuell angepasst. So ist in Pathfinder sichergestellt, dass zwei Simulationen derselben Eingabedatei auch dieselben Ergebnisse liefern. Die Funktion „Randomize“ generiert neue Parameter für die Agenten innerhalb ihrer Profile, ohne ihre Anordnung in der Fläche zu beeinflussen [26].

#### Randomize Occupants

Die Ausgangspunkte der Agenten können durch eine Funktion (Randomize Occupants' positions...) erneut verteilt werden [26]. Im verwendeten Skript werden die Agenten über diese Funktion nach Zufallsprinzip neu auf der vorhandenen Flächen angeordnet [29].

Das Skript variiert also für jeden Simulationsdurchgang die Parameter der Agenten innerhalb zugrundeliegender Verteilungen und die Anordnung der Population in der Veranstaltungsfläche.

#### **3.2.3 Ausgabe der Messwerte aus den Simulationen**

Bei jeder ausgeführten Simulation generiert Pathfinder verschiedene Datensätze. Die aufgezeichneten Daten sowie deren Zeitabstände lassen sich je nach durchzuführenden Untersuchungen variieren und ergänzen.

Als Standardeinstellung exportiert Pathfinder zu jeder durchgeführten Simulation die Messwerte als Datensätze in vier Textdateien. In diesen Dateien werden verschiedene Messwerte mit einem voreingestellten Zeitabstand (CSV Output Freq.) aufgezeichnet. Die für diese Arbeit wesentlichen Inhalte der CSV-Dateien sind im Einzelnen:

##### doors.csv

- der Zeitpunkt der jeweiligen Datenreihe („time(s)“),
- die verbleibende Agentenzahl insgesamt („Remaining (total)“),
- die Gesamtanzahl an Agenten, die einen Ausgang erreicht haben („Exited (total)“) und
- die Anzahl an Agenten, die den jeweiligen Ausgang zum Betrachtungszeitpunkt verlassen („Türbezeichnung“);

##### occupants.csv

- der Name des Agenten („name“ – sofern vergeben, sonst fortlaufende Nummerierung),
- die individuellen Messwerte der Zeit, in der jeder einzelne Agent aktiv auf der Suche nach einem Ausgang ist („active time“ – weiter auch als Zeit in Bewegung beschrieben),
- die Gesamtverweildauer jedes Agenten in Stauungen (jam time total),
- die maximale kontinuierliche Verweildauer jedes Agenten in einer einzelnen Stauung (jam time max continuous),
- die Zeitpunkte, zu denen ein Agent einen Ausgang erreicht (finish time),

- die von den Agenten jeweils zurückgelegten Wegstrecken (distance) sowie
- der Startzeitpunkt des jeweiligen Agenten nach Ablauf seiner individuellen Reaktionszeit (last goal started time).

Die Textdatei *rooms.csv* enthält die Agentenzahl, die einzelne Räume einer Geometrie verlassen. Da der betrachtete Grundriss nur über ein Raum verfügt, sind diese Werte deckungsgleich mit den Ausgaben in der Datei *doors.csv*.

Außerdem kann für Agenten individuell aktiviert werden, dass zusätzliche Daten als Datei *occupants\_detailed.csv* gespeichert werden. Aufgrund der Größe der Datenmenge wird diese Funktion für die durchgeführten Simulationen nicht genutzt. Auf weitere Ausgabemöglichkeiten, wie Daten aus definierten Messflächen, wird aus genanntem Grund ebenfalls verzichtet.

Die Aufzeichnung der Datenreihen erfolgt in dieser Arbeit mit dem Messabstand von einer Sekunde.

### 3.2.4 Statistische Methodik

In der nachstehenden Tabelle 3.2.4.a ist der Auszug aus einer Messreihe der *occupants.csv* aufgeführt. Entsprechend der Agentenzahl enthalten die generierten Dateien 11.000 Messreihen. Zum Verständnis wird hier nur der Beginn einer solchen Tabelle abgebildet.

Tabelle 3.2.4.a: Exemplarischer Auszug aus den in CSV-Dateien aufgezeichneten Messwerten einer Simulation in Pathfinder für die ersten vier Agenten

name	active time(s)	jam time total(s)	jam time max continuous(s)	finish time(s)	distance (m)	last goal started time(s)
1	185,23	148,05	12,93	310,33	35,74	125,10
2	161,78	109,40	11,73	207,18	32,56	45,40
3	229,13	126,65	6,65	351,75	85,37	122,63
4	47,83	32,23	5,35	122,53	10,67	74,70

Die Ausgabe in den CSV-Dateien erfolgt nach amerikanischem Standard mit Dezimaltrennung durch Punkte. Zur Bearbeitung in deutscher Tabellenkalkulationssoftware wurden die Trennzeichen aller Messreihen entsprechend angepasst. Die gezeigte Tabelle beinhaltet bereits konvertierte Werte.

Zur Handhabung der großen Datenmengen wird das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel (Office Version 2013) herangezogen. Es wird eine Arbeitsmappe erstellt, in der zu jedem der zehn simulierten Durchgänge ein Arbeitsblatt vorliegt. Die Messreihen aus den CSV-Dateien werden in diese Arbeitsblätter importiert. Nebenstehend werden in den Arbeitsblättern über Zellfunktionen die Minima, Mittelwerte und Maxima aus den 11.000 Messungen bestimmt. Mit diesem Vorgehen werden die vorgestellten Messreihen (vgl. Tabelle 3.2.4.a) ausgewertet. In angefügten Arbeitsblättern erfolgt eine automatisierte Zusammenfassung durch Formeln und Verweise. Die nachstehende Tabelle 3.2.4.b zeigt als Auszug eines solchen Arbeitsblattes die Zusammenfassung der Mittelwerte der ersten drei simulierten Durchgänge des Modells 1 mit berücksichtigten Reaktionszeiten.

Die Arbeitsmappe wird anschließend vervielfacht, so dass für jede simulierte Modellvariation eine Mappe vorliegt. Die Daten aus den Variationen werden per Import eingelesen. Der einheitliche Aufbau mit stets gleichen Darstellungen erlaubt einen schnellen Überblick der Daten.

Tabelle 3.2.4.b: Auszug aus einem zusammenfassenden Arbeitsblatt in Microsoft Excel zur Darstellung der kalkulierten Mittelwerte aus den ersten drei Simulationsdurchgängen des Modell 1 mit Reaktionszeit

Simulations- durchgang	Mittelwerte					
	Zeit in Bewegung	Gesamtverweildauer in Stauungen	maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung	Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs	zurückgelegte Strecke	Reaktionszeit
	active time(s)	jam time total(s)	jam time max continuous(s)	finish time(s)	distance (m)	last goal started time(s)
1	153,58	105,68	20,17	243,34	35,51	89,76
2	152,03	104,21	19,70	242,23	35,60	90,20
3	155,20	107,14	21,61	245,10	35,91	89,90

Weiter werden die Quartile (0,25-Quantil, Median und 0,75-Quantil) der Messreihen über Zellfunktionen bestimmt. Diese empirischen Kennzahlen dienen der Abbildung des Streuungsmaßes der Verteilung. Mit ihnen werden Kastengrafiken (engl. Box-Plots) erstellt, um einen Überblick über die Häufigkeitsverteilungen der Messwerte zu ermöglichen. Der Interquartilsabstand wird rechteckig dargestellt und die Lage des Median innerhalb durch eine Linie abgebildet. Außerhalb der Rechtecke wird die Spannweite der Verteilung durch sogenannte Antennen (engl. Whiskers) über die Lage der Extrema dargestellt [30]. Die



entstehenden Diagramme bieten eine schnelle Vergleichbarkeit. So lässt sich die Streuung der Gesamtverweildauer der Agenten in Stauungen über die zehn Simulationsdurchgänge effizient abbilden (vgl. Abbildung 3.2.4-1). Hier zeigt sich beispielsweise, dass die Maximalwerte zwar Unterschiede aufweisen, bezogen auf die gesamte Lage der Verteilungen (anhand der Interquartilsabstände) jedoch ähnliche Ergebnisse resultieren.

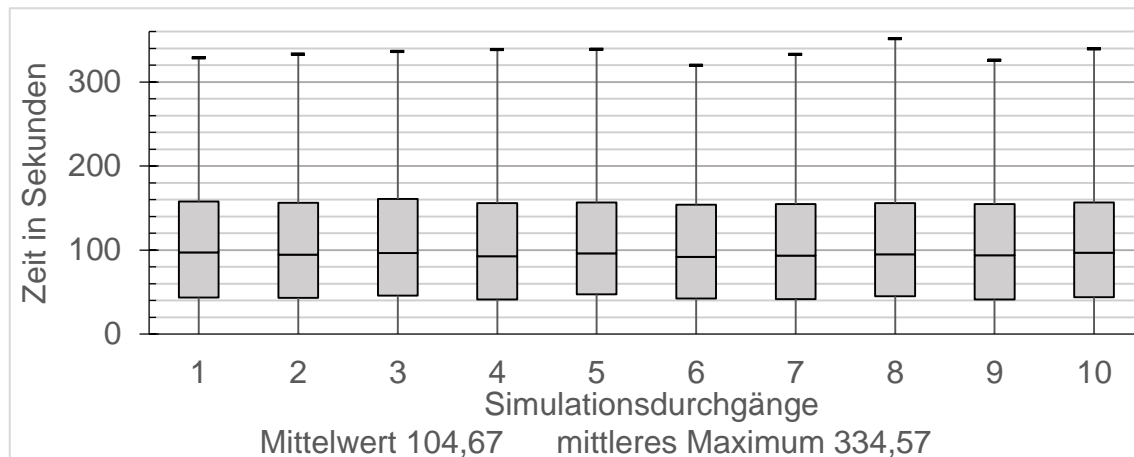


Abbildung 3.2.4-1: Exemplarische Darstellung der individuellen Gesamtverweildauer der Agenten in Stauungen der einzelnen Agenten in den zehn durchgeführten Simulationen des Modells 1 mit berücksichtigten Reaktionszeiten

Die gesammelten Messdaten aus den *occupants.csv* Dateien werden zur Auswertung zusammengefasst und sind in den Anhängen 3 bis 5 dieser Arbeit dargestellt.

#### 3.2.5 Grafische Auswertung mit Pathfinder Results

Neben der schwerpunktmäßig statistischen Auswertung der Simulationen wird in dieser Arbeit auch eine Übertragbarkeit auf die grafischen Auswertungsmöglichkeiten mit Pathfinder Results untersucht. Die Konturen in Pathfinder Results können entweder zu einem Betrachtungszeitpunkt oder zusammenfassend bis zu diesem Betrachtungszeitpunkt Ergebnisse darstellen (vgl. Kapitel 3.2.1.2). Anhand der Kontur zur kumulierten Nutzung (Usage [Accumulated]) sollte erkennbar sein, welche Ausgänge durch die meisten Agenten genutzt werden. Entsprechende Konturen werden aus Pathfinder Results je zum Ende der Simulationen exportiert. Als Grundlage zur Gegenüberstellung mit der statistischen Untersuchung dient die Ausgabedatei *doors.csv*.

In einer Arbeitsmappe in Microsoft Excel werden hierzu die Summen der Agenten je Ausgang gebildet. Die entsprechenden Ergebnisse werden in der späteren Auswertung mit den Ergebnissen aus Pathfinder Results verglichen.

Eine Untersuchung weiterer Konturen erfolgt nicht, da die ausgegebenen CSV-Dateien keine Zeitpunkte enthalten. Die statistischen Wertetabellen können somit nicht verknüpft werden. Zum Abgleich mit den weiteren Konturen wäre dies nötig.

### 3.3 Zusammenfassende Übersicht der Eingabedaten und Parameter

Für die Simulationen mit Pathfinder liegt eine erstellte Geometrie einer Versammlungsstätte vor. Es sind jeweils vier Modellvariationen mit unterschiedlicher Rettungswegführung vorhanden (vgl. Abbildung 3.1.2-1), welche zunächst die gleiche Population mit derselben Verteilung an Agenten enthalten.

Die Simulationen werden im Steering-Modus ausgeführt. Alle Agenten erhalten die Eigenschaften aus den Standardprofilen von Pathfinder. Für die Simulationen mit Reaktionszeiten wird den Agenten das Verweilen an ihrem Ausgangspunkt (Initial Delay) für Zeiten zwischen 30 s und 150 s zugewiesen (vgl. Kapitel 3.2.1.1 und 3.2.2.2).

Es werden Simulationen aller Modelle mit und ohne Reaktionszeiten der Population durchgeführt. Zusätzlich werden Simulationen des Modells 1 mit Reaktionszeit bei veränderten Geschwindigkeitsgrenzwerten ausgeführt. Ein Skript dient der Erstellung und Ausführung von jeweils zehn Simulationsdurchgängen für repräsentative Ergebnisse (vgl. Kapitel 3.2.2.4).

Alle Eingabeparameter sind zusätzlich im Anhang 2 dieser Arbeit als Bildschirmaufnahmen dokumentiert.

## **4 Ergebnisse der Untersuchungen**

### **4.1 Darstellung der Ergebnisse**

#### **4.1.1 Deskriptive Darstellung der Gesamtergebnisse**

Die durchgeführten Simulationen werden anhand der gesammelten Messwerte ausgewertet. Zusammenfassend werden für jede untersuchte Variation die arithmetischen Mittel der zehn Simulationsdurchgänge betrachtet, da eine vollständige Abbildung von 11.000 Messreihen aus allen Simulationen im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist. Untersucht werden so die Werte der *occupants.csv* (vgl. Kapitel 3.2.3) für

- die Räumungszeiten (als Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausganges),
- die Gesamtverweildauer in Stauungen,
- die maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung sowie
- die Zeit, in der die Agenten aktiv auf der Suche nach einem Ausgang sind (als Zeit in Bewegung).

Die Werte der Reaktionszeiten werden, sofern in der Simulation berücksichtigt, mit angeführt. Tabellen und Abbildungen zeigen die beschriebenen Werte an den jeweiligen Abschnitten dieses Kapitel auf. Dargestellte Tabellen sind für eine schnellere Übersicht der Werte aus verschiedenen Simulationen stets gleich aufgebaut. Auf die umfangreicheren Darstellungen in den Anhängen dieser Arbeit wird an den entsprechenden Stellen verwiesen.

#### **4.1.2 Simulationen ohne Reaktionszeiten**

Zunächst werden die Ergebnisse der Simulationen ohne Reaktionszeiten der Agenten dargestellt.

Für die Zeiten, die einzelne Agenten zum Erreichen eines Ausganges benötigen, stellen sich über zehn Durchgänge Mittelwerte zwischen ca. 153,58 s in Modell 4 und 157,58 s in Modell 3 ein. Die gemittelten Werte für die Agenten erstrecken sich von < 1 s bis maximal 350,82 s in Modell 3. Die Werte der individuellen Zeit in Bewegung entsprechen der zum Erreichen eines Ausganges. Die Mittelwerte der Gesamtverweildauer in Stauungen sowie der maximalen kontinuierlichen Verweildauer in einer einzelnen Stauung sind beim ersten und zweiten Modell höher als beim dritten und vierten. Die arithmetischen Mittel der Minima aller Messreihen bilden einheitliche Werte. Alle genannten Ergebnisse können der Tabellen 4.1.2.a entnommen werden.

Tabelle 4.1.2.a: Durchschnittliche Mittelwerte und Extrema der Messreihen aus je zehn Simulationsdurchgängen der vier Modellvariationen ohne Reaktionszeit aus den Dateien occupants.csv

Modellvariation	Zeit in Bewegung			Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung			Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs			zurückgelegte Wegstrecke			Reaktionszeit		
	active time(s)			jam time total(s)			jam time max continuous(s)			finish time(s)			distance (m)			last goal started time(s)		
	Mini-mum	Mittel-wert	Maxi-mum	Mini-mum	Mittel-wert	Maxi-mum	Mini-mum	Mittel-wert	Maxi-mum	Mini-mum	Mittel-wert	Maxi-mum	Mini-mum	Mittel-wert	Maxi-mum	Mini-mum	Mittel-wert	Maxi-mum
1	0,66	156,59	339,44	0,18	109,67	287,72	0,18	12,99	146,60	0,66	156,59	339,44	0,25	29,27	120,19	-	-	-
2	0,65	155,68	321,98	0,18	111,02	293,08	0,18	12,55	80,09	0,65	155,68	321,98	0,25	28,94	116,55	-	-	-
3	0,65	157,78	350,82	0,18	108,37	295,52	0,18	9,58	67,67	0,65	157,78	350,82	0,25	30,37	128,21	-	-	-
4	0,65	153,58	318,21	0,18	97,53	284,18	0,18	9,05	62,85	0,65	153,58	318,21	0,25	31,38	123,77	-	-	-

Durchschnittliche Maximalwerte treten für die Gesamtverweildauer in Stauungen mit 295,52 s im dritten Modell, für die kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung im ersten Modell mit 146,60 s auf. Die von Agenten zurückgelegten Wegstrecken betragen im Mittel rund 30,00 m. Die maximalen Wegstrecken liegen durchschnittlich zwischen 116,55 m im zweiten und 128,21 m im dritten Modell.

Abbildung 4.1.2-1 zeigt eine der erstellten Kastengrafiken, in der beispielhaft die Räumungszeiten der vier Variationen der Versammlungsstätte aufgetragen sind.

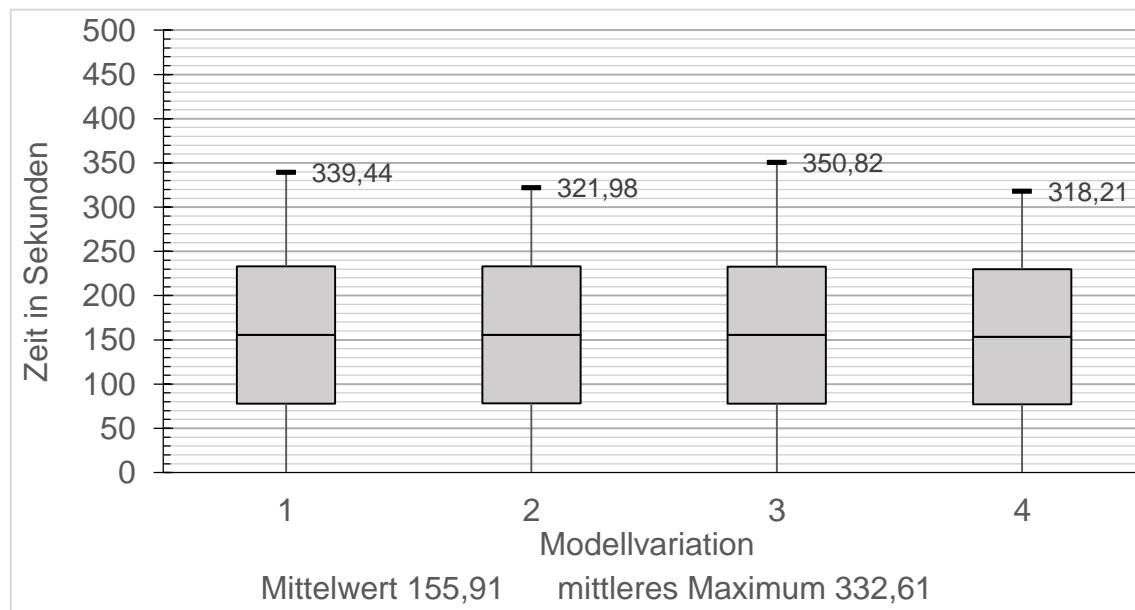


Abbildung 4.1.2-1: Zusammenfassende Darstellung der Zeitpunkte beim Erreichen eines Ausgangs durch die Agenten ohne Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationsdurchgängen der vier Modellvariationen, dargestellt als Kastengrafiken

Es zeigen sich für alle Modellvariationen ähnliche gemittelte Räumungszeiten. Maximalwerte treten zwischen durchschnittlich 318,21 s im vierten und 350,82 s im dritten Modell auf (vgl. Tabelle 4.1.2.a). Die Kastengrafiken zu allen Messreihen ohne Reaktionszeit können Anhang 3 entnommen werden.

Zur Darstellung der Agentenbewegungen im Räumungsverlauf dient das Verhältnis aus der Gesamtverweildauer in Stauungen und der Zeit in Bewegung (jam time total / active time). Abbildung 4.1.2-2 zeigt als Kreisdiagramm die durchschnittlichen Anteile aus den zehn Simulationsdurchgängen des Modells 1. Während der aktiven Suche nach einem Ausgang befinden sich die Agenten hierbei im Mittel 29,97 % der Zeit in einer Stauung, also in einer Bewegung unterhalb des Geschwindigkeitsgrenzwertes. Übrige 70,03 % der Zeit bewegen sie sich schneller als dieser Schwellwert (Geschwindigkeitsgrenzwert von 0,25 m/s – Pathfinder Standard, s. Kapitel 3.2.2.3).

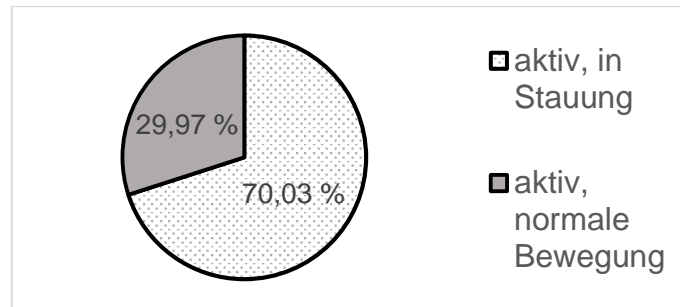


Abbildung 4.1.2-2: Darstellung der Zusammensetzung der durchschnittlich benötigten Zeit zum Erreichen eines Ausgangs durch die Agenten aus den Mittelwerten der Anteile von Zeiten der Bewegung unterhalb und oberhalb des Geschwindigkeitsgrenzwertes im Modell 1 ohne Reaktionszeit

Diese Werte sollen nach Kapitel 3.2.2.2 denen der Simulationen mit Reaktionszeit gegenübergestellt werden. Diese werden im Folgenden in gleicher Darstellung aufgeführt.

#### 4.1.3 Simulationen mit Reaktionszeiten

Die Reaktionszeiten der Agenten liegen zwischen durchschnittlich 30,05 s bis 150,03 s. Die Werte der arithmetischen Mittel betragen ca. 90,00 s.

Die Mittelwerte der Zeitpunkte beim Erreichen eines Ausgangs durch Agenten streuen zwischen 241,87 s im ersten Modell und 248,25 s im vierten Modell. Die durchschnittlich maximal benötigte Zeit zum Erreichen eines Ausgangs weist das erste Modell mit 401,88 s auf.

Die Werte der maximalen individuellen Gesamtverweildauer in Stauungen steigen gegenüber den Messungen ohne Reaktionszeit an (vgl. Tabellen 4.1.2.a und 4.1.3.a). Der höchste Wert für die durchschnittliche Verweildauer in Stauungen tritt im Modell 1 mit 334,57 s auf. Es zeigt sich ein Anstieg der Mittelwerte und Maxima der maximalen kontinuierlichen Verweildauer in einer Stauung. Die zurückgelegten Wegstrecken erhöhen sich in den Simulationen mit Reaktionszeit auf Mittelwerte zwischen 34,89 m und 39,26 m.

Die Übersicht der Daten kann der nachstehenden Tabelle 4.1.3.a entnommen werden.

Tabelle 4.1.3.a: Durchschnittliche Mittelwerte und Extrema der Messreihen aus je zehn Simulationsdurchgängen der vier Modellvariationen mit Reaktionszeit aus den Dateien occupants.csv

Modellvariation	Zeit in Bewegung			Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung			Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs			zurückgelegte Wegstrecke			Reaktionszeit		
	active time(s)			jam time total(s)			jam time max continuous(s)			finish time(s)			distance (m)			last goal started time(s)		
	Mini-mum	Mittel-wert	Maxi-mum	Mini-mum	Mittel-wert	Maxi-mum	Mini-mum	Mittel-wert	Maxi-mum	Mini-mum	Mittel-wert	Maxi-mum	Mini-mum	Mittel-wert	Maxi-mum	Mini-mum	Mittel-wert	Maxi-mum
1	0,54	152,63	401,88	0,00	104,67	334,57	0,00	20,10	215,39	32,78	242,55	441,46	0,35	35,54	124,54	30,05	89,92	150,02
2	0,56	152,01	377,09	0,00	105,99	329,15	0,00	20,96	139,01	32,92	241,87	416,12	0,53	34,89	133,29	30,05	89,86	150,02
3	0,55	152,03	383,19	0,00	101,32	297,79	0,00	13,42	105,27	32,32	241,92	435,07	0,52	36,44	123,83	30,05	89,89	150,02
4	0,56	158,21	372,44	0,00	100,79	303,19	0,00	15,98	130,96	32,27	248,25	417,33	0,37	39,26	128,74	30,05	90,03	150,03

Mit Reaktionszeiten der Population verschiebt sich die Lage der Verteilungen in den Kastendiagrammen, wieder am Beispiel der Räumungszeiten, nach oben (vgl. Abbildung 4.1.3-1).

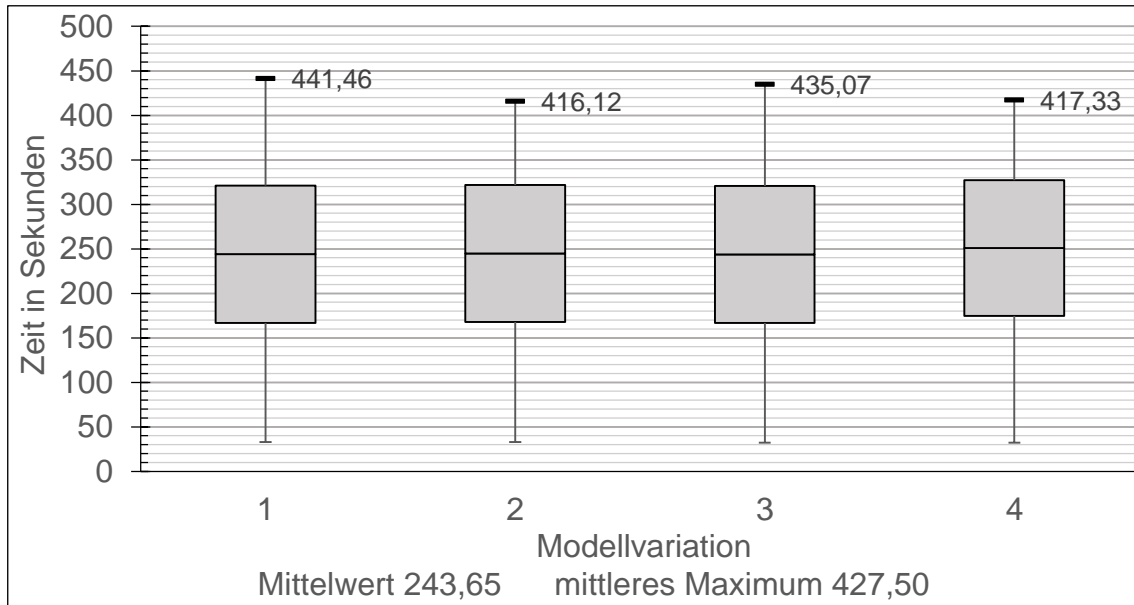


Abbildung 4.1.3-1: Zusammenfassende Darstellung der Zeitpunkte beim Erreichen eines Ausgangs durch die Agenten mit Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationdurchgängen

Die durchschnittlichen Maxima weisen Werte zwischen ca. 416 s und 442 s auf. Die Lage der abgebildeten Verteilungen ist unter den Modellvariationen ähnlich. Die vollständige Zusammenfassung der Messreihen mit Reaktionszeiten ist Anhang 4 zu entnehmen.

Die Gegenüberstellung der Gesamtverweildauer in Stauungen und den Zeiten in Bewegung entsprechend dem vorigen Kapitel ergibt eine leichte Veränderung der Anteile (vgl. Abbildungen 4.1.2-2 und 4.1.3-2). Die Agenten mit Reaktionszeit bewegten sich auf ihrer aktiven Suche nach einem Ausgang im Durchschnitt 31,42 % der Zeit langsamer als die Geschwindigkeitsschwelle.

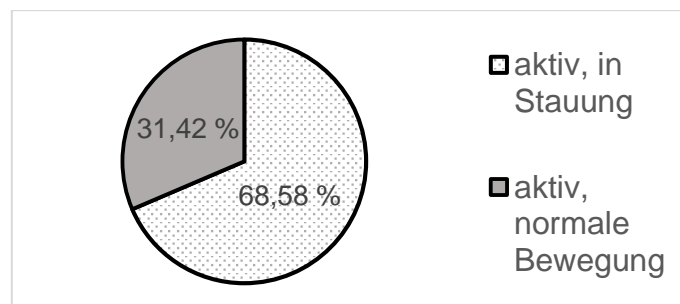


Abbildung 4.1.3-2: Darstellung der Zusammensetzung der durchschnittlich benötigten Zeit zum Erreichen eines Ausgangs durch die Agenten aus den Mittelwerten der Anteile von Zeiten der Bewegung unterhalb und oberhalb des Geschwindigkeitsgrenzwertes im Modell 1 mit Reaktionszeit



#### 4.1.4 Simulationen bei variiertem Geschwindigkeitsgrenzwert

Der Einfluss des Geschwindigkeitsgrenzwertes wird im Folgenden anhand der gemessenen Gesamtverweildauer in Stauungen und der maximalen kontinuierlichen Verweildauer in einer Stauung dargestellt. Weitere Messreihen sind von der getroffenen Variation des Geschwindigkeitsgrenzwertes nach Kapitel 3.2.2.3 nicht beeinflusst und werden nicht dargestellt. Die vollständige Darstellung der zusammengefassten Messreihen kann Anhang 5 entnommen werden.

Die nachstehende Tabelle 4.1.4.a zeigt die Mittelwerte und Extrema aus den durchschnittlichen Ergebnissen der je zehn Simulationsdurchgänge. Für die betrachteten Messreihen zeigt sich ein Wachstum parallel zum Anstieg des Geschwindigkeitsgrenzwertes von 0,25 m/s bis 0,60 m/s. Die Mittelwerte der Gesamtverweildauer in Stauungen steigen von 104,67 s auf 135,12 s, die der maximalen kontinuierlichen Verweildauer in einer Stauung von 20,10 s auf 94,72 s.

Tabelle 4.1.4.a: Durchschnittliche Mittelwerte und Extrema der Messreihen aus je zehn Simulationsdurchgängen des Modells 1 mit Reaktionszeit bei den fünf ausgewählten Geschwindigkeitsgrenzwerten aus den Dateien occupants.csv

Geschwindigkeitsgrenzwert	Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung		
	jam time total(s)			jam time max continuous(s)		
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum
0,25	0,00	104,67	334,57	0,00	20,10	215,39
0,30	0,00	111,87	328,52	0,00	21,57	201,67
0,40	0,02	124,22	350,08	0,01	38,21	276,67
0,50	0,07	130,12	360,68	0,07	72,17	322,21
0,60	0,20	135,12	385,53	0,18	94,72	339,98

Die gemittelten zeitlichen Anteile der Bewegung oberhalb und unterhalb des variierten Geschwindigkeitsgrenzwertes sind in der nachstehenden Abbildung 4.1.4-1 dargestellt. Es zeigt sich eine zeitliche Zunahme der Stauungen an der gesamten aktiven Suche nach einem Ausgang von 68,58 % auf 88,71 % durch entsprechende Erhöhung des Geschwindigkeitsgrenzwertes.

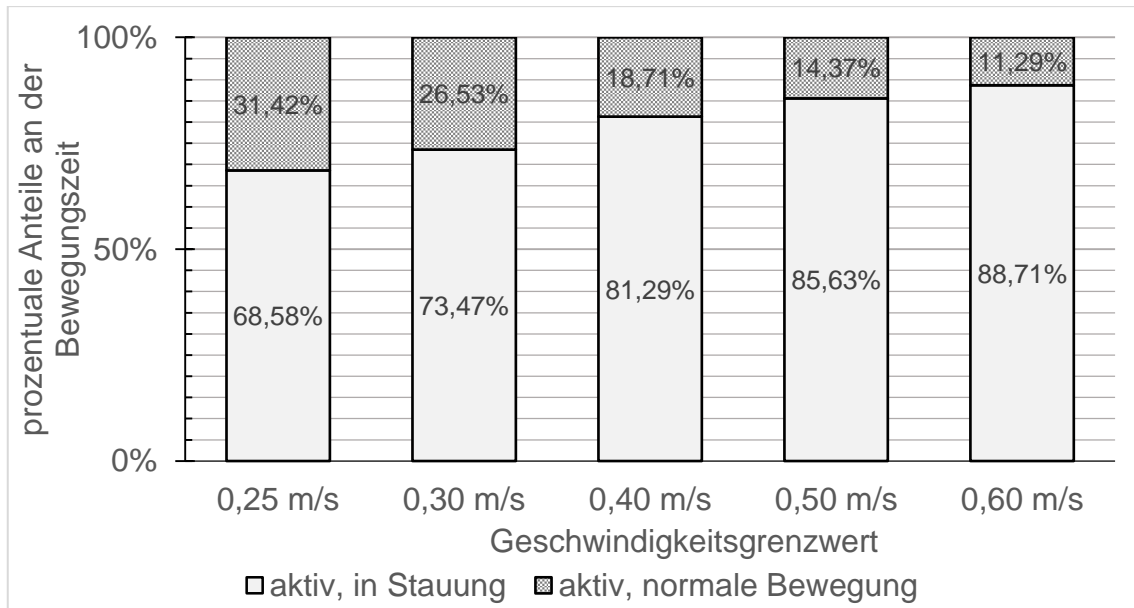


Abbildung 4.1.4-1: Darstellung der Zusammensetzung der durchschnittlich benötigten Zeit zum Erreichen eines Ausgangs aus den Mittelwerten der Anteile von Zeit in Stauungen und normaler Bewegungszeit im Modell 1 mit Reaktionszeit bei variiertem Geschwindigkeitsgrenzwert

Die Verteilung der maximalen kontinuierlichen Verweildauer in einer Stauung zeigt eine Vergrößerung der Interquartilsabstände. Zur Veranschaulichung des Wachstums der Messwerte in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsgrenzwertes sind in der Abbildung 4.1.4-2 die Werte des Median angegeben. Dieser steigt von durchschnittlich 11,87 s auf 82,65 s an.

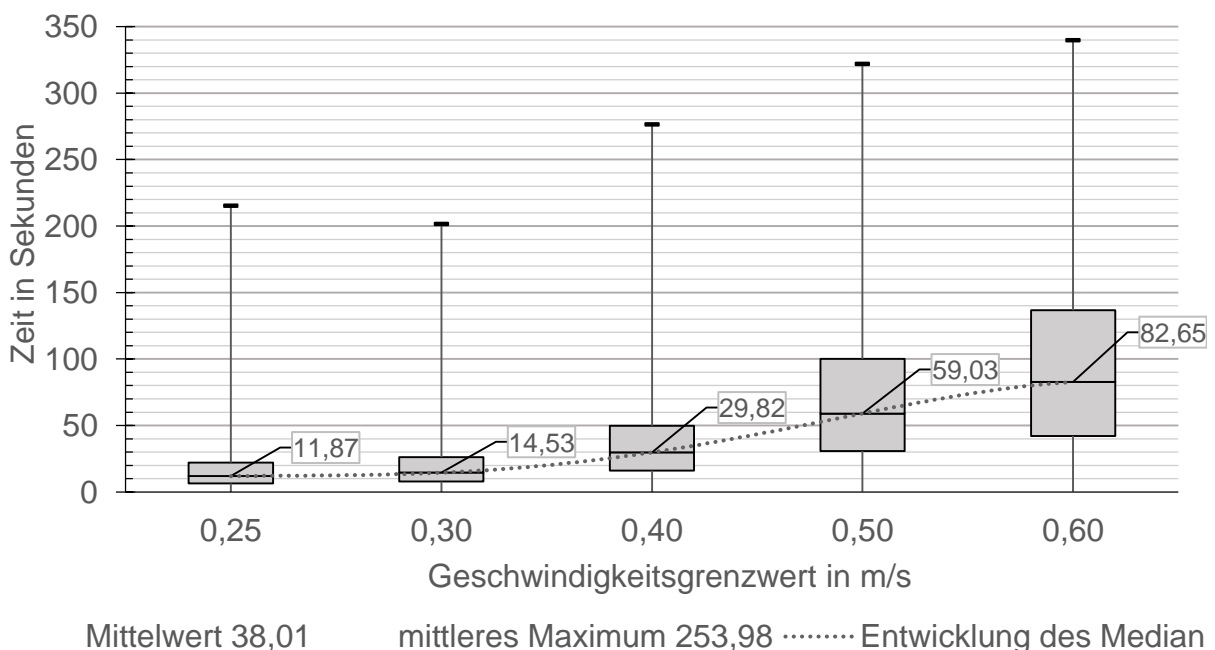


Abbildung 4.1.4-2: Darstellung der maximalen kontinuierlichen Verweildauer der Agenten mit Reaktionszeit in einer Stauung, zusammengefasst aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationdurchgängen mit variierten Geschwindigkeitsgrenzwerten

#### 4.1.5 Gegenüberstellung der statistischen und grafischen Auswertung der Agentenzahlen je Ausgang

In Kapitel 3.2.5 wurde das Vorgehen für die Gegenüberstellung der statistischen Ergebnisse aus den Messreihen der *doors.csv* und den grafischen Konturen aus Pathfinder Results beschrieben. Abbildung 4.2.5-1 zeigt exemplarisch die gemittelten Anzahlen an Agenten mit Reaktionszeit für die Ausgänge des ersten Modells. Im Anhang 6 sind die detaillierten Ergebnisse der Verteilung der Agenten auf die Ausgänge für alle Modellvariationen dargestellt.

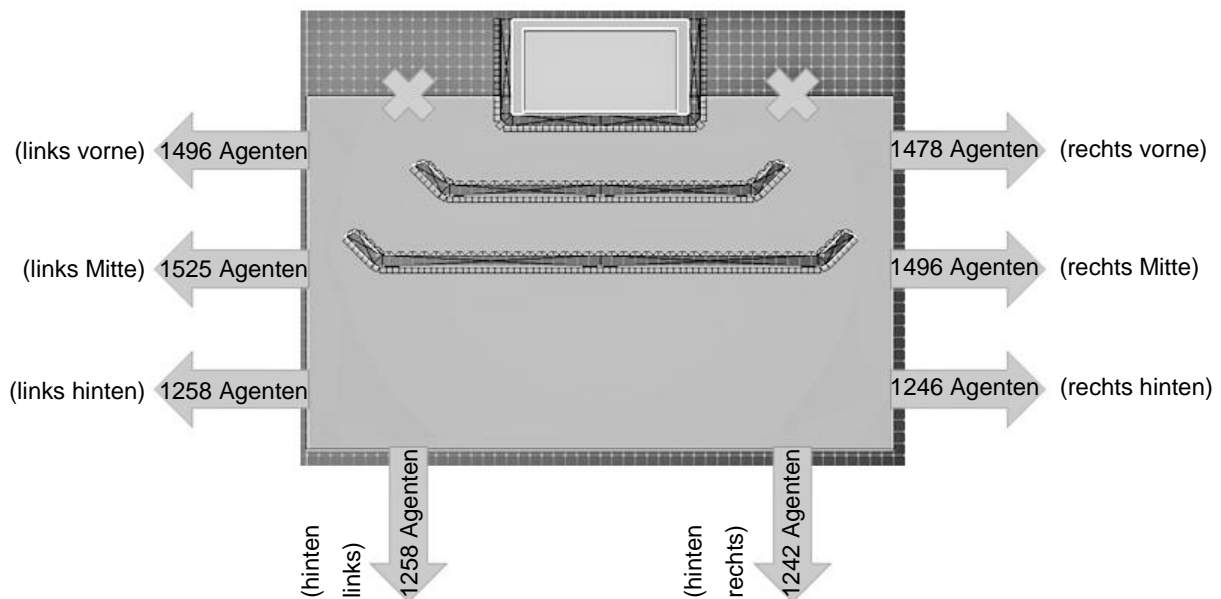


Abbildung 4.1.5-1: Darstellung der durchschnittlichen Agentenzahl je Ausgang in den zehn Simulationen der ersten Modellvariation mit Reaktionszeiten

In diesem Modell weisen die seitlichen Ausgänge größere Agentenzahlen auf als die hinteren. Die Anzahlen sind mit 1.525 und 1.496 Agenten an den mittleren seitlichen Ausgängen am größten.

Die kumulierte Nutzung (vgl. Kapitel 3.2.1.2) ist in der nachstehenden Abbildung 4.1.5-2 ebenfalls für die erste Modellvariation mit Reaktionszeit dargestellt und zeigt maximale Flächennutzungen nah der Ausgänge, insbesondere im vorderen Bereich an den seitlichen Ausgängen.

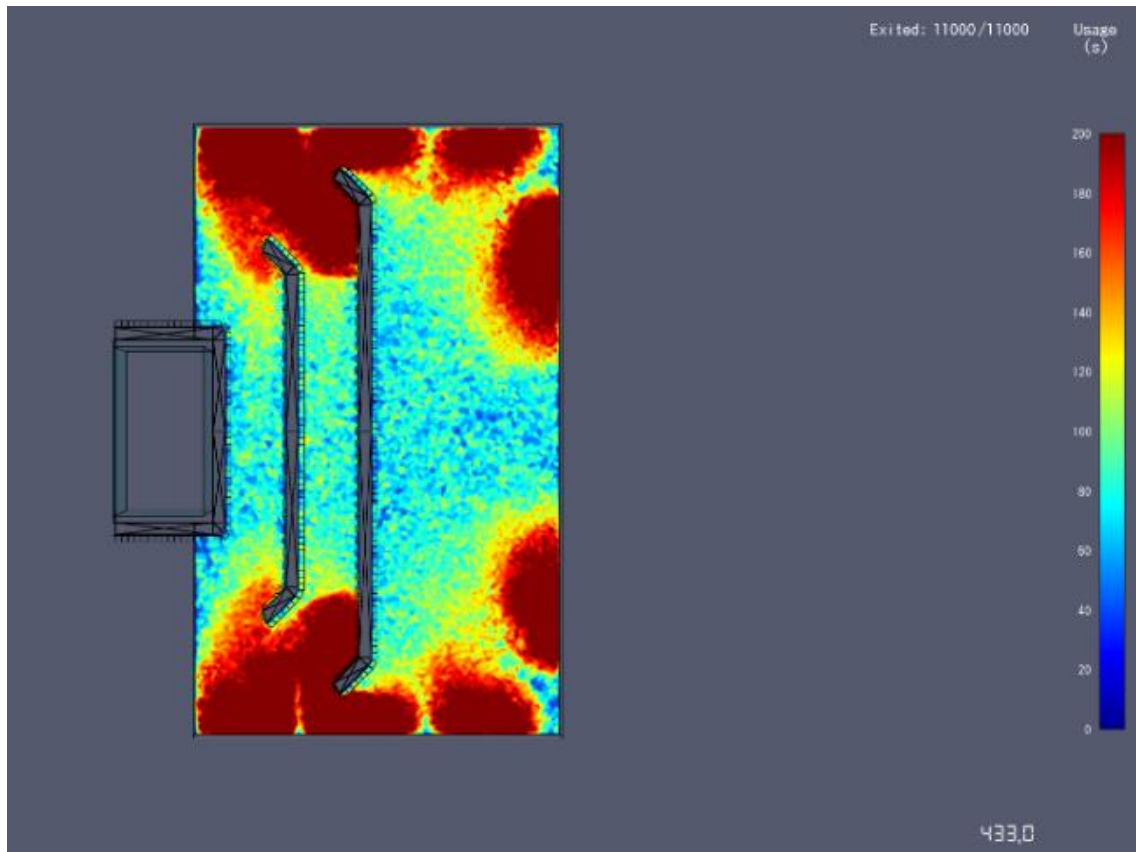


Abbildung 4.1.5-2: Kontur der kumulierten Nutzung in Sekunden (Usage) der Versammlungsfläche in der ersten Modellvariation in Pathfinder Results bei einer Simulation mit Reaktionszeit der Agenten

Die grafischen Ergebnisse aus Pathfinder Results aller Modelle sind in Anhang 7 dargestellt.

Die Spannweiten der durchschnittlichen Personenzahlen aus zehn Simulationen sind für die betrachtete Simulationsreihe in Abbildung 4.1.5-3 zusammengefasst.

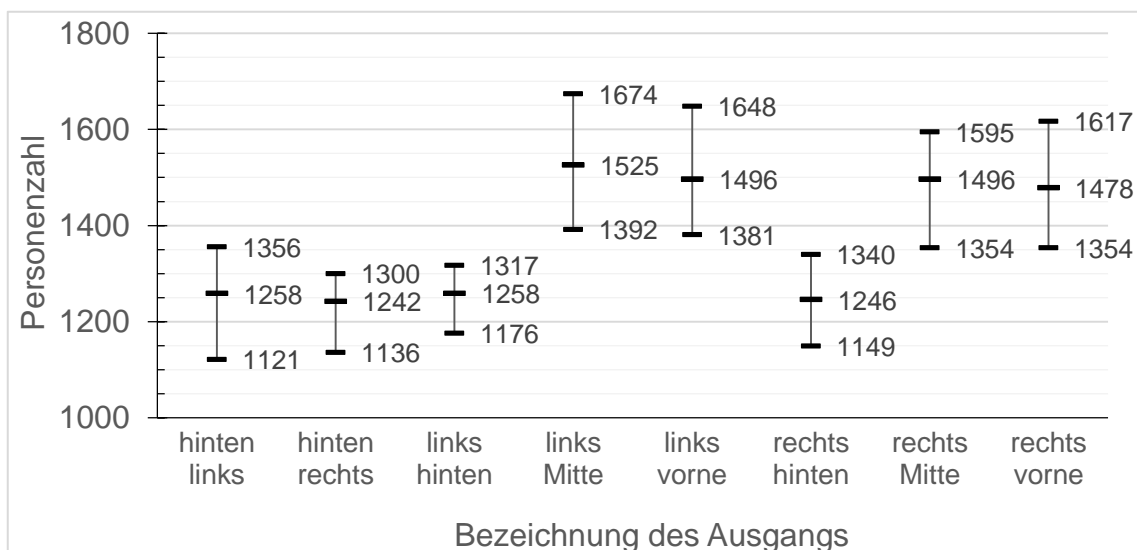


Abbildung 4.1.5-3: Mittelwerte, Minima und Maxima der Personenzahlen je Ausgang gemittelt aus den zehn durchgeführten Simulationen

## **4.2 Auswertung**

### **4.2.1 Einfluss der Reaktionszeit**

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die berücksichtigte Reaktionszeit die Räumungszeiten um durchschnittlich 90 s erhöht (vgl. Tabellen 4.1.2.a und 4.1.3.a sowie die Lage der Verteilungen in Abbildungen 4.1.2-1 und 4.1.3-1). Diese Verschiebung ist plausibel, da sie dem Mittelwert der gewählten Reaktionszeiten zwischen 30 s und 150 s entspricht.

Die Mittelwerte der Gesamtverweildauer in Stauungen nehmen mit Reaktionszeit gegenüber den Simulationen ohne Reaktionszeit in den Modellvariationen 1, 2 und 3 ab. Die Mittelwerte der aktiven Suche nach einem Ausgang mit Reaktionszeit zeigen ebenfalls kürzere Zeitspannen auf (vgl. Tabellen 4.1.2.a und 4.1.3.a). Auch der zeitliche Anteil der Bewegung von Agenten unterhalb des Geschwindigkeitsgrenzwertes nimmt mit 68,58 % bei berücksichtigter Reaktionszeit gegenüber 70,03 % ohne Reaktionszeit ab (s. Abbildungen 4.1.2-2 und 4.1.3-2). Es scheint, dass durch Einfügen der Reaktionszeiten insgesamt weniger Agenten in Stauungen geraten. Die mittleren Maxima der Gesamtverweildauer in Stauungen sowie der Zeit in Bewegung steigen jedoch an. Kombiniert lässt dies vermuten, dass Agenten, die bei berücksichtigter Reaktionszeit dennoch Teil von Stauungen werden, länger durch diese zurückgehalten werden. Die gemittelten Maxima sowie die Mittelwerte der maximalen kontinuierlichen Verweildauer der Agenten in einzelnen Stauungen bestätigen diese Vermutung insofern, als dass sie mit berücksichtigter Reaktionszeit ansteigen (vgl. Tabellen 4.1.2a und 4.1.3a sowie Anhänge 3 und 4).

Diese Effekte sind bei den Modellvariationen 1 bis 3 mit je acht kleineren Ausgängen einheitlich zu erkennen. Das vierte Model mit vier Ausgängen der doppelten jeweiligen Ausgangsbreite folgt diesen Entwicklungen nicht.

Die hinzugefügte Reaktionszeit steht im Zusammenhang mit dem Stauverhalten der Agenten während der Räumungen. Hierzu kann die grafische Auswertung der kumulierten Flächennutzung vergleichend herangezogen werden. In der nachstehenden Abbildung 4.2.1-1 sind dazu die Konturen einer Simulation mit (links) und ohne Reaktionszeit (rechts) der ersten Modellvariante gegenübergestellt. Die längere Nutzung vieler kleiner Flächen im zentralen Bereich zeigt, dass Agenten mit kürzerer Reaktionszeit auf ihrer Route durch noch verweilende Agenten längerer Reaktionszeit beeinträchtigt werden und verlangsamen. Dies deckt sich mit dem in Kapitel 4.1.3 aufgezeigten Anstieg der von den Agenten zurückgelegten Wegstrecken in den verschiedenen Simulationsreihen. So sind

diese mit Reaktionszeit durchschnittlich ca. 6,50 m länger als in den Modellen ohne Reaktionszeit. Das Ausweichen der Agenten und die damit verbundene individuelle Verlangsamung ist also in beiden Untersuchungen erkennbar, statistisch anhand der CSV-Dateien und grafisch mit der Kontur der kumulierten Nutzung aus Pathfinder Results.

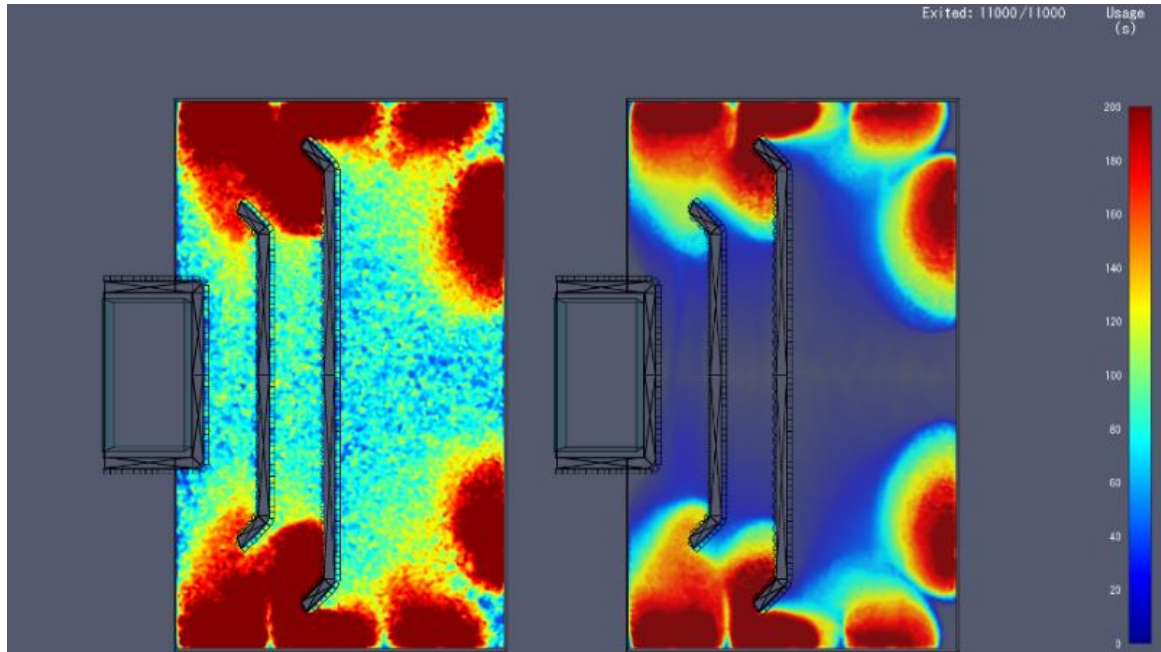


Abbildung 4.2.1-1: Gegenüberstellung der Kontur der kumulierten Nutzung in m/s (Usage) aus Pathfinder Results für denselben Simulationdurchgang des ersten Modells mit Reaktionszeiten (links) und ohne Reaktionszeiten (rechts)

### 4.2.2 Einfluss des Geschwindigkeitsgrenzwertes

In Kapitel 3.2.2.3 wurde anhand einer fiktiven Messreihe von Gehgeschwindigkeiten erörtert, welchen Einfluss die Wahl eines Geschwindigkeitsgrenzwertes durch den Anwender in der Theorie haben kann.

Dieser Einfluss zeigt sich in denen in Tabelle 4.1.4.a dargestellten Veränderungen der Messreihen der Gesamtverweildauern in Stauungen und den maximalen kontinuierlichen Verweildauern in einer Stauung. Aus den zehn Simulationen desselben Modells (Modellvariation 1 mit Reaktionszeit) ist eine Abhängigkeit der Messwerte von dem jeweiligen Geschwindigkeitsgrenzwert klar ersichtlich. Betrachtet man die zeitlichen Anteile der Stauungen an der aktiven Suche nach einem Ausgang in Abbildung 4.1.4-1, ist der Anstieg ebenso deutlich erkennbar. Die aufgezeichneten Stauungen in Pathfinder sind so direkt von einer durch den Anwender veränderlichen Grenzgeschwindigkeit abhängig. Entsprechend notwendig ist die Darstellung des Geschwindigkeitsgrenzwertes in der Dokumentation einer Räumungsstudie zur objektiven Bewertung durch Dritte.

### 4.3 Diskussion der Gesamtergebnisse

Die erlangten Ergebnisse gehen stets aus zehn Simulationsdurchgängen hervor. Dies entspricht der Mindestanzahl an Berechnungsdurchläufen für eine valide Interpretation nach Kapitel 8 des Arbeitsdokuments zur DIN 18009-2 [9]. Durch eine größere Anzahl an Berechnungen können präzisere Aussagen getroffen werden. Bei einer Wiederholung der Untersuchungen sind dennoch gleiche Ergebnisse zu erwarten.

Es ist zu berücksichtigen, dass sich der gewählte Grundriss auf die rechtlichen Vorgaben konzentriert. Gegenüber Konzertsituationen mit komplexeren Bühnenformen und zusätzlichen Hindernissen wie Getränkeständen und Regieplätzen wird ein vereinfachter Fall betrachtet. Die zufällige Anordnung der Agenten ohne Bezug zur Szenenfläche entspricht ebenfalls einer Vereinfachung. Auf dieser Grundlage wurden veränderte Ergebnisse durch variierte Eingabedaten untersucht. Zur Abbildung realistischer Veranstaltungen ist die Durchführung unter anderen Gesichtspunkten empfohlen.

Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Räumungssimulationen mit anderen Berechnungsmethoden ist nur bedingt gegeben. Da die Software Pathfinder untersucht wird, findet keine Eingabe festgelegter Parameter aus anerkannten Regeln der Technik statt. Ein Vergleich der Software mit anderen Methoden kann durch die Vorgaben der RiMEA-Richtlinie [6] durchgeführt werden.

Die Auswertung der Daten anhand gemittelter Werte stellt eine Ungenauigkeit dar. Die Ergänzung durch Lageparameter wie Median und Quartile sowie der Darstellung der Spannweiten erhöht die Repräsentativität. Eine detaillierte Betrachtung ist anhand der umfangreicheren Zusammenstellungen der Messwerte im Anhang dieser Arbeit möglich.

### 4.4 Verknüpfung der Ergebnisse mit dem Stand von Technik und Wissenschaft

Anhand der Simulationen mit variiertem Geschwindigkeitsgrenzwert wird deutlich, dass ein Einfluss des Anwenders auf die Ergebnisse von Räumungssimulationen gegeben ist. Werden Ergebnisse schwerpunktmäßig visuell festgehalten, ist eine Nachvollziehbarkeit dieses Grenzwertes nicht möglich. Ebenso ist bei vollständiger Darstellung der Messwerte aus Pathfinder kein Rückschluss auf den verwendeten Geschwindigkeitsgrenzwert gegeben. Die hinzugezogenen anerkannten Regeln der Technik geben hierzu keine konkreten Vorgaben zu validen Annahmen oder zur Dokumentation des gewählten Geschwindigkeitsgrenzwertes.

## 5 Fazit

Die vorliegende Arbeit untersucht durch Räumungssimulationen einer Versammlungsstätte mit Pathfinder Anforderungen an den Nutzer. Zur Verfügung stehende Richtwerte und Handlungshilfen aus anerkannten Regeln der Technik werden betrachtet und erweisen sich bei der Durchführung als hilfreich. Fehlende Vorgaben zu Eigenschaften der Population wie annehmbare Reaktionszeiten werden aufgezeigt und Vorgehen sowie die notwendige Dokumentation der Methoden beschrieben. Vorgaben zu Reaktionszeiten sind jedoch inkonsistent. Die anzunehmenden Werte unterscheiden sich in der RiMEA-Richtlinie [6, S.56] von denen des vfdb Leitfadens „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ [7, S.273], obwohl das scheinbar gleiche tabellarische Verfahren angewendet wird. Weiter stellt Tabelle 8 in Anhang 2 der RiMEA-Richtlinie in der englischen Tabelle andere Werte dar, als in der deutschen. Zwar erklärt die Richtlinie eingangs den deutschen Teil als verbindlich, dennoch resultieren potentielle Fehlerquellen. Die Art der Verteilung von Richtwerten innerhalb von Populationen ist nicht vorgegeben.

Zur Schaffung vergleichbarer Simulationen durch verschiedene Anwender sind konkrete Vorgaben notwendig. Ein anerkannter Standard für Benutzereingaben und deren Dokumentation wäre erforderlich, da neben der Auswahl von anzunehmenden Eigenschaften auch deren Verteilung auf die Population nachvollziehbar sein muss. Eine vollständige Regulierung der Vorgehensweise kann nicht gegeben sein, wenn sich geltendes Recht auf Landesebene unterscheidet und konkretisierende Normungen parallel dazu auf nationaler oder internationaler Ebene stattfinden. Die Trägheit bei der Überführung von Erkenntnissen in die Rechtsvorschriften erschwert einheitliche Regelungen zusätzlich.

Verwenden Simulationsprogramme untereinander verschiedene Geschwindigkeitsgrenzwerte oder hat der Nutzer entsprechende Einstellungsmöglichkeiten, ist eine detaillierte Dokumentation notwendig. Die Interpretation von Untersuchungen ist sonst erschwert, vor allem wenn die Ergebnisse visuell präsentiert werden und Messwerte nicht einsehbar sind. Räumungssimulationen mit Pathfinder erfordern insgesamt ein umfangreiches Wissen des Anwenders. Die Kenntnis zugrundeliegender Modelle und Fundamentaldigramme ist unbedingt erforderlich. Bewertungsmöglichkeiten wie signifikante Staus von 4 Pers./m<sup>2</sup> nach Kapitel 4.4 der RiMEA-Richtlinie [6, S.24] sind hiervon abhängig, da das SFPE-Handbook beispielsweise Personendichten über 3,76 Pers./m<sup>2</sup> nicht betrachtet. Daher benötigen prüfende Dritte aktuell zwingend mindestens denselben, umfassenden Kenntnisstand.



## 6 Ausblick

Die in Kapitel 4.3 durchgeführte Diskussion der erlangten Ergebnisse zeigt Anknüpfungspunkte für weitere Untersuchungen auf.

Zur Unterstützung bei der Planung von Veranstaltungen werden sowohl der Kommentar zur MVStättVO [12] als auch der veröffentlichte Leitfaden zur Veranstaltungssicherheit [8] unterstützend herangezogen. Die Anordnung der Abschränkungen gemäß § 29 MVStättVO wird in diesen unterschiedlich ausgelegt. Während die Abbildungen im Kommentar [13, S.465f.] eine parallele Anordnung zur Bühne auf der Breite der Szenenfläche darstellen, ergibt sich aus dem Beispiel des Leitfadens [8, S.146] eine parallele Ausdehnung auf eine von den Sichtlinien begrenzte Breite (vgl. Kapitel 3.1.1 und Abbildung 3.1.1-1). Es wäre an geeigneten Beispielen zu überprüfen, ob eine dieser Situationen gegebenenfalls eine bessere Lenkung von Personenströmen darstellt. Auch der Einfluss verschiedener Tiefen  $\geq 10$  m der Stehplatzbereiche könnte hierbei überprüft werden. Komplexere Bühnenausdehnungen mit Laufstegen oder anderen geometrischen Formen und damit verbundene Anordnungen der Abschränkungen wären ebenfalls denkbar.

Um eine realistischere Abbildung von Veranstaltungen zu schaffen, wären Untersuchungen mit weiteren Hindernissen, wie sie bei Konzerten zu erwarten sind, durchzuführen. Annahmen von größeren Personendichten im Nahbereich der Bühne wären zu überprüfen. Ein Orientierungswert läge beispielsweise bei 4 Personen/m<sup>2</sup> [14, S.207].

Die Auswirkung der verschiedenen Richtwerte für die Reaktionszeiten aus der RiMEA-Richtlinie [6] und dem vfdB Leitfaden „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ [7], wie sie in Kapitel 5 beschrieben sind, könnten in vergleichenden Simulationen betrachtet werden. Die zugrundeliegende Primärliteratur nach Purser [31] [32] wäre zu betrachten. Außerdem könnte in diesem Rahmen der Einfluss von Abstufungen der Reaktionszeiten auf das Stauverhalten untersucht werden. Ausgehend von der Evakuierung einer Versammlungsstätte mit einem Brandereignis auf der Bühne ist ein früheres Reagieren in Abhängigkeit der Distanz zur Bühne nicht unwahrscheinlich. Entsprechende Studien könnten hierzu ebenfalls geführt werden.

Die Software Pathfinder könnte qualitativ anhand der Tests im Anhang 1 der RiMEA-Richtlinie verifiziert werden. In Test 4 könnten so die Fundamentaldiagramme der Modi „SFPE“ und „Steering“ gegenübergestellt und analysiert werden. Möglichkeiten zur Eingabe für Dichten  $> 3,76$  Personen/m<sup>2</sup> (vgl. Kapitel 2.3.4) wären zu untersuchen.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] SEYFRIED, ARMIN, MOHCINE CHRAIBI, GREGOR JÄGER und ANNA TSCHERNIEWSKI: Evakuierungssimulationen, unveröffentlichte Präsentationen der Vorlesungsreihe im Sommersemester 2018, Lehr- und Forschungsgebiet Computersimulation für Brandschutz und Fußgängerverkehr, Bergische Universität Wuppertal, 2018.
- [2] KONFERENZ DER FÜR STÄDTEBAU, BAU- UND WOHNUNGSWESEN ZUSTÄNDIGEN MINISTER UND SENATOREN DER LÄNDER (ARGEBAU): Musterbauordnung – MBO. Fassung vom November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 13.05.2016. Online im Internet unter <<https://www.is-ergebau.de/Dokumente/42318979.pdf>> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).
- [3] KONFERENZ DER FÜR STÄDTEBAU, BAU- UND WOHNUNGSWESEN ZUSTÄNDIGEN MINISTER UND SENATOREN DER LÄNDER (ARGEBAU): Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung – MVStättVO). Fassung vom Juni 2005, zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Juli 2014. Online im Internet unter <<https://www.is-ergebau.de/Dokumente/4231724917250.pdf>> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).
- [4] KONFERENZ DER FÜR STÄDTEBAU, BAU- UND WOHNUNGSWESEN ZUSTÄNDIGEN MINISTER UND SENATOREN DER LÄNDER (ARGEBAU): Struktur und Aufgaben. Online im Internet unter <<https://www.is-ergebau.de/verzeichnis.aspx?id=762&o=7590762>> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).
- [5] HANDWERKSKAMMER FÜR MÜNCHEN UND OBERBAYERN: Normen und Technische Regeln: Zusammenhänge, Begriffe und Bedeutung. München, 2011. Online im Internet unter <<https://www.hwk-muenchen.de/downloads/normen-und-technische-regeln-zusammenhaenge-begriffe-und-bedeutung-74,266.pdf>> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).
- [6] RIMEA E.V.: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. Version 3.0.0, Stand 20.03.2016. Online im Internet unter <[https://rimeaweb.files.wordpress.com/2016/06/rimea\\_richtlinie\\_3-0-0\\_-\\_d-e.pdf](https://rimeaweb.files.wordpress.com/2016/06/rimea_richtlinie_3-0-0_-_d-e.pdf)> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).

- [7] TECHNISCH-WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT (TWB) DER VEREINIGUNG ZUR FÖRDERUNG DES DEUTSCHEN BRANDSCHUTZES E.V. (VFDB) in VFDB TÄGUNGSBAND 04-01, DIETMAR HOSSER (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, 3., überarbeitete und ergänzte Auflage November 2013. Online im Internet unter <<https://www.vfdb.de/fileadmin/download/leitfaden2013.pdf>> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).
- [8] LANDESHAUPTSTADT MÜNCHEN KREISVERWALTUNGSREFERAT BRAND-DIREKTION: Veranstaltungssicherheit: Leitfaden für Feuerwehr, Sicherheitsbehörde und Polizei sowie Veranstalter und deren Sicherheitsdienstleister, 3., überarbeitete und um die Erkenntnisse des BMBF-Forschungsprojektes BaSiGo – Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen erweiterte Auflage der Vorgängerschrift Handreichung für die Sicherheit von Großveranstaltungen. Stand vom Juni 2015. Online im Internet unter <[www.muenchen.de/branddirektion-veranstaltungssicherheit](http://www.muenchen.de/branddirektion-veranstaltungssicherheit)> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).
- [9] DIN NABAU 005-52-21 AA „BRANDSCHUTZINGENIEURWESEN" - ARBEITSKREIS 2: DIN 18009-2 Brandschutzingenieurwesen - Teil 2: Räumungssimulation und Personensicherheit. Internes Arbeitsdokument, Stand: 28. Mai 2018.
- [10] KONFERENZ DER FÜR STÄDTEBAU, BAU- UND WOHNUNGSWESEN ZUSTÄNDIGEN MINISTER UND SENATOREN DER LÄNDER (ARGEBAU): Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung – MVStättV). Fassung vom Juni 2005. Online im Internet unter <<https://www.is-ergebau.de/Dokumente/42317251.pdf>> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).
- [11] KONFERENZ DER FÜR STÄDTEBAU, BAU- UND WOHNUNGSWESEN ZUSTÄNDIGEN MINISTER UND SENATOREN DER LÄNDER (ARGEBAU): Muster-Richtlinie über bauaufsichtliche Anforderungen an Schulen (Muster-Schulbau-Richtlinie – MschulbauR). Fassung vom April 2009. Online im Internet unter <<https://www.is-ergebau.de/Dokumente/42312659.pdf>> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).
- [12] KONFERENZ DER FÜR STÄDTEBAU, BAU- UND WOHNUNGSWESEN ZUSTÄNDIGEN MINISTER UND SENATOREN DER LÄNDER (ARGEBAU):

- Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung – MVStättVo), Fassung vom Juni 2005, zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Juli 2014: Begründung der Änderungen. Stand 2014. Online im Internet unter <<https://www.is-argebau.de/Dokumente/42317621.pdf>> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).
- [13] LÖHR, VOLKER und GERD GRÖGER: Bau und Betrieb von Versammlungsstätten: Kommentar zur Muster- Versammlungsstättenverordnung (MVStättVO 2014) einschließlich der darauf beruhenden landesrechtlichen Verordnungen und Verwaltungsvorschriften. Fachmedien Recht und Wirtschaft, dfv Mediengruppe, Frankfurt am Main, 2015, 4., überarbeitete und erweiterte Auflage 2015.
- [14] FORELL, BURKHARD: Internationaler Vergleich der Bemessung von Rettungswegen in Versammlungsstätten. In Braunschweiger Brandschutz-Tage 2012, Tagungsband. Braunschweig: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, At Braunschweig, Volume: Heft 218, September 2012.
- [15] ZENS, SIMON: Empirische Erfassung von Personenstromcharakteristika in Engstellen – Einfluss der Breite. Bachelor-Thesis, Wuppertal, April 2008. Online im Internet unter <[https://www.asim.uni-wuppertal.de/fileadmin/bauing/asim/Thesen/Bachelor\\_Thesis\\_Zens.pdf](https://www.asim.uni-wuppertal.de/fileadmin/bauing/asim/Thesen/Bachelor_Thesis_Zens.pdf)> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).
- [16] NVStättVO 2004, Niedersächsische Versammlungsstättenverordnung (Nds. GVBl. 2004, 426). Fassung vom 8. November 2014. Zuletzt geändert durch Artikel 3 der Verordnung vom 13.11.2012 (Nds. GVBl. S. 438).
- [17] HOLL, STEFAN: Methoden für die Bemessung der Leistungsfähigkeit multidirektional genutzter Fußverkehrsanlagen. Dissertation, Wuppertal, 2016. Online im Internet unter <<http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:468-20161222-092719-9>> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).
- [18] PREDTETSCHENSKI , WSEWOLOD MICHAJLOWITSCH und ANATOLI IWANOWITSCH MILINSKI: Personenströme in Gebäuden: Berechnungsmethoden für die Projektierung. Staatsverlag der DDR, Leipzig, 1971.
- [19] FRUIN, JOHN J.: pedestrian planning and design. Elevator World, überarbeitete Auflage, 1987.

- [20] WEIDMANN, ULRICH: Transporttechnik der Fußgänger: Transporttechnische Eigenschaften des Fußgängerverkehrs (Literaturauswertung). Nummer 90 in Schriftenreihe des IVT. Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Straßen- und Eisenbahnbau, ITH Zürich, Zürich, Zweite, ergänzte Auflage, 1993.
- [21] NELSON, HAROLD E. und FREDERICK W. MOWRER: Emergency Movement. In: DINENNO, PHILIP J., DOUGAL DRYSDALE, CRAIG L. BEYLER, WALTON, W. DOUGLAS, CUSTER, RICHARD L. P., JOHN R. HALL und JOHN M. WATTS (Hrsg.): SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3<sup>rd</sup> Edition, 3–263 – 3–285. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2002.
- [22] PAULS; JAKE: Movement of People. In: DINENNO, PHILIP J., CRAIG L. BEYLER, RICHARD L. P. CUSTER, W. DOUGLAS WALTON, JOHN M. WATTS, DOUGAL DRYSDALE und JOHN R. HALL (Hrsg.): SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2<sup>nd</sup> Edition, 3–367 – 3–380. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 1995.
- [23] MÜLLER, KLAUS: Handbuch Evakuierung: Maßnahmen im Brand- und Katastrophenfall. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2009.
- [24] O'CONNOR, D. und SFPE TASK GROUP ON HUMAN BEHAVIOR und SOCIETY OF FIRE PROTECTION ENGINEERS (Hrsg.): Engineering Guide to Human Behavior in Fire. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2003.
- [25] THUNDERHEAD ENGINEERING (Thunderhead Engineering Consultants, Inc.): Verification and Validation. Manhattan, Kansas. Online im Internet unter <[https://www.thunderheadeng.com/files/com/pathfinder/verification\\_validation\\_2015\\_2.pdf](https://www.thunderheadeng.com/files/com/pathfinder/verification_validation_2015_2.pdf)> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).
- [26] THUNDERHEAD ENGINEERING (Thunderhead Engineering Consultants, Inc.): Pathfinder: User Manual. Manhattan, Kansas. Online im Internet unter <[https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/downloads/2014/10/users\\_guide.pdf](https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/downloads/2014/10/users_guide.pdf)> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).
- [27] PHEASANT, STEPHEN und CRISTINE M, HASLEGRAVE: Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work, Third Edition. CRC Press – Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2006.

- [28] THUNDERHEAD ENGINEERING (Thunderhead Engineering Consultants, Inc.): Pathfinder Results: User Manual. Manhattan, Kansas. Online im Internet unter <[https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/dlm\\_uploads/2018/03/results\\_users\\_guide-1.pdf](https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/03/results_users_guide-1.pdf)> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).
- [29] THUNDERHEAD ENGINEERING (Thunderhead Engineering Consultants, Inc.): Monte Carlo Simulations in Pathfinder. Manhattan, Kansas. Online im Internet unter <<https://www.thunderheadeng.com/2018/06/monte-carlo-simulations-in-pathfinder>> (zuletzt aufgerufen am 25.09.2018).
- [30] SCHUSTER, THOMAS und ARNDT LIESEN: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler: Ein Lehr- und Übungsbuch für das Bachelorstudium. Springer Gabler, Berlin, zweite Auflage, 2017.
- [31] PURSER, DAVID A.: Behaviour and Travel Interactions in Emergency Situations and Data Needs for Engineering Design. In Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003, Greenwich, U.K., S.255-369, 2003.
- [32] PURSER, DAVID A.: Data Benefits. In Fire Prevention Engineers Journal, S. 21-24, August 2003.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.3.1-1: Fundamentaldiagramm resultierend aus den Berechnungsmethoden nach <i>Predtetschenski</i> und <i>Milinski</i> für horizontale Wege bei Normalbedingungen unter Berücksichtigung einer maximalen Dichte von $D = 0,92$ (eigene Darstellung nach [17] [18]) .....	7
Abbildung 2.3.4-1: Fundamentaldiagramm des SFPE Handbuchs nach <i>Nelson</i> und <i>Mowrer</i> in eigener Darstellung.....	9
Abbildung 3.1.1-1: Erstelltes CAD-Modell mit Abschrankungen nach § 29 MVStättVO orientiert am Leitfaden für Veranstaltungssicherheit [8].....	12
Abbildung 3.1.2-1: Übersicht der Anordnung und Breite der zur Verfügung stehenden Rettungswege in den vier erstellten Modellvariationen.....	13
Abbildung 3.2.1-1: Abhängigkeit des Faktors der Geschwindigkeitsänderung (Fraction of Max. Speed) von der Dichte (Density) in den Profileinstellungen von Pathfinder .....	15
Abbildung 3.2.1-2: Messergebnisse des Steering-Modus bei einer vorgegebenen Gehgeschwindigkeit von 1,19 m/s im Vergleich zu entsprechenden Werten des SFPE Handbuchs – dargestellt ist der Personenfluss in Metern pro Sekunde in Abhängigkeit der Durchgangsbreite in Metern (Grafik entnommen aus [25, S.26]) .....	16
Abbildung 3.2.1-3: Exemplarische Darstellung der Gehgeschwindigkeit in m/s (Speed) in einem Simulationsdurchgang Zeitpunkt 160,0 s in Pathfinder Results .....	18
Abbildung 3.2.2-1: Beispielhafte Darstellung des Verlaufes der Gehgeschwindigkeit einer Person über eine aufgezeichnete Zeitspanne zur Gegenüberstellung der resultierenden Flächenanteile durch zwei verschiedene Geschwindigkeitsgrenzwerte .....	20
Abbildung 3.2.4-1: Exemplarische Darstellung der individuellen Gesamtverweildauer der Agenten in Stauungen der einzelnen Agenten in den zehn durchgeführten Simulationen des Modells 1 mit berücksichtigten Reaktionszeiten .....	25
Abbildung 4.1.2-1: Zusammenfassende Darstellung der Zeitpunkte beim Erreichen eines Ausgangs durch die Agenten ohne Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationsdurchgängen der vier Modellvariationen, dargestellt als Kastengrafiken.....	29

Abbildung 4.1.2-2: Darstellung der Zusammensetzung der durchschnittlich benötigten Zeit zum Erreichen eines Ausgangs durch die Agenten aus den Mittelwerten der Anteile von Zeiten der Bewegung unterhalb und oberhalb des Geschwindigkeitsgrenzwertes im Modell 1 ohne Reaktionszeit.....30

Abbildung 4.1.3-1: Zusammenfassende Darstellung der Zeitpunkte beim Erreichen eines Ausgangs durch die Agenten mit Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationsdurchgängen .....32

Abbildung 4.1.3-2: Darstellung der Zusammensetzung der durchschnittlich benötigten Zeit zum Erreichen eines Ausgangs durch die Agenten aus den Mittelwerten der Anteile von Zeiten der Bewegung unterhalb und oberhalb des Geschwindigkeitsgrenzwertes im Modell 1 mit Reaktionszeit.....32

Abbildung 4.1.4-1: Darstellung der Zusammensetzung der durchschnittlich benötigten Zeit zum Erreichen eines Ausgangs aus den Mittelwerten der Anteile von Zeit in Stauungen und normaler Bewegungszeit im Modell 1 mit Reaktionszeit bei variiertem Geschwindigkeitsgrenzwert .....34

Abbildung 4.1.4-2: Darstellung der maximalen kontinuierlichen Verweildauer der Agenten mit Reaktionszeit in einer Stauung, zusammengefasst aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationsdurchgängen mit variierten Geschwindigkeitsgrenzwerten .....34

Abbildung 4.1.5-1: Darstellung der durchschnittlichen Agentenzahl je Ausgang in den zehn Simulationen der ersten Modellvariation mit Reaktionszeiten.....35

Abbildung 4.1.5-2: Kontur der kumulierten Nutzung in Sekunden (Usage) der Versammlungsfläche in der ersten Modellvariation in Pathfinder Results bei einer Simulation mit Reaktionszeit der Agenten .....36

Abbildung 4.1.5-3: Mittelwerte, Minima und Maxima der Personenzahlen je Ausgang gemittelt aus den zehn durchgeführten Simulationen.....36

Abbildung 4.2.1-1: Gegenüberstellung der Kontur der kumulierten Nutzung in m/s (Usage) aus Pathfinder Results für denselben Simulationsdurchgang des ersten Modells mit Reaktionszeiten (links) und ohne Reaktionszeiten (rechts) .....38



## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.2.4.a: Exemplarischer Auszug aus den in CSV-Dateien aufgezeichneten Messwerten einer Simulation in Pathfinder für die ersten vier Agenten.....	23
Tabelle 3.2.4.b: Auszug aus einem zusammenfassenden Arbeitsblatt in Microsoft Excel zur Darstellung der kalkulierten Mittelwerte aus den ersten drei Simulationsdurchgängen des Modell 1 mit Reaktionszeit .....	24
Tabelle 4.1.2.a: Durchschnittliche Mittelwerte und Extrema der Messreihen aus je zehn Simulationsdurchgängen der vier Modellvariationen ohne Reaktionszeit aus den Dateien occupants.csv .....	28
Tabelle 4.1.3.a: Durchschnittliche Mittelwerte und Extrema der Messreihen aus je zehn Simulationsdurchgängen der vier Modellvariationen mit Reaktionszeit aus den Dateien occupants.csv .....	31
Tabelle 4.1.4.a: Durchschnittliche Mittelwerte und Extrema der Messreihen aus je zehn Simulationsdurchgängen des Modells 1 mit Reaktionszeit bei den fünf ausgewählten Geschwindigkeitsgrenzwerten aus den Dateien occupants.csv .....	33

## **A. Anhangverzeichnis**

A.1	Anhang 1: CAD-Zeichnung .....	XVII
A.2	Anhang 2: Standardeinstellungen und Eingaben in Pathfinder.....	XVIII
A.3	Anhang 3: Ergebnisse der Simulationen ohne Reaktionszeit .....	XXIV
A.4	Anhang 4: Ergebnisse der Simulationen mit Reaktionszeit .....	XXXII
A.5	Anhang 5: Simulationsergebnisse bei variiertem Geschwindigkeitsgrenzwert ...	XL
A.6	Anhang 6: Darstellungen der Agentenzahlen je Ausgänge .....	XLIX
A.7	Anhang 7: Grafiken aus Pathfinder Results .....	LIII

## A.1 Anhang 1: CAD-Zeichnung

Dargestellt ist die CAD-Zeichnung, die orientiert am Leitfaden für Veranstaltungssicherheit [8] erstellt wurde.

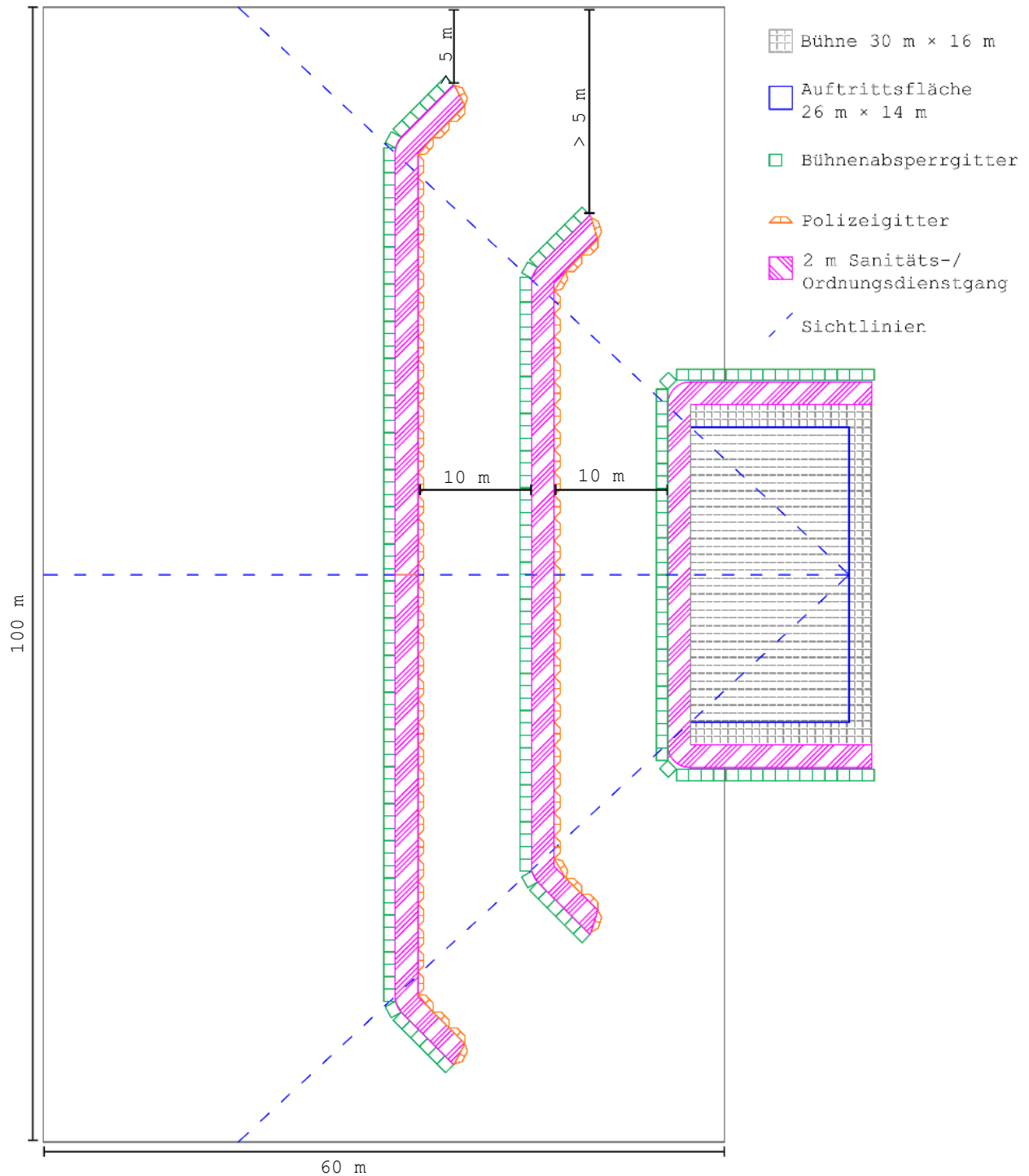


Abbildung A.1-1: CAD-Zeichnung der Versammlungsstätte

## A.2 Anhang 2: Standardeinstellungen und Eingaben in Pathfinder

Als Bildschirmaufnahmen sind in diesem Anhang die wesentlichen Einstellungen und Eingabeparameter in Pathfinder für die durchgeführten Simulationen dargestellt. Die einzigen veränderten Werte sind hierbei die hinzugefügten Reaktionszeiten von 30 s bis 150 s (Abbildung A.2-7 – „Initial Delay“) sowie die variierten Geschwindigkeitsgrenzwerte (Abbildung A.2-9 – „Jam Velocity“).

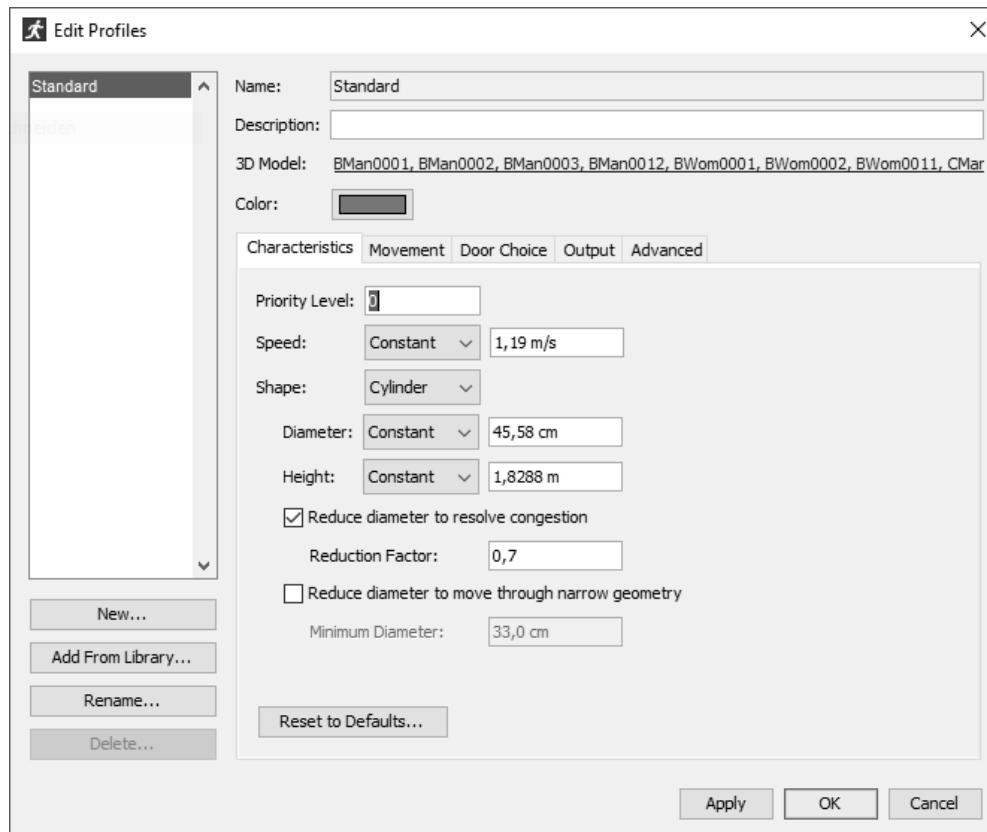


Abbildung A.2-1: Verwendete Standardeinstellungen des Profils im Steering-Modus der Software Pathfinder; „Characteristics“

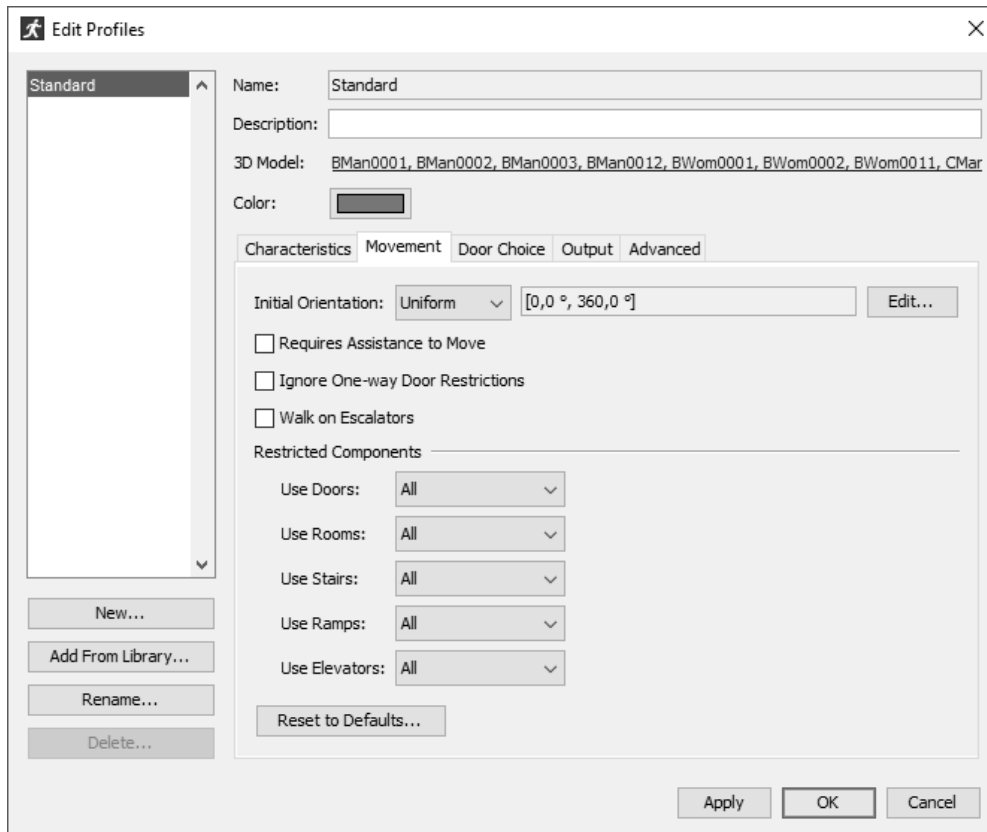


Abbildung A.2-2: Verwendete Standardeinstellungen des Profils im Steering-Modus der Software Pathfinder; „Movement“

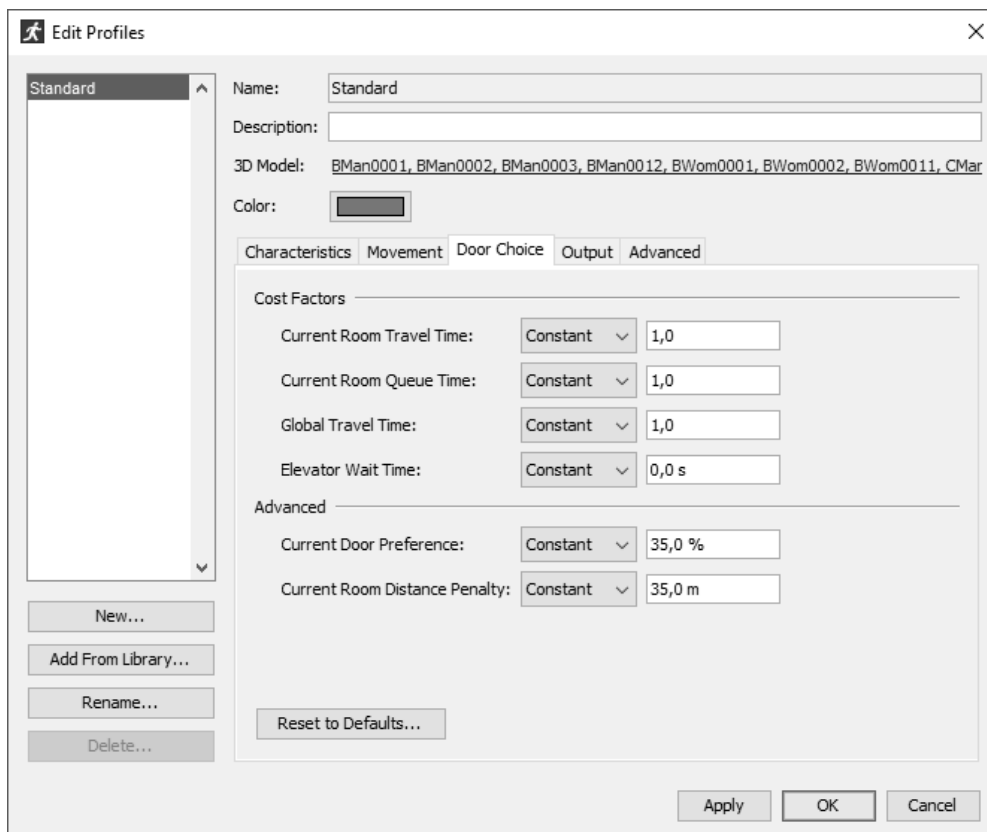


Abbildung A.2-3: Verwendete Standardeinstellungen des Profils im Steering-Modus der Software Pathfinder; „Door Choice“

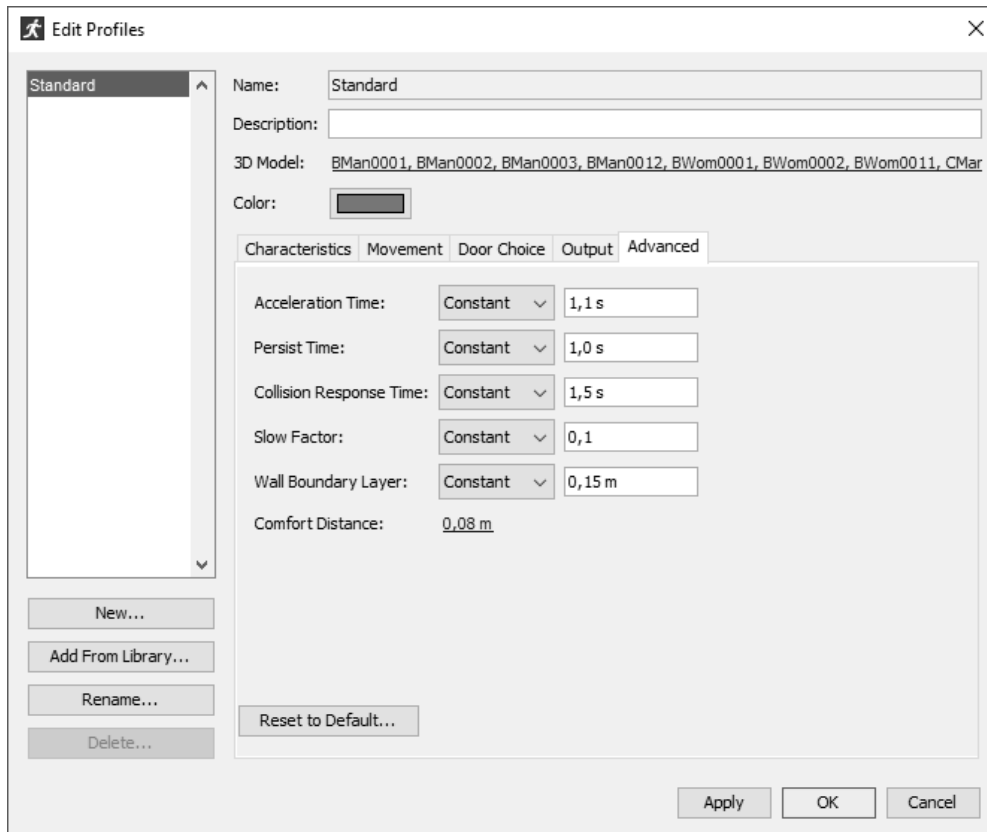


Abbildung A.2-4: Verwendete Standardeinstellungen des Profils im Steering-Modus der Software Pathfinder; „Advanced“

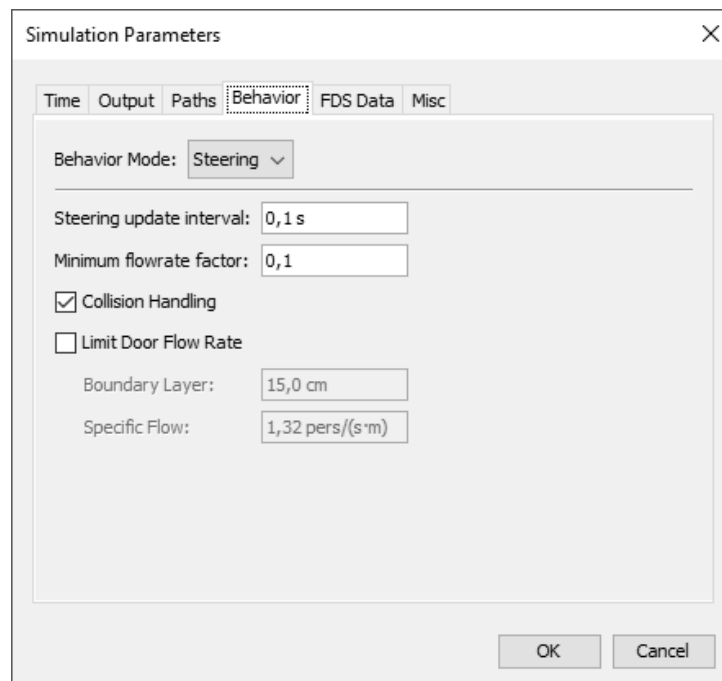


Abbildung A.2-5: Verwendete Simulationsparameter mit den Standardwerten des Steering-Modus

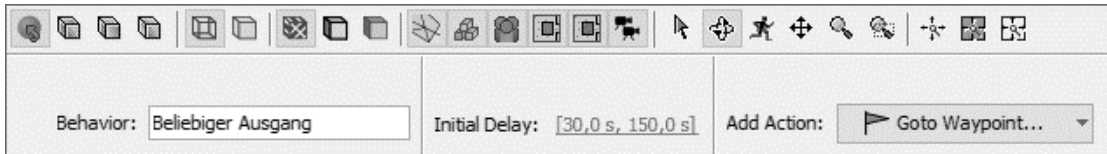


Abbildung A.2-6: Hinzugefügte Reaktionszeit als Verzögerung in der Verhaltensweise (Behavior) der Population

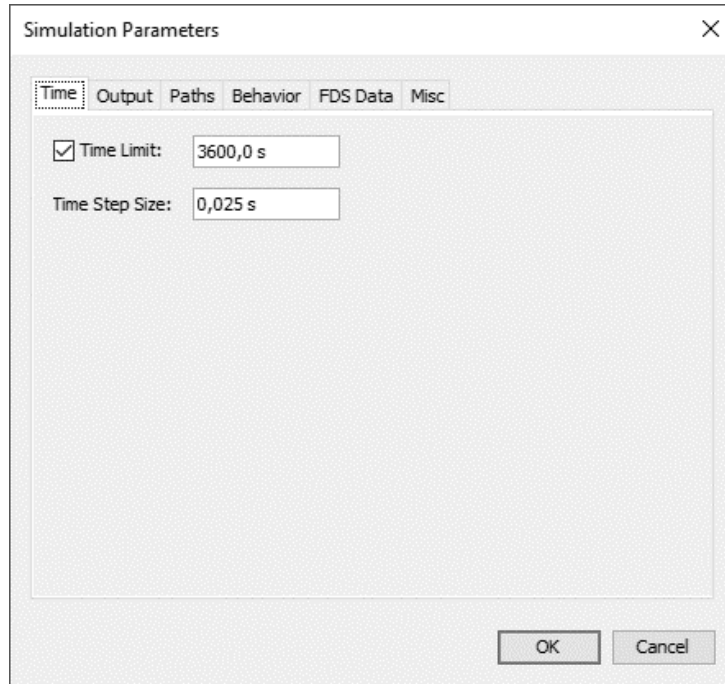


Abbildung A.2-7: Simulationsparameter; „Time“

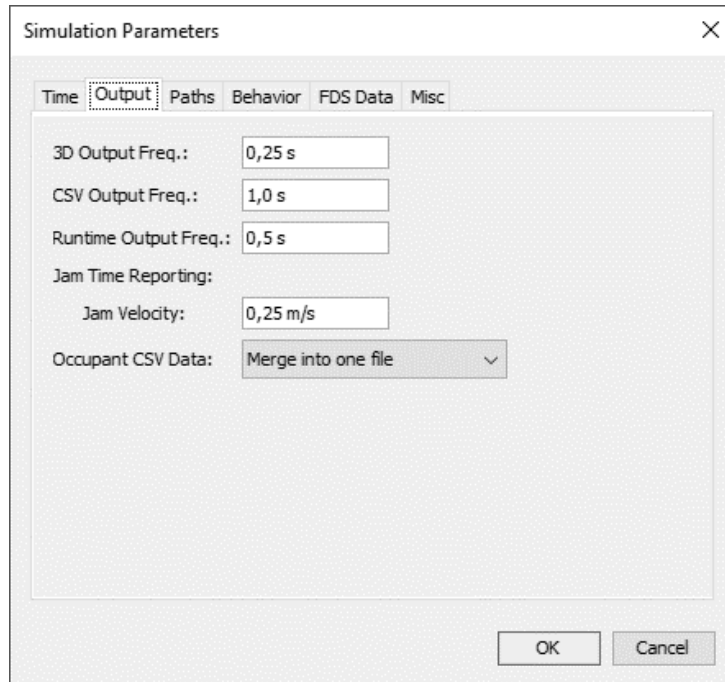


Abbildung A.2-8: Simulationsparameter; „Output“

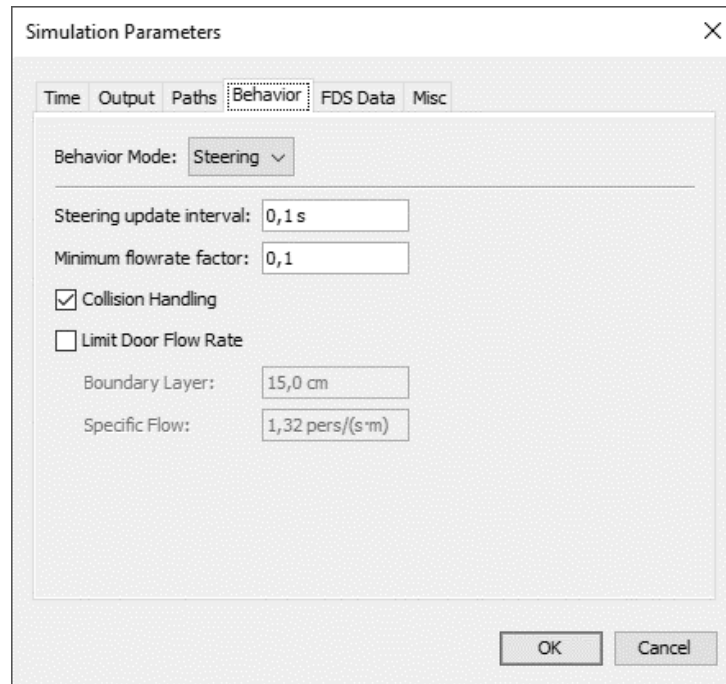


Abbildung A.2-9: Simulationsparameter; „Behavior“



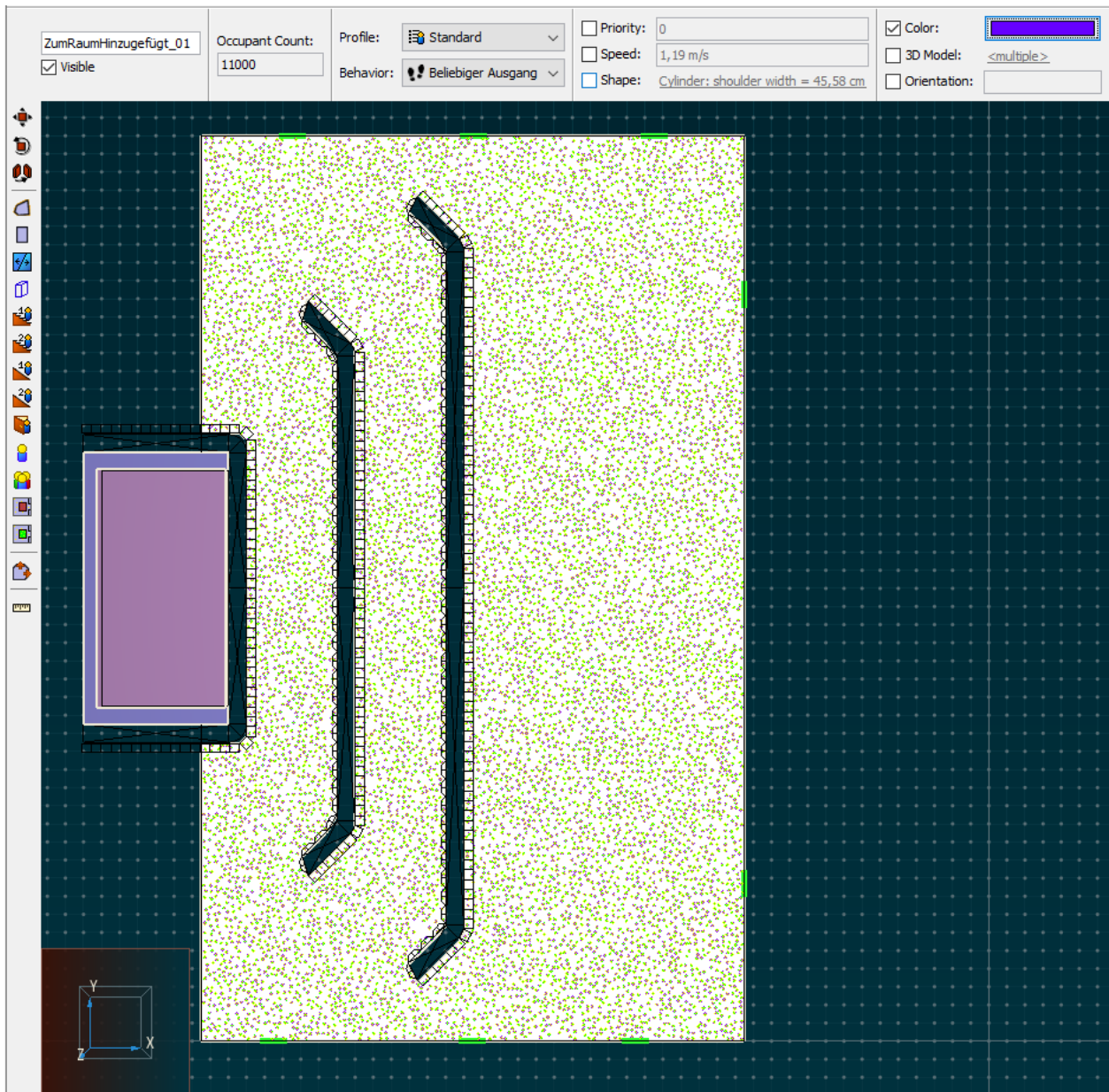


Abbildung A.2-10: Einstellungen der Agenten und ihre Verteilung auf der Fläche

### **A.3 Anhang 3: Ergebnisse der Simulationen ohne Reaktionszeit**

Im Folgenden sind die zusammengefassten Ergebnisse aus Microsoft Excel für die zehn durchgeführten Simulationen je Modell dargestellt.

Anschließend zeigen die Kastengrafiken die Lage der Verteilungen je Messgröße für die vier Modellvariationen im Vergleich.

Tabelle A.3.a: Arithmetische Mittel aus zehn Simulationsdurchgängen des Modells 1 ohne Reaktionszeit

Simulationsdurchgang	Zeit in Bewegung			Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung			Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs			zurückgelegte Wegstrecke			Reaktionszeit		
	active time(s)			jam time total(s)			jam time max continuous(s)			finish time(s)			distance (m)			last goal started time(s)		
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum
1	0,65	157,87	341,18	0,18	110,51	288,30	0,18	13,38	150,25	0,65	157,87	341,18	0,24	29,62	136,90	-	-	-
2	0,63	156,92	338,08	0,18	109,97	297,55	0,18	13,17	144,05	0,63	156,92	338,08	0,27	29,24	130,85	-	-	-
3	0,65	155,95	339,58	0,18	109,10	288,50	0,18	12,87	159,10	0,65	155,95	339,58	0,24	29,11	107,63	-	-	-
4	0,70	156,57	335,95	0,18	109,52	281,00	0,18	12,65	137,50	0,70	156,57	335,95	0,28	29,34	107,56	-	-	-
5	0,65	157,27	342,88	0,18	110,25	293,75	0,18	12,74	124,70	0,65	157,27	342,88	0,24	29,30	112,23	-	-	-
6	0,65	156,45	333,93	0,18	109,86	281,55	0,18	12,51	173,60	0,65	156,45	333,93	0,24	29,13	102,09	-	-	-
7	0,68	156,92	341,48	0,18	110,10	286,80	0,18	12,93	157,40	0,68	156,92	341,48	0,24	29,18	124,42	-	-	-
8	0,65	155,52	337,40	0,18	108,63	289,15	0,18	13,08	155,38	0,65	155,52	337,40	0,24	29,26	117,87	-	-	-
9	0,65	155,84	341,83	0,18	108,98	282,45	0,18	13,13	113,58	0,65	155,84	341,83	0,26	29,23	132,00	-	-	-
10	0,68	156,64	342,10	0,23	109,77	288,13	0,20	13,43	150,48	0,68	156,64	342,10	0,26	29,28	130,34	-	-	-

Tabelle A.3.b: Arithmetische Mittel aus zehn Simulationsdurchgängen des Modells 2 ohne Reaktionszeit

Simulationsdurchgang	Zeit in Bewegung			Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung			Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs			zurückgelegte Wegstrecke			Reaktionszeit		
	active time(s)			jam time total(s)			jam time max continuous(s)			finish time(s)			distance (m)			last goal started time(s)		
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum
1	0,65	155,89	325,35	0,18	111,10	294,30	0,18	12,46	86,28	0,65	155,89	325,35	0,24	29,09	109,94	-	-	-
2	0,60	156,46	325,05	0,18	111,83	294,90	0,18	12,69	95,00	0,60	156,46	325,05	0,25	28,95	113,71	-	-	-
3	0,65	155,25	319,13	0,18	110,60	290,75	0,18	12,41	93,10	0,65	155,25	319,13	0,24	29,01	120,46	-	-	-
4	0,68	155,64	323,50	0,18	111,04	292,03	0,18	12,31	88,38	0,68	155,64	323,50	0,26	28,76	112,72	-	-	-
5	0,65	156,01	319,28	0,18	110,95	292,40	0,18	12,30	71,23	0,65	156,01	319,28	0,24	29,33	125,25	-	-	-
6	0,65	155,98	325,93	0,18	111,65	296,93	0,18	12,46	62,20	0,65	155,98	325,93	0,24	28,72	116,46	-	-	-
7	0,68	155,92	322,75	0,18	111,34	295,60	0,18	12,67	80,00	0,68	155,92	322,75	0,24	28,84	115,79	-	-	-
8	0,65	155,80	323,80	0,18	111,22	294,58	0,18	12,87	70,05	0,65	155,80	323,80	0,24	28,85	121,73	-	-	-
9	0,63	154,65	318,05	0,18	110,01	291,28	0,18	12,83	83,20	0,63	154,65	318,05	0,26	28,90	113,60	-	-	-
10	0,68	155,16	317,00	0,23	110,47	288,05	0,18	12,47	71,50	0,68	155,16	317,00	0,26	28,95	115,87	-	-	-

Tabelle A.3.c: Arithmetische Mittel aus zehn Simulationsdurchgängen des Modells 3 ohne Reaktionszeit

Simulationsdurchgang	Zeit in Bewegung			Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung			Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs			zurückgelegte Wegstrecke			Reaktionszeit		
	active time(s)			jam time total(s)			jam time max continuous(s)			finish time(s)			distance (m)			last goal started time(s)		
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum
1	0,65	158,39	351,23	0,18	108,86	295,50	0,18	9,56	88,53	0,65	158,39	351,23	0,24	30,54	135,49	-	-	-
2	0,60	157,43	352,98	0,18	108,28	302,25	0,18	9,61	58,23	0,60	157,43	352,98	0,24	30,19	120,76	-	-	-
3	0,68	157,79	354,55	0,18	108,23	292,40	0,18	9,50	67,30	0,68	157,79	354,55	0,26	30,51	139,51	-	-	-
4	0,68	158,37	348,00	0,18	108,95	296,85	0,18	9,62	75,93	0,68	158,37	348,00	0,26	30,43	118,54	-	-	-
5	0,65	157,26	350,05	0,18	107,84	293,03	0,18	9,27	54,75	0,65	157,26	350,05	0,24	30,32	123,87	-	-	-
6	0,65	158,10	349,70	0,18	108,73	293,93	0,18	9,55	59,00	0,65	158,10	349,70	0,24	30,26	125,38	-	-	-
7	0,68	157,72	350,28	0,18	108,33	300,83	0,18	9,84	61,10	0,68	157,72	350,28	0,26	30,33	140,54	-	-	-
8	0,65	157,27	350,10	0,18	107,95	293,55	0,18	9,66	84,63	0,65	157,27	350,10	0,24	30,34	127,14	-	-	-
9	0,63	157,13	353,05	0,18	107,59	290,23	0,18	9,38	55,53	0,63	157,13	353,05	0,26	30,45	120,91	-	-	-
10	0,68	158,30	348,25	0,23	108,96	296,63	0,18	9,77	71,68	0,68	158,30	348,25	0,26	30,32	129,95	-	-	-

Tabelle A.3.d: Arithmetische Mittel aus zehn Simulationsdurchgängen des Modells 4 ohne Reaktionszeit

Simulationsdurchgang	Zeit in Bewegung			Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung			Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs			zurückgelegte Wegstrecke			Reaktionszeit		
	active time(s)			jam time total(s)			jam time max continuous(s)			finish time(s)			distance (m)			last goal started time(s)		
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum
1	0,60	153,77	318,15	0,18	97,69	286,45	0,18	9,30	60,88	0,60	153,77	318,15	0,24	31,39	101,04	-	-	-
2	0,70	153,13	316,78	0,18	97,15	285,80	0,18	8,88	59,93	0,70	153,13	316,78	0,29	31,37	132,21	-	-	-
3	0,65	153,53	318,65	0,18	97,57	286,55	0,18	9,14	78,53	0,65	153,53	318,65	0,24	31,31	132,15	-	-	-
4	0,65	153,26	317,28	0,18	97,21	284,40	0,18	9,02	61,60	0,65	153,26	317,28	0,24	31,28	101,26	-	-	-
5	0,65	153,50	317,55	0,18	97,34	282,40	0,18	9,14	54,63	0,65	153,50	317,55	0,24	31,50	135,53	-	-	-
6	0,65	153,63	317,65	0,18	97,66	285,45	0,18	9,09	47,60	0,65	153,63	317,65	0,24	31,39	135,52	-	-	-
7	0,65	153,33	316,55	0,18	97,40	281,93	0,18	8,82	65,00	0,65	153,33	316,55	0,24	31,34	123,06	-	-	-
8	0,65	153,68	318,33	0,18	97,65	281,93	0,18	9,01	64,73	0,65	153,68	318,33	0,25	31,34	135,46	-	-	-
9	0,65	154,37	321,05	0,18	98,08	284,55	0,18	9,18	73,23	0,65	154,37	321,05	0,26	31,57	132,54	-	-	-
10	0,65	153,55	320,13	0,18	97,57	282,38	0,18	8,93	62,35	0,65	153,55	320,13	0,25	31,28	108,94	-	-	-

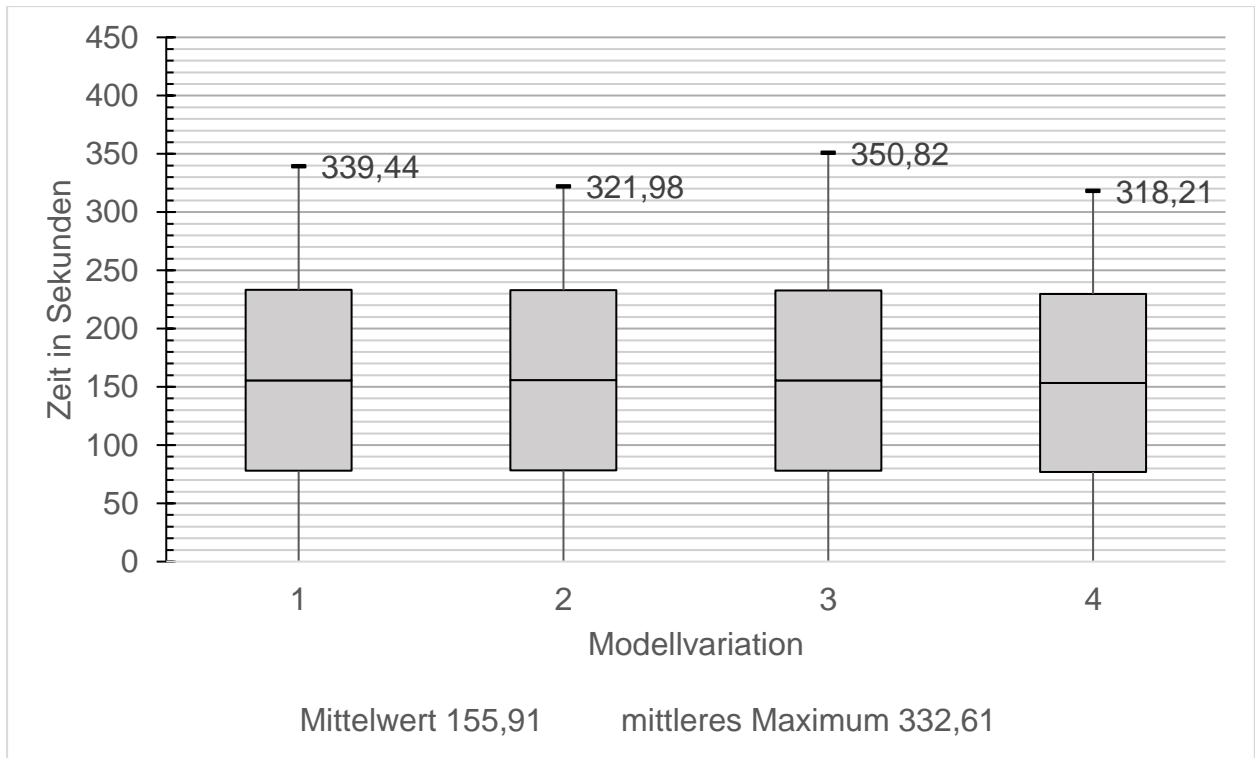


Abbildung A.3-1: Zusammenfassende Darstellung der Zeiten in Bewegung der Agenten ohne Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationen durchgängen

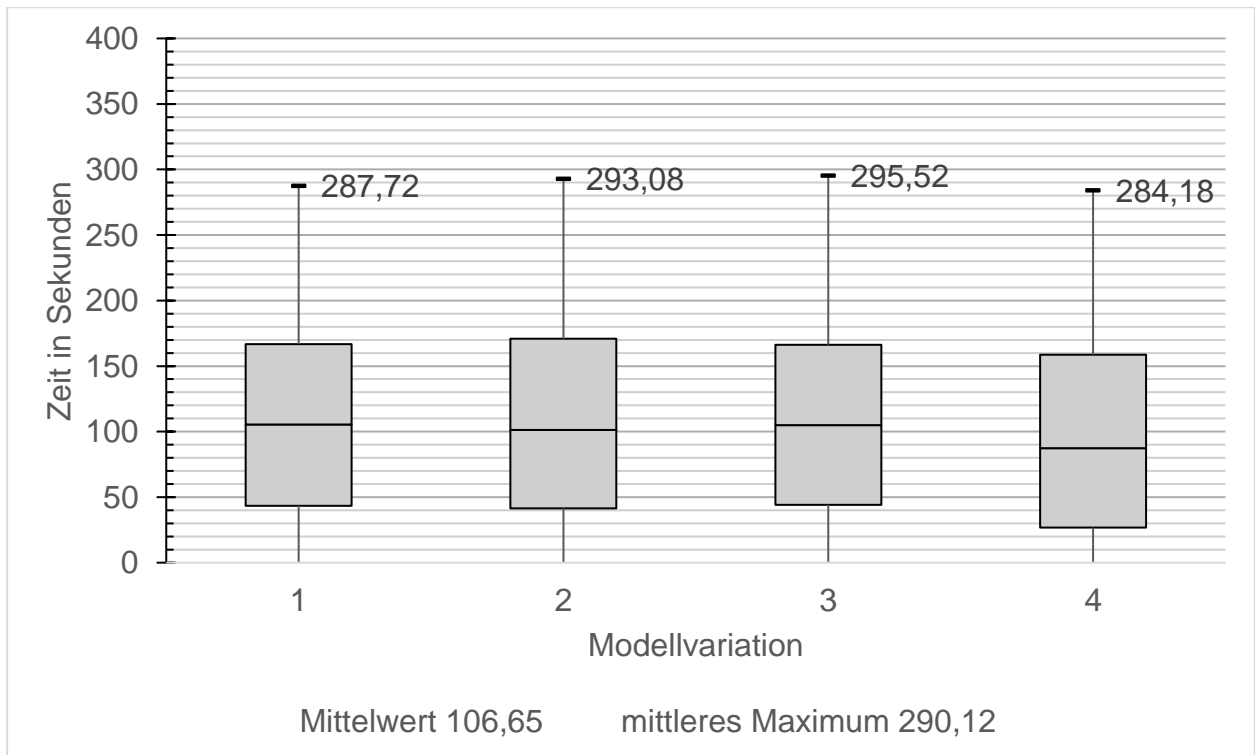


Abbildung A.3-2: Zusammenfassende Darstellung der Gesamtverweildauer der Agenten in Stauungen ohne Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationen durchgängen

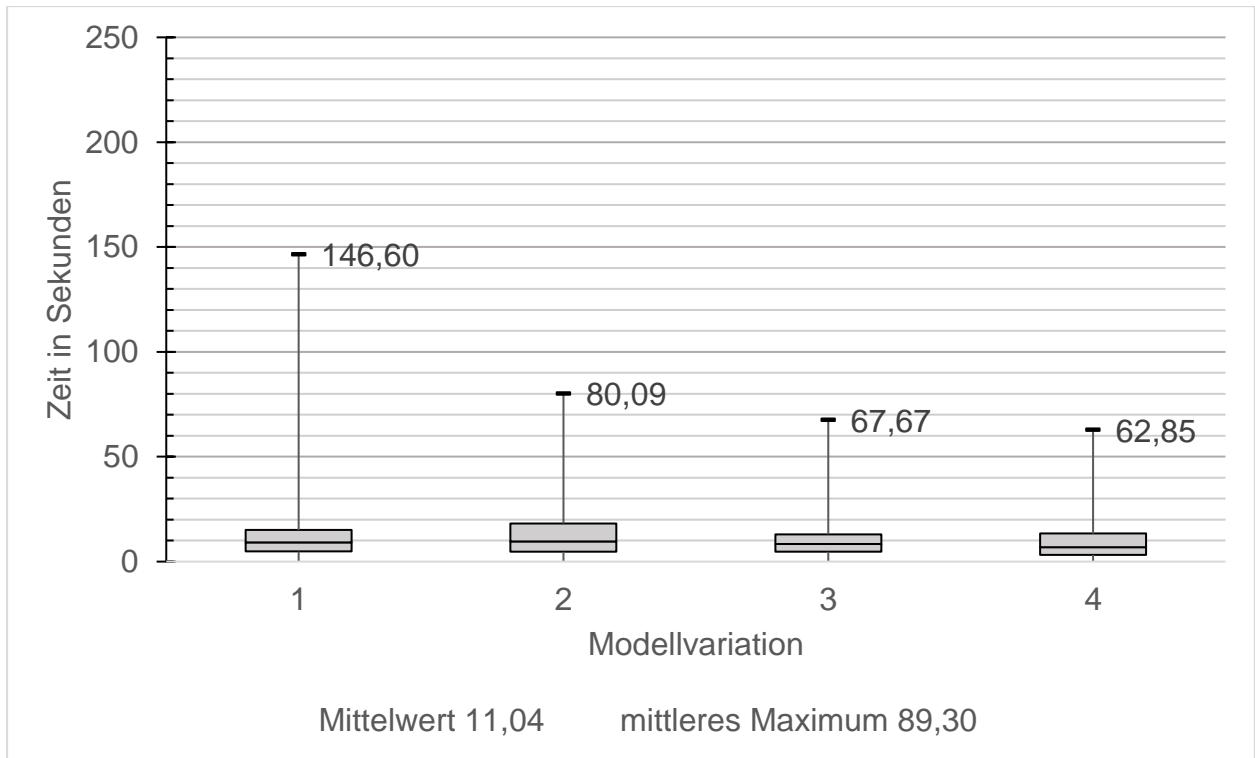


Abbildung A.3-3: Zusammenfassende Darstellung der maximalen kontinuierlichen Verweildauer der Agenten in Stauungen ohne Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationen durchgängen

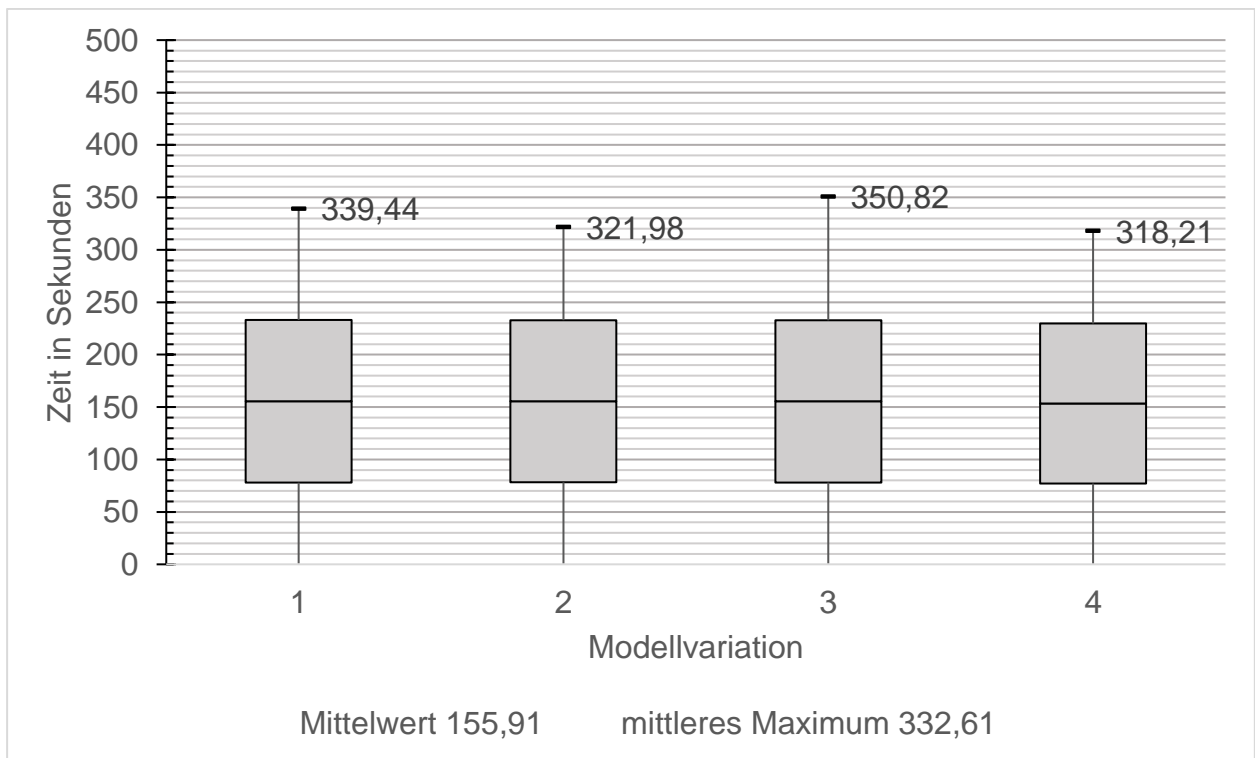


Abbildung A.3-4: Zusammenfassende Darstellung der Zeitpunkte beim Erreichen eines Ausgangs durch die Agenten ohne Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationen durchgängen



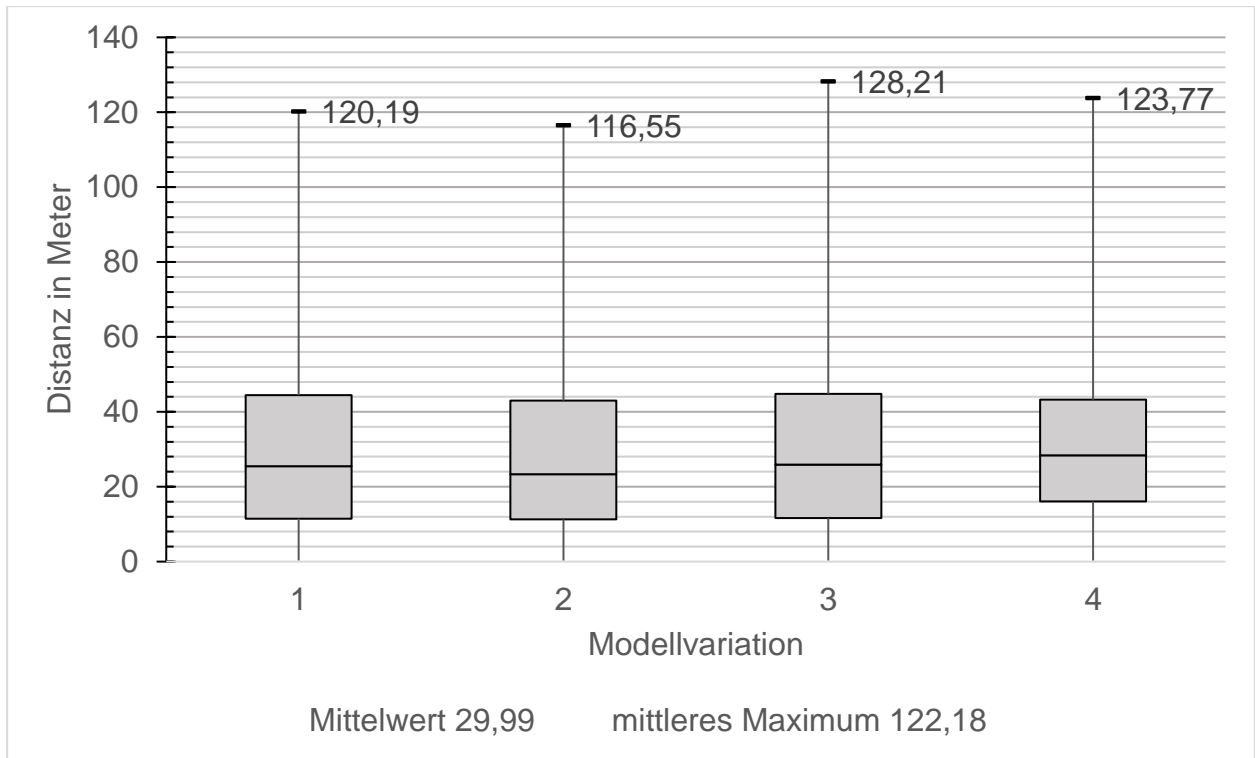


Abbildung A.3-5: Zusammenfassende Darstellung zurückgelegten Wegstrecken durch die Agenten ohne Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationen durchgängen

#### **A.4 Anhang 4: Ergebnisse der Simulationen mit Reaktionszeit**

Im Folgenden sind die zusammengefassten Ergebnisse aus Microsoft Excel für die zehn durchgeführten Simulationen je Modell dargestellt.

Anschließend zeigen die Kastengrafiken die Lage der Verteilungen je Messgröße für die vier Modellvariationen im Vergleich.

Tabelle A.4.a: Arithmetische Mittel aus zehn Simulationsdurchgängen des Modells 1 mit Reaktionszeit

Simulationsdurchgang	Zeit in Bewegung			Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung			Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs			zurückgelegte Wegstrecke			Reaktionszeit		
	active time(s)			jam time total(s)			jam time max continuous(s)			finish time(s)			distance (m)			last goal started time(s)		
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum
1	0,60	153,58	392,78	0,00	105,68	328,65	0,00	20,17	219,10	33,35	243,34	432,85	0,38	35,51	113,17	30,05	89,76	150,03
2	0,60	152,03	405,15	0,00	104,21	333,43	0,00	19,70	218,93	33,98	242,23	445,35	0,36	35,60	120,86	30,08	90,20	150,00
3	0,55	155,20	410,90	0,00	107,14	336,20	0,00	21,61	229,43	31,60	245,10	447,43	0,26	35,91	133,27	30,05	89,90	150,03
4	0,58	151,03	404,63	0,00	103,32	338,50	0,00	19,80	229,13	31,70	240,65	440,33	0,28	35,28	122,13	30,05	89,62	150,03
5	0,55	154,04	407,28	0,00	105,59	338,98	0,00	18,37	204,53	32,68	244,39	448,30	0,29	35,95	137,75	30,05	90,35	150,03
6	0,50	150,15	385,25	0,00	102,84	319,95	0,00	18,91	173,65	32,55	240,05	426,45	0,26	34,99	112,49	30,05	89,90	150,00
7	0,58	150,94	398,05	0,00	103,25	333,05	0,00	20,82	244,83	35,70	241,41	437,95	0,26	35,34	111,84	30,05	90,47	150,03
8	0,53	154,08	416,98	0,00	105,21	351,53	0,00	19,23	166,20	31,33	243,68	453,40	0,37	36,36	148,33	30,05	89,60	150,03
9	0,45	151,90	397,10	0,00	103,91	326,10	0,00	20,32	216,18	33,15	241,61	440,28	0,76	35,38	128,43	30,05	89,71	150,03
10	0,45	153,40	400,70	0,00	105,60	339,33	0,00	22,07	251,90	31,78	243,09	442,25	0,28	35,05	117,19	30,05	89,69	150,03

Tabelle A.4.b: Arithmetische Mittel aus zehn Simulationsdurchgängen des Modells 2 mit Reaktionszeit

Simulationsdurchgang	Zeit in Bewegung			Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung			Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs			zurückgelegte Wegstrecke			Reaktionszeit		
	active time(s)			jam time total(s)			jam time max continuous(s)			finish time(s)			distance (m)			last goal started time(s)		
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum
1	0,58	153,07	378,68	0,00	106,36	326,13	0,00	21,18	157,65	32,85	243,03	419,45	0,36	35,47	133,68	30,05	89,97	150,03
2	0,45	150,61	382,80	0,00	105,42	328,40	0,00	20,38	122,50	32,55	239,87	416,18	0,47	34,47	129,34	30,05	89,26	150,03
3	0,53	156,01	388,85	0,00	108,87	350,43	0,00	21,65	129,33	33,15	246,18	427,38	0,66	35,52	153,79	30,05	90,18	150,03
4	0,48	155,68	380,38	0,00	109,48	326,88	0,00	21,74	137,60	32,68	245,30	420,08	0,84	34,92	139,40	30,05	89,62	150,03
5	0,55	153,45	372,58	0,00	107,41	325,30	0,00	21,49	135,10	34,05	243,32	413,78	0,24	35,04	125,71	30,05	89,87	150,03
6	0,60	150,97	377,78	0,00	104,54	324,50	0,00	20,39	122,25	32,95	240,75	410,03	0,28	34,92	133,29	30,05	89,79	150,03
7	0,60	151,56	376,00	0,00	105,50	334,95	0,00	21,92	146,90	32,75	241,39	421,35	0,29	34,85	123,97	30,05	89,83	150,03
8	0,58	149,83	371,28	0,00	104,86	323,33	0,00	20,11	159,45	32,55	239,77	409,23	0,79	34,26	126,49	30,05	89,94	150,03
9	0,60	149,37	375,73	0,00	104,35	324,75	0,00	20,04	138,33	32,88	239,50	409,30	1,05	34,15	127,24	30,05	90,13	150,03
10	0,60	149,56	366,85	0,00	103,08	326,88	0,00	20,75	140,95	32,83	239,55	414,48	0,36	35,32	139,98	30,05	89,99	150,00

Tabelle A.4.c: Arithmetische Mittel aus zehn Simulationsdurchgängen des Modells 3 mit Reaktionszeit

Simulationsdurchgang	Zeit in Bewegung			Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung			Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs			zurückgelegte Wegstrecke			Reaktionszeit		
	active time(s)			jam time total(s)			jam time max continuous(s)			finish time(s)			distance (m)			last goal started time(s)		
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum
1	0,55	153,09	375,95	0,00	103,00	295,08	0,00	13,54	101,93	31,90	242,92	434,30	0,42	35,84	116,40	30,08	89,83	150,03
2	0,53	151,46	379,98	0,00	101,10	292,08	0,00	13,46	97,05	32,78	241,36	434,78	0,79	36,16	121,63	30,05	89,90	150,03
3	0,50	153,18	386,40	0,00	101,58	295,83	0,00	13,33	116,53	31,23	243,33	451,75	0,29	37,32	131,52	30,05	90,16	150,03
4	0,65	148,47	386,85	0,00	97,60	303,70	0,00	12,22	92,30	31,05	238,07	433,65	0,38	36,72	138,09	30,05	89,60	150,03
5	0,55	152,47	387,83	0,00	101,62	309,20	0,00	13,55	92,13	33,25	242,34	431,80	0,34	36,67	108,75	30,05	89,87	150,03
6	0,58	154,22	375,85	0,00	103,53	299,43	0,00	15,10	117,58	33,23	244,52	432,25	0,29	36,49	117,82	30,05	90,30	150,00
7	0,55	152,35	379,90	0,00	101,52	295,80	0,00	13,55	101,28	33,85	241,89	425,48	1,01	36,29	119,45	30,05	89,54	150,03
8	0,55	147,18	385,15	0,00	97,33	291,53	0,00	12,00	89,55	31,23	237,11	423,90	0,45	35,71	121,98	30,05	89,93	150,03
9	0,50	151,71	389,70	0,00	101,00	284,43	0,00	13,47	132,43	32,25	241,51	440,40	0,52	36,39	128,60	30,05	89,81	150,03
10	0,50	156,19	384,33	0,00	104,98	310,88	0,00	14,01	111,90	32,43	246,20	442,43	0,69	36,79	134,08	30,05	90,01	150,03

Tabelle A.4.d: Arithmetische Mittel aus zehn Simulationsdurchgängen des Modells 4 mit Reaktionszeit

Simulationsdurchgang	Zeit in Bewegung			Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung			Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs			zurückgelegte Wegstrecke			Reaktionszeit		
	active time(s)			jam time total(s)			jam time max continuous(s)			finish time(s)			distance (m)			last goal started time(s)		
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum
1	0,65	155,61	364,10	0,00	97,88	298,13	0,00	16,16	156,68	31,85	245,47	416,85	0,28	39,73	119,75	30,05	89,86	150,03
2	0,60	160,46	370,85	0,00	103,66	307,50	0,00	16,14	104,25	32,53	250,62	410,73	0,36	38,68	129,69	30,05	90,16	150,03
3	0,48	157,76	381,63	0,00	100,93	303,28	0,00	15,67	100,80	32,55	248,09	421,48	0,45	38,86	136,02	30,05	90,33	150,03
4	0,53	157,08	361,85	0,00	99,92	299,20	0,00	15,12	110,13	30,98	246,46	410,95	0,38	39,05	127,23	30,05	89,38	150,03
5	0,58	158,07	374,18	0,00	100,07	305,25	0,00	14,30	121,58	31,45	247,92	417,98	0,31	39,62	137,30	30,05	89,85	150,03
6	0,53	159,04	375,33	0,00	101,80	293,30	0,00	15,46	163,10	32,70	249,23	419,60	0,24	39,22	124,66	30,05	90,19	150,03
7	0,58	159,43	381,15	0,00	101,62	313,28	0,00	15,90	118,50	32,15	250,21	423,58	0,72	39,79	134,82	30,08	90,77	150,03
8	0,63	155,85	370,75	0,00	98,98	295,75	0,00	17,19	161,60	32,55	245,63	416,35	0,38	38,90	128,90	30,05	89,78	150,03
9	0,55	159,05	367,20	0,00	100,94	299,10	0,00	16,22	108,33	32,63	249,22	415,05	0,36	39,63	126,89	30,05	90,17	150,03
10	0,50	159,77	377,40	0,00	102,11	317,15	0,00	17,69	164,68	33,33	249,61	420,73	0,26	39,15	122,13	30,05	89,84	150,03

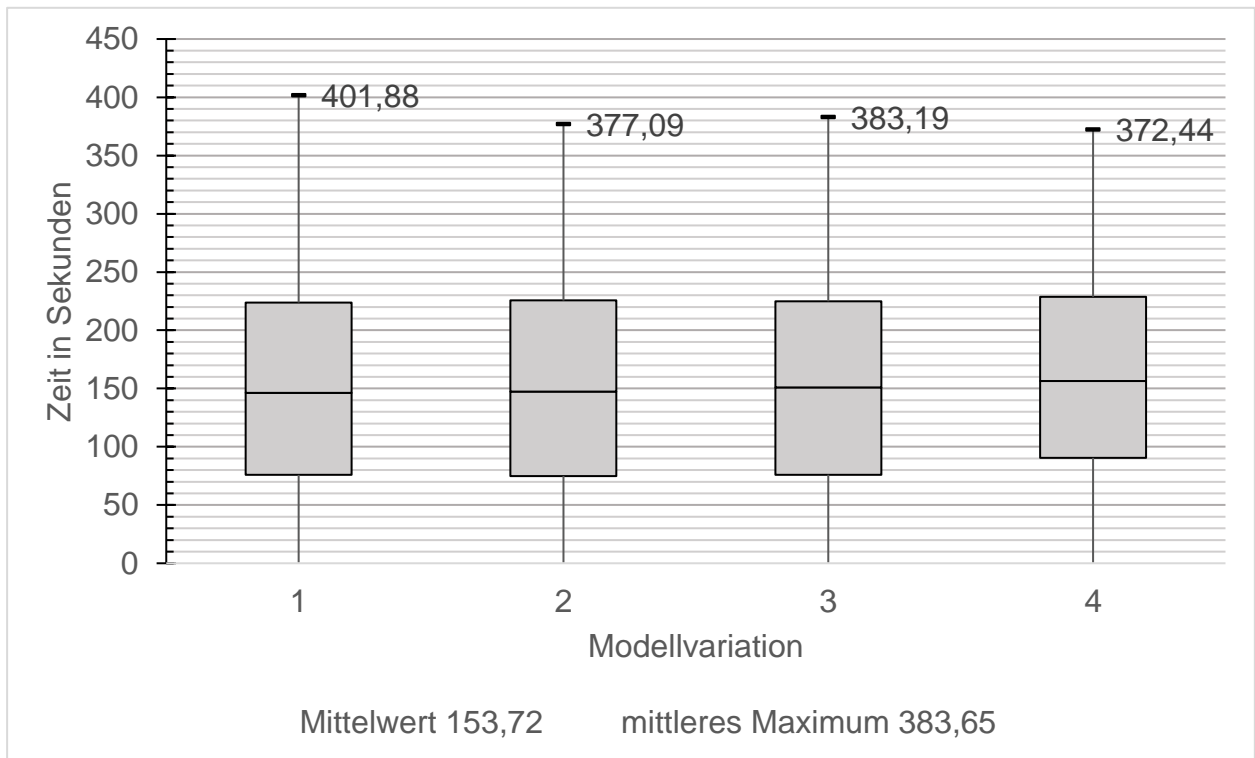


Abbildung A.4-1: Zusammenfassende Darstellung der Zeiten in Bewegung der Agenten mit Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationsdurchgängen

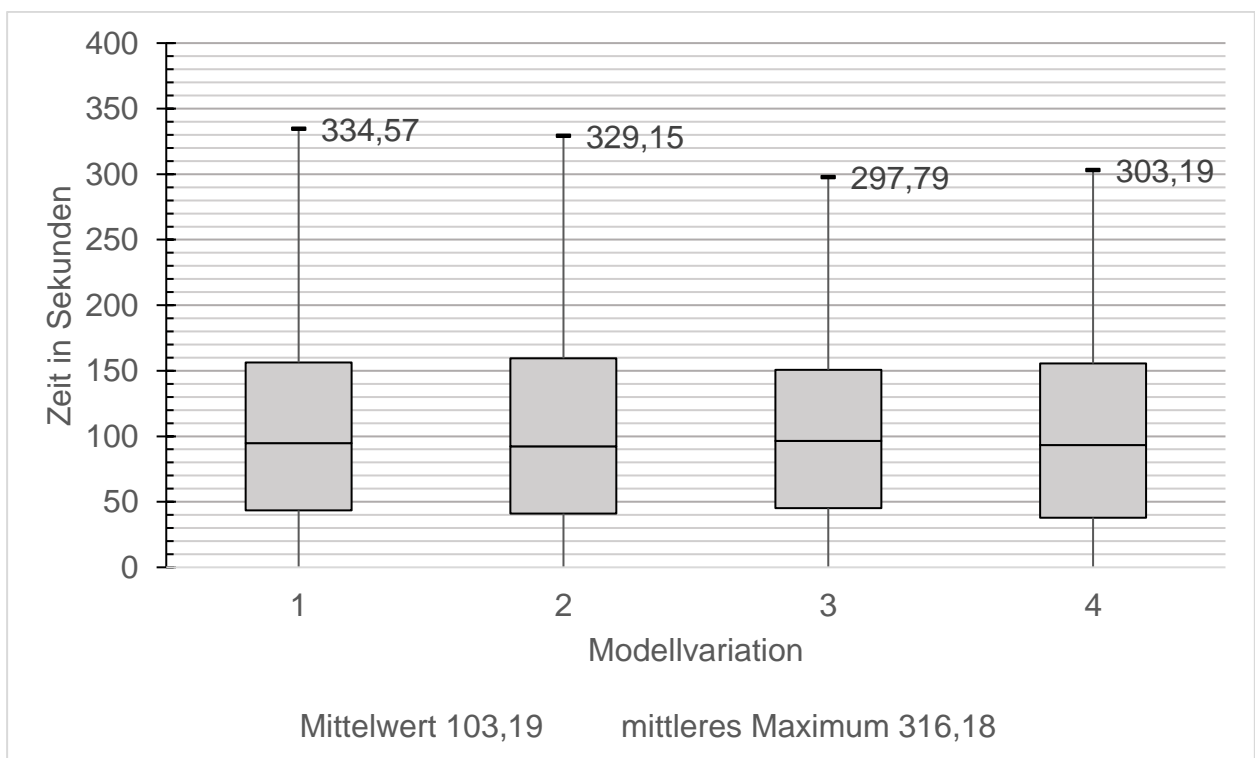


Abbildung A.4-2: Zusammenfassende Darstellung der Gesamtverweildauer der Agenten in Stauungen mit Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationsdurchgängen

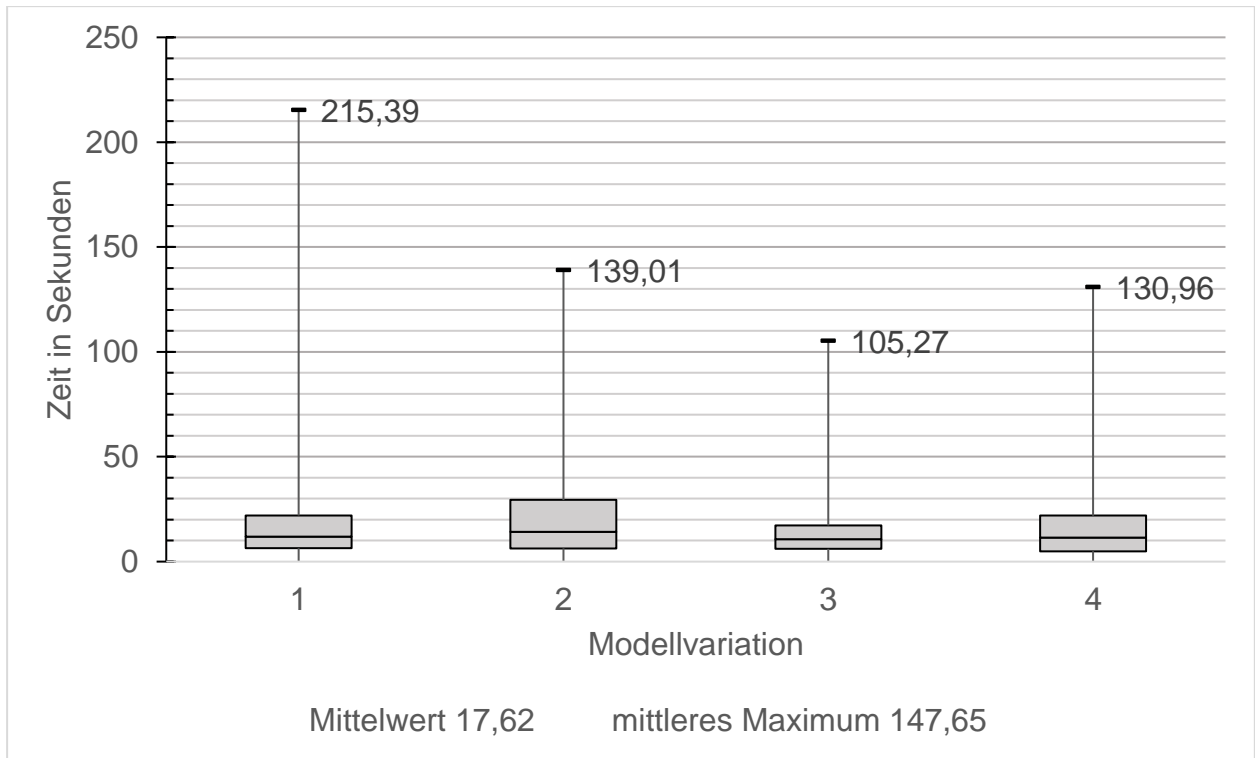


Abbildung A.4-3: Zusammenfassende Darstellung der maximalen kontinuierlichen Verweildauer der Agenten in Stauungen mit Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationen durchgängen

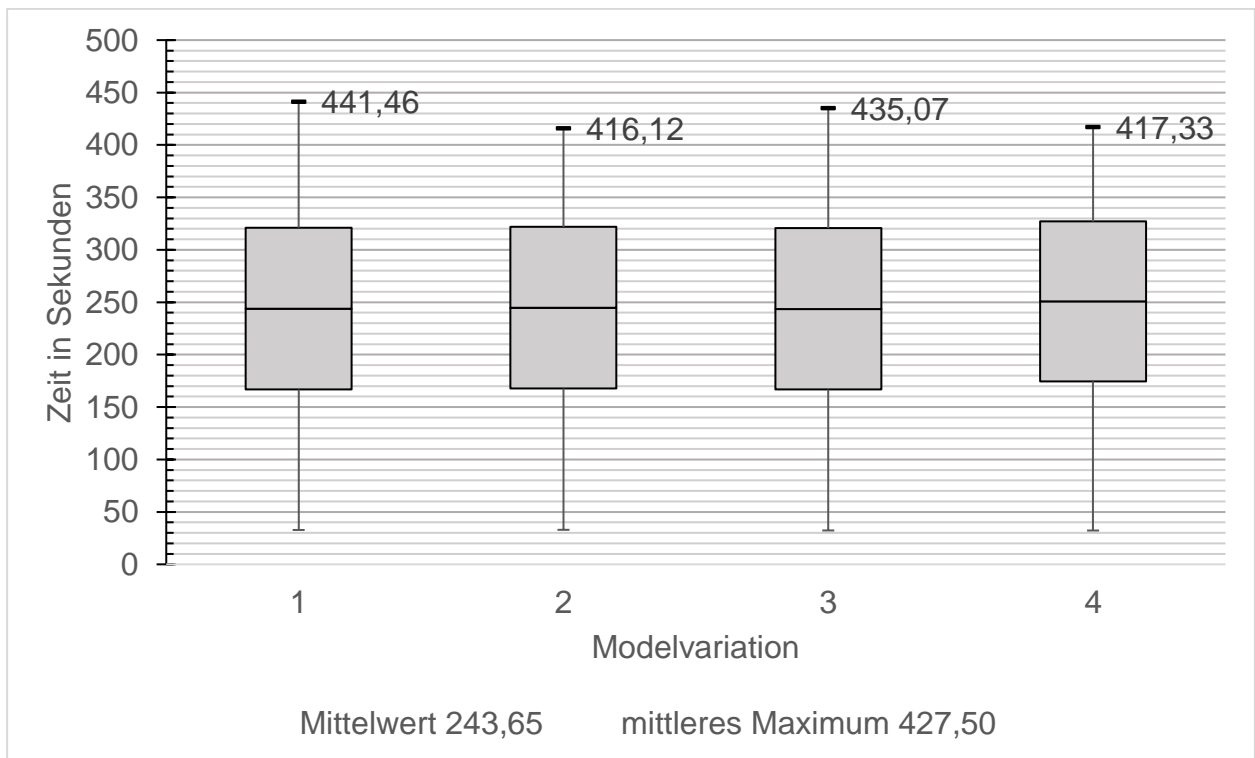


Abbildung A.4-4: Zusammenfassende Darstellung der Zeitpunkte beim Erreichen eines Ausgangs durch die Agenten mit Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationen durchgängen



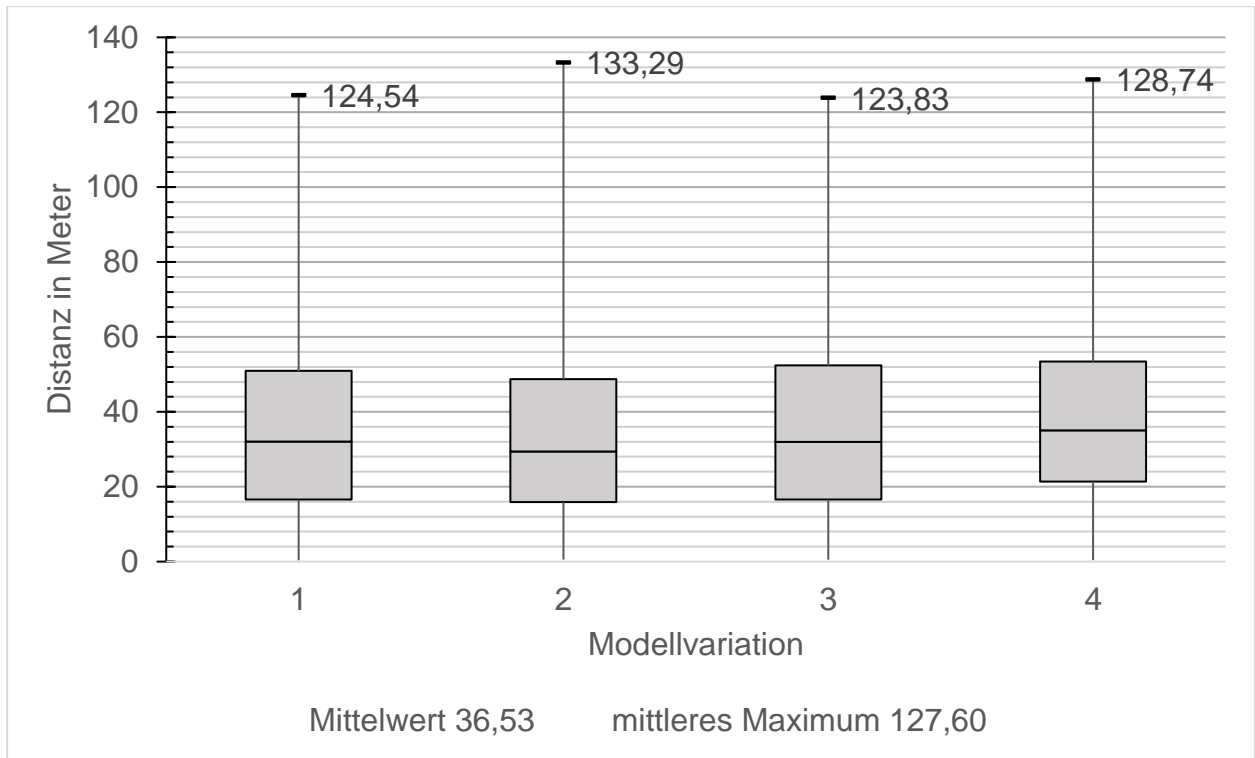


Abbildung A.4-5: Zusammenfassende Darstellung zurückgelegten Wegstrecken durch die Agenten mit Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationsdurchgängen

## **A.5 Anhang 5: Simulationsergebnisse bei variiertem Geschwindigkeitsgrenzwert**

Im Folgenden sind die zusammengefassten Ergebnisse aus Microsoft Excel für die zehn durchgeführten Simulationen des ersten Modells bei variiertem Geschwindigkeitsgrenzwert dargestellt.

Anschließend zeigen die Kastengrafiken die Lage der Verteilungen je Messgröße aus den entsprechenden Simulationen im Vergleich.

Anhang 5: Simulationsergebnisse bei variiertem Geschwindigkeitsgrenzwert

Tabelle A.5.a: Arithmetische Mittel aus zehn Simulationsthroughgängen des Modells 1 mit einem Geschwindigkeitsgrenzwert von 0,25 m/s

Simulationsthroughgang	Zeit in Bewegung			Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung			Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs			zurückgelegte Wegstrecke			Reaktionszeit		
	active time(s)			jam time total(s)			jam time max continuous(s)			finish time(s)			distance (m)			last goal started time(s)		
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum
1	0,60	153,58	392,78	0,00	105,68	328,65	0,00	20,17	219,10	33,35	243,34	432,85	0,38	35,51	113,17	30,05	89,76	150,03
2	0,60	152,03	405,15	0,00	104,21	333,43	0,00	19,70	218,93	33,98	242,23	445,35	0,36	35,60	120,86	30,08	90,20	150,00
3	0,55	155,20	410,90	0,00	107,14	336,20	0,00	21,61	229,43	31,60	245,10	447,43	0,26	35,91	133,27	30,05	89,90	150,03
4	0,58	151,03	404,63	0,00	103,32	338,50	0,00	19,80	229,13	31,70	240,65	440,33	0,28	35,28	122,13	30,05	89,62	150,03
5	0,55	154,04	407,28	0,00	105,59	338,98	0,00	18,37	204,53	32,68	244,39	448,30	0,29	35,95	137,75	30,05	90,35	150,03
6	0,50	150,15	385,25	0,00	102,84	319,95	0,00	18,91	173,65	32,55	240,05	426,45	0,26	34,99	112,49	30,05	89,90	150,00
7	0,58	150,94	398,05	0,00	103,25	333,05	0,00	20,82	244,83	35,70	241,41	437,95	0,26	35,34	111,84	30,05	90,47	150,03
8	0,53	154,08	416,98	0,00	105,21	351,53	0,00	19,23	166,20	31,33	243,68	453,40	0,37	36,36	148,33	30,05	89,60	150,03
9	0,45	151,90	397,10	0,00	103,91	326,10	0,00	20,32	216,18	33,15	241,61	440,28	0,76	35,38	128,43	30,05	89,71	150,03
10	0,45	153,40	400,70	0,00	105,60	339,33	0,00	22,07	251,90	31,78	243,09	442,25	0,28	35,05	117,19	30,05	89,69	150,03

Anhang 5: Simulationsergebnisse bei variiertem Geschwindigkeitsgrenzwert

Tabelle A.5.b: Arithmetische Mittel aus zehn Simulationsdurchgängen des Modells 1 mit einem Geschwindigkeitsgrenzwert von 0,30 m/s

Simulationsdurchgang	Zeit in Bewegung			Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung			Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs			zurückgelegte Wegstrecke			Reaktionszeit		
	active time(s)			jam time total(s)			jam time max continuous(s)			finish time(s)			distance (m)			last goal started time(s)		
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum
1	0,55	152,35	392,23	0,00	112,06	333,40	0,00	23,24	211,40	34,40	242,25	431,40	0,78	35,59	123,75	30,05	89,90	150,03
2	0,63	152,76	399,20	0,00	112,96	330,78	0,00	23,50	239,58	33,20	242,70	437,75	0,32	35,11	111,83	30,05	89,94	150,03
3	0,63	154,63	404,40	0,00	113,78	323,45	0,00	21,59	156,73	33,68	244,32	441,33	0,35	36,16	137,59	30,05	89,69	150,00
4	0,58	155,18	408,65	0,00	114,43	339,20	0,00	21,20	270,55	33,45	245,35	446,98	0,29	35,69	125,23	30,05	90,17	150,00
5	0,58	153,37	416,53	0,00	112,53	328,35	0,00	20,46	146,10	32,93	243,24	451,43	0,28	35,67	122,54	30,05	89,86	150,03
6	0,48	152,52	399,85	0,00	112,01	328,30	0,00	21,00	189,20	32,25	242,74	441,48	0,26	35,51	125,05	30,05	90,23	150,03
7	0,50	153,12	383,68	0,00	112,48	325,43	0,00	21,62	178,38	32,70	242,85	433,93	0,43	35,55	149,49	30,05	89,72	150,00
8	0,55	150,44	385,83	0,00	111,06	316,88	0,00	20,87	207,43	32,80	239,97	428,00	0,53	34,68	111,27	30,05	89,53	150,03
9	0,65	148,16	396,58	0,00	108,05	323,98	0,00	21,83	258,85	32,58	238,17	431,43	0,26	35,24	121,27	30,05	90,01	150,03
10	0,55	150,02	383,68	0,00	109,31	335,45	0,00	20,44	158,45	31,45	240,03	430,15	0,38	35,65	144,06	30,05	90,01	150,00

Anhang 5: Simulationsergebnisse bei variiertem Geschwindigkeitsgrenzwert

Tabelle A.5.c: Arithmetische Mittel aus zehn Simulationen durchgängen des Modells 1 mit einem Geschwindigkeitsgrenzwert von 0,40 m/s

Simulationsdurchgang	Zeit in Bewegung			Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung			Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs			zurückgelegte Wegstrecke			Reaktionszeit		
	active time(s)			jam time total(s)			jam time max continuous(s)			finish time(s)			distance (m)			last goal started time(s)		
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum
1	0,53	154,72	400,58	0,00	125,98	356,28	0,00	37,96	252,13	32,45	244,16	435,90	0,28	35,84	117,72	30,05	89,44	150,03
2	0,58	150,03	384,25	0,00	121,41	346,03	0,00	39,23	301,30	31,70	240,01	424,03	0,34	35,34	131,04	30,08	89,98	150,03
3	0,50	152,73	392,25	0,00	124,16	347,90	0,00	37,67	256,43	32,00	243,01	434,15	0,39	35,35	115,88	30,05	90,28	150,03
4	0,58	151,89	384,33	0,00	122,93	340,85	0,00	39,53	272,30	32,80	242,02	428,60	0,36	35,77	113,19	30,05	90,13	150,00
5	0,65	149,10	388,78	0,15	120,62	337,10	0,13	37,55	276,60	32,65	238,70	428,63	0,33	35,15	105,83	30,05	89,60	150,03
6	0,48	154,08	403,93	0,00	126,02	361,88	0,00	38,60	302,80	33,10	244,34	443,68	0,37	34,95	117,03	30,08	90,26	150,03
7	0,60	153,21	407,83	0,00	124,65	359,30	0,00	37,04	270,50	32,53	242,81	452,03	0,27	35,78	134,90	30,05	89,60	150,03
8	0,60	155,60	413,58	0,00	126,30	354,20	0,00	38,03	255,15	34,63	245,84	447,40	0,48	36,63	144,26	30,05	90,23	150,03
9	0,45	150,69	390,93	0,00	122,68	343,98	0,00	36,80	296,38	31,60	240,07	425,65	0,34	34,92	136,14	30,10	89,39	150,03
10	0,53	155,92	394,70	0,00	127,42	353,25	0,00	39,65	283,13	31,20	246,32	434,38	0,31	35,51	111,85	30,05	90,39	150,03

Anhang 5: Simulationsergebnisse bei variiertem Geschwindigkeitsgrenzwert

Tabelle A.5.d: Arithmetische Mittel aus zehn Simulationsdurchgängen des Modells 1 mit einem Geschwindigkeitsgrenzwert von 0,50 m/s

Simulationsdurchgang	Zeit in Bewegung			Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung			Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs			zurückgelegte Wegstrecke			Reaktionszeit		
	active time(s)			jam time total(s)			jam time max continuous(s)			finish time(s)			distance (m)			last goal started time(s)		
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum
1	0,48	150,39	389,85	0,00	128,07	350,23	0,00	70,39	316,30	31,40	240,44	431,98	0,76	35,63	122,29	30,05	90,06	150,03
2	0,50	152,77	388,33	0,00	131,34	359,28	0,00	73,27	318,20	32,65	242,71	436,68	0,31	35,24	120,57	30,05	89,93	150,03
3	0,58	153,95	396,60	0,05	131,58	358,23	0,05	73,71	325,88	33,13	244,45	446,80	0,48	36,01	135,87	30,05	90,49	150,03
4	0,48	154,73	406,65	0,20	133,30	374,25	0,20	73,09	325,85	34,00	244,65	443,05	0,55	35,32	120,78	30,05	89,91	150,03
5	0,55	152,76	390,80	0,00	131,14	360,93	0,00	72,03	318,90	33,00	243,07	428,50	0,36	35,31	125,78	30,05	90,31	150,03
6	0,43	147,47	405,15	0,00	125,52	368,48	0,00	69,02	322,60	32,63	237,65	445,58	0,36	35,32	122,04	30,05	90,17	150,03
7	0,60	152,88	395,63	0,15	131,02	348,58	0,15	73,16	310,83	31,40	242,88	430,98	0,29	35,57	144,39	30,05	90,00	150,03
8	0,53	148,87	388,73	0,18	127,12	353,48	0,18	70,76	317,23	32,98	238,82	425,40	0,42	35,08	108,44	30,05	89,94	150,03
9	0,50	152,15	395,78	0,00	130,68	368,23	0,00	72,11	323,45	31,35	241,74	435,43	0,30	35,22	113,95	30,05	89,59	150,03
10	0,55	153,46	399,15	0,15	131,42	365,10	0,15	74,20	342,90	32,60	243,48	441,78	0,29	35,73	134,06	30,05	90,02	150,03

Anhang 5: Simulationsergebnisse bei variiertem Geschwindigkeitsgrenzwert

Tabelle A.5.e: Arithmetische Mittel aus zehn Simulationsdurchgängen des Modells 1 mit einem Geschwindigkeitsgrenzwert von 0,60 m/s

Simulationsdurchgang	Zeit in Bewegung			Gesamtverweildauer in Stauungen			maximale kontinuierliche Verweildauer in einer Stauung			Zeitpunkt beim Erreichen eines Ausgangs			zurückgelegte Wegstrecke			Reaktionszeit		
	active time(s)			jam time total(s)			jam time max continuous(s)			finish time(s)			distance (m)			last goal started time(s)		
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum
1	0,63	152,85	388,53	0,20	135,84	365,98	0,20	94,91	327,40	32,28	242,82	432,73	0,38	35,30	114,59	30,05	89,97	150,03
2	0,55	146,56	387,00	0,03	129,76	352,93	0,03	89,88	322,10	31,43	236,87	423,68	0,34	34,89	121,05	30,05	90,31	150,03
3	0,53	154,20	395,88	0,20	137,29	369,20	0,13	96,80	338,10	32,28	244,65	438,43	0,34	35,36	110,09	30,05	90,45	150,03
4	0,60	150,69	404,93	0,33	133,84	374,45	0,33	93,58	330,18	32,48	240,98	439,98	0,29	35,05	129,41	30,05	90,29	150,00
5	0,60	151,00	411,10	0,10	133,30	382,45	0,10	93,50	309,05	33,43	241,05	449,90	0,29	35,87	137,30	30,05	90,05	150,03
6	0,55	153,55	388,73	0,28	136,25	372,35	0,28	96,50	325,23	33,25	243,95	435,88	0,36	35,68	126,96	30,05	90,40	150,03
7	0,55	151,14	399,20	0,25	133,76	366,95	0,23	93,18	331,70	32,35	241,60	445,28	0,53	35,36	121,08	30,05	90,47	150,03
8	0,53	156,10	402,73	0,28	139,03	385,53	0,25	98,45	325,33	31,48	246,17	447,88	0,24	35,70	143,07	30,05	90,07	150,03
9	0,60	149,26	390,30	0,23	131,43	364,70	0,18	90,88	321,65	31,08	238,78	429,93	0,34	35,99	147,43	30,05	89,52	150,00
10	0,58	157,66	402,10	0,13	140,69	377,85	0,10	99,48	339,98	31,45	247,74	441,75	0,26	35,60	130,67	30,05	90,09	150,00

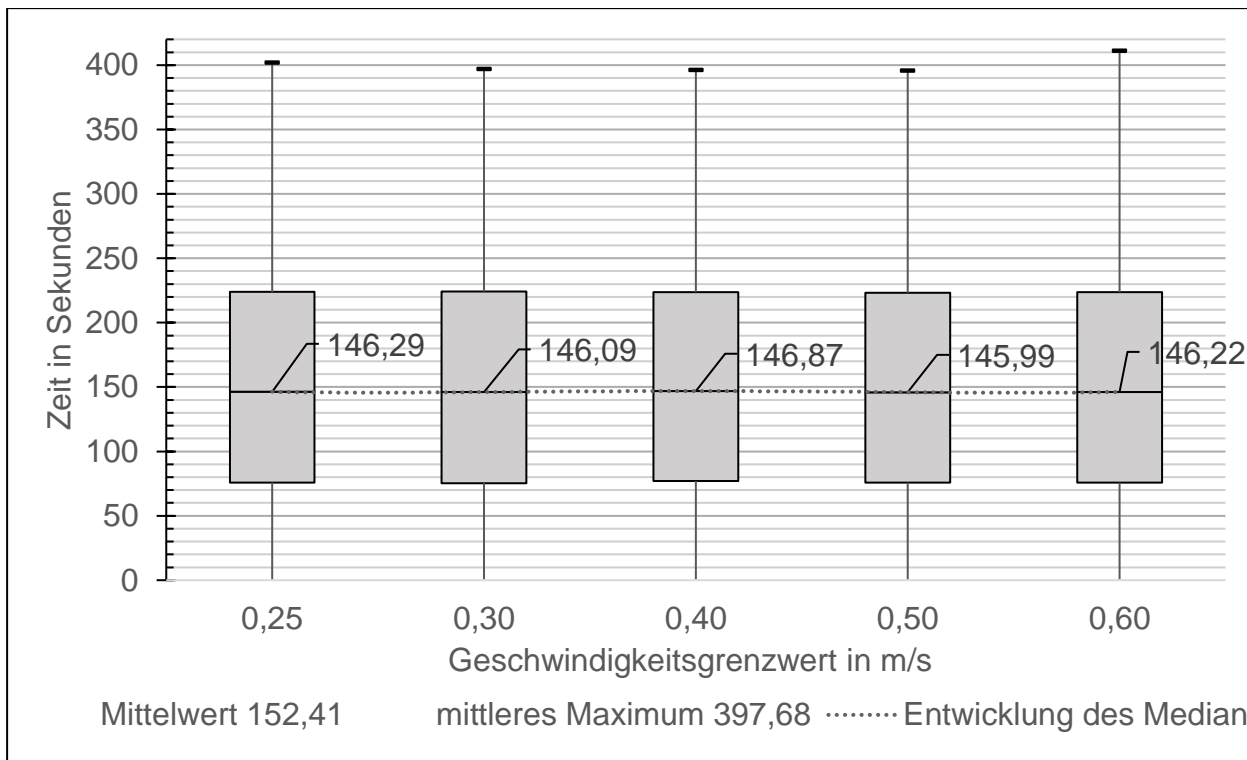


Abbildung A.5-1: Zusammenfassende Darstellung der Zeiten in Bewegung der Agenten mit Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationdurchgängen bei variierten Geschwindigkeitsgrenzwerten

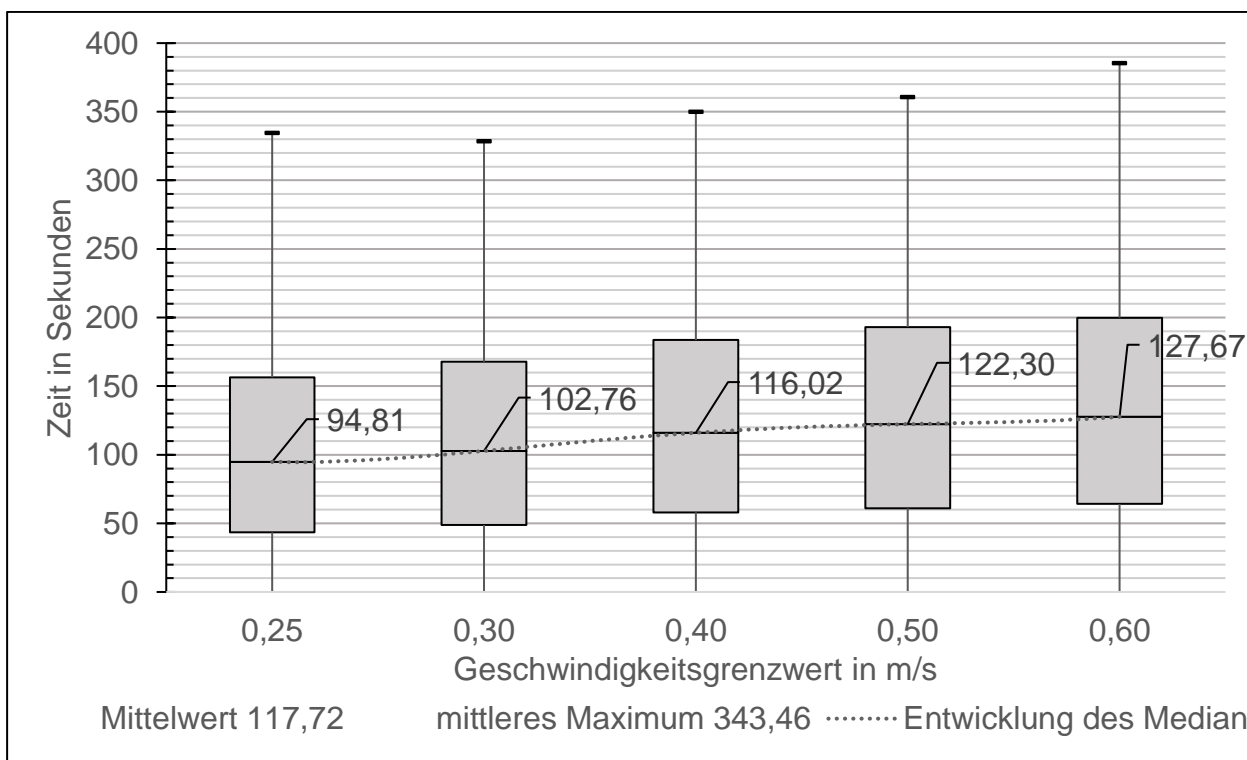


Abbildung A.5-2: Zusammenfassende Darstellung der Gesamtverweildauer der Agenten in Stauungen mit Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationdurchgängen bei variierten Geschwindigkeitsgrenzwerten



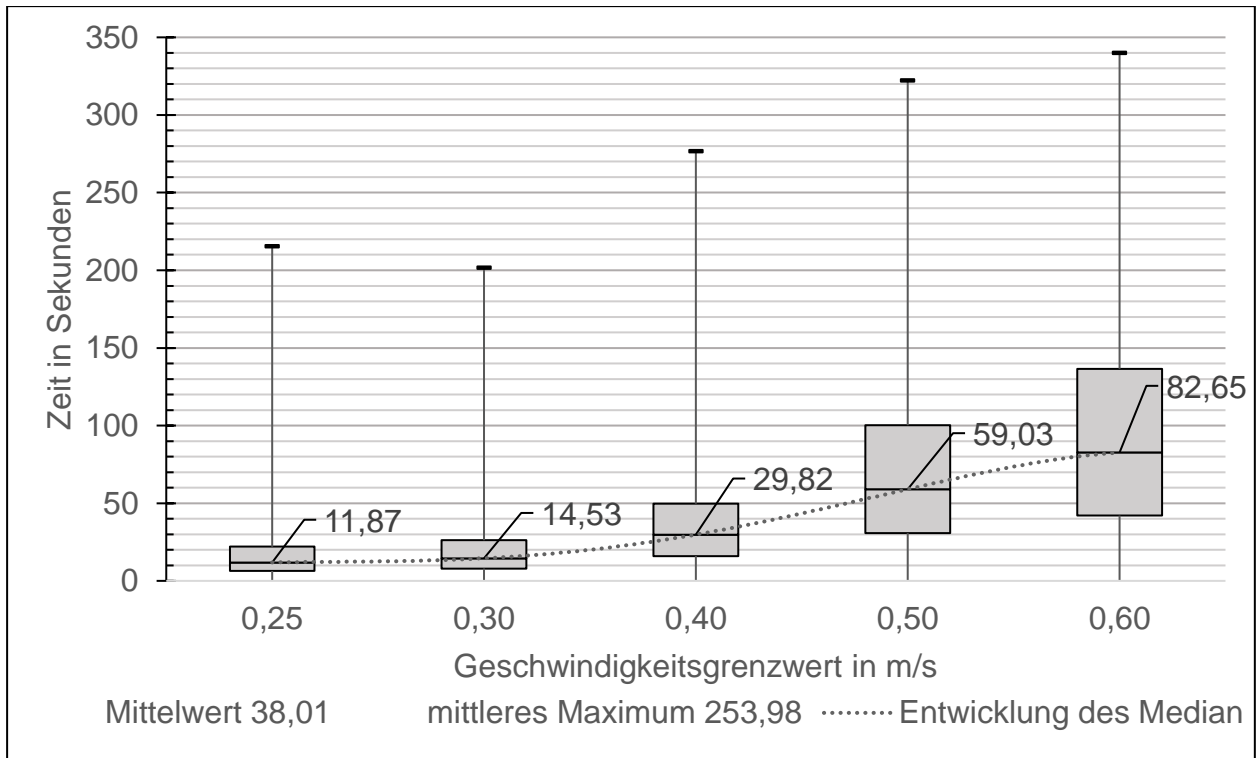


Abbildung A.5-3: Zusammenfassende Darstellung der maximalen kontinuierlichen Verweildauer der Agenten in Stauungen mit Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationdurchgängen bei variierten Geschwindigkeitsgrenzwerten

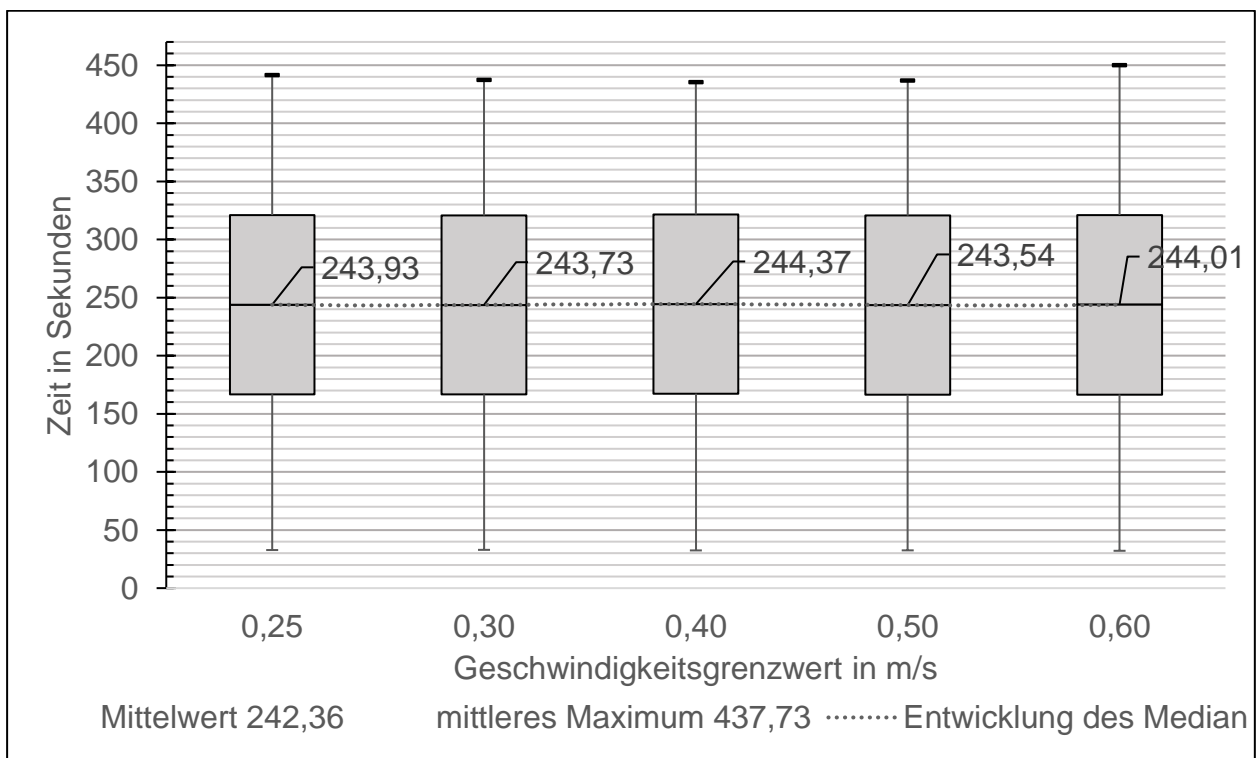


Abbildung A.5-4: Zusammenfassende Darstellung der Zeitpunkte beim Erreichen eines Ausgangs durch die Agenten mit Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationdurchgängen bei variierten Geschwindigkeitsgrenzwerten

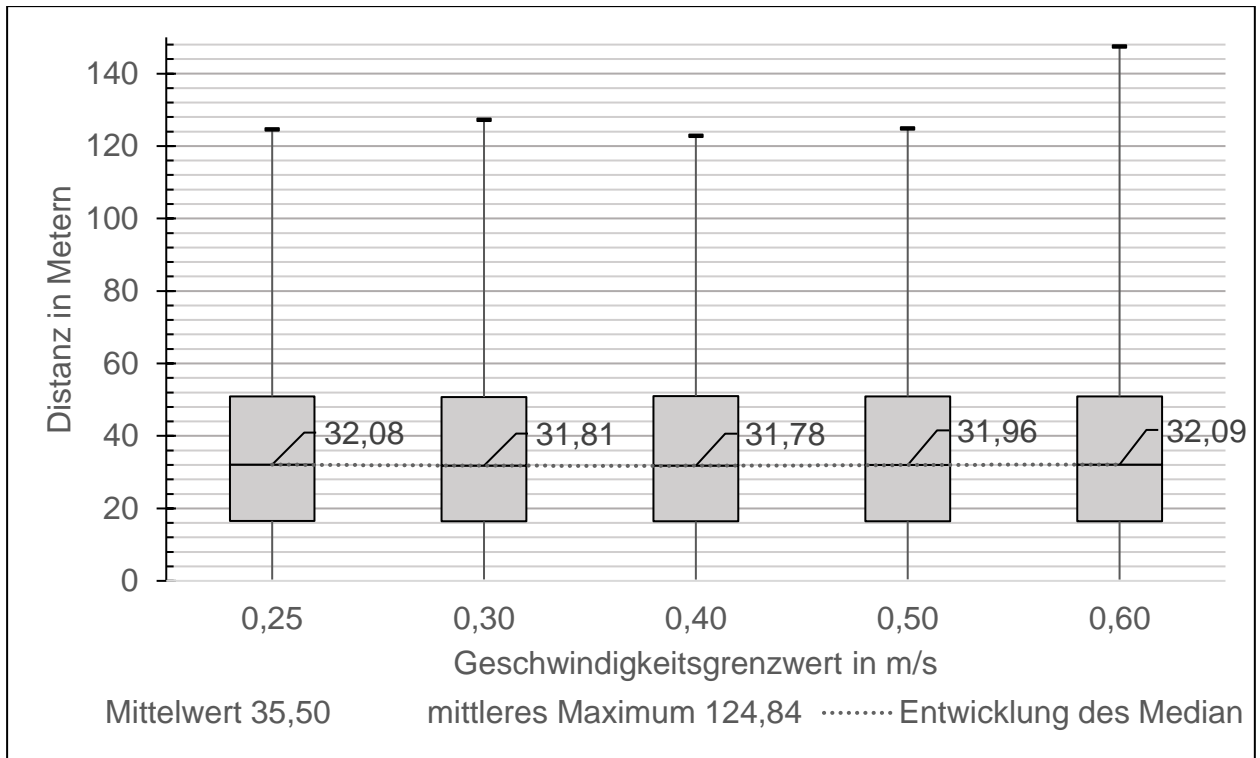


Abbildung A.5-5: Zusammenfassende Darstellung zurückgelegten Wegstrecken durch die Agenten mit Reaktionszeit aus den gemittelten Ergebnissen von je zehn Simulationdurchgängen bei variierten Geschwindigkeitsgrenzwerten

## A.6 Anhang 6: Darstellungen der Agentenzahlen je Ausgänge

Die nachstehenden Grafiken geben einen Überblick über die Verteilung der Agenten auf die Ausgänge in den jeweiligen Modellen. Dargestellt sind die Mittelwerte aus den zehn simulierten Durchgängen.

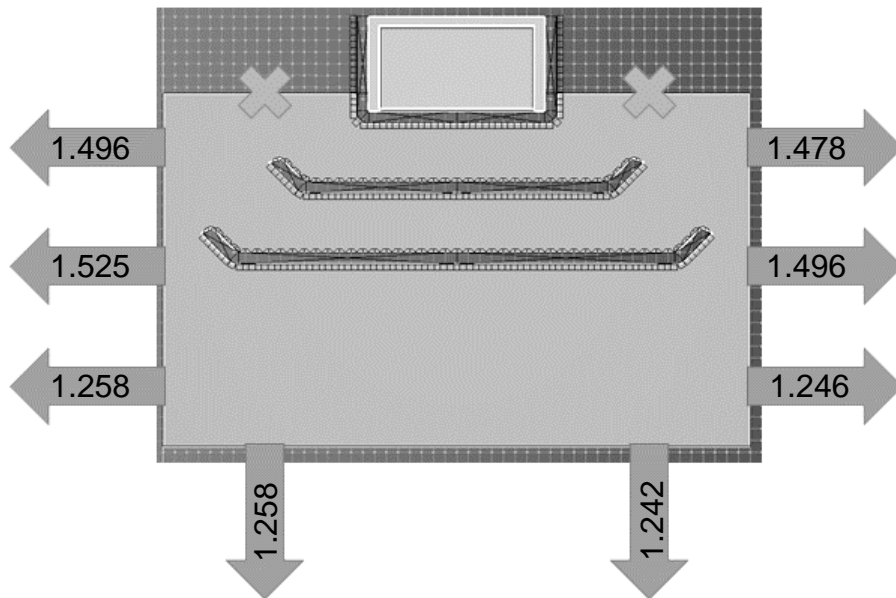


Abbildung A.6-1: Darstellung der zur Verfügung stehenden Ausgänge des ersten Modells mit zugeordneten Mittelwerten der Agentenzahlen je Ausgang

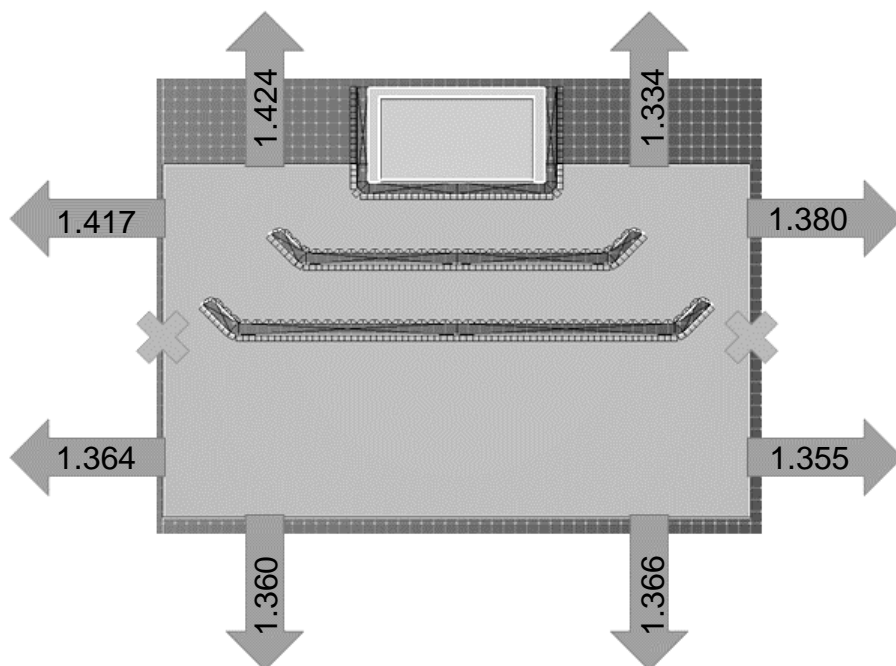


Abbildung A.6-2: Darstellung der zur Verfügung stehenden Ausgänge des zweiten Modells mit zugeordneten Mittelwerten der Agentenzahlen je Ausgang

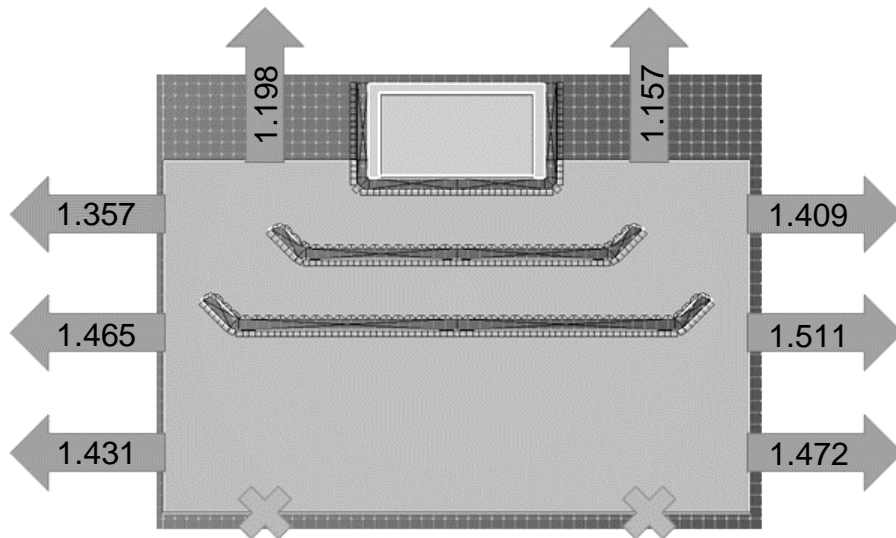


Abbildung A.6-3: Darstellung der zur Verfügung stehenden Ausgänge des dritten Modells mit zugeordneten Mittelwerten der Agentenzahlen je Ausgang

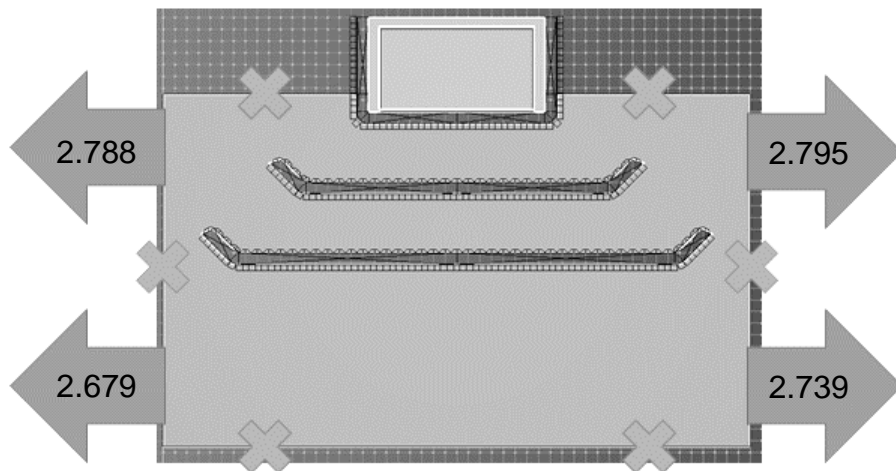


Abbildung A.6-4: Darstellung der zur Verfügung stehenden Ausgänge des vierten Modells mit zugeordneten Mittelwerten der Agentenzahlen je Ausgang

Die nachstehenden Diagramme zeigen die Spannweiten der Agentenzahlen je Ausgang über die zehn simulierten Durchläufe je Modell auf. Aufgetragen sind die Extrema und die Lage der Mittelwerte.

Anhang 6: Darstellungen der Agentenzahlen je Ausgänge

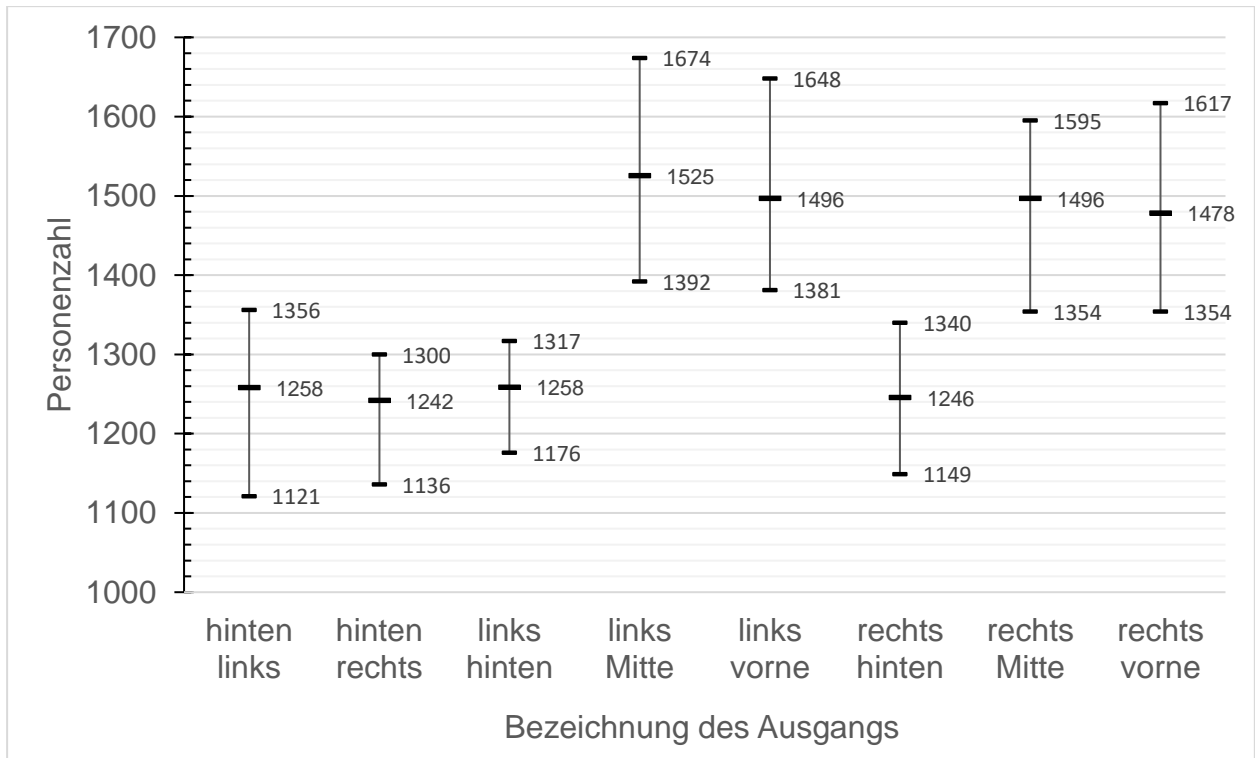


Abbildung A.6-5: Spannweiten der Extrema der Agentenzahlen je Ausgang über die zehn simulierten Durchläufe des ersten Modells mit Lage der Mittelwerte

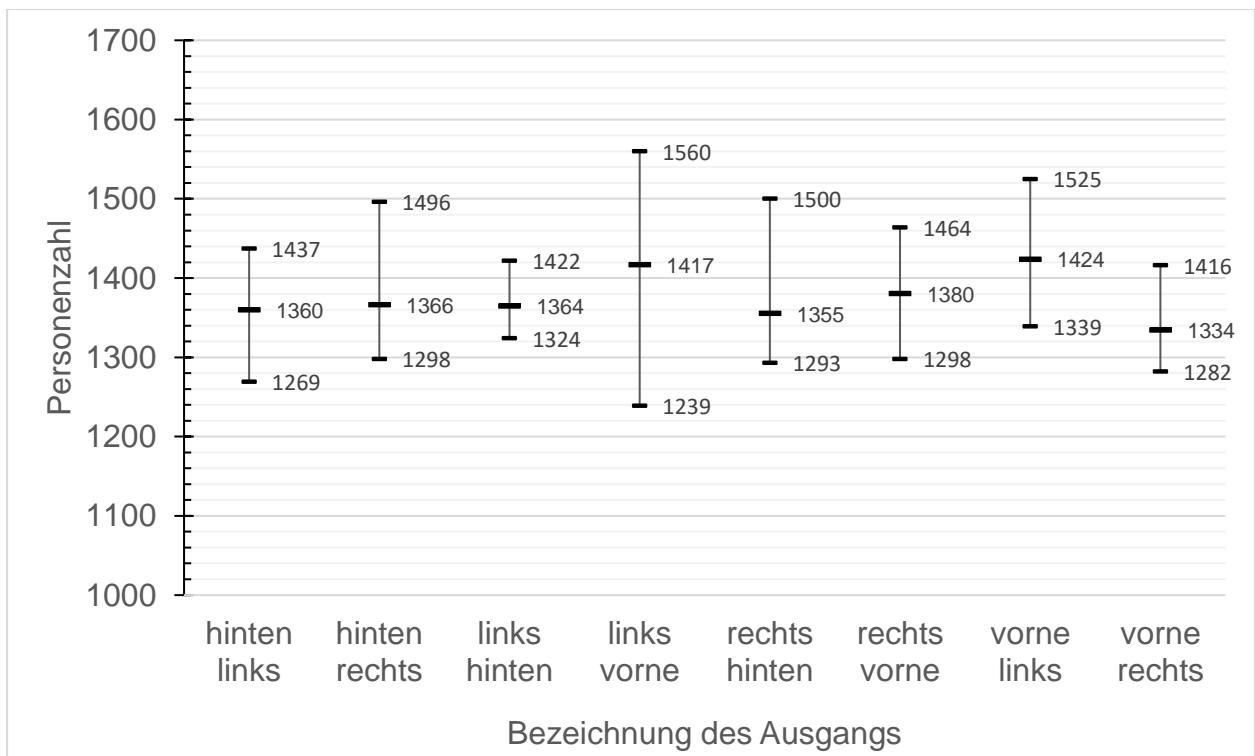


Abbildung A.6-6: Spannweiten der Extrema der Agentenzahlen je Ausgang über die zehn simulierten Durchläufe des zweiten Modells mit Lage der Mittelwerte

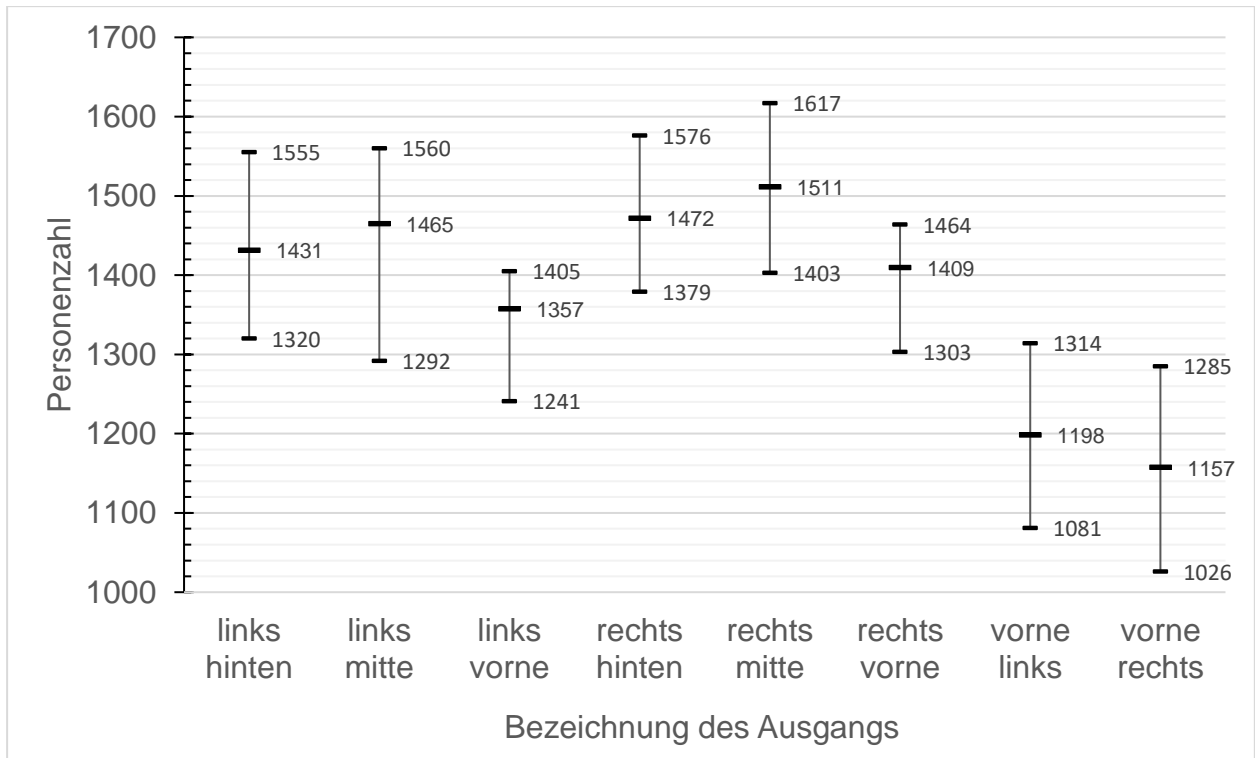


Abbildung A.6-7: Spannweiten der Extrema der Agentenzahlen je Ausgang über die zehn simulierten Durchläufe des dritten Modells mit Lage der Mittelwerte

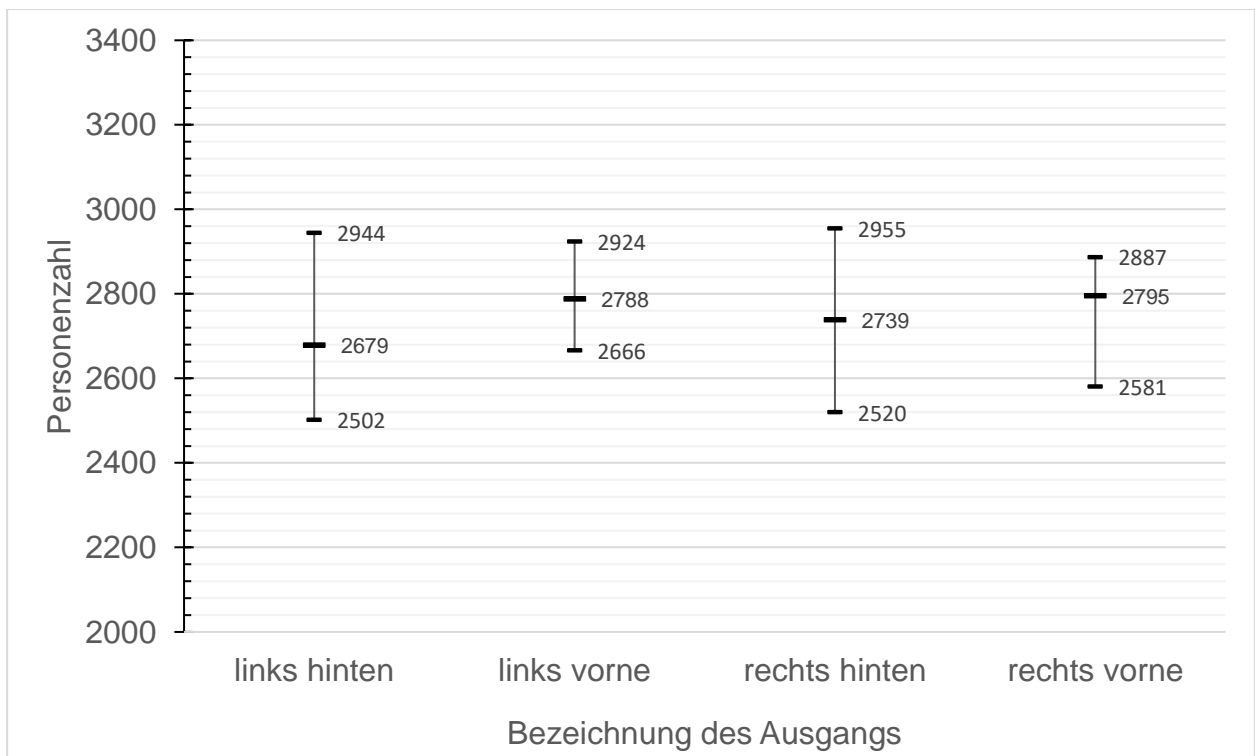


Abbildung A.6-8: Spannweiten der Extrema der Agentenzahlen je Ausgang über die zehn simulierten Durchläufe des vierten Modells mit Lage der Mittelwerte

## A.7 Anhang 7: Grafiken aus Pathfinder Results

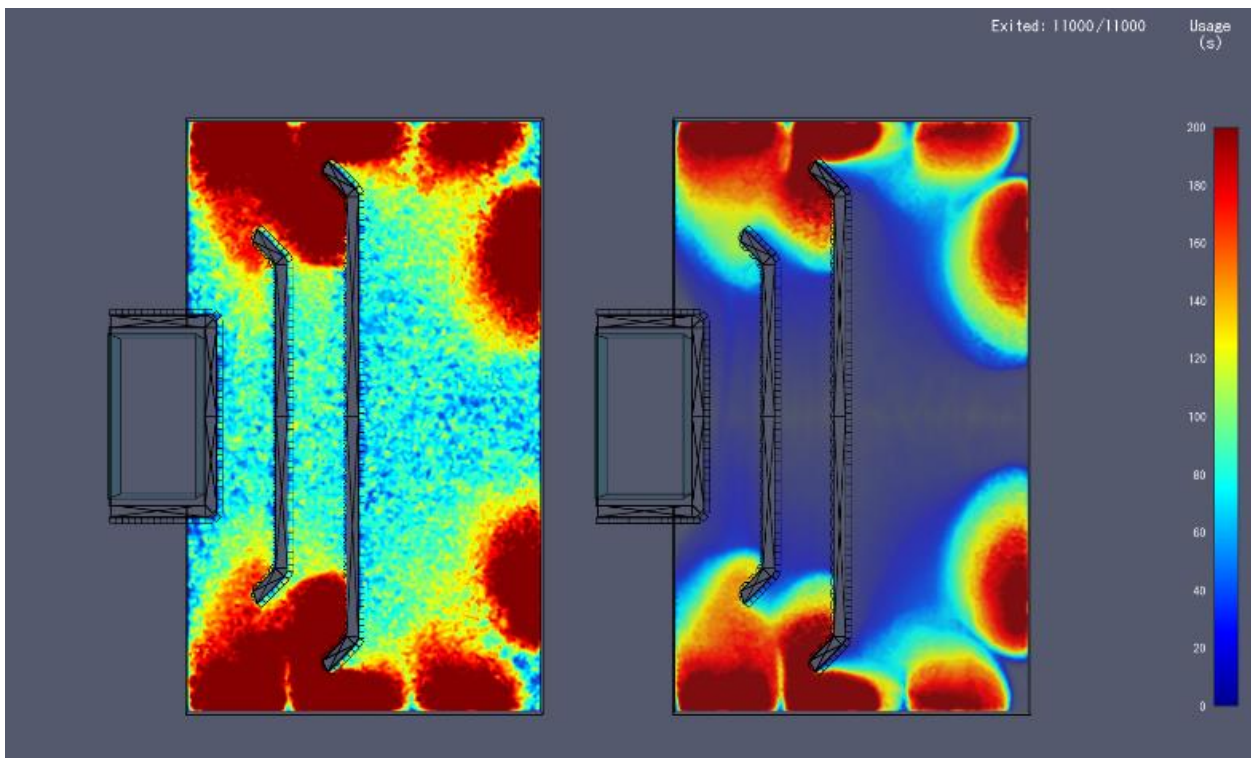


Abbildung A.7-1: Gegenüberstellung der Konturen der kumulierten Nutzung des ersten Modells mit Reaktionszeit (links) und ohne Reaktionszeit (rechts) der Population

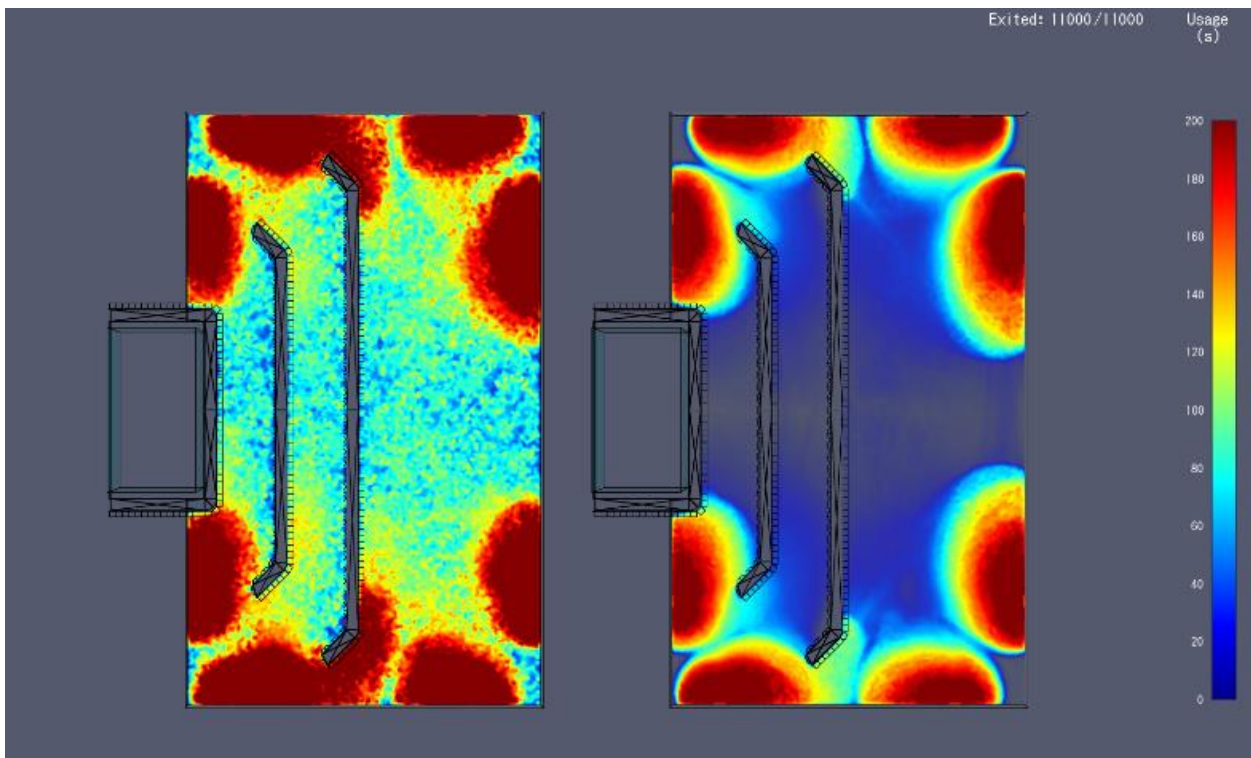


Abbildung A.7-2: Gegenüberstellung der Konturen der kumulierten Nutzung des zweiten Modells mit Reaktionszeit (links) und ohne Reaktionszeit (rechts) der Population



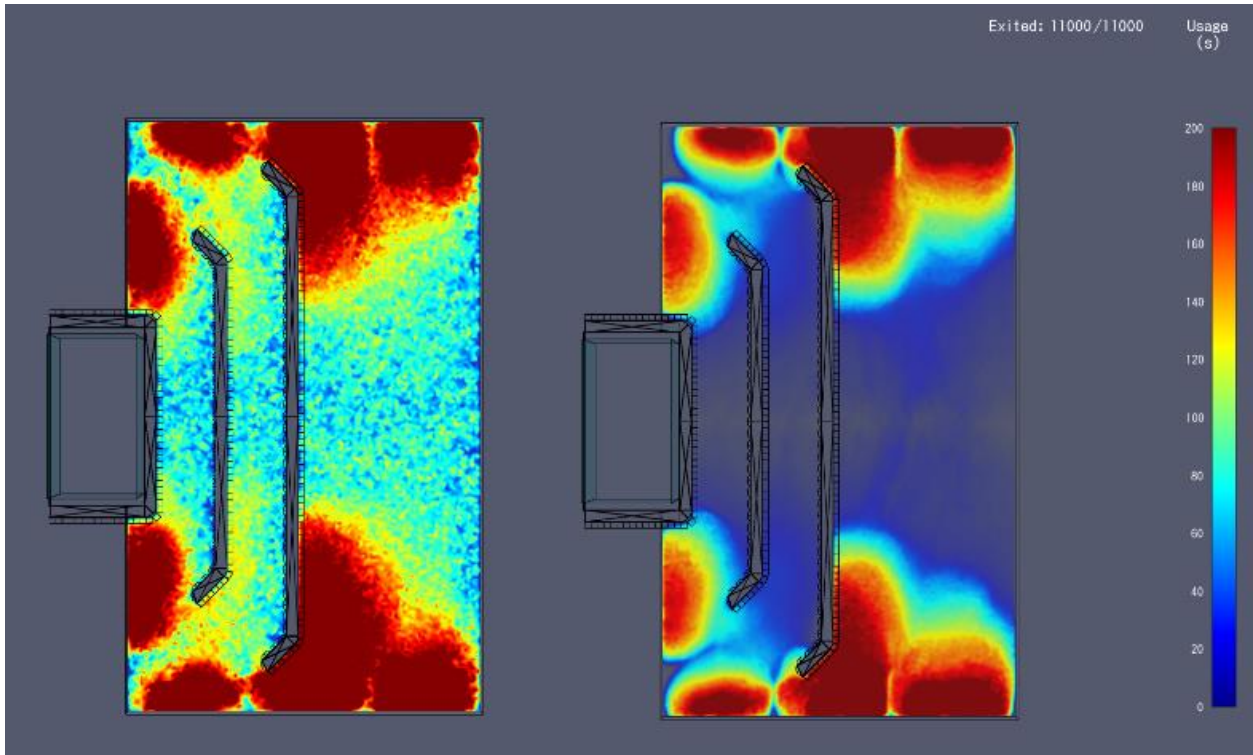


Abbildung A.7-3: Gegenüberstellung der Konturen der kumulierten Nutzung des dritten Modells mit Reaktionszeit (links) und ohne Reaktionszeit (rechts) der Population

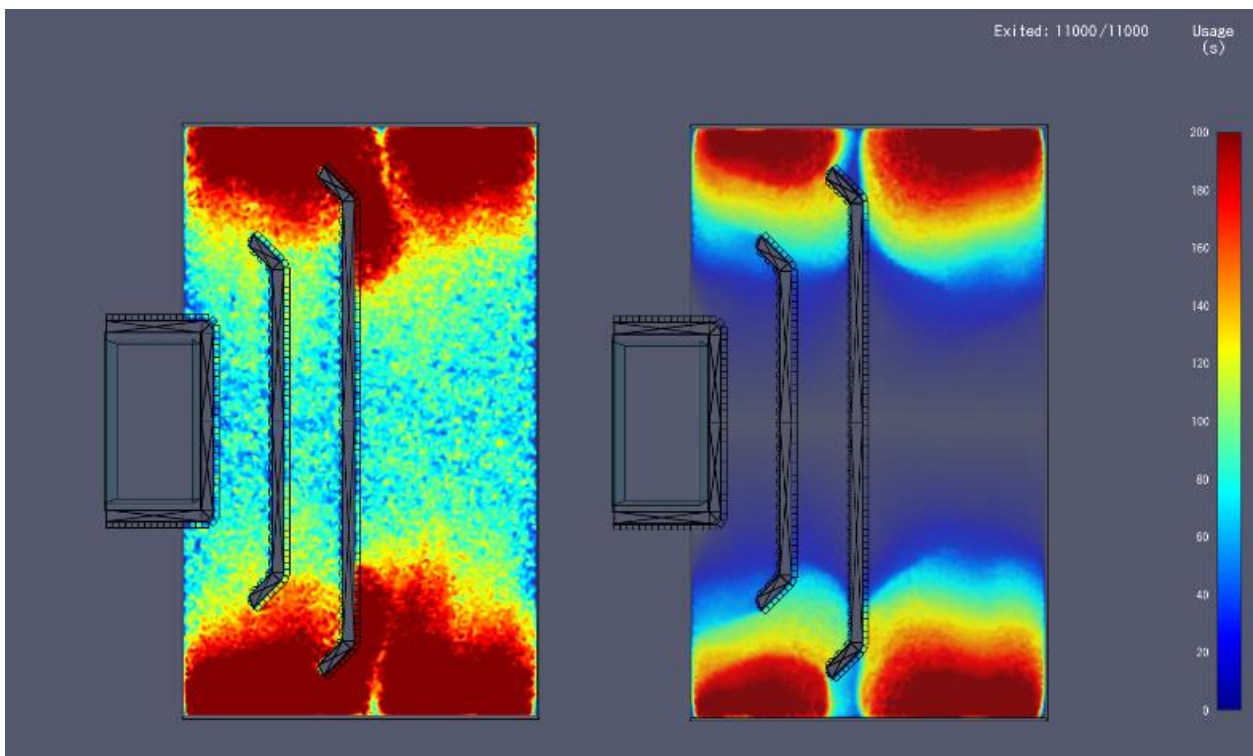


Abbildung A.7-4: Gegenüberstellung der Konturen der kumulierten Nutzung des vierten Modells mit Reaktionszeit (links) und ohne Reaktionszeit (rechts) der Population