



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Fachbereich D – Abteilung Sicherheitstechnik

*Lehr- und Forschungsgebiet Computersimulation
für Brandschutz und Fußgängerverkehr*

Staubildung in Räumungssimulationen unter Einfluss der Personenzahl und Fluchtwegbreite

Master-Thesis

Von

Kira Mielke

1. Prüfer*in: Prof. Armin Seyfried
2. Prüfer*in: Dr. Jette Schumann

Tag der Ausgabe: 05.04.2022

Tag der Abgabe: 01.09.2022

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Methodik	3
2.1 Grundlagen der Räumungsmodelle.....	3
2.1.1 Modellübersicht.....	3
2.1.2 Grundlagen zur Simulationssoftware JuPedSim.....	4
2.1.3 Relevante Parameter der Fußgängerdynamik.....	5
2.1.4 Geschwindigkeitsbasiertes Bewegungsmodell	6
2.1.5 Messmethoden.....	7
2.2 Leistungskriterien	10
2.2.1 Räumungszeiten	10
2.2.2 Wissenschaftliche Erkenntnisse zur Staudefinition.....	11
2.2.3 Kriterien der Staubildung.....	13
2.3 Einfluss von Fluchtwegbreiten auf die Räumungsdynamik	15
2.3.1 Wissenschaftliche Erkenntnisse zum Verhalten in Engstelle	15
2.3.2 Vorgaben aus dem Bau- und Arbeitsrecht.....	16
3 Parameterstudie zur Staudefinition.....	18
3.1 Struktur und Aufbau des Szenarios	18
3.1.1 Struktur der Stauuntersuchung.....	18
3.1.2 Aufbau der Geometrie	19
3.1.3 Parameter der Agenten.....	21
3.2 Grundlagen für die Analyse	23
3.2.1 Messmethode und -flächen	23
3.2.2 Überprüfung der Modellparameter.....	24
3.2.3 Berechnung der Staubeurteilungsfaktoren	26
3.2.4 Betrachtungszeitraum	29
3.3 Analyse der Staudynamik.....	30
3.3.1 Stauphasen.....	30
3.3.2 Staudynamik in der Messfläche M1	33
3.4 Analyse der Staukriterien	34
3.4.1 Staustelle und Staugröße.....	34
3.4.2 Stau- und Wartezeit.....	37

3.4.3	Abstand zur Tür und Geschwindigkeit in der Messfläche M2.....	39
3.5	Auswahl der Geschwindigkeitsgrenze	41
3.6	Diskussion.....	42
4	Vergleich der Staubildung	44
4.1	Struktur und Aufbau der Szenarios.....	44
4.1.1	Struktur der Stauuntersuchung.....	44
4.1.2	Aufbau der Szenarien.....	44
4.2	Bewertung der Staubildung	46
4.2.1	Evakuierungszeit und Fluss.....	46
4.2.2	Dynamik und Stauphasen	47
4.2.3	Staufläche und Staugröße.....	49
4.2.4	Staudichte	54
4.2.5	Warte- und Stauzeiten.....	56
5	Fazit	57
6	Literatur.....	59
	Anhang.....	62
	Anhang 1 – Geometrie Datei.....	62
	Anhang 2 – Konfigurationsdatei JPScore.....	63
	Anhang 3 – Konfigurationsdateien JPSreport	64
	Anhang 4 – Visualisierung Stauzeit.....	67
	Anhang 5 – Konfigurationsdatei JPScore Version 2.....	68
	Anhang 6 – Ergänzung Abbildung 48.....	69
	Eidesstattliche Versicherung	70

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassifizierung von operationalen Modellansätzen, eigene Darstellung in Anlehnung an [27] und [25].	3
Abbildung 2: Funktionen vom „Collision-free speed model“: Optimal speed Funktion (OV), in Anlehnung an [33].	6
Abbildung 3: Funktionen vom „Collision-free speed model“: Repulsions Funktion, in Anlehnung an [33].	7
Abbildung 4: Darstellung der Methoden A-D :Linie „x“ (Methode A), Δx (Methode B), Messfläche „ $b_{corr} * \Delta x$ “ (Methode C) und Voronoi-Zellen (Methode D) in einem Korridor, in Anlehnung an [36]	8
Abbildung 5: Dichte und Geschwindigkeit über die Zeit nach Methode C (classical density/ velocity) und D (Voronoi density/ velocity) und Bestimmung des stationären Zustandes (lila Linien), aus [36].	9
Abbildung 6: Zeitschema zum Abgleich der Räumungszeiten, in Anlehnung an [15]	10
Abbildung 7: LOS nach Weidmann in Verbindung verschiedener Fundamentaldiagramme, aus [35]	11
Abbildung 8: Skizze Fundamentaldiagramm nach Weidmann (und SFPE) inkl. Markierung der Geschwindigkeitsgrenze von 0,7m/s, in Anlehnung an [8, 32].	12
Abbildung 9: Untersuchungsfaktoren einer Staubildung, in Anlehnung an [15]	13
Abbildung 10: Skizze des Reißverschluss-effektes bei ansteigender Breite der Engstelle (x), aus [27, 29]	15
Abbildung 11: Verlauf der Positionen der Personen (Messpunkt am Kopf) in der Engstelle für die Breiten 0,8m und 0,9m nach Seyfried, aus [29]	16
Abbildung 12: Visualisierung der Geometrie.	20
Abbildung 13: Repulsion Funktion (links) und Speed Funktion (rechts) passend zum gewählten Parameterset, in Anlehnung an [33].	22
Abbildung 14: Darstellung der Trajektorien aller Agenten (200) inkl. der Messfläche M1.	23
Abbildung 15: Darstellung der Trajektorien aller Agenten (200) inkl. der Messfläche M2.	23
Abbildung 16: Darstellung der Trajektorien aller Agenten (200) inkl. der Messfläche M3.	24
Abbildung 17: Verlauf von Geschwindigkeit und spez. Fluss in der Messfläche M3 inkl. Vergleich der Werte des vfdb – Leitfaden.	25
Abbildung 18: Vergleich der Daten aus Messfläche M3 und dem Fundamentaldiagramm nach Weidmann.	25
Abbildung 19: Skizzierte Berechnung der Staufläche A_{tc} in Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Agenten und der Geschwindigkeitsgrenze.	26
Abbildung 20: Skizzierte Berechnung der Agentenanzahl am Beispiel $N_{tc} = 3$ in Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Agenten und der Geschwindigkeitsgrenze.	27
Abbildung 21: Skizzierte Berechnung der Stauzeit t_S in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsverlaufes verschiedener Agenten und der Geschwindigkeitsgrenze.	27
Abbildung 22: Skizzierte Berechnung der Wartezeit $t_{w,i}$ eines Agenten n Abhängigkeit der Geschwindigkeitsgrenze.	28
Abbildung 23: Darstellung der Trajektorien aller Agenten (200) bis zum Start des Betrachtungszeitraumes bei 3.625 s.	29
Abbildung 24: Individuelle Geschwindigkeiten der Agenten in der Messfläche M2 über die Zeit.	30

Abbildung 25: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten zum Zeitpunkt 5, 10, 15.....	31
Abbildung 26: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten zum Zeitpunkt 22 bis 47 s	31
Abbildung 27: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten zum Zeitpunkt 50 bis 90 s.	32
Abbildung 28: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten zum Zeitpunkt 100 bis 120 s.	32
Abbildung 29: Dichte- und Geschwindigkeitsverlauf der Messfläche M1.....	33
Abbildung 30: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten (15, 55 und 105 s) inkl. der Messfläche M1.	33
Abbildung 31: Skizzierte Form des dynamischen Staus (links) und statischen Staus (rechts) in Bezug zur jeweiligen Geschwindigkeitsgrenze (Beispiele).	34
Abbildung 32: Maximale Staufläche über die Zeit in Bezug zur jeweiligen Geschwindigkeitsgrenze.....	35
Abbildung 33: Verlauf der – mittleren individuellen – Dichte in Messfläche M2.....	35
Abbildung 34: Veränderung der Stauform in der Stauentwicklungsphase anhand der Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen.....	36
Abbildung 35: Maximale Staugröße/ Anzahl an Agenten im Stau über die Zeit in Bezug zur jeweiligen Geschwindigkeitsgrenze.	36
Abbildung 36: Histogramm der Wartezeiten nach Geschwindigkeitsgrenze (Gruppierung auf 10s).....	37
Abbildung 37: Boxplot-Diagramm zu Verteilung der Wartezeiten nach Geschwindigkeitsgrenze.....	38
Abbildung 38: Maximaler Abstand der Agenten in Bezug zur jeweiligen Geschwindigkeitsgrenze.....	39
Abbildung 39: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten inkl. Markierung der relevanten Agenten für die Betrachtung des Abstandes zum Zeitpunkt 7.125s.	39
Abbildung 40: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten inkl. Markierung einer Blockade.....	40
Abbildung 41: Maximaler Abstand zur Mitte der Tür (Ausgang A).....	40
Abbildung 42: Verlauf der Geschwindigkeit bei einem veränderten Parameterset (gemäß Anhang 5).....	42
Abbildung 43: Beispiel der Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen (zum Zeitpunkt 16s) bei veränderten Modellparametern (gemäß Anhang 5)	43
Abbildung 44: Skizzierte Darstellung der Berechnung der Staufläche im Bereich der Engstelle mittels Individueller Voronoi-Daten.	43
Abbildung 45: Darstellung der Geometrie mit den veränderten Ausgangsbreiten.	45
Abbildung 46: Durchschnittliche Evakuierungszeiten (der Messfläche M2).....	46
Abbildung 47: Maximaler, minimaler und mittlerer Fluss (links) und spezifischer Fluss (rechts) in der Messfläche M3.	46
Abbildung 48: Übereinandergelegte Laufwege aller Agenten im Korridor über den gesamten Zeitraum der Simulation (am Beispiel von 3 Szenarien).	47

Abbildung 49: Verlauf der individuellen Geschwindigkeiten der fünf Szenarien im Raum inkl. Stauphasen von 200-1.2 (oben) nach 300-1.5 (mittig) 400-2.4 (unten).....	48
Abbildung 50: Position der Agenten des Szenarios 400-2.4 bei $t = 5s$	49
Abbildung 51: Staupfläche über die Zeit im Vergleich der 5 Szenarien.....	50
Abbildung 52: Staugröße über die Zeit im Vergleich der fünf Szenarien.	50
Abbildung 53: Prozentuale Staugröße über die Zeit im Vergleich der fünf Szenarien.	51
Abbildung 54: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten zum Zeitpunkt der maximale Staupfläche und Staugröße der fünf Szenarien.	52
Abbildung 55: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten zum Beginn der stationären Stauphase der fünf Szenarien.....	53
Abbildung 56: Mittlere Staudichte über die Zeit in Bezug zu den Stauphasen.	54
Abbildung 57: Maximalen Dichte im Stau der fünf Szenarien.....	55
Abbildung 58: Ausschnitt der Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen zum jeweiligen Zeitpunkt der Maximalen Dichte.....	55
Abbildung 59: Stauzeit (links) und prozentuale Stauzeit (rechts) der fünf Szenarien im Vergleich.	56
Abbildung 60: Boxplot-Diagramm zur Verteilung der Wartezeiten der 5 Szenarien.....	56

Abkürzungsverzeichnis

ArbStättV	Arbeitsstättenverordnung
ASR	Technische Regeln für Arbeitsstätten
MVStättVO	Muster-Versammlungsstättenverordnung
RiMEA	Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen
LOS	Level of Service
Vfdb	Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes

1 Einleitung

Das deutsche Baurecht [17] begründet seine Vorgaben im Bereich des Brandschutzes in folgenden fünf Schutzziele: dem Schutz vor Rauch und Feuer, dem Ermöglichen von wirksamen Löscharbeiten und der Rettung von Mensch und Tier. Werden die präskriptiven Anforderungen aus dem Baurecht nicht erfüllt, können diese mittels ingenieurtechnischer Verfahren nachgewiesen werden.

In Bezug auf das Schutzziel der Rettung von Menschen, gibt es verschiedene präskriptive Anforderungen in Verordnungen, Richtlinien und Normen, die sich mit der Planung und Ausführung von Flucht- und Rettungswegen auseinandersetzen. Dabei werden beispielsweise in der Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättVO) [18] horizontale Fluchtwegbreiten im proportionalen Verhältnis zur Personenanzahl vorgegeben. Im Arbeitsschutzrecht [10] bauen die zugehörigen Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) A2.3 [9] für horizontale Fluchtwege, ab einer Anzahl von 200 Personen, auf einem vergleichbaren Verhältnis von Fluchtwegbreiten zur Personenanzahl auf. Dabei werden, seit der Aktualisierung der ASR A2.3 im Frühjahr 2022, in beiden genannten Regelwerken Interpolationen erlaubt. Seitdem spiegeln beide Vorgaben die Erkenntnisse aus dem linearen Zusammenhang zwischen Fluss- und Fluchtwegbreite aus der Forschung. Daraus abgeleitet wird in den Vorgaben davon ausgegangen, bei der vorgegebenen proportionalen Veränderung der zwei Parameter, Fluchtwegbreite und Personenanzahl, das Schutzziel bei der Räumung gleichermaßen erfüllen können. Dabei gibt es die Möglichkeit den Räumungsablauf mittels passender Szenarien zu simulieren in und zu untersuchen. Die Anwendung von Simulationen zieht, aufgrund der Verlässlichkeit und der Richtigkeit von Softwareprogrammen sowie der darin verwendeten Szenarien- und Parameterauswahl, viele Annahmen mit sich.

Die Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen (RiMEA) [26] strebt dabei eine Grundlage zur Standardisierung für Aufbau und Analyse von Räumungssimulationen an. Zudem wird derzeit, ergänzend zur DIN 18009-1 – Brandschutzingenieurwesen Teil 1: Grundsätze und Regeln für die Anwendung [13], ein Teil 2 in Bezug auf Räumungssimulation und Personensicherheit [15] entwickelt. Im derzeitigen Entwurf stellt diese unter anderem Begriffe, Berechnungsmodelle, Grundlagen zum Aufbau der Szenarien, Parameterverteilungen und Leistungskriterien vor. Dabei werden neben den zeitbezogenen Leistungskriterien, die bisher bei der Analyse von Räumungsszenarien ausschlaggebend sind, auch Staubeurteilungskriterien eingeführt. Die Problematik bei der Anwendung dieser Kriterien ergibt sich allerdings aufgrund einer unzureichenden und modellabhängigen Staudefinition.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Staubildung bei proportionaler Veränderung der Personenanzahl und horizontalen Fluchtwegbreite auf Basis einer eigenen Staudefinition zu untersuchen. Dafür werden im Rahmen dieser Arbeit zu Beginn die wichtigsten Aspekte in Bezug auf mögliche Berechnungsmodelle und deren relevanten Parameter sowie der Aufbau von Räumungssimulationen und deren Analysemöglichkeiten eingeführt. Anschließend werden die zeitbezogenen Leistungskriterien sowie die derzeit bekannten Ansätze zur Staudefinition und Staubeurteilung mit Fokus auf die DIN 18009-2 (Entwurf) [15] erläutert. Im letzten Teil der Grundlagen werden, angelehnt an das Ziel dieser Arbeit, die relevanten wissenschaftlichen Erkenntnisse sowie Verordnungen und Richtlinien in Bezug auf proportionale Fluchtwegbreiten und Personenanzahl beleuchtet.

Anschließend folgt die Stauuntersuchung zur Staudefinition mittels einer festzulegenden Geschwindigkeitsgrenze, die für alle Agenten in der Simulation individuell angewendet wird. Zur Einführung in das Kapitel wird vorerst die Struktur und die grundlegenden Annahmen bezüglich des folgenden Entwicklungs- und Analyseprozesses der Szenarien näher beschrieben. Anschließend folgt die Vorstellung des ausgewählten Szenarios in Bezug auf die Auswahl der Geometrie und Modellparameter. Dabei bilden die Fluchtwegbreiten der ASR A2.3 und das Geschwindigkeitsmodell die Basis für das festgelegte Szenario. Zur Vorbereitung der Analyse werden zudem weitere Annahmen und Berechnungen aufgestellt. Die folgende Analyse umfasst sowohl die allgemeine Dynamik in der Geometrie in Bezug auf den Ablauf der Stauentwicklung als auch die Betrachtung der Staukriterien nach DIN 18009-Teil 2 (Entwurf). Zur Festlegung der Staudefinition für das gewählte Szenario und dessen Modellparameter stehen dabei die Betrachtung unterschiedlicher Geschwindigkeitsgrenzen im Fokus.

Die zweite Analyse befasst sich mit der Anwendung der Staudefinition dieser Arbeit und der Staubeurteilung für Fluchtwegszenarien, die nach dem Prinzip des proportionalen Verhältnisses von Fluchtwegbreite und Personenanzahl in Anlehnung an die ASR A2.3 ausgelegt werden. Die Struktur der Analyse und der Aufbau der Szenarien werden am Anfang des Kapitels näher eingeführt. Der Vergleich der Szenarien basiert zu Beginn auf der Untersuchung der Zeitfaktoren und Flüsse sowie der Dynamik in der Geometrie in Verbindung mit den Kenntnissen aus der vorhergegangenen Analyse. Anschließend stehen die eingeführten Staukriterien und deren Entwicklungen über die Zeit sowie die Untersuchung von Zusammenhängen dieser im Fokus. Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit werden im Fazit zusammengefasst und mit einem Ausblick verknüpft.

2 Grundlagen und Methodik

2.1 Grundlagen der Räumungsmodelle

2.1.1 Modellübersicht

Bei der Anwendung von ingenieurtechnischen Verfahren kann nach DIN 18009-1 [13] zwischen argumentativer und leistungsbezogener Nachweisführung differenziert werden. Bei der leistungsbezogenen Nachweisführung werden sich dabei verschiedener (Berechnungs-) Modelle bedient. Diese basieren, in Bezug auf die Räumung von Personen, gemäß aktueller Literatur [27] auf der Grundlage dreier Verhaltensebenen: der strategischen, taktischen oder operationalen Ebene. Auf der übergeordneten strategischen Ebene wird die Entscheidung zur Bewegung und dessen Reihenfolge getroffen. Darauf aufbauend umfasst die taktische Ebene kurzfristige Entscheidungen, wie die Auswahl der Route. Beide Ebenen werden von Umwelteinflüssen wie beispielweise aus der Soziologie oder der Psychologie beeinflusst. Auf der letzten Ebene, der operationalen Ebene, wird schließlich das detaillierte Gehverhalten beschrieben, welches unter anderem die Beeinflussung von Personen untereinander berücksichtigt und in Abhängigkeit von Hindernissen steht.

Die meisten operationalen Modelle basieren auf bekannten Bewegungsmustern aus der Physik, denen vergleichbare Eigenschaften zugeschrieben werden. Dabei ist das Ziel ein möglichst einfaches, jedoch realistisches und reproduzierbares Modell zu entwickeln. Neben den Verhaltensebenen sind Modelle weitere Charakteristika zuzuordnen, die sich nach [27] und [25] entsprechend der Abbildung 1 klassifizieren lassen:

Beschreibung	Makroskopisch ➤ Betrachtung von Personenmenge	vs.	Mikroskopisch ➤ Betrachtung von einzelnen Personen
Variablen	Diskret ➤ Abgestufte Betrachtung von Zeit/ Ort/...	vs.	Kontinuierlich ➤ durchgehende Betrachtung von Zeit/ Ort/...
Dynamik	Deterministisch ➤ Eindeutige Berechnung von Datenpunkten	vs.	Stochastisch ➤ Einfluss von Zufallszahlen einzelner Parameter
Wechselwirkungen (Bsp.)	Regel basiert ➤ Entscheidungsmuster	vs.	Kraft basiert ➤ Von Hindernissen etc. wirken Kräfte
Genauigkeit	Hoch	vs.	Niedrig

Abbildung 1: Klassifizierung von operationalen Modellansätzen, eigene Darstellung in Anlehnung an [27] und [25].

Eine grundlegende Unterscheidung der Modelle betrifft die Einordnung in ein makro- oder mikroskopisches Modell. Makroskopische bzw. Strömungsmodelle orientieren sich an der Bewegung eines Personenstroms. Mit diesen Modellen werden vor allem Kapazitäten oder die Bewegungsdynamik von gesamten Personenströmen berechnet. Mikroskopische bzw. Individualmodelle können hingegen die Bewegungen individuell detailliert über Raum und Zeit

abbilden. Dabei werden Geometrien modelliert und Personeneigenschaften festgelegt, um die Bewegungen einzelner Personen in der Gruppe auf Grundlage physikalischer Modelle zu berechnen [27, 35]. Zudem wird bei der Verwendung von Simulationsmodellen zur Stabilisation der Ergebnisse mehrfache Berechnungen empfohlen [26, 35].

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen sind Räumungssimulationen mikroskopisches Modelle, für deren Szenarios nach [26] zwei Eingabegrößen festzulegen sind: eine Geometrie und eine Population. Die Geometrie stellt dabei die räumliche Struktur des Gebäudes und der Fluchtwege dar. Grundsätzlich wird in der Geometrie zwischen Ebenen, Hindernisse, Wänden, Treppen, Türen, Rampen oder Ausgängen unterschieden. In Bezug auf die Variable des Raumes kann die Berechnung einerseits in raumdiskreten Modellen bzw. in Zellularautomaten stattfinden. Hierbei werden Geometrien in eine Gitterstruktur überführt und daran die Bewegungen der Agenten – Personen in Simulationen – bzw. ihre Laufwege angepasst. In raumkontinuierlichen Modellen besteht die Geometrie andererseits aus einer freien Fläche, welche nur durch Wände und Hindernisse begrenzt wird. Aufgrund der Komplexität ergibt sich bei raumkontinuierlichen Modellen viel Flexibilität, aber auch eine hohe Rechenkapazität. [26, 35].

Die Population umfasst nach [26] die Eigenschaften der Agenten. Dabei kann die Zusammensetzung der Population hinsichtlich der Reaktionszeiten, freien Geschwindigkeiten für Ebenen und Treppen, Anfangsverteilung und Altersverteilung relevant sein. Bezüglich der Eigenschaften von Agenten enthalten unter anderem der Leitfaden der Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes (vfdb) zu Ingenieurmethoden des Brandschutzes [35], den Entwurf der DIN 18009-2 [15] und die RiMEA Richtlinie [26] Vorschläge zur Festlegung von den möglichen Zeitfaktoren, Verteilung von Altersgruppen und freien Geschwindigkeiten in mikroskopischen Modellen. Zudem werden in mikroskopischen Modellen, in Bezug auf die Eigenschaften von Agenten, wie zum Beispiel für den Platzbedarf, oft Verteilungsmodelle verwendet. Ein Faktor, der in mikroskopischen Modellen noch keine Anwendung findet, sind die psychologischen Einflüsse, da bisher keine wissenschaftlich fundierte Grundlage diesbezüglich vorliegt [26, 35].

2.1.2 Grundlagen zur Simulationssoftware JuPedSim

In dieser Arbeit findet das Software Programm JuPedSim Anwendung, welches ein 2-dimensionales Open Source Programm zur Simulation, Analyse und Visualisierung von Fußgängerdynamiken ist [3]. Das Programm wird seit 2012 stetig weiterentwickelt [2] und besteht aus 4 Komponenten:

- JPSeditor: zur Erstellung und Bearbeitung der Geometrie-Datei
- JPSScore: Berechnungsmodul der Trajektorien
- JPSreport: Analyse von Trajektorien
- JPSvis: zur Visualisierung von Geometrien und Trajektorien [3]

Alle Informationen zur Software über Installation, Aufbau der Geometrie und Konfigurationsdateien sowie Operationale Modelle und Analysemethoden werden auf der Website [<https://www.jupedsim.org/index.html>] zur Verfügung gestellt.

Für die Berechnung der Simulation werden dem Modul JPScore die Eingangsparameter der Agenten in einer Konfigurationsdatei und die Geometrie als xml-Dateien vorgegeben. Die Ausgabe-Datei enthält dann Informationen zu den Laufwegen der Agenten pro Zeitschritt bzw. Frame.

In der Konfigurationsdatei können in Verbindung mit der Geometrie zudem Eigenschaften von Türen, Ziele, Wartezonen festgelegt werden. In Bezug auf die Agenten können verschiedene Agentengruppen erzeugt werden, für die unter anderem folgende Parameter festgelegt werden können: Anzahl der Agenten, Raum der Anfangsposition, Begrenzungen der Fläche der Anfangsverteilung in X- und Y-Richtung, Ziel(-raum) der Agenten, ein „Router“ zur Navigation und Zielfindung in der Geometrie und das Bewegungsmodell [4].

Beispiele für raumkontinuierliche Bewegungsmodelle sind das Social-Force-Modell und das Optimal-Velocity-Modell bzw. Geschwindigkeitsmodell. Im Social-Force-Modell berechnen sich die Laufwege bzw. Geschwindigkeiten aus der Wirkung von Kräften. Darunter die antreibende Kraft des Agenten, der die freie Geschwindigkeit anstrebt, die umweltbezogenen Kräfte ausgehend der umliegenden Agenten und die physikalischen Kräfte aufgrund von Reibung und Kompression, die sich beispielsweise in hohen Dichten ergeben [27]. Das in dieser Arbeit verwendete Geschwindigkeitsmodell wird nach Einführung der relevanten Parameter in Kapitel 2.1.4 näher erläutert.

2.1.3 Relevante Parameter der Fußgängerdynamik

Vor der Vorstellung des verwendeten Geschwindigkeitsmodells in Kap. 2.1.4, erfolgt zunächst eine allgemeine Einführung der relevanten Parameter der Dichte und des Flusses sowie derer Zusammenhänge zur Geschwindigkeit.

Im Bereich der Fußgängerdynamik basieren viele Erkenntnisse für makro- und mikroskopische Modelle auf Fundamentaldiagrammen. Fundamentaldiagramme dienen nach [27] zur Charakterisierung von Fußgängersystemen und stellen einen Zusammenhang zwischen Dichte, Fluss und Geschwindigkeit ($J(\rho)$, $v(J)$ oder $v(\rho)$) dar. Aufgrund unterschiedlicher Definition der Parameter und unterschiedlicher Experimente, ergeben sich unterschiedliche Verläufe für die Zusammenhänge in verschiedenen Studien. Bekannte Daten für Zusammenhänge kommen unter anderem von Preditischinski und Melinski, Weidmann, Nelson, Mowrer und dem SFPE-Handbuch [15, 27, 32].

Allgemein ergibt sich die Personendichte ρ aus der Betrachtung von Personen N pro Fläche bzw. Flächeneinheit A [15].

$$\rho = \frac{N}{A} \left[\frac{1}{qm} \right] \quad \text{Formel 1}$$

Die allgemeine Definition des Personenflusses J ist die Anzahl der Personen, die ein Element pro Zeitabschnitt passieren [23, 27]. Zusätzlich kann der Fluss aus dem hydrodynamischen Zusammenhang mittels Breite des Wegeelementes und der mittleren Dichte und Geschwindigkeit der Person ermittelt werden [25, 27].

$$J = \frac{N}{\Delta t} = \rho * v * b \left[\frac{1}{s} \right] \quad \text{Formel 2}$$

Da dieser Fluss in Abhängigkeit der Breite b des Wegeelementes steht, kann der Fluss auf den spezifischen Fluss pro Meter umgerechnet werden [15, 23, 29]

$$J_s = \frac{J}{b} = \rho * v \left[\frac{1}{s*m} \right] \quad \text{Formel 3}$$

Die Geschwindigkeit von Personen ist zudem abhängig von der freien Gehgeschwindigkeit. Diese kann nach [26] nur bei einer sehr geringen Personendichte erreicht werden, wenn sie sich uneingeschränkt bewegen können und ist nach [15] zudem vom Wegeelement, beispielsweise horizontaler Weg oder Treppe, und seiner Beschaffenheit abhängig.

2.1.4 Geschwindigkeitsbasiertes Bewegungsmodell

Das Velocity Model oder auch „Collision-free speed model“ berechnet die Geschwindigkeiten und Richtungsvektoren der Agenten auf Basis des Abstandes der Agenten sowie der Repulsion (Abstoßung), aus der eine Änderung des Abstandes der Agenten folgt. Die Darstellung der Agenten ist in diesem Modell kreisförmig. Die Geschwindigkeit der Agenten wird in dem Modell mittels einer Geschwindigkeitsfunktion „optimal speed“ (OV), anhand der freien Geschwindigkeit (v_o), dem Durchmesser der kreisförmigen Agenten (l), dem Abstand zum Mittelpunkt der anderen Agenten (s) und der „Time gap“ (T), die die Trägheit des Folgeverhalten darstellt ermittelt (siehe Formel 4 und Abbildung 2) [33].

$$V(s) = \min \left\{ v_o, \max \left\{ 0, \frac{s-l}{T} \right\} \right\} \quad \text{Formel 4}$$

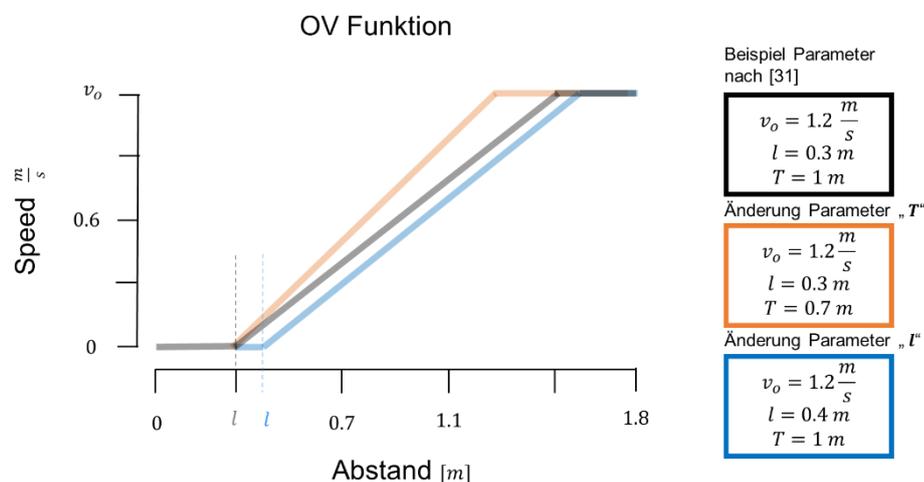


Abbildung 2: Funktionen vom „Collision-free speed model“: Optimal speed Funktion (OV), in Anlehnung an [33].

Zusätzlich wird die Abstoßung durch die Funktion der Repulsion durch die Koeffizienten (a) der die Stärke der Repulsion bestimmt und der Distanz (D), an dem die Repulsion wirkt, bestimmt. sowie dem Abstand zum Mittelpunkt der Agenten (s) und dem Durchmesser der kreisförmigen Agenten (l) berechnet. Dies ist in Formel 5 und Abbildung 3 skizziert [4, 33].

$$R(s) = a * \exp\left(\frac{l-s}{D}\right)$$

Formel 5

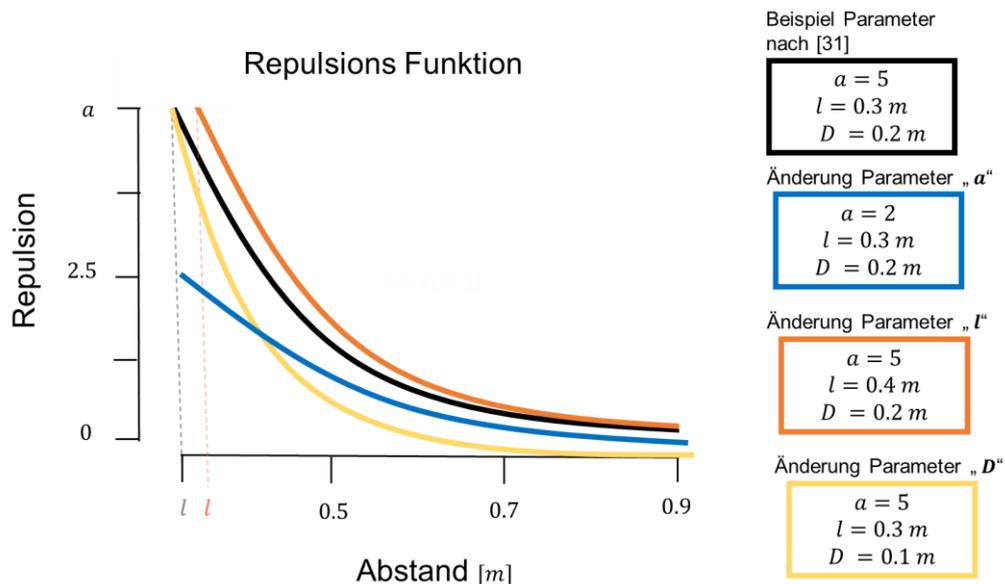


Abbildung 3: Funktionen vom „Collision-free speed model“: Repulsions Funktion, in Anlehnung an [33].

Dabei ergeben sich durch das Modell zudem Einschränkungen, die bei der Analyse bedacht werden sollten. Beispielsweise kann das Modell keine Stop-and-go Wellen abbilden und stellt Stauungen vor Engstellen in einer Kreisstruktur dar [33].

2.1.5 Messmethoden

Zur Analyse der Simulation werden aus den Simulationsdaten der Laufwege weitere Daten bezüglich Dichte, Geschwindigkeiten Flüssen etc. ermittelt werden. Dabei gibt es verschiedene Messmethoden die Anwendung finden können. Im Folgenden werden die im Analysetool JPSreport, zugehörig zur Software JuPedSim, etablierten Messmethoden A bis D vorgestellt. Grundsätzlich können diese Methoden auch in Verbindung mit einer anderen Simulationssoftware Anwendung finden.

Die Festlegung der Messmethode erfolgt in der zugehörigen Konfigurationsdatei [1]. In der Messmethode A wird über eine Messlinie (X) der Fluss und die mittlere sowie auch die individuelle Geschwindigkeit von Agenten über eine Zeit gemessen. In der Messmethode B werden Fluss und Geschwindigkeit über Ort und Zeit gemessen, wobei die Messung in Bezug auf ein Teilstück mit Δx in einem Korridor die Ein- und Ausgangszeit betrachtet wird. Die Messmethode C spannt eine rechteckige Fläche mit Kanten b_{cor} und Δx auf und ermittelt die Dichte anhand der Anzahl der Agenten in der Fläche [36].

In der Messmethode D wird die Dichte und die Geschwindigkeit anhand des Voronoi-Verfahrens ermittelt. Dabei wird entsprechend der Abbildung 4 um jeden Agenten i eine eigene Fläche $A_i(t)$ aufgespannt. Diese Fläche, die Voronoi-Zelle, wird durch die umliegenden Agenten sowie Wände und Hindernisse begrenzt. Die daraus entstehenden Grenzlinien, sind das

sogenannte Voronoi-Diagramm, welches von JPSreport für jeden Frame erstellt werden kann [22, 36].

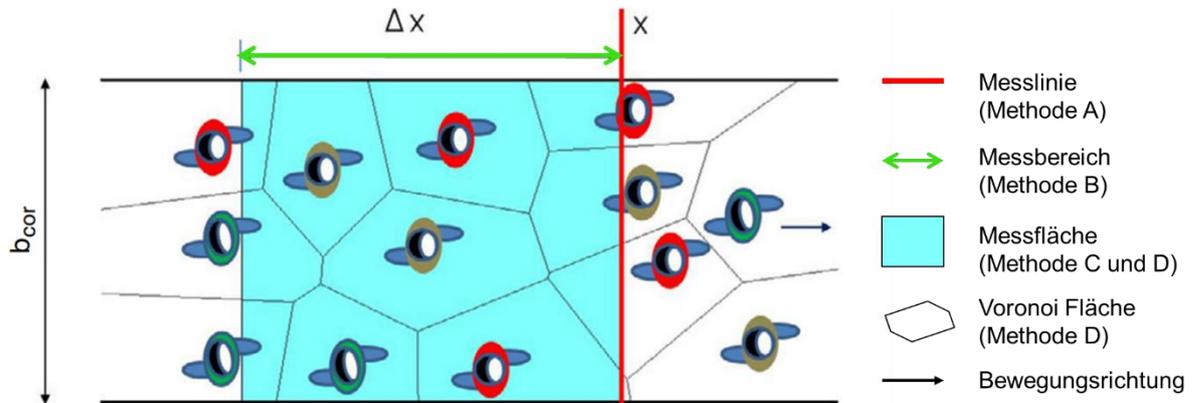


Abbildung 4: Darstellung der Methoden A-D : Linie „x“ (Methode A), Δx (Methode B), Messfläche „ $b_{corr} * \Delta x$ “ (Methode C) und Voronoi-Zellen (Methode D) in einem Korridor, in Anlehnung an [36]

Die Dichte ergibt sich daraufhin aus dem Kehrwert des Flächeninhaltes der Voronoi-Zelle eines Agenten i am Ort xy [36]:

$$\rho_{xy} = \frac{1}{A_i}, \text{ für } (x, y) \in A_i \quad \text{Formel 6}$$

Die momentane Geschwindigkeit des Agenten i am Ort xy wird über die Zeit betrachtet [36]:

$$v_{xy} = v_i(t), \text{ für } (x, y) \in A_i \quad \text{Formel 7}$$

$$\text{mit: } v_i(t) = \frac{x_i(t + \frac{\Delta t'}{2}) - x_i(t - \frac{\Delta t'}{2})}{\Delta t'} \quad \text{Formel 8}$$

Für die Messfläche wird in Anlehnung an Methode C, ein aufgespanntes Rechteck mit Kanten Δx und b_{corr} als Messfläche gesetzt und die Dichte der Agenten in der Messfläche über die Größe der Messfläche integriert [36]:

$$\langle \rho \rangle_v = \frac{\iint \rho_{xy} dx dy}{b_{corr} \Delta x} \quad \text{Formel 9}$$

$$\langle v \rangle_v = \frac{\iint v_{xy} dx dy}{b_{corr} \Delta x} \quad \text{Formel 10}$$

Bei der Analyse der Dichte und Geschwindigkeit über die Zeit können die Bereiche mit nahezu stationären Zuständen gemäß Abbildung 5 manuell ermittelt werden. Diese werden als unabhängig von Anfangs- und Endbedingungen des Bewegungsvorgangs angenommen. Die Daten der stationären Zustände werden beispielsweise als Basis für die Darstellung in Fundamentaldiagrammen genutzt [36].

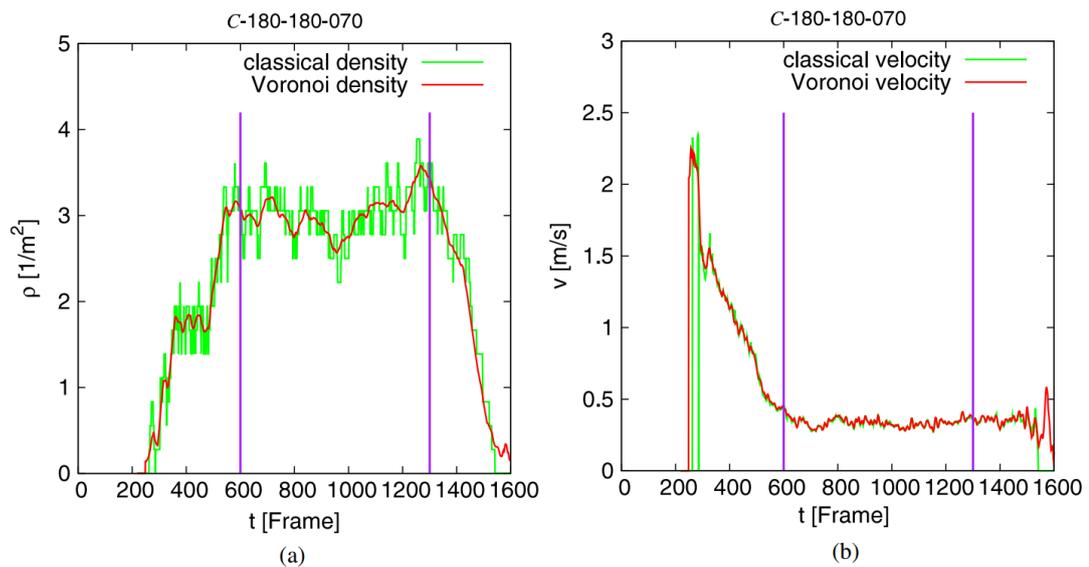


Abbildung 5: Dichte und Geschwindigkeit über die Zeit nach Methode C (classical density/ velocity) und D (Voronoi density/ velocity) und Bestimmung des stationären Zustandes (lila Linien), aus [36].

Die Methode D hat gegenüber den klassischen Modellen der Methoden A bis C keine Sprünge von Dichten, wenn Agenten die Messfläche verlassen oder betreten [22]. Dies ist ebenfalls in Abbildung 5 (links) ersichtlich. Zudem sind die Methoden A, B und C primär für die Analyse der mittleren Dichte, Geschwindigkeit etc. im stationären Zustand ausgelegt, wohingegen Methode D auch für die Analyse individueller Dichten der Agenten geeignet ist [1].

Das Prinzip der Voronoi-Zellen wurde nach [12] ursprünglich für die Betrachtung in Gruppen mit hohen Dichten in einfachen Strukturen ausgelegt. Für die Anwendung in komplexen Strukturen und unter der Annahme von Randpersonen bedarf es für die Anwendung weiterer Modifikationen. In Bezug auf Hindernisse und Wände sind die Voronoi-Zellen an diesen zu begrenzen. Zur Vermeidung großer Voronoi-Zellen von Agenten in Randbereichen sollte eine manuelle Begrenzung der Voronoi-Zellen festgelegt werden. Dies kann durch das Begrenzen der Zelle in Abhängigkeit des Abstandes eines Agenten erfolgen. Dabei kann ein fester Wert oder auch eine Begrenzungswert in Abhängigkeit der vorliegenden Dichte gewählt werden. Letzteres wirkt sich erheblich auf den Rechenaufwand aus. Eine andere Möglichkeit bietet die Regulierung über die Dichte. Bei allen drei Varianten ist die Auswahl der Begrenzung in Abhängigkeit des Anwendungsfalls zu wählen.

2.2 Leistungskriterien

Die leistungsbezogene Nachweisführung basiert nach [13] auf der Bewertung von Leistungskriterien. Leistungskriterien sind quantitative Spezifizierungen von funktionalen Anforderungen. Funktionale Anforderungen bedeuten Erwartungen an einen Zustand oder eine erforderliche Leistungsfähigkeit. Ein Beispiel einer funktionalen Anforderung aus der DIN 18009-1 [13], ist die Nutzbarkeit der Rettungswege für die Dauer der Räumung. Gemäß dem Entwurf der DIN 18009-2 [15] besteht ein dazugehöriges Leistungskriterium im Bereich Räumungssimulation aus einer Beurteilungsgröße mit einem Beurteilungswert. Im Rahmen dieser Arbeit werden die in der DIN 18009-2 (Entwurf) benannten Leistungskriterien für mikroskopische Modelle aus dem Bereich der Räumungszeiten (Kapitel 2.2.1) und Staubbildung (Kapitel 2.2.3) vorgestellt. Zur Einführung in die Thematik der Staubbildung wird diesbezüglich in Kapitel 2.2.2 der aktuelle Stand einer Staudefinition eingeführt.

2.2.1 Räumungszeiten

Allgemein wird bei Räumungsszenarien zwischen verfügbarer Räumungszeit, also bis zum letztmöglichen Zeitpunkt zum Verlassen des Gebäudes, und erforderlicher Räumungszeit unterschieden. Diese setzt sich entsprechend der Abbildung 6 und Formel 4, aus mehreren Zeitfaktoren zusammen.

$$\Delta t_{\text{erforderlich}} = \Delta t_{\text{Detektion}} + \Delta t_{\text{Alarm}} + \Delta t_{\text{Flucht}}(t_{\text{Reaktion},i}, t_{\text{Bewegung},i}) \quad \text{Formel 11}$$

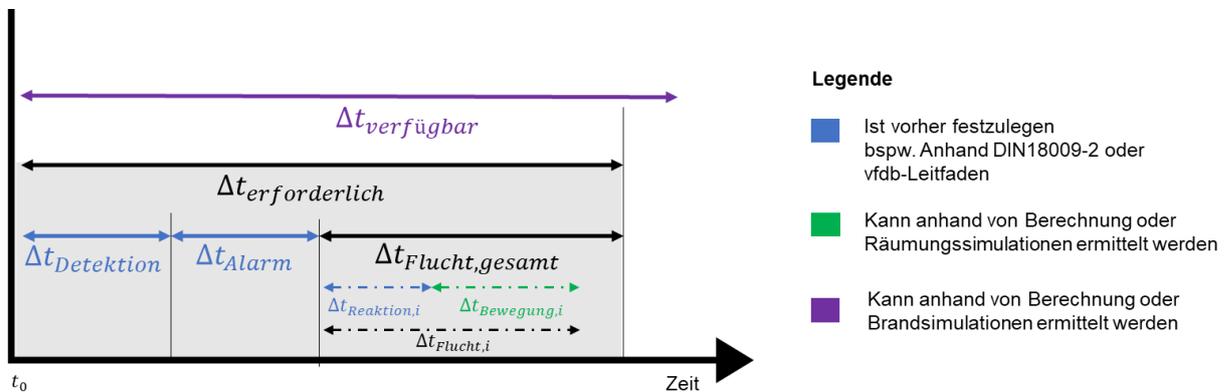


Abbildung 6: Zeitschema zum Abgleich der Räumungszeiten, in Anlehnung an [15]

Die gesamte Fluchtzeit ist das Maximum der individuellen Reaktions- und Bewegungszeiten. Die Bestimmung der Reaktionszeit kann gemäß DIN 18009-2 (Entwurf) [15], RiMEA [26] und vfdb-Leitfaden [35] anhand von Kategorien sowie zugehörigen Tabellenwerten erfolgen. Die individuelle und gesamte bzw. maximale Bewegungszeit kann anhand unterschiedlicher makroskopischer oder mikroskopischer Modelle gemäß Kap. 2.1.1 berechnet werden.

2.2.2 Wissenschaftliche Erkenntnisse zur Staudefinition

In der aktuellen Literatur gibt es keine einheitliche Definition für einen Stau im Bereich der Räumungssimulation. Allerdings finden sich nach [8], abhängig vom Modell verschiedene Definitionsansätze für einen Stau auf Grundlage der Kapazität, der Dichte, der Geschwindigkeit sowie dem Zusammenhang von Geschwindigkeit oder Dichte bezüglich der Zeit.

Bei dem Ansatz der Kapazität aus makroskopischen Modellen entsteht ein Stau, wenn der eingehende (Personen-)Fluss größer ist als der ausgehende (Personen-)Fluss [8, 15, 35].

Ein weiterer Ansatz setzt den Stau in Abhängigkeit zur Dichte. Dabei können zum einen die Level of Service (LOS) nach Weidmann [34] herangezogen werden. Diese bewerten den Freiheitsgrad der Bewegung bzw. den Komfort der Personen. Dabei werden anhand von 8 Kriterien, wie bspw. Geschwindigkeitswahl oder -wechsel, Berührungen, Überholungen der Personen die LOS von A bis I definiert. Die Zuordnung erfolgt über die definierten Dichten, wobei A die kleinsten Dichten und somit größten Bewegungsmöglichkeiten darstellt und I die größten Dichten. Weidmann hat zudem die Dichten der LOS mit dem von ihm aufgestellten Fundamentaldiagramm in Verbindung gesetzt und bietet somit auch eine Zuordnung anhand der Geschwindigkeit und des spezifischen Flusses. In folgender Abbildung des vfdb-Leitfadens [35] sind die LOS in Verbindung des Fundamentaldiagrammes nach Weidmann, SFPE und Preditschinski und Melinski grafisch dargestellt.

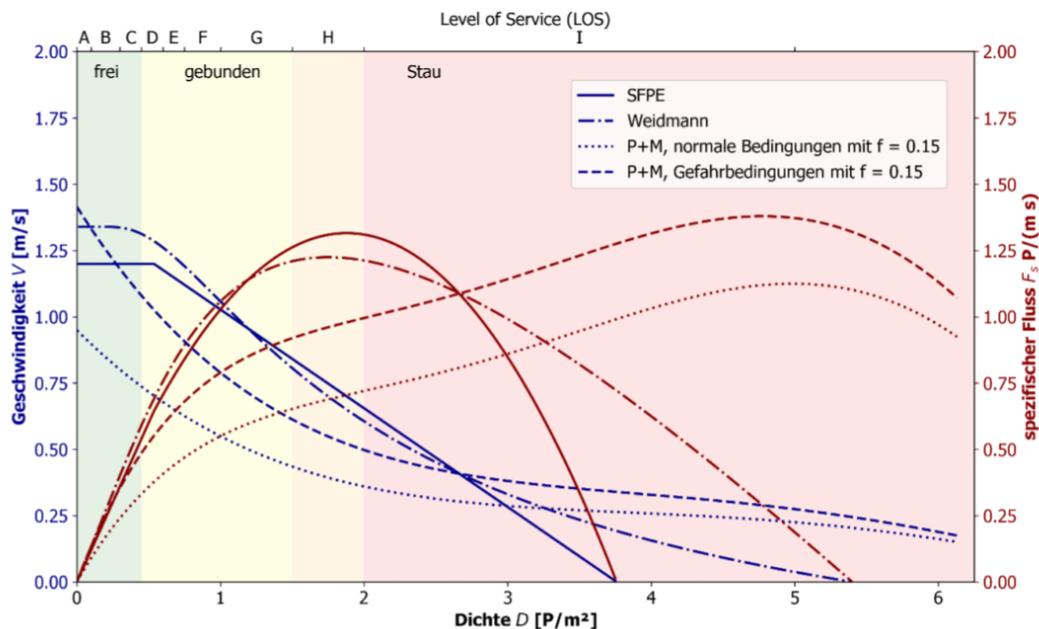


Abbildung 7: LOS nach Weidmann in Verbindung verschiedener Fundamentaldiagramme, aus [35]

Für mikroskopische Modelle gibt es zusätzlich nach [15] den Ansatz, Stauungen mittels Geschwindigkeitsgrenze zu bestimmen. Jede Unterschreitung der Geschwindigkeitsgrenze einer Person in der Simulation ist dann jeweils ein Hinweis auf eine lokale Stauung. Der Beurteilungswert ist modellspezifisch und abhängig von den Personeneigenschaften und der Ausrichtung der Weegelemente. Nach vfdb-Leitfaden [35] kann die Bestimmung des Geschwindigkeitsgrenze in Abhängigkeit des Flusses oder individuell mittels definierter Szenarien in einer

Parameterstudie erfolgen. Dabei kann die Geschwindigkeit relativ zur freien Geschwindigkeit oder als absolute Geschwindigkeitsgrenze festgelegt werden.

Ein Ansatz zur Festlegung der Geschwindigkeitsgrenze stellt [8] auch die Verbindung des Fundamentaldiagramms nach Weidemann dar. Gemäß Abbildung 8 ergibt sich beim maximalen Fluss und dem Wendepunkt der Geschwindigkeitsreduktion eine Geschwindigkeitsgrenze von $0,7 \text{ m/s}$ für horizontale Weegelemente.

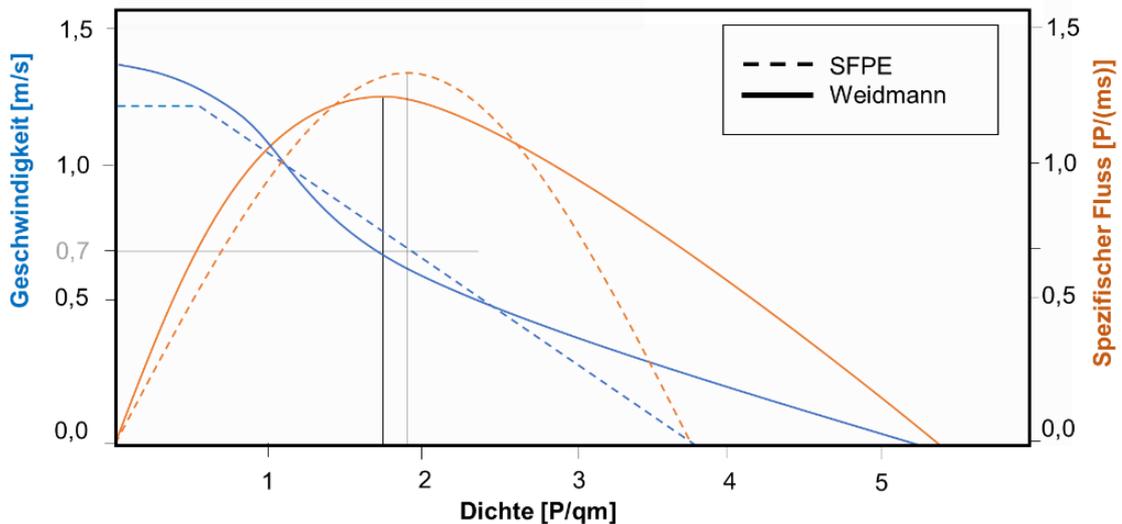


Abbildung 8: Skizze Fundamentaldiagramm nach Weidemann (und SFPE) inkl. Markierung der Geschwindigkeitsgrenze von $0,7 \text{ m/s}$, in Anlehnung an [8, 32].

Im Rahmen des Entwurfes der DIN 18009-2 [15] wurde alternativ zur individuellen Grenzwertfindung zusätzlich vorerst dieser Wert für horizontale Weegelemente vorgeschlagen. Aktuell wird zudem nach [8] in der Entwicklung der DIN 18009-2 (Entwurf) allgemein eine mögliche Grenzwertspanne zwischen $0,2 \text{ m/s}$ und $0,8 \text{ m/s}$ diskutiert und von der Nennung eines konkreten Wertes abgewichen.

Ein anderer Ansatz nach Mehl [16] setzt die Geschwindigkeit in Relation zur Zeit. Dabei benennt er die Geschwindigkeitsgrenze $0,3 \text{ m/s}$ und empfiehlt, dass der daraus definierte Stau nicht länger als eine Minute andauern sollte. Zusätzlich empfiehlt Mehl, die Verzögerungszeit auf die Hälfte der Laufzeit (Bewegungszeit) oder auf maximal zwei Minuten zu begrenzen.

Gemäß der RiMEA Richtlinie [26] tritt ein signifikanter Stau auf, wenn ein Personenstrom oberhalb eines Schwellenwertes ins Stocken gerät und bezieht zeitweisen Stillstand mit ein. In der Richtlinie wird dazu unter anderem eine Geschwindigkeitsgrenze für die Dichte in Bezug zur relativen Fluchtzeit vorgeschlagen, also zum Beispiel 4 Personen pro Quadratmeter, die länger als 10% der gesamten Fluchtzeit anhalten.

Inwiefern ein Stau zu einem Gedränge werden und eine Gefahr und Risiko bergen kann wird kaum definiert und ist nach DIN 18009-2 (Entwurf) [15] Gegenstand aktueller Forschung.

2.2.3 Kriterien der Staubildung

Aufgrund der im vorherigen Kapitel aufgezeigten bislang ungenauen Definition eines Staus sowie der Annahme, dass ein Stau nicht zwingend eine Gefährdung und einen Schaden für Personen herbeiführt, ist nach [35] die Vermeidung eines Staus nicht das Ziel der Räumungsplanung. Das Auftreten von Stauungen ist somit noch kein Leistungskriterium für eine Nachweisführung. Zur Bewertung der Staubildung werden im Entwurf der DIN 18009-2 [15] Staustelle, Staugröße, Stauzeit, Wartezeit und Staudichte vorgeschlagen (vgl. Abbildung 9). Im Falle von mehrfach auftretenden Stauungen sind die Werte der Staugröße, Stauzeit und Wartezeit über das gesamte Gebäude zu betrachten.



Abbildung 9: Untersuchungsfaktoren einer Staubildung, in Anlehnung an [15]

In der folgenden Tabelle wird die Aussagefähigkeit der fünf o.g. Kriterien mit den grundlegenden makro- und mikroskopischen Modellen (Kap. 2.1.1) in Verbindung gesetzt.

Tabelle 1: Aussagefähigkeit von Modellen, in Anlehnung an [15, 35]

	Makroskopische Modelle		Mikroskopische Modelle	
	Kapazitätsanalyse	Dynamische Strömungsmodelle	Raumdiskrete Modelle	Raumkontinuierliche Modelle
Staustelle	Eingeschränkt (nur sichtbare Engstellen)	ja	ja	ja
räumliche Ausdehnung	nein	Eingeschränkt (fest)	Eingeschränkt (Abhängig der Zellgröße)	Eingeschränkt (Abhängig von Platzbedarf und Staudichte)
Staudichte	nein	nein	nein	Eingeschränkt (Modelle zur Berechnung nicht standardisiert)
Staugröße	nein	ja	ja	ja
Stauzeit	Eingeschränkt (Passagezeit der Engstelle)	ja	ja	ja
Wartezeit	nein	Eingeschränkt (nur maximale Wartezeit möglich)	ja	ja

Die Stauausdehnung kann nach [8] aufgrund der Blockade anderer Fluchtwege über die Signifikanz eines Staus entscheiden. Aufgrund der modellabhängigen Darstellung von Personen und Stauverhalten, kann die Ausdehnung je nach Modell entsprechend variieren. Zudem empfiehlt [8], die Flächenausdehnung des Staus in Bezug zur Zeit zu setzen.

Die Aussagekraft der Stauzeit kann durch den Bezug zur Gesamträumungszeit erhöht werden. Nach RIMEA [26] und vfdb Leitfaden [35] ist die individuelle Warte- bzw. Anstehzeit ein relevantes Kriterium für die Signifikanz eines Staus, da damit einhergehend die Psyche der Personen beeinflusst wird. Aufgrund fehlender empirischer Daten gibt es jedoch noch keinen Ansatz der daraus eine Geschwindigkeitsgrenze für die Wartezeit ableitet [35].

Die Betrachtung der Staudichte ist nach [8] für die Staubeurteilung bei Simulationen nur bedingt zielführend, da abhängig vom Modell maximale Dichten vorgegeben werden. Somit ist keine Vergleichbarkeit bei der Verwendung anderer Modelle gegeben. Zudem müsste das Verfahren der Dichtemessung standardisiert werden (vgl. Kapitel 2.1.5).

Aufgrund der zeitlichen Veränderung der Staugröße, bietet es sich nach [8] an diese ins Verhältnis zur Zeit zu setzen. Dabei kann aus der Staugröße auch der Stauzuwachs bzw. die Kapazität ermittelt werden. Zusätzlich zu den Leistungskriterien aus dem Entwurf der DIN 18009-2 können auch Kriterien wie Vergleich von Fluss im Stau und optimalem Fluss oder die Verzögerung bzw. der Zeitverlust einer Person angewendet werden

Die Bewertung der genannten Leistungskriterien kann im Bereich der Staubildung nicht allgemeingültig erfolgen. Die DIN 18009-Teil 1 [13] und 2 (Entwurf) [15] schlagen vor, einen Vergleich der Werte aus materiellen Anforderungen des Baurechts, insbesondere der regelkonformen Sonderbauten wie beispielsweise der MVStättVO (Kap. 2.3.2) zu ziehen.

2.3 Einfluss von Fluchtbreite auf die Räumungsdynamik

Der Zusammenhang zwischen Kapazität und Breite einer Engstelle ist Gegenstand früherer und aktueller Forschung. Da sich die Kapazität wesentlich auf die Fluchtmöglichkeit und vor allem die Bewegungszeit auswirkt, werden in Kapitel 2.3.1 die aktuellen Erkenntnisse zu Verhalten in Engstellen vorgestellt. Präskriptive Forderungen an Fluchtbreiten, die sich aus dem Bauordnungsrecht und Arbeitsschutz ergeben, werden in Kapitel 2.3.2 benannt.

Aufgrund der unterschiedlichen Begrifflichkeiten wird zuvor die Verwendung des Begriffs Fluchtweg im Rahmen dieser Arbeit definiert. Grundsätzlich gibt es die Begriffe Flucht- und Rettungsweg. Ein Fluchtweg dient primär der Selbstrettung (Flucht). Ein Rettungsweg dient primär der Fremdrettung zum Beispiel durch Rettungskräfte. Dabei ist der Umgang mit den Begriffen nicht einheitlich geregelt. In den Landesbauordnungen erfolgt beispielsweise keine Unterscheidung von Flucht- und Rettungsweg, sondern es wird eine Zusammenfassung unter dem Begriff Rettungsweg vorgenommen. In Bezug auf Sonderbauten hingegen wird in den Verordnungen zwischen Flucht- und Rettungswegen unterschieden. Im Arbeitsschutzrecht werden Flucht- und Rettungsweg unter dem Begriff Fluchtweg zusammengefasst [21]. Da im Rahmen dieser Arbeit die Räumung bzw. Entfluchtung von Personen mittels Simulation im Fokus steht, wird unabhängig der Nutzung in der Originalliteratur hier durchgängig der Begriff Fluchtweg verwendet.

2.3.1 Wissenschaftliche Erkenntnisse zum Verhalten in Engstelle

Im Rahmen der Personenstromanalyse gibt es bereits Untersuchungen bezüglich des Zusammenhanges zwischen Kapazität und Breite einer Engstelle. Anfänglich wurde eine Annahme basierend auf der Breite der Personen und der Linienbildung in der Engstelle aufgestellt. Dabei wurde angenommen, dass die Kapazität erst ansteigt, wenn Personen nebeneinander laufen können und somit mehrere Linien bilden. Anfang der 2000er zeigten bereits die ersten Experimente, dass sich bei breiter werdenden Engstellen ein Reißverschlussseffekt entsprechend der Abbildung 10 nachweisen lässt [27], wodurch der sprunghafte Kapazitätsanstieg widerlegt wurde.

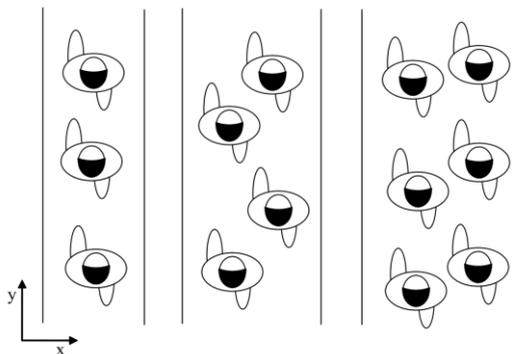


Abbildung 10: Skizze des Reißverschlussseffektes bei ansteigender Breite der Engstelle (x), aus [27, 29]

Die Experimente von Seyfried et. al mit Publikation im Jahr 2009 zeigen außerdem, dass sich gemäß Abbildung 11 ab einer Breite von 0,9 m eine geteilte Linienbildung erkennen lässt, deren Abstand sich bei ansteigender Breite der Engstelle kontinuierlich vergrößert [29].

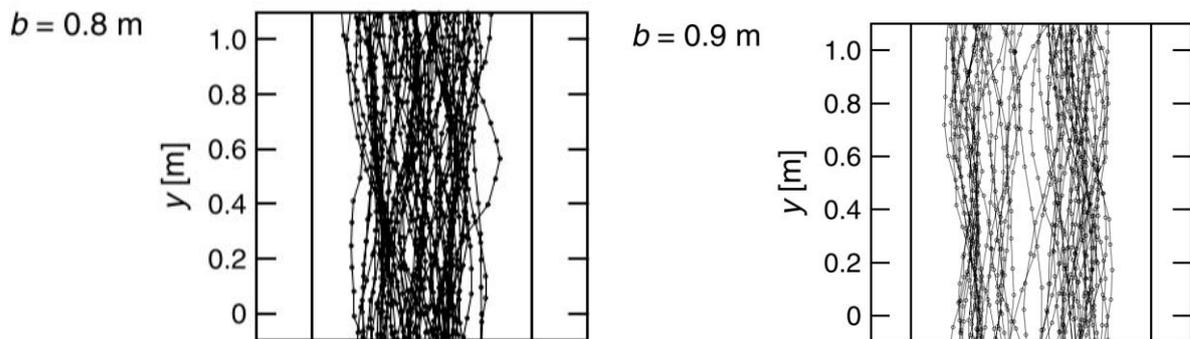


Abbildung 11: Verlauf der Positionen der Personen (Messpunkt am Kopf) in der Engstelle für die Breiten 0,8m und 0,9m nach Seyfried, aus [29]

Aus der Erkenntnis des Reißverschluss-effektes und der Linienbildung aus versetzten Personen, lässt sich nach [27] ableiten, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Kapazität und Breite der Engstelle gegeben ist. Nach [15] lässt sich somit eine Interpolation von Wegbreiten rechtfertigen.

Abhängig von der Gestaltung, Ausführung und Messung der Experimente liegen teilweise dabei unterschiedliche maximale spezifische Flüsse vor. Beispielsweise ergibt sich nach Weidmann [7] ein maximaler spezifischer Fluss von $1,31 \text{ m/s}$ und [29] hat in Experimenten einen maximalen spezifischen Fluss von $1,9 \text{ m/s}$ gemessen.

2.3.2 Vorgaben aus dem Bau- und Arbeitsrecht

Aus der MBO [17] ergibt sich die Vorgabe die Breite der Treppen und Flure an den größten zu erwartenden Verkehr auszurichten. Dahingegen werden in der MVStättVO [18] konkrete Fluchtwegbreiten benannt. Unter 200 Besuchern ist eine lichte Breite der Fluchtwege von $0,9 \text{ m}$ ausreichend. Bei Versammlungsstätten ab 200 Besuchern stellt die MVStättVO in Bezug auf die Fluchtwegbreite einen Zusammenhang zwischen Personenanzahl, die auf den Rettungsweg angewiesen ist, und lichter Rettungswegbreite her. Somit werden für Versammlungsstätten, die sich nicht im Freien befinden, für je 200 Personen eine Fluchtwegbreite von $1,20 \text{ m}$ gefordert. Dabei wird eine Interpolation der Werte erlaubt. In Bezug auf einen Stau folgert [8] daraus, dass somit ein Stau zulässig ist, wenn die Mindestzahlen und Verhältnisse eingehalten werden.

Ähnliche Vorgaben der Fluchtwegbreiten und Personenanzahlen finden sich auch in der Muster-Schulbaurichtlinie [20]. In dieser wird eine nutzbare Mindestbreite von notwendigen Fluren von $1,5 \text{ m}$ vorgegeben und zusätzlich die Anpassung der Fluchtwegbreite pro 200 Personen um je $1,2 \text{ m}$ nutzbare Breite gefordert. Die Muster-Schulbaurichtlinie aus dem Jahr 2009 fordert dabei eine schrittweise Anpassung dieser Fluchtwegbreite. Gemäß der Schulbaurichtlinie NRW [24] dürfen im Gegensatz dazu entsprechend interpolierte Werte angewandt werden.

Im Arbeitsschutzrecht wird im Arbeitsschutzgesetz [10] gefordert, dass der Arbeitgeber Maßnahmen ergreifen muss, damit der Beschäftigte sich bei unmittelbarer erheblicher Gefahr in Sicherheit bringen kann. Nach zugehöriger Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) [11] Anhang 2.3 sind Anzahl, Anordnung, Abmessung der Fluchtwege und Notausgänge nach der Nutzung, der Einrichtung und der höchstmöglichen Anzahl an Personen zu richten. Der Verlauf

der Fluchtwege ist möglichst kurz zu halten und wenn möglich ins Freie, ansonsten in einen gesicherten Bereich, zu führen. Zudem sind Notausgangstüren der Fluchtrichtung auszurichten. Die ArbStättV erlaubt dabei Abweichungen von den Anforderungen, soweit ein gleichwertiges Sicherheits- und Schutzniveau für die Gesundheit der Beschäftigten erreicht werden kann.

Die Technischen Regeln für Arbeitsstätten, die vom Ausschuss für Arbeitsstätten und der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin veröffentlicht werden, dienen zur weiteren Konkretisierung der Anforderung aus der ArbStättV. Die ASR A2.3 [9] bezieht sich dabei auf die Fluchtwege und Notausgänge und konkretisiert die o.g. schriftlichen Ausführungen durch Zahlenwerte für Fluchtwegbreiten und -längen. In Bezug auf die Fluchtweglängen ergeben sich für Räume ohne oder mit normaler Brandgefährdung oder Räume mit erhöhter Brandgefährdung mit selbsttätigen Feuerlöscheinrichtungen maximale Fluchtweglängen von 35 m.

In der Tabelle 1 der ASR A2.3 [9] finden sich die Vorgaben zu horizontalen Fluchtwegbreiten, in Abhängigkeit der Summe der Personenanzahl, die diesen als Hauptfluchtweg nutzen. Bis zur Aktualisierung der ASR A2.3 im Frühling 2022 wurden noch die Vorgaben aus älteren Versionen der ASR aus den Jahren 1985 (ASR 10/1) verwendet. Aufgrund dessen beauftragte der ASTA verschiedene Fachgutachten zur Fortschreibung der Richtlinie [16]. In Anlehnung an diese Fachgutachten wurde die Tabelle der Fluchtwegbreiten der ASR A2.3 [9] entsprechend der folgenden Tabelle erweitert und eine Interpolation ab 200 Personen erlaubt. Ebenso wurden die erlaubten Engstellen an Türen mit bis zu 15 cm durch die Fachgutachten [16] bestärkt und somit weiterhin aufgenommen. Die Zeitliche Komponente der Nutzung, bspw. durch auftretende Verzögerungen, ist dabei für die Fluchtwegbreite nach ASR A2.3 [9] irrelevant.

Tabelle 2: Fluchtwegbreiten der ASR A2.3 Ausschnitt aus Tabelle 1, aus [9]

	A	B	C
Nr.	Anzahl der Personen (Einzugsgebiet)	Lichte Mindestbreiten von Durchgängen und Türen im Verlauf von Hauptfluchtwegen, z. B. Türen von Notausgängen (in m)	Lichte Mindestbreiten von Hauptfluchtwegen (in m)
1	bis 5	0,80 ¹⁾	0,90
2	bis 20	0,90	1,00
3	bis 50	0,90	1,20
4	bis 100	1,00	1,20
5	bis 200	1,05	1,20
6	bis 300	1,65	1,80
7	bis 400	2,25	2,40

Vollständigkeitshalber ist zu benennen, dass für Treppen bzw. mehrgeschossigen Fluchtwege eine zusätzliche Tabelle erstellt wurde, in der die Vorgaben der Fluchtwegbreiten nach Personen pro Ebene getroffen wurde. Dabei können für Treppen je nach Betrachtungsweise beide Tabellen als Grundlage verwendet werden [9].

3 Parameterstudie zur Staudefinition

3.1 Struktur und Aufbau des Szenarios

3.1.1 Struktur der Stauuntersuchung

Im Folgenden wird der Aufbau der folgenden Kapitel bezüglich der Staudefinition anhand der Zielstellung dieser Arbeit erläutert. Entsprechend der aktuellen Regelwerke (Kapitel 2.3.2) wird, basierend auf dem kontinuierlich wachsenden Fluss, ein Zusammenhang zwischen einer Türbreite von 1,2 m pro 200 Agenten angenommen, der mit steigender Agentenzahl interpolierte Werte zulässt. Diese Annahme wird durch den Vorschlag der DIN 18009-Teil 1 [13] und 2 [15] gestützt, einen Vergleich der Werte aus materiellen Anforderungen des Baurechts, insbesondere der regelkonformen Sonderbauten, zu ziehen. Daraus ergibt sich im Rahmen dieser Arbeit die Aufgabenstellung den o.g. Zusammenhang, in Bezug auf die Staubildung, mittels eines raumkontinuierlichen mikroskopischen Berechnungsmodells in horizontalen Szenarien zu prüfen.

Grundlage der Berechnung bietet die Wahl der Simulationssoftware und des operationalen Modells. Für die Durchführung der Simulation wird das bereits in Kapitel 2.1.2 erläuterte Softwareprogramm JuPedSim bzw. dessen Komponente JPScore in der Version 0.9.5 [5] in Verbindung mit dem Kapitel 2.4.2 eingeführten Geschwindigkeitsmodell verwendet. Die ermittelten Ergebnisse dieser Arbeit sind somit nur in Abhängigkeit dieses Modelles gültig.

Zur Analyse des Stauverhaltens ist eine Staudefinition festzulegen. Basierend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 2.2.2 und [31] wird auf eine Definition anhand eines Geschwindigkeitsgrenzwertes zwischen 0,1 m/s bis 0,9 m/s in Zwischenschritten von 0,1 m/s für die Agenten zurückgegriffen. Diese Grenzwerte werden in einer Parameterstudie (Kap. 3) mit einem festgelegten Szenario betrachtet. Dabei wird eine vereinfachte Geometrie, bestehend aus einem Raum und einem Korridor, in Anlehnung an die MBO und ASR A2.3 angestrebt (Kap. 3.1.2). Das gewählte Parametersetting wird auf Grundlage bekannter Daten aus der RiMEA [26] und der DIN 33402-2 [14] in Anlehnung an das Fundamentaldiagramm Weidmann [34] in Kapitel 3.1.3 beschrieben. Die Konfigurationsdateien des Szenarios finden sich im Anhang dieser Arbeit.

Die folgende Analyse erfolgt mit der Softwarekomponente JPSreport in der Version 0.8.6 [6] und der Messmethode D (Kap. 2.1.5). In Verbindung damit werden drei Messflächen festgelegt (Kap. 3.2.1), die drei Aspekte abdecken sollen: die gesamte Dynamik in der Geometrie bzw. im Raum, den Kern der Stauung und den Fluss in der Engstelle. Letzteres dient zur Überprüfung des gewählten Parametersettings anhand des Fundamentaldiagramms nach Weidmann und dem vfdb-Leitfaden (Kap. 3.2.2). Die konservative Betrachtungsweise wurde ausgewählt, da diese in der Praxis etabliert und auch in die vorgestellten Normen [13, 15] einbezogen ist.

Bei der Analyse werden außerdem die in Kapitel 2.2.3 vorgestellten Staubeurteilungsfaktoren herangezogen. Zur Berechnung dieser Faktoren werden bzgl. der Staufläche, Staugröße, Stauzeit und Wartezeit Berechnungen in Anlehnung an [31] aufgestellt (Kap. 3.2.3). Zusätzlich wird der Beurteilungsfaktor der Geschwindigkeit in Abhängigkeit zum Abstand des

Agentenmittelpunktes zum Mittelpunkt der Tür in Anlehnung an [30] betrachtet. Da sich die gesamten Berechnungen auf Individuelle Daten beziehen, würden Mittelwerte die Aussagekraft beeinflussen. Somit wurde im Rahmen dieser Arbeit für das betrachtete Szenario die Startverteilung der Agenten ausgehend von der mittlere Simulationszeit aus 50 Simulationen ermittelt.

Für die Auswertung der Simulations-Dateien und die Berechnung der Staukriterien wird die freiverfügbare Programmiersprache Python in Version 3 angewandt. Dabei bietet Python die Möglichkeit vorgeschriebene Module in die eigenen Skripte zu integrieren. Im Rahmen dieser Arbeit finden primär die Module *Numpy* für numerische Daten, *Pandas* zur Datenverarbeitung in Tabellen, und *matplotlib* zur Erstellung von Diagrammen, Anwendung [28]. Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Skripte, werden digital zur Arbeit eingereicht und können bei Bedarf am Lehr- und Forschungsgebiet Computersimulation für Brandschutz und Fußgängerverkehr der Bergischen Universität Wuppertal angefragt werden.

Nach Festlegung des Betrachtungszeitraumes in Kapitel 3.2.4, durch den der Einfluss der Anfangsbedingungen minimiert werden soll, folgt die Stauanalyse (Kap. 3.3). Zu Beginn wird dazu die allgemeine Dynamik in dem Raum anhand der individuellen Geschwindigkeitsverläufe betrachtet, um daraus Stauphasen ableiten zu können (Kap. 3.3.1). In Verbindung mit den Stauphasen wird der Verlauf der Geschwindigkeiten und Positionen mittels Python visualisiert.

Darauffolgend wird in Kap. 3.3.2 der Verlauf in dem Stauzentrum in Bezug auf die Stauphasen und einen stationären Zustand geprüft. Daraus soll allgemein abgeleitet werden, ob die Staudynamik und die Stauphasen einen Zusammenhang zur Entwicklung im Stauzentrum haben. Die anschließende Analyse der Staukriterien in Kap. 3.4 soll dabei ebenfalls die Anwendung der Stauphasen betrachten. Für die Auswahl eines Geschwindigkeitsgrenzwertes werden zudem Schwankungen und Stetigkeiten in den Verläufen der Staukriterien sowie Differenzen und Zusammenhang im Vergleich zueinander herausgestellt. Diese werden anschließend in Kapitel 3.5 zusammengefasst. Des Weiteren wird die Auswahl bspw. in Bezug auf die Anwendungsgrenzen in Kapitel 3.6 diskutiert.

3.1.2 Aufbau der Geometrie

Im Folgenden wird die angenommene Geometrie und deren Entscheidungsgrundlage beschrieben. Es ist anzunehmen, dass der Aufbau der Geometrie einen Einfluss auf die Entwicklung und Definition des Staus im Rahmen dieser Arbeit hat. Dies ist einerseits in der Anfangsdichte und damit in dem zusammenhängenden Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit von stauunabhängigen Blockaden einzelner Agenten untereinander begründet. Andererseits können vom Ausgang weiter entfernte Anfangspositionen den Ankunftszeitpunkt und somit die Beteiligung an einem möglichen Stau verzögern. Im Rahmen dieser Arbeit wird nicht untersucht, inwiefern sich eine Veränderung der Geometrie auf die Leistungskriterien der Staubeurteilung und Festlegung der Geschwindigkeitsgrenze auswirken würde.

Die Geometrie besteht entsprechend der Abbildung 12 aus einem Raum mit einer Fläche von 400qm. Die zugehörige Konfigurationsdatei findet sich in Anhang 1.

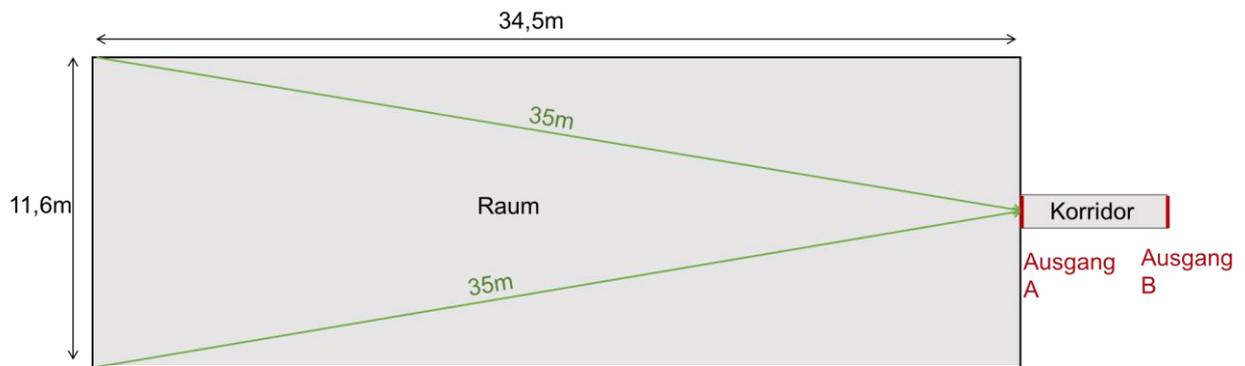


Abbildung 12: Visualisierung der Geometrie.

Die Größe wurde auf Grundlage baurechtlicher Vorgaben einer Nutzungseinheit mit Büro- oder Verwaltungsnutzung abgeleitet. Zwischen zwei Nutzungseinheiten sind nach § 29 Absatz 2 MBO [17, 19] Trennwände vorzusehen, um brandschutztechnisch abgegrenzte Einheiten herzustellen. Nach § 36 Absatz 1 Satz 4 der MBO [17] ist innerhalb von Nutzungseinheiten mit maximal 400qm, die einer Büro- oder Verwaltungsnutzung dienen, kein notwendiger Flur erforderlich. Die Planung eines notwendigen Flures würde Laufwege und Fluchtwegbreiten innerhalb des Raumes vorgeben. Dies wäre für die Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit nicht zielführend.

Der erforderliche zweite Fluchtweg nach § 33 MBO [17] ist in der Geometrie nicht näher betrachtet, da sich die Vorgaben der Türbreiten und Personen in allen drei aufgeführten Regelwerken: ASR A2.3 [9], MVStättVO [18] und SchulbauRL [20], explizit auf die Personen im Einzugsgebiet beziehen. Unter Beachtung der Zielstellung dieser Arbeit, wäre die Darstellung eines zweiten Fluchtweges somit nicht zielführend. Zudem gibt es bezüglich des zweiten Fluchtweges verschiedene Umsetzungsmöglichkeiten, beispielsweise über Rettungsgeräte der Feuerwehr [17], somit wäre eine allgemeingültige Darstellung nicht möglich.

Die Maße der Geometrie sind an die Fluchtweglänge von 35 m bis zum gesicherten Bereich aus der MBO [17] und der ASR A2.3 [9], für Räume ohne erhöhte Brandgefahr, angelehnt. In der MVStättVO [18], gibt es abhängig der Art der Versammlungsstätte verschiedene Fluchtweglängen. Maximal ist eine Lauflinie von 30 m erlaubt. Es wurde im Rahmen dieser Arbeit entschieden sich an den Vorgaben der MBO und ASR A2.3 zu orientieren.

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 ausgearbeitet, ergibt sich aus der MVStättVO und der ASR A2.3 ab 200 Agenten je eine Ausgangsbreite von 1,2 m. Somit wird in Verbindung der Annahme von 200 Agenten die Türbreite auf 1,2 m festgelegt (vgl. Kapitel 4.1).

Zusätzlich befindet sich nach dem Ausgang A aus dem Raum ein Korridor. Da der Korridor als gesicherter Bereich definiert wird, ist dieser Teil der Fluchtwegplanung entsprechend an die Fluchtwegbreiten anzupassen. Der Korridor dient primär dazu, dass die Agenten im Collision-free speed model (vgl. Kap 2.1.4) Wechselwirkungen auf die benachbarten Agenten ausüben und diese beim Verschwinden aus der Simulation im Ausgangsbereich A vollständig mit berechnet werden.

3.1.3 Parameter der Agenten

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit festgelegten Parameter der Startpositionen, mittlere freie Geschwindigkeit, Größe und Interaktionen aufgezeigt. Die Auswahl der Parameter der Agenten beeinflusst sowohl den Verlauf der Simulation als auch die Staubeurteilung und Staudefinition im Rahmen dieser Arbeit. Dabei wird in dieser Arbeit keine Aussage getroffen, inwiefern sich eine Veränderung der einzelnen Parameter auf die Leistungskriterien der Staubeurteilung (Kap. 2.2.3) und Festlegung der Geschwindigkeitsgrenze auswirken würde. Die vollständige Konfigurationsdatei befindet sich in Anhang 2.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Szenario für eine detaillierte Betrachtung mit acht Frames pro Sekunde ausgegeben. Entsprechend der Konfiguration der Geometrie werden, in Anlehnung an die Fluchtwegbreite von 1,20 m der ASR A2.3 und MVStättVO, 200 Agenten in dem Raum verteilt. Ziel der Agentengruppe ist das Verlassen der Geometrie durch die Ausgänge A und B. Dabei haben die Agenten zu Beginn einen Abstand von mindestens 4 m zum Ausgang A. Dies soll den Agenten ermöglichen eine höhere Geschwindigkeit aufzunehmen und somit die Stauanalyse von einem dynamischeren Zeitpunkt heraus beginnen zu lassen und vom Einfluss der Anfangspositionen nahe das Ausganges A zu lösen. Die konkreten Anfangspositionen werden durch den ermittelten Seed Wert (vgl. Kap 3) bestimmt. Es ist davon auszugehen, dass die Annahme der Verteilung im Raum sich ebenfalls auf die zeitliche Entwicklung der Laufwege und mögliche Stauungen auswirkt.

Als operationales Modell wurde das kollisionsfreie Geschwindigkeitsmodell entsprechend dem Kapitel 2.1.4 gewählt. Es lässt gemäß [33] im Gegensatz zu Kraft-basierten Modellen keine Überlappungen der Agenten zu und kann zudem experimentell untersuchte Phänomene, wie den linearen Fluss in Engstellen und Linienbildungen, darstellen. Bei der Analyse von Stauungen ist zu beachten, dass das Modell keine Stop-and-go Wellen abbildet.

Basierend auf den Ergebnissen von Weidmann [34] ergibt sich eine mittlere freie Geschwindigkeit v_o von 1.34 m/s . Nach RiMEA Richtlinie [26] ist dabei eine ausgeglichene Population zwischen Männern und Frauen mit einem mittleren Alter von 50 Jahren gegeben. Zudem ist nach [26] die freie Geschwindigkeit für Männer um 10,9 % schneller als die für Frauen. Es ist aufgrund der Geometrie und der Anzahl der Agenten im Raum davon auszugehen, dass die Agenten nur für einen sehr begrenzten Zeitraum die freie Gehgeschwindigkeit erreichen können und somit der Einfluss der klein gewählten Streuung der freien Geschwindigkeit in dem Szenario eher als gering einzuschätzen ist. Geschwindigkeitsparameter für vertikale Bewegungen oder Fahrtreppen sind aufgrund des Szenarios nicht notwendig.

Da Verzögerungen, beispielsweise durch unterschiedliche Reaktionszeiten gemäß ASR A2.3 [9] nicht zu beachten sind, werden diese im Szenario nicht angesetzt. Aus diesem Grund sind zudem keine zusätzlichen Ziele oder Wartezonen vorgegeben.

Entsprechend der DIN 33402-2 [14] liegt eine durchschnittliche Schulterbreite für Männer bei 48 cm und für Frauen bei 34,5 cm. Hieraus ergibt sich für eine gesamte Population bestehend aus je 50% Männern und Frauen eine durchschnittliche Schulterbreite von 45,75 cm. Aufgrund der Darstellungsform der Agenten in Kreisform, würde eine direkte Übertragung dieser Werte für Schulterbreiten auf den Kreisdurchmesser der Agenten zu größeren Flächen der Agenten führen. Zusätzlich ist aufgrund der Eigenschaft des gewählten Modells, in dem Berührungen

der Agenten nicht zugelassen werden, ein kleinerer Kreisdurchmesser anzunehmen als die o.g. 45,75 cm. Unter Einbeziehung der in DIN 33402-2 [14] angegebenen durchschnittlichen Tiefe eines Agenten der Gesamtpopulation von 28,75 cm ergäbe sich eine rechteckige Fläche von 0,1315 qm. Eine Umrechnung dieser Fläche auf einen Kreis, ergäbe einen Durchmesser von ca. 41 cm. Dies würde den Einfluss der Schulterbreite, der in Bezug auf die Einordnung in einer Engstelle im Gegensatz zur Tiefe einen größeren Einfluss hat, verringern. Somit ist dieser Wert als zu gering anzunehmen.

In den Fachgutachten zur ASR A2.3 [16] mit der Software crowd:it, wurde ein Kreisdurchmesser zwischen 42 bis 46 cm angenommen. In Verbindung mit der vorherigen Eingrenzung der Schulterbreiten mittels Werten der DIN 33402-2 und dem Fachgutachten, wurde ein durchschnittlicher Kreisdurchmesser von 44 cm mit einer Standardabweichung von $\sigma = 0.033$ angenommen. Des Weiteren wurde die gewählte Breite in Kombination der weiteren Parametern aus dem Fundamentaldiagramm nach Weidmann [34] und mit Werten für Korridore nach dem vfdB Leitfaden [35] überprüft dies ist dem Kapitel 3.2.2 zu entnehmen. Wie bereits beschrieben, ist davon auszugehen, dass die Schulterbreite den Fluss in der Engstelle maßgeblich mit beeinflussen kann und somit eine Veränderung des Wertes zu einer anderen Staudynamik führen könnte. Entsprechend der gewählten Parameterauswahl für JPScore mit $T = 0.7$, $D = 0.2$ und $a = 2$ ergeben sich für das gewählte Parameterset dieser Arbeit folgende Funktionen:

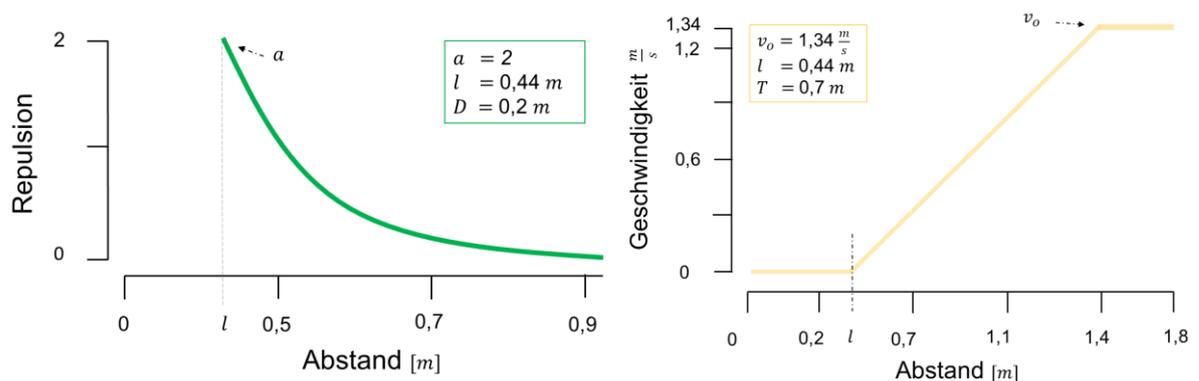


Abbildung 13: Repulsion Funktion (links) und Speed Funktion (rechts) passend zum gewählten Parameterset, in Anlehnung an [33].

3.2 Grundlagen für die Analyse

3.2.1 Messmethode und -flächen

In der Konfigurationsdatei für JPSreport werden Informationen zur Messmethode hinterlegt. In Bezug auf die verwendete Messmethode D werden unter anderem die betroffene Messfläche und der Begrenzungswert (vgl. Kap 2.1.5) für die Voronoi-Zellen festgelegt. In Bezug auf die Begrenzung der Voronoi Zelle wird, in Anlehnung an [12], die Voronoi Zelle an diesen Stellen durch einen Kreis mit einem Radius von 1 m beschränkt. Entlang des Kreises werden dann die Punkte der Voronoi-Zelle verteilt. Die Auswahl des Radius beeinflusst die individuellen Dichten für Agenten in den Randbereichen. Des Weiteren werden in dieser Datei die Messflächen angegeben. Die in Verbindung der Messmethoden verwendeten Messflächen M1, M2 und M3 werden im Folgenden eingeführt.

Die Messfläche M1 ist als eine quadratische Messfläche in Raum vor dem Ausgang A mit der Kantenlänge entsprechend der Türbreite (1,2 m) festgelegt. Zudem hat die Messfläche zum Ausgang A einen Abstand von 1 m. Die Messmethode setzt, bei der Berechnung der Classical Voronoi Daten der Messfläche nach [36] (Kapitel 2.1.5), die Daten in Bezug zur Fläche, daher wird die Messfläche M1 klein gewählt. Zudem soll die Messfläche den durch die Trajektorien erkennbaren Staumittelpunkt abbilden, um die Dynamik der Staubildung bestmöglich einzufassen. Der Abstand zum Ausgang A dient dazu, die erwartete Beschleunigung beim Verlassen des Staus in der Engstelle nicht einzubeziehen.

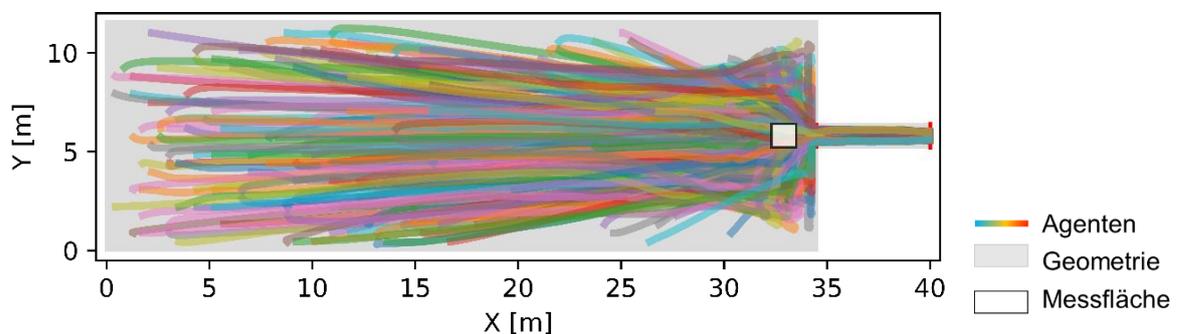


Abbildung 14: Darstellung der Trajektorien aller Agenten (200) inkl. der Messfläche M1.

Für die Analysen, die den ganzen Raum betrachten sollen, ist die Messfläche M2, mit je 10 cm Abstand zu den raumumschließenden Wänden, in den gesamten Raum gelegt.

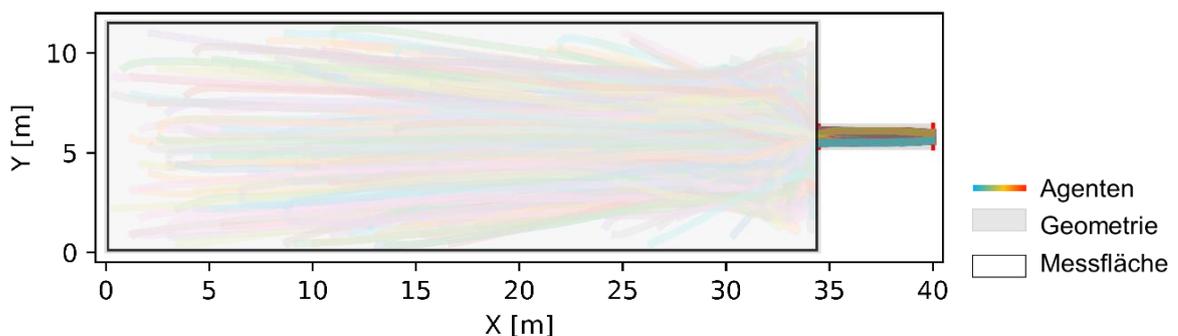


Abbildung 15: Darstellung der Trajektorien aller Agenten (200) inkl. der Messfläche M2.

Die Messfläche M3 umfasst eine Größe von 1 qm und ist mittig in den Korridor gelegt. Dabei wurde die Messfläche gemäß der folgenden Abbildung mittig des Korridors angesetzt, um den Einfluss der Stauungen vor dem Ausgang A sowie dem Ausgang B zu vermindern.

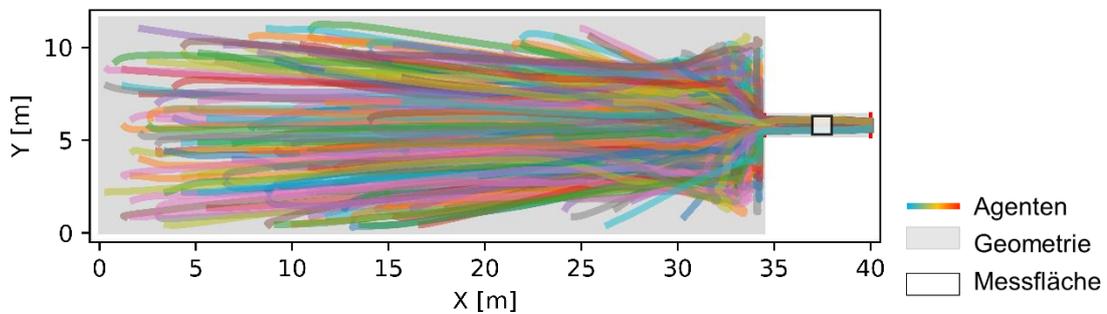


Abbildung 16: Darstellung der Trajektorien aller Agenten (200) inkl. der Messfläche M3.

3.2.2 Überprüfung der Modellparameter

Zur Überprüfung des genutzten Modellparameter in dem gewählten Szenario wird ein Vergleich der Daten der Simulation – aus der Messfläche M3 – mit verschiedenen Datensätzen aus dem vfdb-Leitfaden und aus dem Fundamentaldiagramm nach Weidmann herangezogen. Zum einen werden die Werte für Geschwindigkeiten und spezifische Flüsse aus dem vfdb Leitfaden [35] in Anlehnung an das SFPE Handbuch, entsprechend der folgenden Tabelle, herangezogen:

Tabelle 3: Horizontale Geschwindigkeit und spezifischer Personenstrom, aus [35].

Wegelement	Geschwindigkeit [m/s]	V Personenstrom F_s [P/ms]
Korridor (moderate Auslastung)	1,0	1,1
Korridor (optimale Auslastung)	0,6	1,3

Des Weiteren wird der maximale spezifische Fluss für Gänge bzw. Türöffnungen nach Weidmann [34] bzw. RiMEA [26] bei $1,3 \text{ m/s}$ und das Fundamentaldiagramm von Weidmann entsprechend der Formel 12 betrachtet [7].

$$\theta_{s,max} = \rho * 1.34 * \left(1 - e^{-1,913 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{5.4}\right)}\right) \quad \text{Formel 12}$$

Für den Vergleich der Ergebnisse des gewählten Szenarios mit den oben genannten Werten der Literatur sollten diese unter vergleichbaren Rahmenbedingungen betrachtet werden. Da Weidmann und der vfdb-Leitfaden von einem fließenden Verkehr in einem Korridor ausgehen, wurde die Messfläche M3 aus dem Korridor verwendet. Innerhalb der Messfläche wurde primär der stationäre Zustand für den weiteren Vergleich in die Betrachtung einbezogen.

Dieser befindet sich zwischen 30 s und 110 s. In dem Bereich zeigen sich zudem gemäß der folgenden Abbildung vergleichbare Geschwindigkeiten und spezifische Flüsse zu den Orientierungswerten des vdfb-Leitfadens.

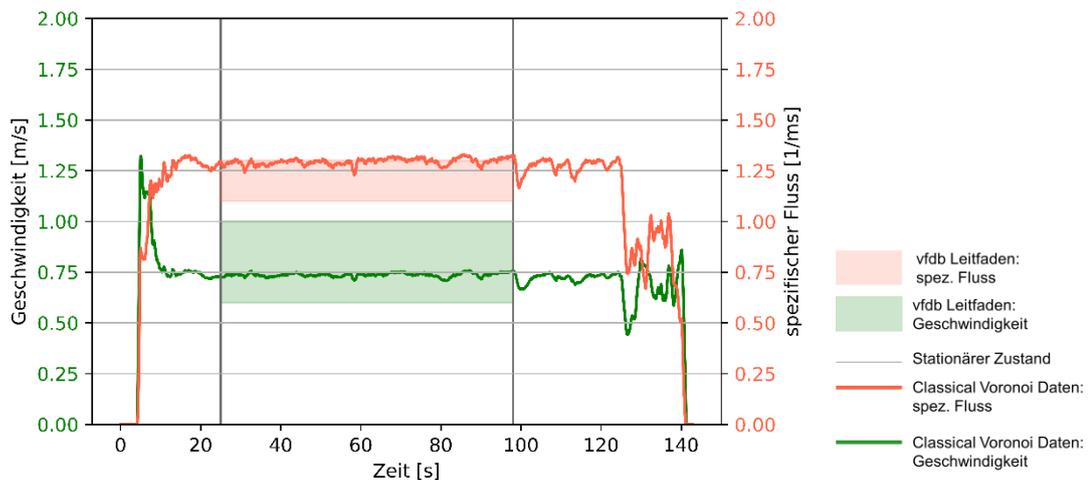


Abbildung 17: Verlauf von Geschwindigkeit und spez. Fluss in der Messfläche M3 inkl. Vergleich der Werte des vdfb – Leitfadens.

Zudem wird innerhalb dieses Bereiches ein Maximum von 1,32 m/s erreicht, welches nahezu mit dem Maximum nach Weidmann übereinstimmt. Die Anlehnung an Weidmann zeigt sich ebenfalls im folgenden Vergleich zum Fundamentaldiagramm. Dabei ist sowohl der spezifische Fluss als auch die Geschwindigkeit aus dem Szenario mit den Werten von Weidmann vergleichbar.

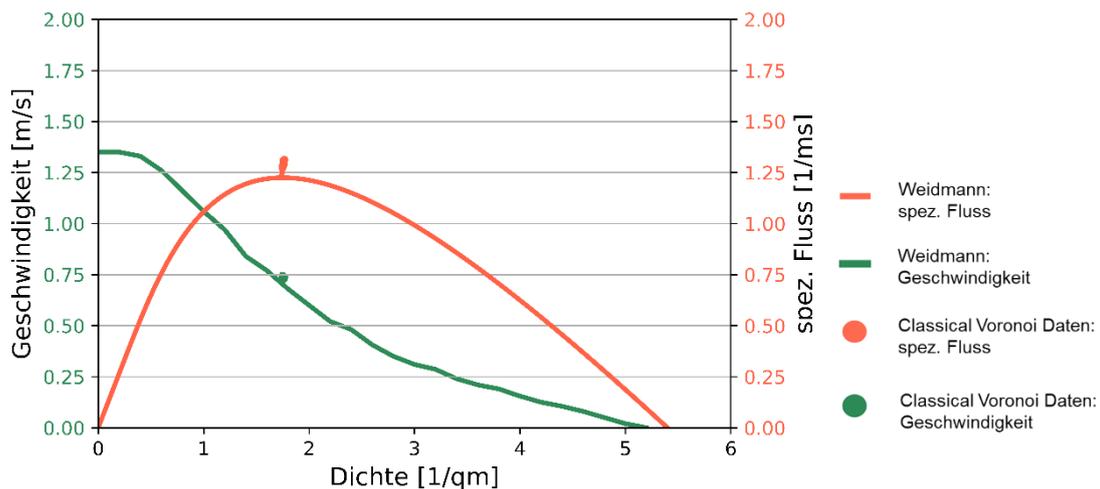


Abbildung 18: Vergleich der Daten aus Messfläche M3 und dem Fundamentaldiagramm nach Weidmann.

Somit wird eine Vergleichbarkeit der Simulationsdaten mittels dem gewählten Szenario gegenüber bekannten Vorgaben angenommen.

3.2.3 Berechnung der Staubeurteilungsfaktoren

Für die Analyse des Staus anhand der Kriterien der Staubeurteilung werden in Anlehnung an die Definitionen der DIN 18009-2 (Entwurf) [15], [31] und den gegebenen Daten aus JPSreport folgende Berechnungen aufgestellt.

Die Berechnung der Stauffläche erfolgt über die Zeit. Der Zeitpunkt t_c ist jeweils der aktuelle (current) betrachtete Zeitpunkt. Es wird dabei der Zeitraum von $t_{c=0}$ bis $t_{c=m}$ betrachtet, indem $t_{c=0}$ den Betrachtungsbeginn und $t_{c=m}$ das Betrachtungsende darstellt. Dabei wird gemäß der Voronoi Methode zum Zeitpunkt t_c die Fläche eines individuellen (i) Agenten $A_{t_c,i}$ als Kehrwert der Dichte $\rho_{t_c,i}$ angenommen (vgl. Formel 13).

$$A_{t_c,i} = \frac{1}{\rho_{t_c,i}} \quad \text{Formel 13}$$

Die Fläche A_{t_c} aller Agenten n zum Zeitpunkt t_c ergibt sich, gemäß Formel 14, aus der Summe aller einzelnen Flächen der Agenten, die zum Zeitpunkt t_c eine Geschwindigkeit $v_{t_c,i}$ unter der Geschwindigkeitsgrenze v_{limit} haben. Daraus ergibt sich pro Zeitschritt t_c eine zugehörige Stauffläche.

$$A_{t_c,v_{limit}} = \sum_{i=1}^n A_{t_c,v_{t_c,i}} \quad \text{für } v_{t_c,i} \leq v_{limit} \quad \text{Formel 14}$$

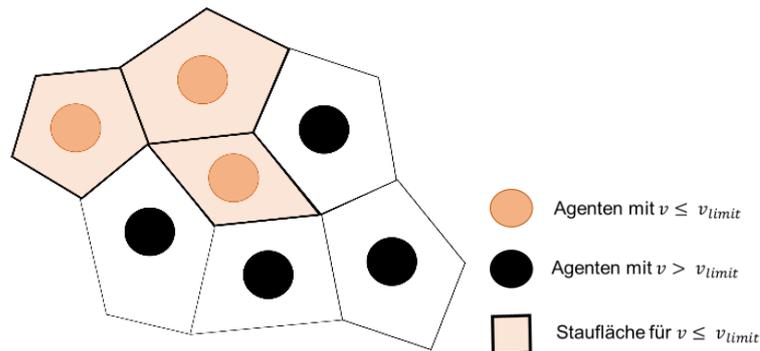


Abbildung 19: Skizzierte Berechnung der Stauffläche A_{t_c} in Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Agenten und der Geschwindigkeitsgrenze.

Die ermittelte maximale Fläche A_{max} (vgl. Formel 15) ist die maximale Fläche, die sich über die Zeit $t_{c=0}$ bis $t_{c=m}$ bei der Betrachtung für die jeweilige Geschwindigkeitsgrenze v_{limit} ergibt.

$$A_{max, v_{limit}} = \max(A_{t_{c=0}, v_{limit}}, A_{t_{c=1}, v_{limit}}, \dots, A_{t_{c=m}, v_{limit}}) \quad \text{Formel 15}$$

Die Berechnung der Staugröße bzw. der im Stau beteiligten Agenten erfolgt ebenfalls über die Zeit. Der Zeitraum ebenfalls definiert von $t_{c=0}$ bis $t_{c=m}$. Die Anzahl der am Stau beteiligten Agenten N_{t_c} über die Agenten n zum Zeitpunkt t_c ist entsprechend der Formel 16 und 17 die Menge aller Agenten $P_{t_c,i}$, die zum Zeitpunkt t_c eine Geschwindigkeit $v_{t_c,i}$ unter der Geschwindigkeitsgrenze v_{limit} haben. Somit ergibt sich pro Zeitschritt eine am Stau beteiligte Agentenanzahl für die jeweilige Geschwindigkeitsgrenze v_{limit} .

$$N_{t_c, v_{limit}} = \sum_{i=1}^n P_{t_c, i} \tag{Formel 16}$$

$$\text{mit } P_{t_c, i} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } v_{t_c, i} \leq v_{limit} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \tag{Formel 17}$$

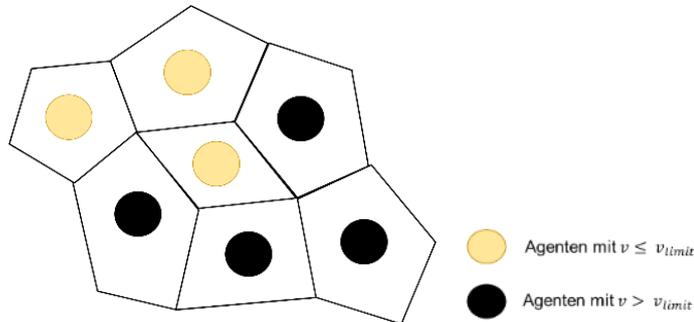


Abbildung 20: Skizzierte Berechnung der Agentenanzahl am Beispiel $N_{t_c} = 3$ in Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Agenten und der Geschwindigkeitsgrenze.

Das daraus ermittelte Maximum ist die größte Anzahl an Agenten N_{max} in Betrachtung über die Zeit $t_{c=0}$ bis $t_{c=m}$ für die jeweilige Geschwindigkeitsgrenze v_{limit} . (vgl. Formel 18)

$$N_{max, v_{limit}} = \max(N_{t_{c=0}, v_{limit}}, N_{t_{c=1}, v_{limit}}, \dots, N_{t_{c=m}, v_{limit}}) \tag{Formel 18}$$

Die Stauzeit im Betrachtungszeitraum t_0 bis t_m ist die Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt t_a , an dem die Geschwindigkeit von dem ersten Agenten ($v_{t_c, i}$) unter die Geschwindigkeitsgrenze (v_{limit}) fällt, bis zum Zeitpunkt t_e , an dem der letzte Agent noch unter der Geschwindigkeitsgrenze liegt.

$$t_{s, v_{limit}} = t_{a, v_{limit}} - t_{e, v_{limit}} \tag{Formel 19}$$

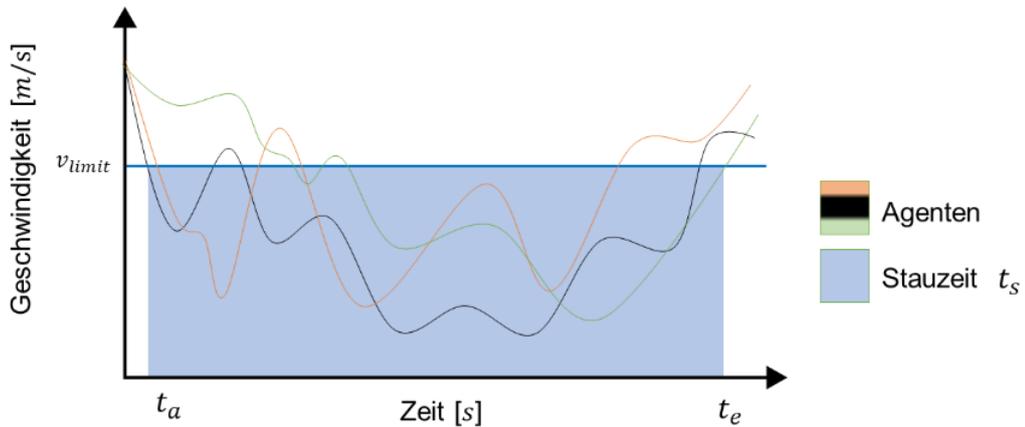


Abbildung 21: Skizzierte Berechnung der Stauzeit t_s in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsverlaufes verschiedener Agenten und der Geschwindigkeitsgrenze.

Die Wartezeit wird für jeden Agenten über den Betrachtungszeitraum berechnet. Die Wartezeit eines Agenten $t_{w, i}$, ist die Summe aller Zeitschritte $\Delta t_{v_{t_c, i} < v_{limit}, i}$ in der der Agent eine Geschwindigkeit $v_{t_c, i}$ unter der Geschwindigkeitsgrenze v_{limit} hat.

$$\Delta t_{v_{t_c,i} < v_{limit,i}} = \begin{cases} t_{c,i} - t_{c-1,i} & , \text{für } v_{t_c,i} < v_{limit} \\ 0, & \text{für } v_{t_c,i} > v_{limit} \end{cases} \quad \text{Formel 20}$$

$$t_{w,i,v_{limit}} = \sum_{c=0}^m \Delta t_{v_{t_c,i} < v_{limit,i}} \quad \text{Formel 21}$$

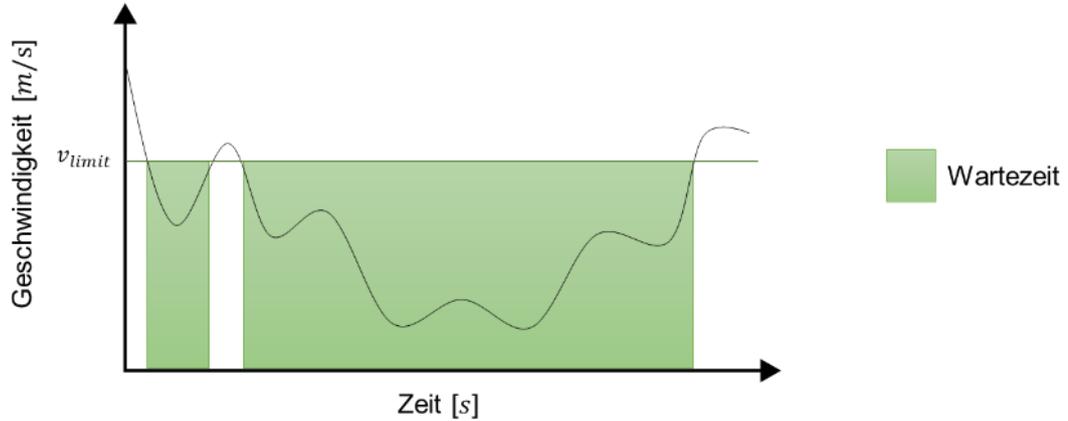


Abbildung 22: Skizzierte Berechnung der Wartezeit $t_{w,i}$ eines Agenten n Abhängigkeit der Geschwindigkeitsgrenze.

Die Maximale Wartezeit aller Agenten n , ist das Maximum der Wartezeiten pro Agenten.

$$t_{w,max,v_{limit}} = \max(t_{w,i=1,v_{limit}}, t_{w,i=2,v_{limit}}, \dots, t_{w,n,v_{limit}}) \quad \text{Formel 22}$$

Des Weiteren wird im Rahmen dieser Arbeit der Abstand der Agenten zum Mittelpunkt der Tür betrachtet. Der im Folgenden festgelegte Abstand ist als die Luftlinie zur Mitte vom Ausgang A definiert. Dafür wird der Abstand $D_{t_c,i}$ zum Zeitpunkt t_c über den Pythagoras der Differenz der X bzw. Y-Koordinate des Agenten ($X_{t_c,i}/Y_{t_c,i}$) zum Zeitpunkt t_c zur mittleren Koordinate vom Ausgang A (X_{Exit_0}/Y_{Exit_0}) als Kantenlängen ermittelt.

$$D_{t_c,i,v_{limit}} = \begin{cases} \sqrt{(X_{Exit_0} - X_{t_c,i})^2 + (Y_{Exit_0} - Y_{t_c,i})^2} & , \text{für } (v_{t,i} \leq v_{limit}) \\ \{ \} & , \text{für } (v_{t,i} > v_{limit}) \end{cases} \quad \text{Formel 23}$$

Das daraus ermittelte Maximum ist die größte Distanz $D_{t_c,i,v_{limit} \max}$ in Betrachtung über die Zeit $t_{c=0}$ bis $t_{c=m}$ für die jeweilige Geschwindigkeitsgrenze v_{limit} .

$$D_{t_c,i,v_{limit} \max} = \max(D_{t_{c=0,i}}, D_{t_{c=1,i}}, \dots, A_{t_{c=m,i}}) \quad \text{Formel 24}$$

3.2.4 Betrachtungszeitraum

Der Betrachtungsbeginn wird als der Zeitpunkt angenommen, an dem der erste Agent den Ausgang A erreicht. Somit soll der Einfluss von den Anfangsbedingungen minimiert und die Betrachtung von einem dynamischen Zeitpunkt aus gestartet werden. Für das in diesem Kapitel beschriebenen Szenario wurde der Beginn des Betrachtungszeitraumes, wie in Abbildung 23 dargestellt, ab 3.625 Sekunden angenommen.

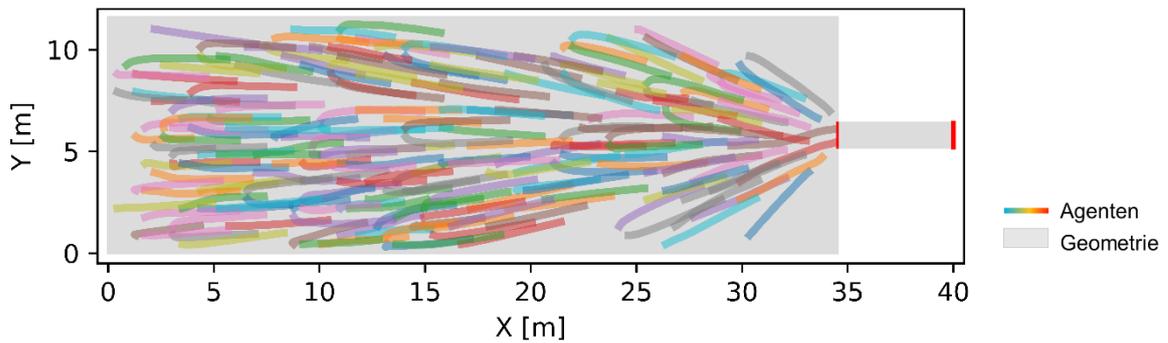


Abbildung 23: Darstellung der Trajektorien aller Agenten (200) bis zum Start des Betrachtungszeitraumes bei 3.625 s.

Das Betrachtungsende ist der Zeitpunkt, an dem der letzte Agent die Messfläche M2 verlässt. Bei dem hier beschriebenen Szenario ergibt sich, eine Bewegungszeit von ca. 138 s. Dieser Zeitraum wird in den folgenden Analysen betrachtet.

3.3 Analyse der Staudynamik

3.3.1 Stauphasen

Zu Beginn werden die individuellen Geschwindigkeiten aller Agenten, entsprechend der Abbildung 24, für eine allgemeine Betrachtung der Dynamik innerhalb der Messfläche M2 über die Zeit herangezogen. Dabei lassen sich vier Zeitpunkte erkennen, an denen sich die Dynamik der Agentengruppe bzw. die Geschwindigkeiten der Agenten ändern.

Zu Beginn steigen die Geschwindigkeiten an, sodass viele Agenten ihre freie Geschwindigkeit erreichen. Anschließend fallen die Geschwindigkeiten aller Agenten über einen kurzen Zeitraum (ca. 20 s) sehr stark ab. Danach ändert sich das Muster der Geschwindigkeitsverläufe und es bilden sich diverse Schwankungen, aber kein Agent erreicht die freie Geschwindigkeit. Die Schwankungen nehmen im Verlaufe in ihrer Dauer und Amplitude über einen ähnlich kurzen Zeitraum (ca. 25 s) ab, bis sich gleichmäßige Schwankungen bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit unter 0,1 m/s ergeben. Die Häufigkeit der Schwankungen nimmt durch das Verlassen der Agenten mit der Zeit ab und die Durchschnittsgeschwindigkeit und die Ausprägungen der Schwankungen steigen kontinuierlich an. Über den gesamten Zeitraum sind zudem schnell ansteigende Geschwindigkeiten zu erkennen. Dies sind die Agenten, die den Stau in Richtung der Engstelle verlassen.

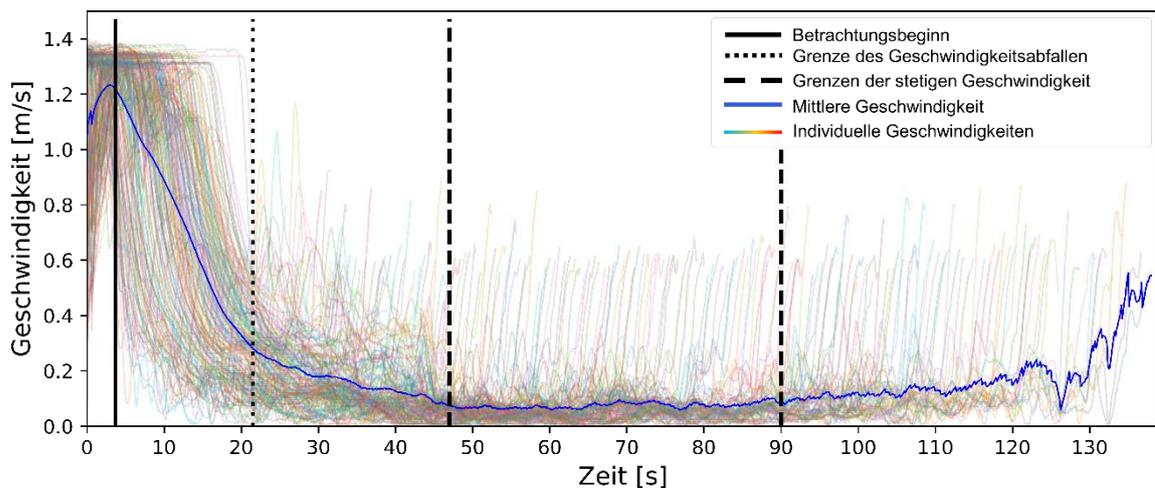


Abbildung 24: Individuelle Geschwindigkeiten der Agenten in der Messfläche M2 über die Zeit.

Im Folgenden wird der Verlauf der Simulation in Bezug auf die ermittelten Geschwindigkeitsänderungen untersucht und mit Bildern aus der Simulation verknüpft. Dabei wird geprüft, inwiefern sich daraus Stauphasen ableiten lassen können.

Im Bereich des Geschwindigkeitswechsels am Anfang befindet sich der festgelegte Betrachtungsbeginn. Entsprechend der Absicht, möglichst vielen Agenten zu ermöglichen hohe Geschwindigkeiten aufzunehmen bevor sich ein Stau bilden kann, scheint die Annahme des Zeitpunktes aus Kapitel 3.2.4 sinnvoll gewählt.

Nach dem Betrachtungsbeginn erfolgt eine kollektive Geschwindigkeitsreduzierung bis zum Übergang in die Geschwindigkeitsschwankungen bei dem Zeitpunkt um ca. 22 s. Die Visualisierung der Positionen und Geschwindigkeiten der Agenten in der Messfläche M2 in Abbildung

24, zeigt ebenfalls eine deutliche Veränderung der Dynamik in dem Zeitraum. Die Agenten scheinen sich im hinteren Bereich des Raumes vorerst auf die Breite des Raumes zu verteilen und sich dann in Richtung der Engstelle anzunähern und dabei schrittweise die Geschwindigkeit anzugleichen. Die Entwicklung in diesem Zeitraum wird als dynamische und kurze Stauanbindungsphase definiert.

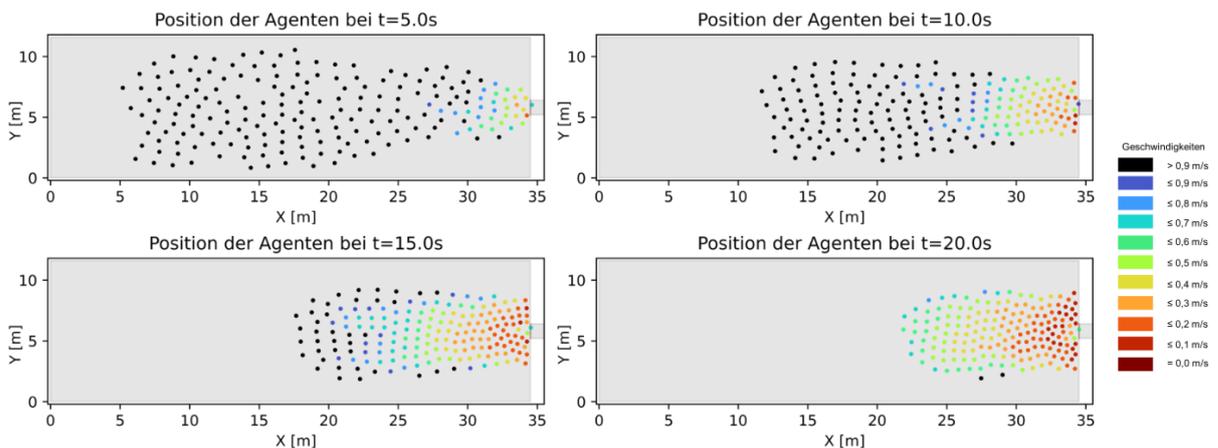


Abbildung 25: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten zum Zeitpunkt 5, 10, 15 und 20 s

Anschließend sind gemäß Abbildung 24 in dem Bereich zwischen 22 und 47 s diverse Schwankungen der Geschwindigkeiten erkennbar, die auf ein kurzzeitiges Hindernis hindeuten. In Anlehnung an einen signifikanten Stau nach RiMEA [26] der durch Stocken von Personenströmen definiert wird, ist diese Phase deutlich mit einem Stauverhalten in Verbindung zu bringen. Der gebildete Stau lässt dabei noch kurzzeitige Bewegungsspielraum zu. Somit gehen einige Agenten beispielsweise kurzzeitig seitlich am Stau weiter nach vorn. Dieser Effekt ist in der Abbildung 26, zwischen den Zeitpunkten 22 und 42 s, erkennbar. Im Vergleich zur vorherigen Visualisierung der Stauanbindungsphase liegt zudem eine deutlich langsamere Stauentwicklung vor. Somit wird diese Phase als Stauentwicklungsphase definiert.

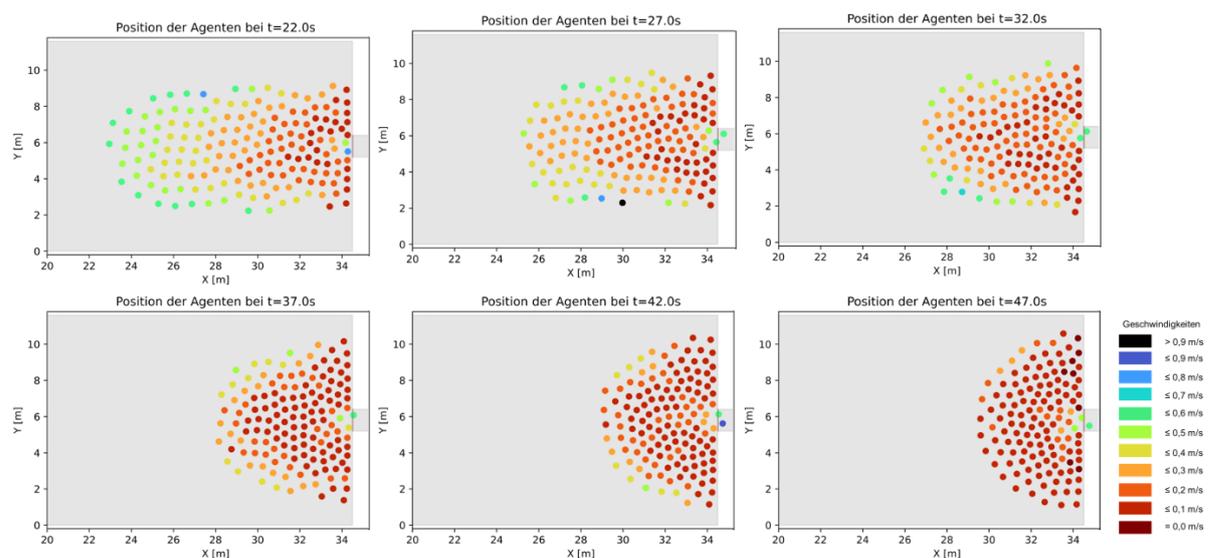


Abbildung 26: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten zum Zeitpunkt 22 bis 47 s

Entsprechend des Geschwindigkeitsverlaufes aus Abbildung 24, scheinen sich die Geschwindigkeiten bis zum Zeitpunkt von ca. 47 s einzupendeln und mit Ende der Stauentwicklungsphase beginnt eine deutlich weniger dynamische Phase mit kleineren Schwankungen. Dies zeigt sich ebenfalls bei der Betrachtung der Zeitspanne zwischen 50 und 90 s in Abbildung 27. Dabei bleibt die Form des Staus ähnlich und verkleinert sich kontinuierlich. Aufgrund der fehlenden Dynamik ist davon auszugehen, dass dies der späteste Zeitpunkt ist, an dem alle Agenten in einem statischen Stau stehen. Dieser Zeitraum wird als stationäre Stauphase definiert.

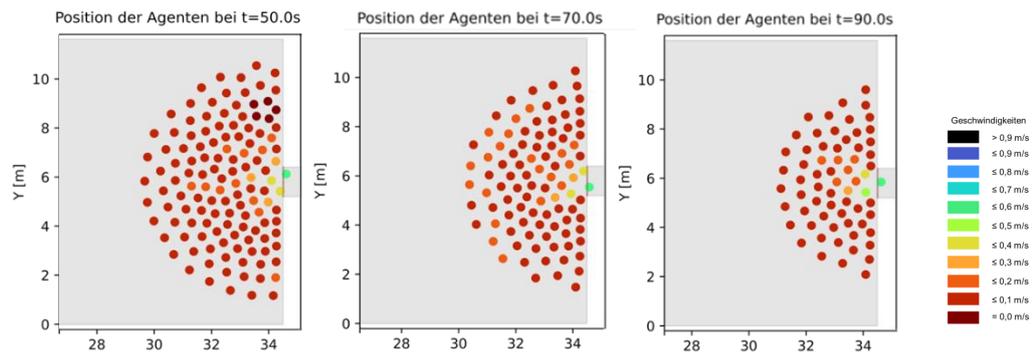


Abbildung 27: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten zum Zeitpunkt 50 bis 90 s.

Aufgrund der abnehmenden Agentenanzahl in dem Raum - und so auch im Stau - ergibt sich ab ca. 90 s eine Stauabbauphase, die sich durch einen leichten Anstieg der durchschnittlichen Geschwindigkeit kennzeichnet. Dieser minimale Anstieg ergibt sich, da aufgrund der verminderten Staufläche und Anzahl an Agenten mehr seitliche Bewegungen der Agenten zugelassen werden. Dabei verläuft diese, wie in der folgenden Abbildung zu sehen, ebenfalls eher statisch und mit niedrigen Geschwindigkeiten.

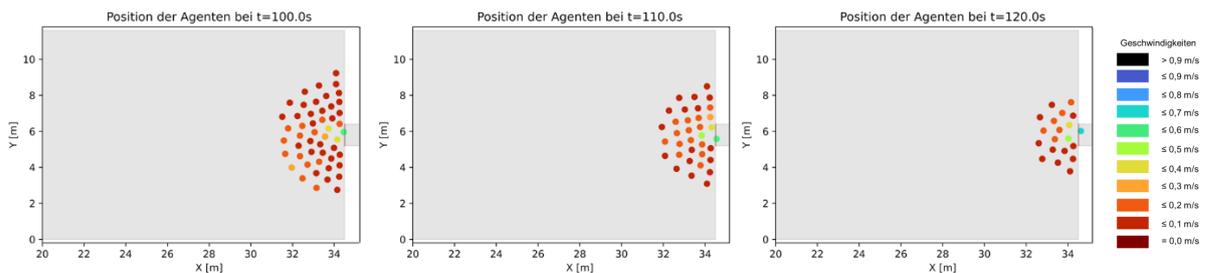


Abbildung 28: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten zum Zeitpunkt 100 bis 120 s.

3.3.2 Staudynamik in der Messfläche M1

Zusätzlich wird der Dichte-, Fluss- und Geschwindigkeitsverlauf innerhalb der Messfläche M1 betrachtet und mit den bisherigen Erkenntnissen verglichen. Dabei stellt sich innerhalb der Messfläche eine vergleichbare Dynamik ein. Somit lässt sich ebenfalls eine Verbindung zu den oben benannten Stauphasen herstellen.

In der Stauanbindungsphase spiegelt sich, entsprechend der Abbildung 29 und 30, der schnelle Anstieg von der Dichte und Abfall der Geschwindigkeit in der Messfläche M1 wider. In der Stauentwicklungsphase nimmt die Dynamik deutlich ab, die Dichte steigt dabei weiterhin an. Mit Beginn der stationären Stauphase zeichnet sich der Bereich der maximalen Dichte ab, in welchem diese nicht mehr kontinuierlich ansteigt, sondern tendenziell abfällt. Anschließend fällt im Bereich der Stauabbauphase die Dichte, da aufgrund der abnehmenden Größe des Staus die Messfläche nicht mehr mit Agenten nachgefüllt wird. In Bezug auf die Geschwindigkeit lässt sich der Bereich des stationären Zustandes durch gleichbleibende Geschwindigkeiten um ca. 0,1 m/s erkennen.

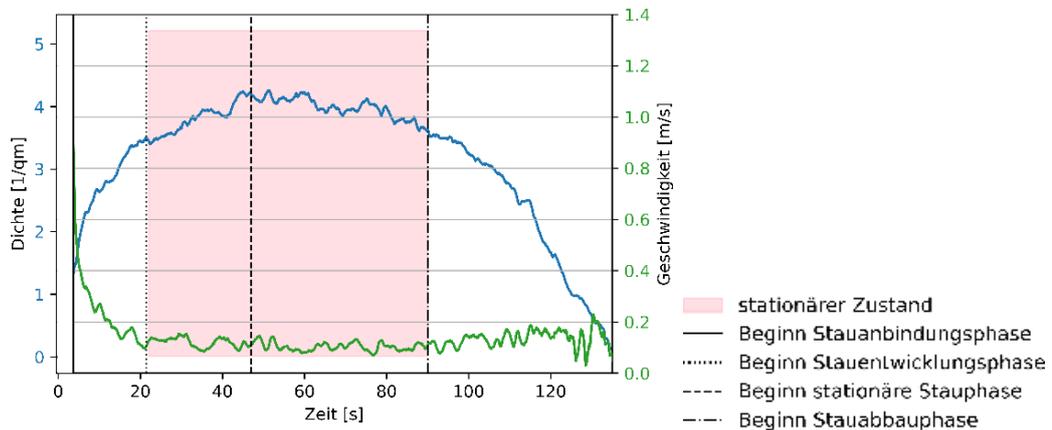


Abbildung 29: Dichte- und Geschwindigkeitsverlauf der Messfläche M1.

Dabei hängt die Auswertung maßgeblich von der Positionierung der Messfläche ab. Ziel war es die Messfläche in das Zentrum des Staus zu setzen, um ggf. Annahmen hinsichtlich der Dynamik des Staus ableiten zu können. Dies konnte durch die gewählte Positionierung der Messfläche entsprechend der Abbildung 29 und 30 erreicht werden.

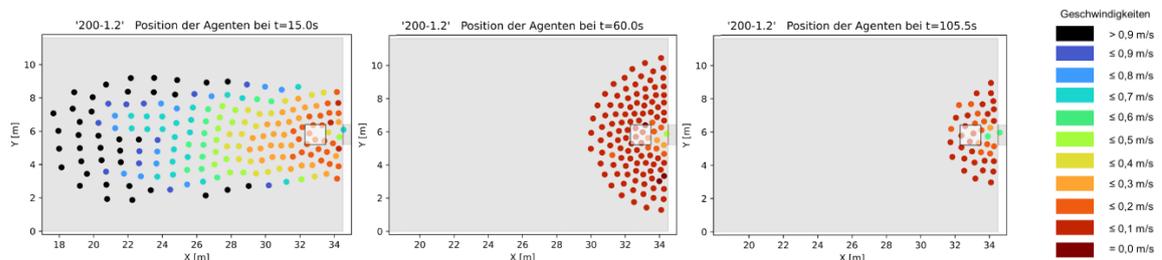


Abbildung 30: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten (15, 55 und 105 s) inkl. der Messfläche M1.

3.4 Analyse der Staukriterien

Ziel dieses Kapitels ist es eine Geschwindigkeitsgrenze für eine dynamische Staudefinition festzulegen. Die Auswertung aus Kapitel 3.2 zeigt, dass dafür vor allem die Stauanbindungs- und Entwicklungsphase in Betrachtung zu ziehen sind. Die stationäre Stauphase hingegen scheint für die Untersuchung des statischen Stauverhaltens relevant. In den folgenden Kapiteln werden nun die in Kap 2.2.3 vorgestellten Staukriterien in Bezug auf die verschiedenen Geschwindigkeitsgrenzen unter Einfluss der festgelegten Stauphasen betrachtet und analysiert.

3.4.1 Staustelle und Staugröße

Die Staustelle umfasst einerseits die Position bzw. Lage des Staus, deren Form sowie die berechnete Staupfläche. Wie erwartet findet die Staubildung vor der Engstelle statt. Die Ausbreitung und Form ist dabei, wie in Abbildung 31 beispielhaft dargestellt, von der jeweiligen Geschwindigkeitsgrenze abhängig. Die Form in der Abbildung bildet dabei nicht die tatsächliche Fläche mittels Voronoi-Zellen ab, sondern stellt einen groben Umriss der örtlichen Verteilung der Agenten anhand ihrer Geschwindigkeitsgrenze dar. Dabei bilden sich in der Stauanbauphase (Beispiel: 15 s) bei der Geschwindigkeitsgrenze von $\leq 0,6$ m/s überwiegend einheitliche Flächen mit stellenweise kleineren Ausläufern einzelner Agenten. Diese Agenten sind dabei primär von Agenten umgeben die maximal 0,1 m/s schneller sind und dies auch nur für einen kurzen Zeitraum. Ab einer Geschwindigkeitsgrenze von 0,7 m/s bilden sich größere Ausläufe bestehend aus mehreren Agenten in größerer Entfernung von der Engstelle. Dies hat zur Folge, dass bei einer Geschwindigkeitsgrenze ab 0,8 m/s benachbarte Agenten bis zu 0,4 m/s höhere Geschwindigkeiten haben. Im Laufe des Überganges nimmt, entsprechend der folgenden Abbildung (Beispiel: 50 s), der Stau in der stationären Stauphase die modellabhängige rundliche Form vor der Engstelle an.

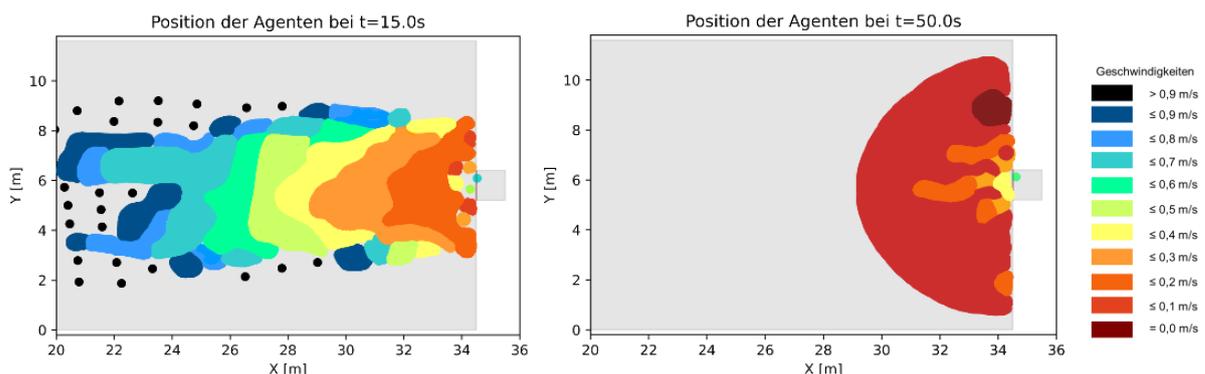


Abbildung 31: Skizzierte Form des dynamischen Staus (links) und statischen Staus (rechts) in Bezug zur jeweiligen Geschwindigkeitsgrenze (Beispiele).

Anschließend folgt die Betrachtung der berechneten Staupfläche über die Zeit in Abbildung 32. Allgemein sind dabei für die Geschwindigkeitsgrenzen $\geq 0,5$ m/s zu Beginn schnelle und nahezu lineare Anstiege bis zur maximalen Staupfläche erkennbar. Anschließend nimmt die Staupfläche zunächst stark ab. Im weiteren Verlauf verringert sich die Staupfläche über die Zeit gesehen zunehmend langsamer. Dazu sind im Vergleich für die Geschwindigkeitsgrenzwerte \leq

0,4 m/s sowohl die Zunahme als auch Abnahme der Staupfläche mit flacheren Steigungen verbunden.

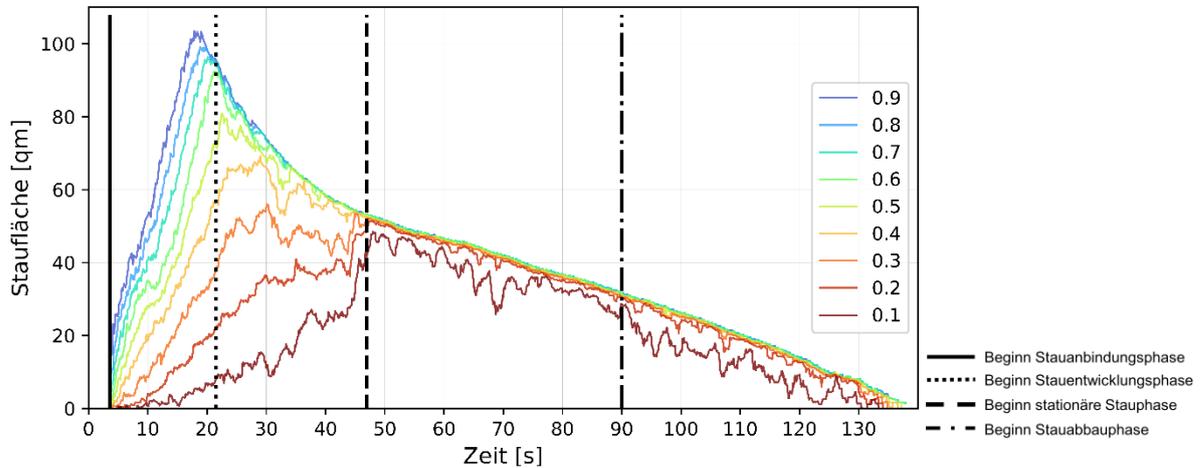


Abbildung 32: Maximale Staupfläche über die Zeit in Bezug zur jeweiligen Geschwindigkeitsgrenze.

Die unterschiedliche Entwicklung der Staupfläche ist darin begründet, dass in der Stauanbindungsphase noch eine niedrige bzw. keine einheitliche Dichte vorliegt und die Staupfläche sich somit noch verdichtet. Dies zeigt sich in der Abbildung 33, indem die mittlere Dichte bis kurz vor Ende der Stauentwicklungsphase ansteigt. Dies gilt für die gesamte Fläche der Agenten und ist grenzwertunabhangig. Dabei haben, wie in der Abbildung 29, zur Dichte in der Messfläche M1 zu sehen, die Agenten, welche bereits in der Näher der Engstelle stehen in Verbindung mit ihren niedrigen Geschwindigkeiten früher höhere und konstantere Dichten. Dieser Effekt ist zudem als Positionen in Abbildungen 25 und 26 visualisiert.

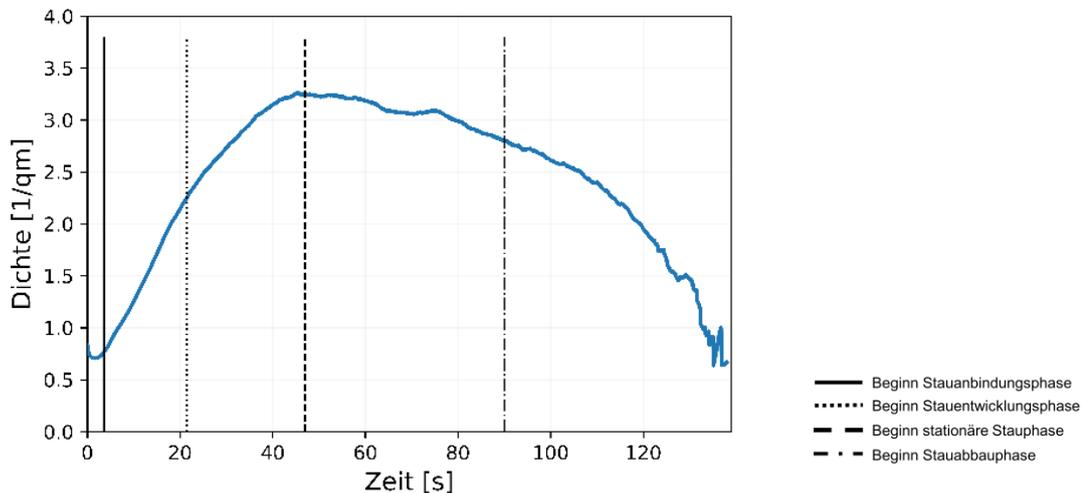


Abbildung 33: Verlauf der – mittleren individuellen – Dichte in Messfläche M2.

In Bezug auf die Maxima der Staupfläche in Verbindung mit den Stauphasen ist in Abbildung 32 erkennbar, dass bei der Geschwindigkeitsgrenze von 0,6 m/s dieses zu dem Zeitpunkt erreicht wird, an dem die definierte Stauanbindungsphase in die Stauentwicklungsphase übergeht. Somit würde die Auswahl dieser Geschwindigkeitsgrenze die Definition des Phasenüberganges bestätigen. Innerhalb der Stauentwicklungsphase zeigen sich in Abbildung 24

für die Geschwindigkeitsgrenzwerte $\leq 0,4$ m/s deutliche Schwankungen. Diese ergeben sich daraus, dass sich die gebildete Stauform näher an der Engstelle und in Form eines Halbkreises entwickelt. Im Laufe der Staumentwicklung bewegen sich Agenten, die bereits niedrige Geschwindigkeiten ($\leq 0,4$ m/s) erreicht haben, kurzzeitig schneller, da sie, wie in folgender Abbildung dargestellt, auf die seitlichen Stauränder ausweichen. Bei Auswahl von Geschwindigkeitsgrenzwerten $\leq 0,4$ m/s würde das Ausweichverhalten der Agenten nicht als Zusammenhang zum Stau gewertet werden. Da jedoch der Stau als Auslöser dieses Verhaltens anzunehmen ist, könnte die Auswahl dieser Geschwindigkeitsgrenzwerte zu einer Unterschätzung des Stauverhaltens führen.

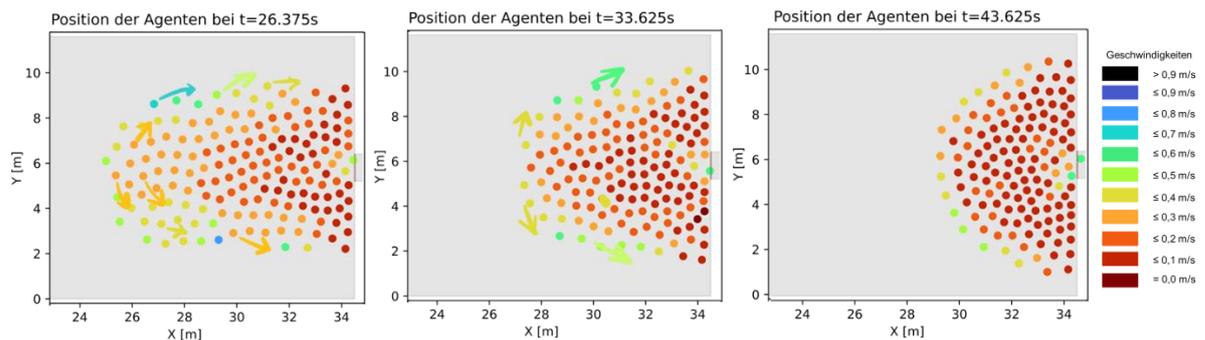


Abbildung 34: Veränderung der Stauform in der Staumentwicklungsphase anhand der Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen.

Ab dem Beginn der stationären Stauphase, sind wie bereits in Kap. 3.3.1 herausgearbeitet, primär niedrige Geschwindigkeiten $\leq 0,3$ m/s erkennbar, die sich über die gesamte Staupläche erstrecken. Somit ist diese Phase des Staus nahezu unabhängig der Geschwindigkeitsgrenzwerte $> 0,3$ m/s. Unter Betrachtung der abflachenden Steigung im Bereich der Stauabbauphase lässt sich die Definition dieser Phase ebenfalls bestätigen.

Dabei entwickelt sich die Zu- und Abnahme der Staugröße über die Zeit, entsprechend folgender Abbildung, für die Geschwindigkeitsgrenzwerte $\geq 0,4$ m/s linear. Die lineare Abnahme ist in dem kontinuierlichen Abfluss der Agenten begründet.

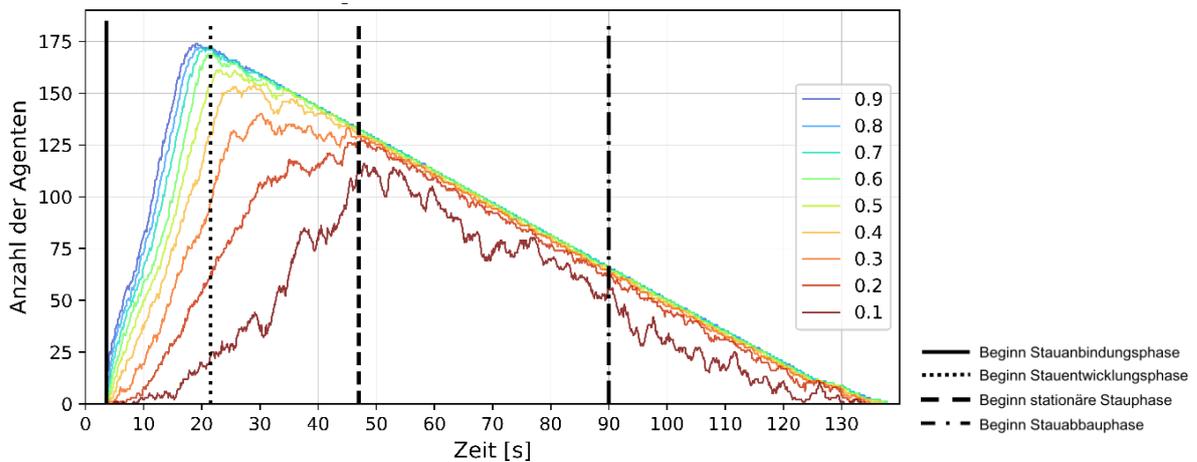


Abbildung 35: Maximale Staugröße/ Anzahl an Agenten im Stau über die Zeit in Bezug zur jeweiligen Geschwindigkeitsgrenze.

Bei dem Geschwindigkeitsgrenzwert von 0,1 m/s ist die Abnahme der Agentenanzahl deutlich schwankender. Somit scheint bei diesem Geschwindigkeitsgrenzwert nicht nur das Verlassen von Agenten aus dem Raum einen Einfluss auf die Abnahme der Personenzahl zu haben, sondern auch individuelle Bewegungsmuster innerhalb des vorhandenen Staus. Da sich in dem Bereich der stationären Stauphase ein deutlicher Stau aller Agenten entwickelt hat (vgl. Kapitel 4.3.1) sollte die Staugröße somit primär von der Anzahl der Agenten, die den Raum verlassen bestimmt werden. Es wird daher von der Auswahl der Geschwindigkeitsgrenze von 0,1 m/s abgeraten. Bei den Geschwindigkeitsgrenzwerten 0,2 m/s und 0,3 m/s reagiert die Anzahl der Agenten in der Stauabbauphase ebenfalls sensibler. Somit ergäbe die Auswahl dieser Geschwindigkeitsgrenzwerte eine mögliche Unterschätzung des Stauverhaltens.

3.4.2 Stau- und Wartezeit

Die Wartezeit ist nach RiMEA [26] einer der einflussreichsten Kriterien, da sich diese für den einzelnen Agenten direkt bemerkbar macht und Auswirkungen auf dessen Psyche haben kann. Bei der Betrachtung der Verteilung der Wartezeit zeigt sich gemäß folgender Abbildung, dass sich diese bei zunehmender Geschwindigkeitsgrenze zu einer gleichmäßigen Verteilung angleicht bzw. homogener wird.

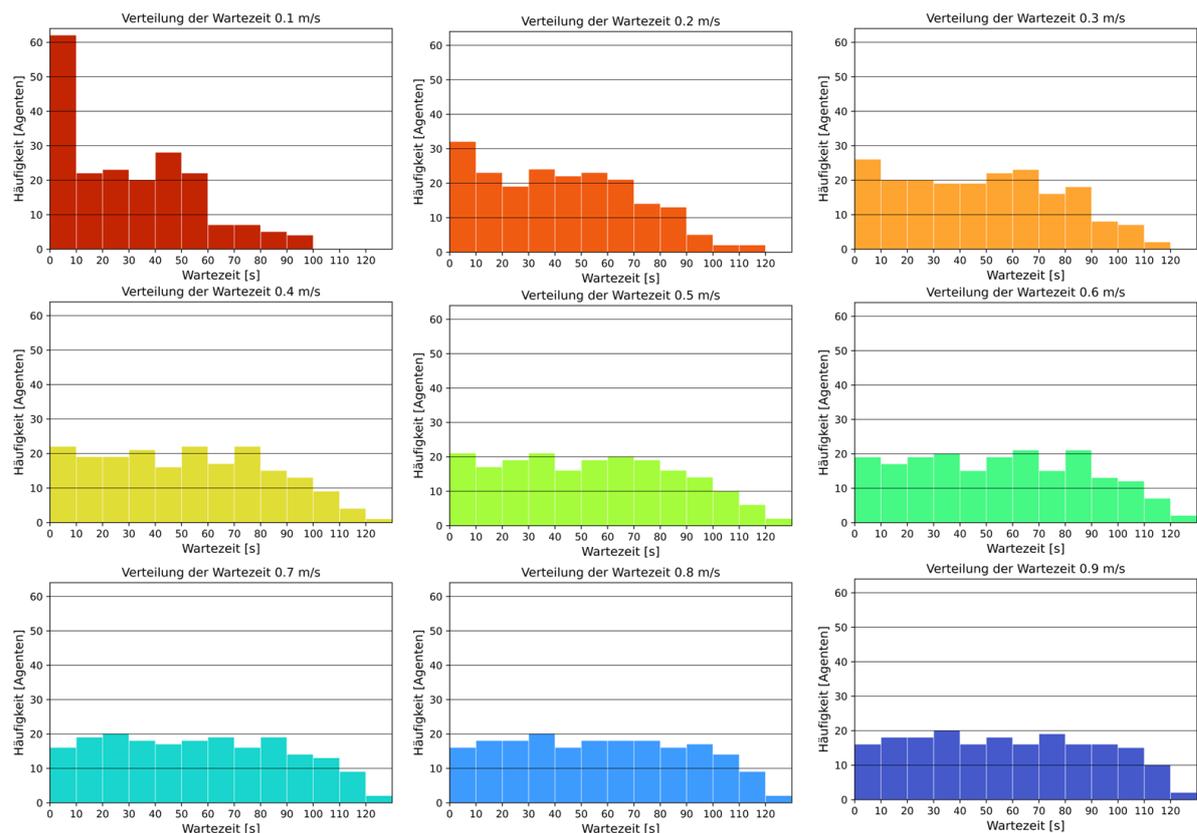


Abbildung 36: Histogramm der Wartezeiten nach Geschwindigkeitsgrenze (Gruppierung auf 10s).

Es ist zudem auffällig, dass bei der Betrachtung der Geschwindigkeitsgrenze für die Staudefinition von 0,1 m/s über 60 Agenten unter 10 s im Stau stehen und nur sehr wenige Agenten über 60 s im Stau stehen. Dies ist darin begründet, dass einerseits bis zum Zeitpunkt von ca.

15 bzw. 16 s kaum ein Agent diese Geschwindigkeitsgrenze unterschreitet und somit bereits 18 Agenten die Messfläche verlassen haben. Außerdem unterschreiten viele Agenten diese Geschwindigkeitsgrenze nur zeitweise. Dies ist zudem in den Schwankungen der Staufläche und Staugröße (Kap. 3.4.1) zu sehen.

In Bezug auf die maximale Wartezeit liegt diese vom Geschwindigkeitswert von 0,1 m/s, wie in Abbildung 37 zu sehen, bei 98 s und somit 15 s unter der maximalen Wartezeit bei der Geschwindigkeitsgrenze von 0,2 m/s. Die maximalen Wartezeiten der Geschwindigkeitsgrenzwerte von 0,2 m/s bis 0,9 m/s liegen in einer Zeitspanne von 12 s. Somit besteht die Gefahr den Stau anhand der Geschwindigkeitsgrenze von 0,1 m/s zu unterschätzen.

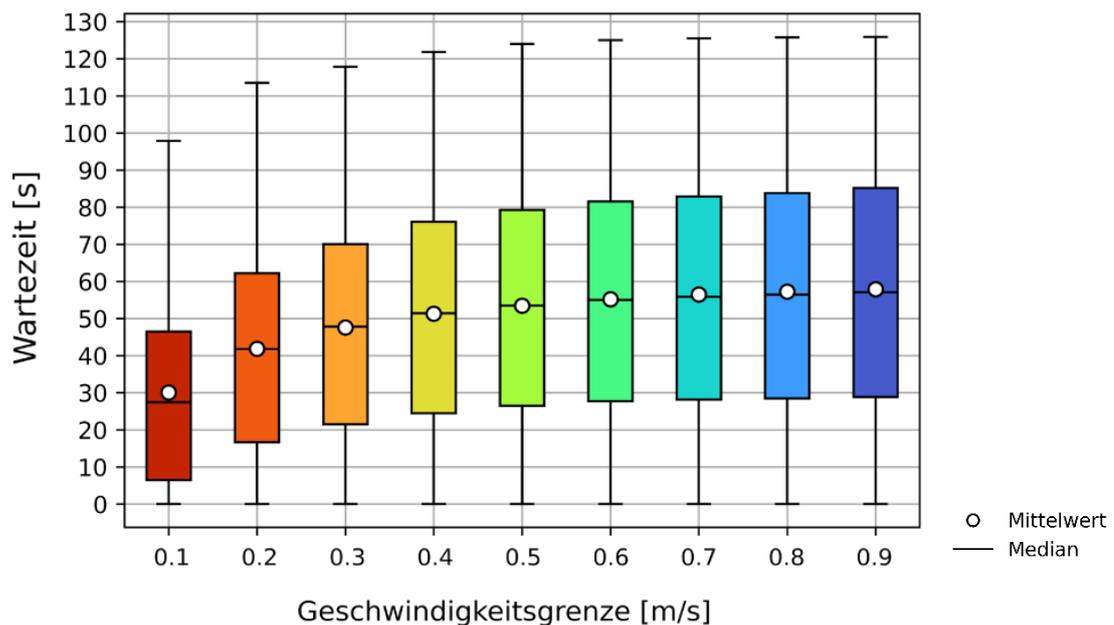


Abbildung 37: Boxplot-Diagramm zu Verteilung der Wartezeiten nach Geschwindigkeitsgrenze

Die Verteilung in Abbildung 37 zeigt außerdem, dass sich ab einer Geschwindigkeitsgrenze von 0,6 m/s der Median, der Mittelwert und das Maximum für die höheren Geschwindigkeitsgrenzen deutlich angleichen und somit die Gefahr die Wartezeit zu unterschätzen für die Geschwindigkeitsgrenzen $\geq 0,6$ m/s abnimmt.

In Bezug auf die Stauzeit ergibt sich im Rahmen der Parameterstudie keine verwendbare Aussage in Bezug auf die Auswahl eines Geschwindigkeitsgrenzwertes. Dies ist darin begründet, dass zum Zeitpunkt des Betrachtungsbeginnes bereits ein Agent eine Geschwindigkeit unter 0,6 m/s besitzt. Somit ist die Stauzeit für die Geschwindigkeitsgrenzwerte $\geq 0,6$ m/s jeweils der ganze Betrachtungszeitraum (siehe Anhang 4).

Aus dem Verlauf der mittleren Dichte lässt sich aufgrund der gleichen Entwicklung unabhängig der Geschwindigkeitsgrenze ebenfalls keine Erkenntnis in Bezug auf das Ziel dieser Arbeit ziehen (siehe Anhang 4).

3.4.3 Abstand zur Tür und Geschwindigkeit in der Messfläche M2

Des Weiteren wurde zusätzlich zu den Staukriterien aus der Literatur der maximale Abstand der Agenten zur Tür (Ausgang A) betrachtet. Dies bedeutet, dass entsprechend der folgenden Abbildung über die Zeit für jede Geschwindigkeitsgrenze Zeit jeweils der Agent mit dem größten Abstand zum Türmittelpunkt ermittelt wurde. Dabei kann es sich zu unterschiedlichen Zeitpunkten um unterschiedliche Agenten handeln.

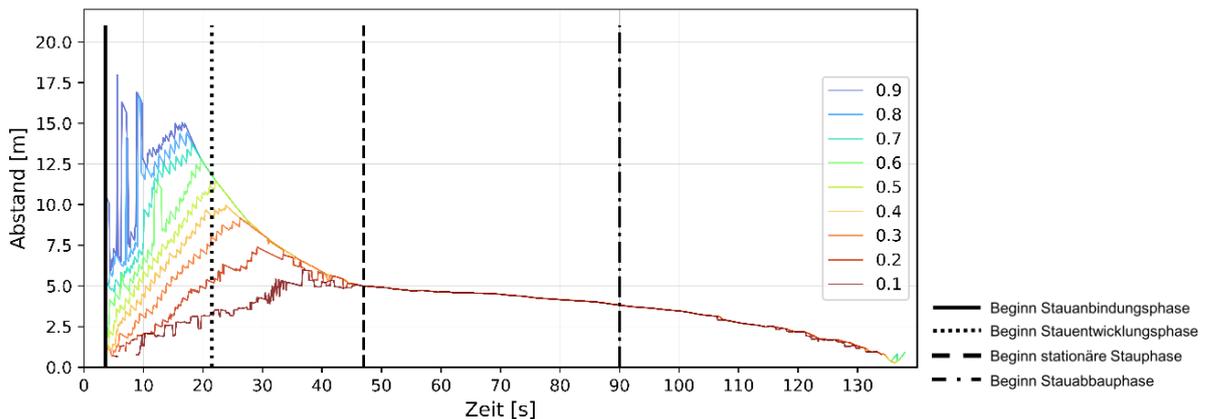


Abbildung 38: Maximaler Abstand der Agenten in Bezug zur jeweiligen Geschwindigkeitsgrenze.

Bei der Betrachtung des maximalen Abstandes ergeben sich in der Stauanbauphase für die Geschwindigkeitsgrenze $\geq 0,8$ m/s größere Schwankungen. Dies Schwankungen entstehen primär durch kurzzeitige Blockaden von Agenten gegenseitig, die jedoch nicht im direkten Zusammenhang mit dem gebildeten Stau stehen. Dies zeigt sich zum Beispiel in der folgenden Abbildung. Dabei haben nur einzelne Agenten für eine sehr kurze Zeit, teilweise < 1 s, eine Geschwindigkeit unter den Geschwindigkeitsgrenzwerten.

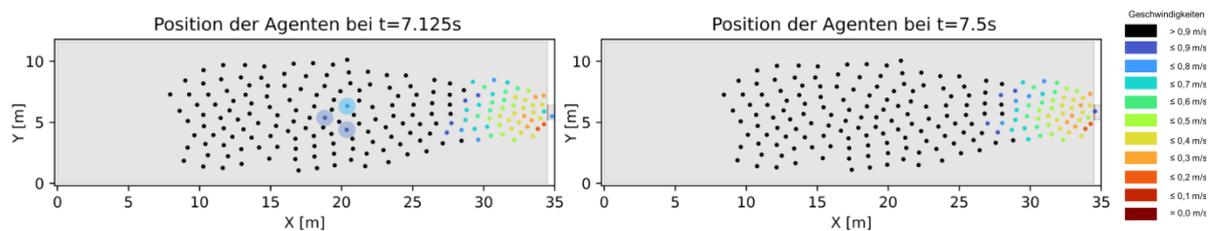


Abbildung 39: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten inkl. Markierung der relevanten Agenten für die Betrachtung des Abstandes zum Zeitpunkt 7.125s.

Eine Annahme der Geschwindigkeitsgrenze $\geq 0,8$ m/s hätte somit zur Folge, dass diese kurzfristigen Blockaden ebenfalls in den Stau eingerechnet werden und somit die Bewertung des Staus vor der Engstelle beeinflussen. Im Rahmen dieser Arbeit wird in Hinblick auf das Analyseziel die Geschwindigkeitsgrenze $\geq 0,8$ m/s somit nicht als sinnvolle Annahme erachtet.

Ebenfalls auffällig am Verlauf des Abstandes der Agenten nach Abbildung 38 ist der kurzzeitig geradlinige Anstieg des Abstandes bei der Geschwindigkeitsgrenze 0,6 m/s und 0,7 m/s zwischen 11 und 13 s sowie der darauf folgende Abfall für die Geschwindigkeitsgrenze 0,6 m/s. Unter Betrachtung der Positionen der Agenten, gemäß folgender Abbildung, ist zu sehen, dass sich die Agenten an der Stelle deutlich näher kommen und die Agenten die Geschwindigkeit kurzfristig, aufgrund einer Blockade reduzieren. Dabei ist, im Gegensatz zu den

Ereignissen bei den Geschwindigkeitsgrenze $\geq 0,8$ m/s, bereits eine örtliche Nähe zu langsameren Agenten erkennbar. Somit kann davon ausgegangen werden, dass diese Blockade bereits im Zusammenhang zum Stau steht. Die Auswahl der Geschwindigkeitsgrenze von 0,6 oder 0,7 m/s ist folglich in Bezug auf den Abstand und die Blockaden in der Nähe des Staus als durchaus sensibel einzustufen.

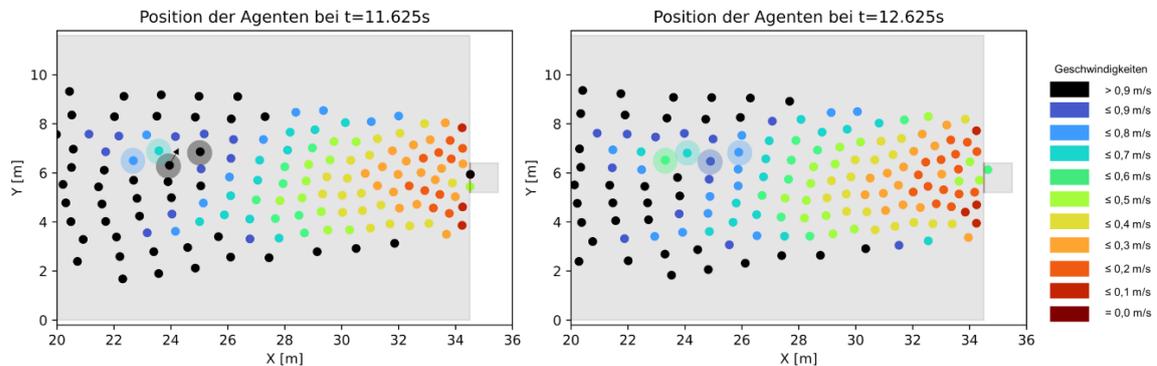


Abbildung 40: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten inkl. Markierung einer Blockade.

Dabei ist zu beachten, dass für die Grenzwertgeschwindigkeiten 0,6 und 0,7 m/s die Blockade entsprechend der Abbildung 41 keinen Einfluss auf den über den gesamten Zeitraum betrachteten maximalen Abstand hat. Es zeigt sich zudem, dass der maximale Abstand zwischen den Grenzwerten 0,1 und 0,7 m/s annähernd linear im Zusammenhang steht und sich zum maximalen Abstand in Bezug auf den Geschwindigkeitsgrenzwert 0,8 m/s ein Versatz nach oben abbildet. Diese Erkenntnis deckt sich mit den bisherigen Annahmen bezüglich der Sensibilität der Geschwindigkeitsgrenzwerte ab 0,6 m/s und 0,8 m/s.

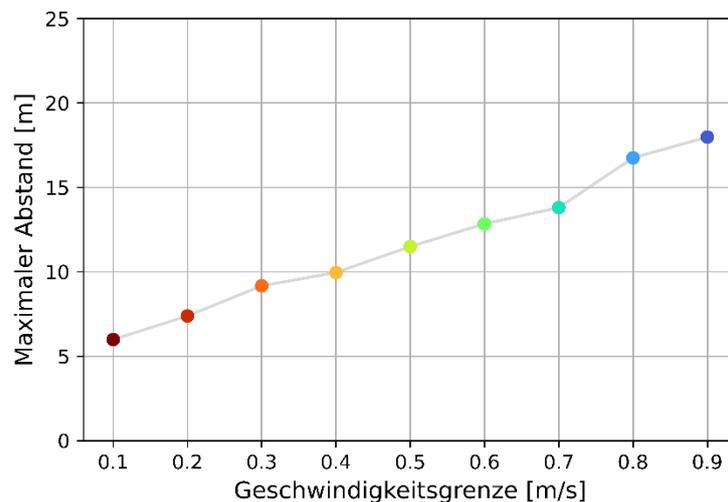


Abbildung 41: Maximaler Abstand zur Mitte der Tür (Ausgang A)

3.5 Auswahl der Geschwindigkeitsgrenze

Ziel ist es, auf Basis dieser Ergebnisse, eine feste Geschwindigkeitsgrenze festzulegen, die in der weiteren Betrachtung dieser Arbeit Anwendung findet. Nachfolgend werden die Ergebnisse der vorherigen Kapitel hinsichtlich der Geschwindigkeitsgrenzwerte zusammengefasst.

Aus der Betrachtung der Dynamik ergeben sich vier Stauphasen: Stauanbindung, Stauentwicklung, stationärer Stau und Stauabbau. Die Dauer des stationären Staus bei dem Geschwindigkeitsgrenzwert $\leq 0,3$ m/s zeigt sich sowohl in dem Verlauf der individuellen Geschwindigkeit sowie bei der Betrachtung der Staupläche und Staugröße. Aus der Analyse dieser Stauphase wird abgeleitet, dass für diesen Geschwindigkeitsgrenzwert ein kollektives und statisches Stauverhalten abgebildet wird. Auf Grundlage des abnehmenden Verlaufs der Staugröße und Verteilungen der Wartezeit könnte die Auswahl der Geschwindigkeitsgrenze $\leq 0,3$ m/s zu einer Unterschätzung des Staus führen. Damit einhergehend würde das dynamischere Stauverhalten der Stauanbindungs- und Stauentwicklungsphase nicht einbezogen werden.

Durch die Veränderung der Staupform in der Stauentwicklungsphase und der damit einhergehenden instabilen Verläufe wird die Geschwindigkeitsgrenze von 0,4 m/s für die Auswahl des Geschwindigkeitsgrenzwertes, mit Fokus auf ein dynamisches Stauverhalten, ebenfalls als zu niedrig erachtet.

Bei der Betrachtung des zeitlichen Verlaufes der maximalen Staupläche und Staugröße, befindet sich jeweils das Maximum der Geschwindigkeitsgrenze 0,6 m/s am Übergang der Stauanbindungs- und Stauentwicklungsphase. Dies zeigt, dass die Erkenntnisse der Dynamik sich mit dem Verlauf dieses Geschwindigkeitsgrenzwertes decken. Zudem nähert sich die Verteilung der Wartezeit bei den Geschwindigkeitsgrenzen $\geq 0,6$ m/s deutlich zueinander an. Somit kann durch die Auswahl dieser Geschwindigkeitsgrenze eine Unterschätzung des Kriteriums ausgeschlossen werden.

Der verzerrende Einfluss von Blockaden zwischen Agenten in stauunabhängigen Bereichen kann durch den Ausschluss von Geschwindigkeitsgrenzen $\geq 0,8$ m/s eingedämmt werden. Gleiches gilt für Ausläufe der Staupläche in Bereiche hinein, in denen Agenten nahezu die freie Gehgeschwindigkeit erreichen.

Zusammenfassend werden, für die Definition des dynamischen Staus, die Geschwindigkeitsgrenzen $\leq 0,4$ und $\geq 0,8$ m/s abgelehnt. Aufgrund der passenden Dynamik in Bezug auf die Stauphasen sowie die Verteilung der Wartezeiten wird eine Geschwindigkeitsgrenze von 0,6 m/s angenommen.

3.6 Diskussion

Die Ergebnisse der Parameterstudie und die Auswahl der Geschwindigkeitsgrenze im Rahmen dieser Arbeit sind grundsätzlich nur für das gewählte Parameterset mit der verwendeten Software und Messmethode gültig. Somit kann von der festgelegten Geschwindigkeitsgrenze keine Aussage für andere Szenarien mit veränderten Parametern abgeleitet werden. Dabei ist das gewählte Parameterset mittels des gewählten Szenarios zwar in Anlehnung an Weidmann (1992) festgelegt worden, ein allgemeingültiges Parametersetting in Verbindung der Erkenntnis von Weidmann liegt allerdings nicht vor.

Neben der Anpassung einzelner Modellparameter können diese allgemein auch an anderen Datengrundlagen ausgerichtet werden (vgl. Anhang 5). Die folgende Betrachtung soll dabei einen kurzen Einblick bezüglich möglicher Auswirkungen der Auslegung der Modellparameter geben. Nähere Analysen sind im Rahmen dieser Arbeit nicht zielführend. Werden die Parameter der Körpergröße und Repulsion beispielweise so angepasst, dass diese sich an dem maximalen Fluss von 1,9 m/s aus den Experimenten gemäß [29] orientieren, ergibt sich gemäß folgender Abbildung 42 eine veränderte Dynamik im Raum. Durch die Veränderung der Modellausrichtung hat sich zum einen die Evakuierungszeit aus Messfläche M2 von 128 auf 110 s reduziert. Zum anderen ergeben sich gegenüber dem ausgewählten Szenario gemäß Kapitel 3.1 (Abbildung 24) nach dem kollektiven Abfall der individuellen Geschwindigkeiten eine höhere mittlere Geschwindigkeit und größere Geschwindigkeitsschwankungen der einzelnen Agenten.

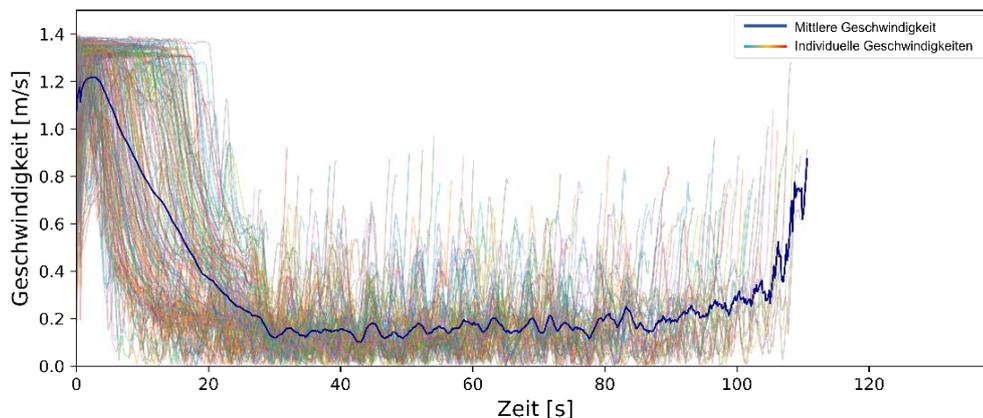


Abbildung 42: Verlauf der Geschwindigkeit bei einem veränderten Parameterset (gemäß Anhang 5)

Zudem wird gemäß Abbildung 43 deutlich, dass sich (entgegen Abbildung 25) die Form der Agentengruppe in Richtung der Engstelle schneller in Y- Richtung ausbreitet und bereits vor der Engstelle einen Halbkreis bildet, während Agenten im hinteren Bereich sich der Gruppe anbinden.

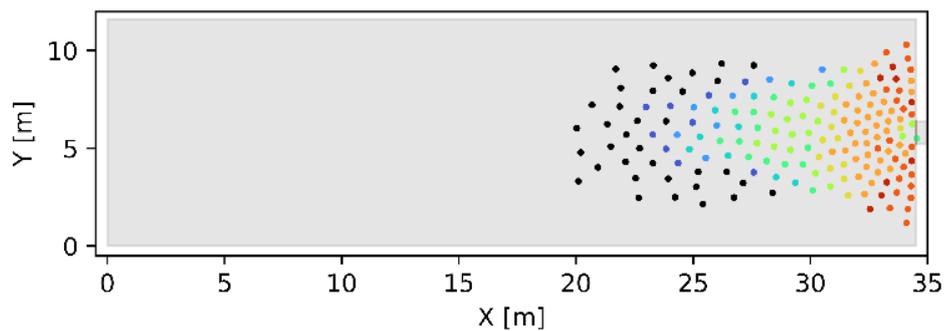


Abbildung 43: Beispiel der Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen (zum Zeitpunkt 16s) bei veränderten Modellparametern (gemäß Anhang 5)

Unabhängig der Modellauslegung werden auch in Bezug auf die Analyse bzw. die Messmethode Annahmen beispielsweise bezüglich der Messflächen für die Voronoi-Zellen getroffen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Messfläche M2 zur Berechnung des Raumes mit 10 cm Abstand zu den Wänden gewählt. Bei der Berechnung der individuellen Voronoi-Daten werden dabei die Agenten, die sich am Rand der Messfläche befinden mit Ihren gesamten Voronoi-Flächen einbezogen. Somit hat die Auswahl der Messfläche vor allem im Bereich des Ausganges einen minimalen Einfluss auf die Staukriterien.

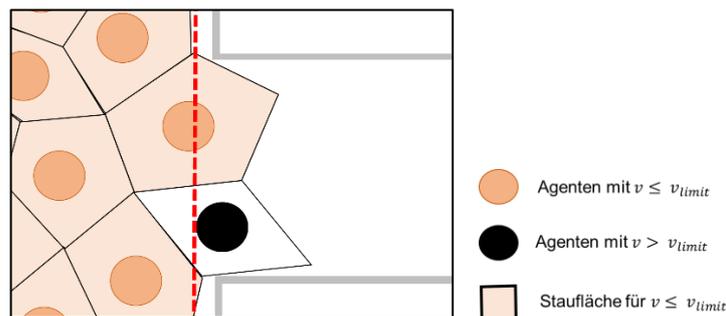


Abbildung 44: Skizzierte Darstellung der Berechnung der Staufläche im Bereich der Engstelle mittels Individueller Voronoi-Daten.

In Bezug auf die Analyse sind zudem, aufgrund der fehlenden wissenschaftlichen Erkenntnisse, bestimmte Verhaltensweisen der Agenten nicht eindeutig als „Stau“ oder „kein Stau“ zu identifizieren. Diese Problematik schlägt sich auch auf die Erfassung der Staukriterien nieder. Zum Beispiel werden Agenten, die kurzzeitig an den Staugrenzen entlanglaufen oder Agenten, die ihre Route ändern, um beispielsweise einen anderen Ausgang anzusteuern, je nach Geschwindigkeitsgrenzwert unterschiedlich erfasst. Dies ist zudem darin begründet, dass es sich bei dem Grenzwert um ein starres Bewertungskriterium handelt. Dabei wurden im Rahmen dieser Arbeit keine Zwischenwerte in Betracht gezogen. Aufgrund der Modellauswahl ist zudem keine Abbildung von Stop and Go - Wellen möglich und somit ist ein möglicher Einfluss auf die Dynamik und die Staukriterien nicht darstellbar.

4 Vergleich der Staubildung

4.1 Struktur und Aufbau der Szenarios

4.1.1 Struktur der Stauuntersuchung

Die in dieser Arbeit ausgewählte Geschwindigkeitsgrenze aus Kapitel 3.5 wird im Folgenden zum Vergleich der veränderten Türbreiten in Verbindung mit ansteigenden Personenzahlen nach ASR2.3 und MVStättVO angewendet. Im Folgenden wird die Struktur dieses Kapitels anhand der Zielstellung erläutert. Allgemeine Informationen zur Struktur und Datenaufarbeitung finden sich zudem in Kapitel 3.1.1.

Für den Vergleich werden in Kapitel 4.1 fünf Szenarien mit 200 bis 400 Agenten, aufbauend auf dem in Kapitel 3 ermittelten Modellparametern, festgelegt. Die Entscheidung für die Auswahl der Szenarien ist angelehnt an die Überschneidung der Werte der ASR A2.3 und der MVStättVO für den Bereich ab 200 Agenten.

Anschließend werden in Kapitel 4.2.1 zunächst allgemeine Faktoren wie die Evakuierungszeit und der Fluss in der Engstelle unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus Kapitel 2.2.2 unabhängig von der aufgestellten Geschwindigkeitsgrenze betrachtet. Anschließend wird geprüft, ob sich die ermittelten Stauphasen aus dem Kapitel 3.3.1 auf die erweiterten Szenarien übertragen lassen. Der Vergleich der Staubildungskriterien unter Betrachtung des festgelegten Geschwindigkeitsgrenzwertes von 0,6 m/s folgt in Kapitel 4.2.3 und 4.2.4 anhand der Staukriterien nach den in Kapitel 3.2.3 eingeführten Berechnungen.

Dabei werden der Verlauf der Staukriterien über die Zeit betrachtet und in Bezug auf die Staufläche, Staugröße und Dichte der Verlauf, die Steigungen und die Maxima zueinander herausgearbeitet. Zudem wird die Verteilung der Wartezeit gegenübergestellt und die absolute Stauzeit und die Stauzeit in Relation zur Evakuierungszeit betrachtet. Dabei wird geprüft, ob der Zusammenhang der proportional ansteigenden Personenzahl gegenüber der Türbreite auch in Bezug auf die Staubeurteilung wiederzuerkennen ist.

4.1.2 Aufbau der Szenarien

Der Aufbau der Geometrie orientiert sich an der bereits bekannten Geometrie der Parameterstudie aus Kapitel 3.1.2 Dabei werden, in Anlehnung an die MVStättVO sowie ASR A2.3, die Breiten der Tür und des Korridors gemäß Tabelle 4 zwischen 1,2 m und 2,4 m angepasst. Diese Veränderung der Geometrie basiert auf der maximalen Anzahl der im Raum befindlichen Agenten. Die Entscheidung für die Auswahl der Szenarien ist angelehnt an die Überschneidung der ASR A2.3 und die MVStättVO für den Bereich von 200 bis 400 Agenten.

Tabelle 4: Szenarien der unterschiedlichen Türbreiten und Anzahl der Agenten.

Szenario Nr.	Anzahl der Agenten	Türbreite
200-1,2	200	1,2 m
250-1,5	250	1,5 m
300-1,8	300	1,8 m
350-2,1	350	2,1 m
400-2,4	400	2,4 m

Somit ergibt sich die Änderung der Geometrie gemäß folgender Abbildung.

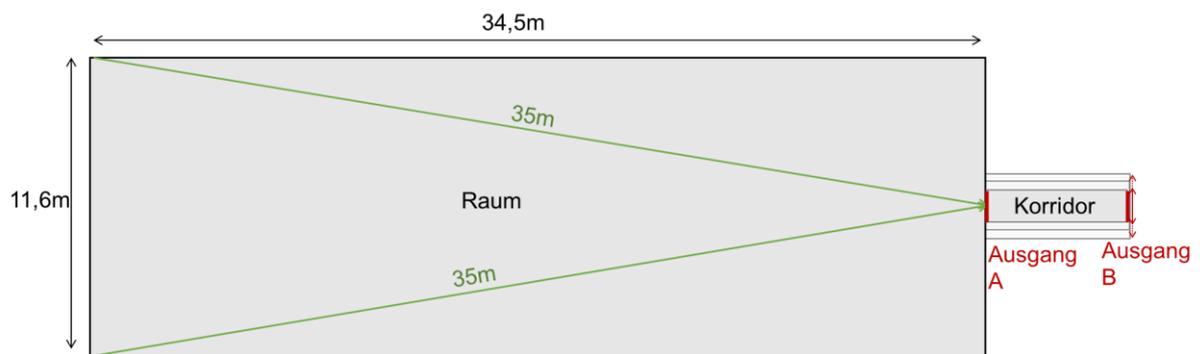


Abbildung 45: Darstellung der Geometrie mit den veränderten Ausgangsbreiten.

Die sonstigen Parameter der Agenten sind aus der Erläuterung der Parameterstudie (Kap. 3.1.3) zu entnehmen. In Bezug auf die Analyse werden, die bereits in Kapitel 3.2.1 aufgeführten Messfläche M2 zur Betrachtung des ganzen Raumes und M3 zur Betrachtung des Korridors beibehalten. Der Betrachtungsbeginn wird gemäß Kapitel 3.2.4 für jedes Szenario neu bestimmt und liegt für alle Szenarien zwischen 3 s und 3,625 s.

4.2 Bewertung der Staubildung

4.2.1 Evakuierungszeit und Fluss

Im Folgenden werden die Evakuierungszeit der Messfläche M2 sowie der Fluss der Messfläche M3 unabhängig der Staudefinition betrachtet.

Bei der Betrachtung der gemittelten Evakuierungszeiten der Szenarien in Bezug auf die Messfläche M2, ergibt sich entsprechend der folgenden Abbildung eine maximale Zeitdifferenz von ca. 11 s. Somit liegen vergleichbare Evakuierungszeiten für die unterschiedlichen Szenarien vor.

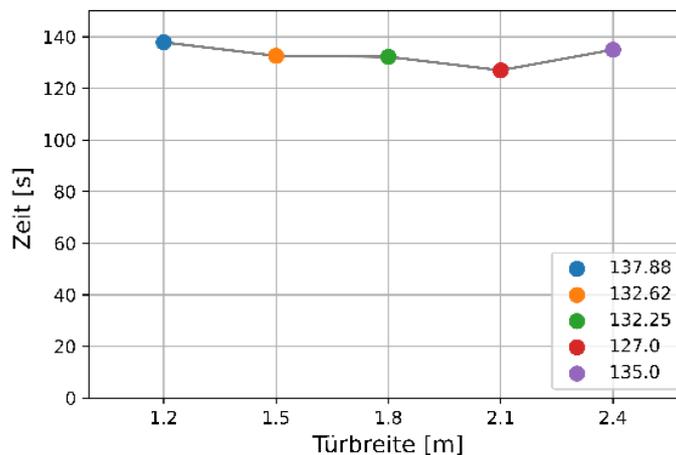


Abbildung 46: Durchschnittliche Evakuierungszeiten (der Messfläche M2).

Dabei wird die Evakuierungszeit entscheidend durch den Fluss in der Engstelle beeinflusst. Die Abbildung 47 zeigt die lineare Entwicklung des mittleren Flusses sowie den gleichbleibenden spezifischen Fluss in der Messfläche M3. Somit scheinen sich die wissenschaftlichen Erkenntnisse bezüglich der Kapazität in Engstellen (Kap. 2.3.1) auch in der Simulation abzubilden.

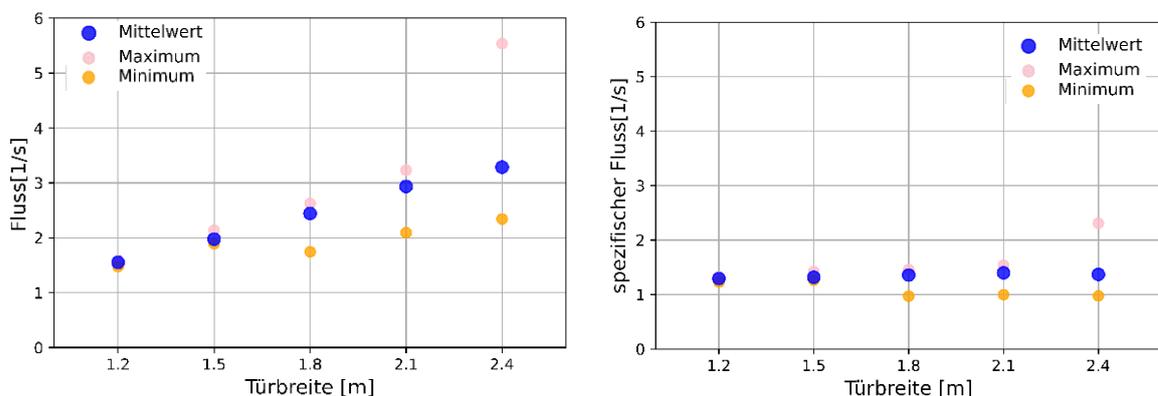


Abbildung 47: Maximaler, minimaler und mittlerer Fluss (links) und spezifischer Fluss (rechts) in der Messfläche M3.

Des Weiteren zeigt die Betrachtung des maximalen und minimalen (spezifischen) Flusses, dass der Fluss mit ansteigender Türbreite innerhalb der Messfläche stark schwankt. Diese Schwankungen entstehen durch die vermehrte Anzahl an Bewegungsmöglichkeiten, die aus der veränderten Breite des Korridors resultieren. Dadurch haben die Agenten mehr Möglichkeiten aneinander vorbeizulaufen und sich dabei zeitweise gegenseitig zu blockieren. Bei der Betrachtung der Linienbildung in der folgenden Abbildung zeigt sich, dass in dem Szenario 200-1.2 deutlich zwei Linien bei den Laufwegen der Agenten ausbilden. Im Gegensatz dazu ist in die folgenden Szenarien zwar auch Linienbildungen erkennbar, allerdings zeigen sich auch vermehrt seitliche Bewegungen.

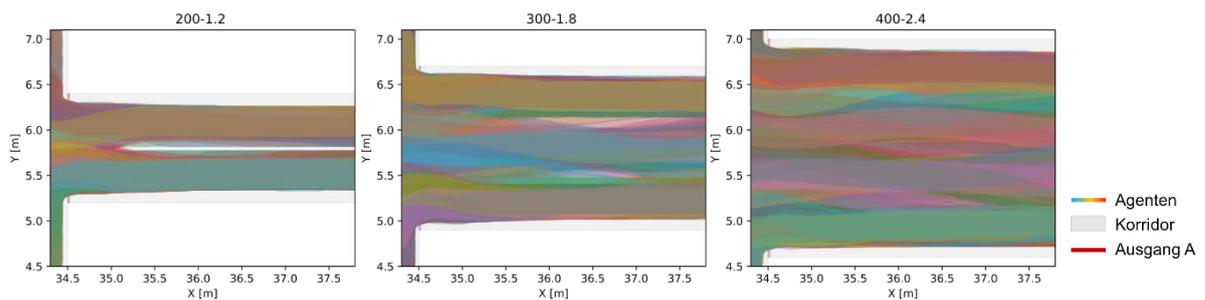


Abbildung 48: Übereinandergelegte Laufwege aller Agenten im Korridor über den gesamten Zeitraum der Simulation (am Beispiel von 3 Szenarien).

Ferner werden in allen Szenarien innerhalb der Messfläche M3 hauptsächlich Geschwindigkeiten zwischen 0,6 und 1,4 m/s erreicht. Somit entsteht dort nach der Definition dieser Arbeit kein Stau.

4.2.2 Dynamik und Stauphasen

Im Vergleich der individuellen Geschwindigkeiten der Agenten in der Messfläche M2 zeigen sich im Verlauf über die Zeit diverse Ähnlichkeiten. Für die folgende Betrachtung gemäß der Abbildung 49 werden die Szenarien 200-1.2, 300-1.8 und 400-2.4 abgebildet. Die Ergebnisse der Szenarien 250-1.5 und 350-2.1 sind dem Anhang 7 zu entnehmen. Dabei sind die folgenden Erkenntnisse in Bezug auf den Verlauf und die Entwicklung der Stauphasen auf alle Szenarien anwendbar.

Zum einen können mit ansteigender Fluchtwegbreite und Personenzahl verringerte Geschwindigkeiten zum Betrachtungsbeginn festgestellt werden. Zum anderen liegen die Phasenübergänge zu der Staumentwicklungs- und Stauabbauphase für die neu betrachteten Szenarien in etwa dem gleichen Zeitraum, sodass sich für alle Szenarien gültige Zeiträume annähern lassen. Alle Phasenübergänge sind in der folgenden Abbildung entsprechend gekennzeichnet. Die Dauer der Staumentwicklungsphase, als der Zeitraum der deutlich schwankenden Geschwindigkeiten, verlängert sich kontinuierlich um knapp 5 s und kann somit nicht zusammengefasst werden.

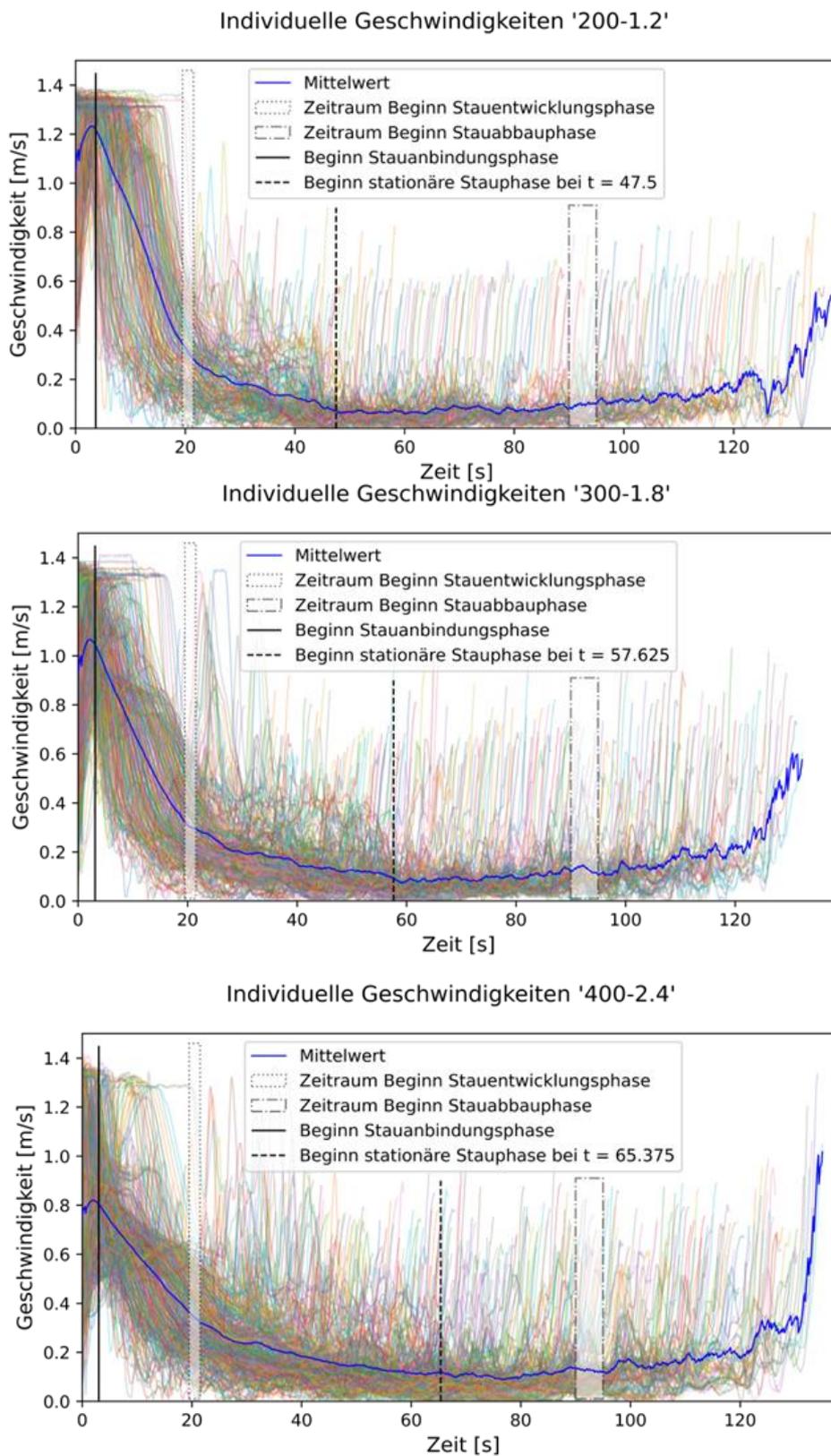


Abbildung 49: Verlauf der individuellen Geschwindigkeiten der fünf Szenarien im Raum inkl. Stauphasen von 200-1.2 (oben) nach 300-1.5 (mittig) 400-2.4 (unten)

Zu Beginn des Verlaufes zeigt sich, dass mit zunehmender anfänglicher Agentenanzahl weniger Agenten ihre freie Geschwindigkeit erreichen. Insbesondere bei dem Szenario 400-2,4 zeigt sich eine deutlich niedrigere mittlere Geschwindigkeit zum Betrachtungsbeginn. Der Grund liegt in der höheren Anfangsdichte im Raum und somit in frühen Blockaden der Agenten untereinander. Dies ist in der folgenden Abbildung beispielhaft dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Agenten in Reihen einordnen und bis zur Geschwindigkeitsgrenze 0,5 m/s abbremsen. Dabei nutzen die Agenten die Breite des Raumes nahezu vollständig aus.

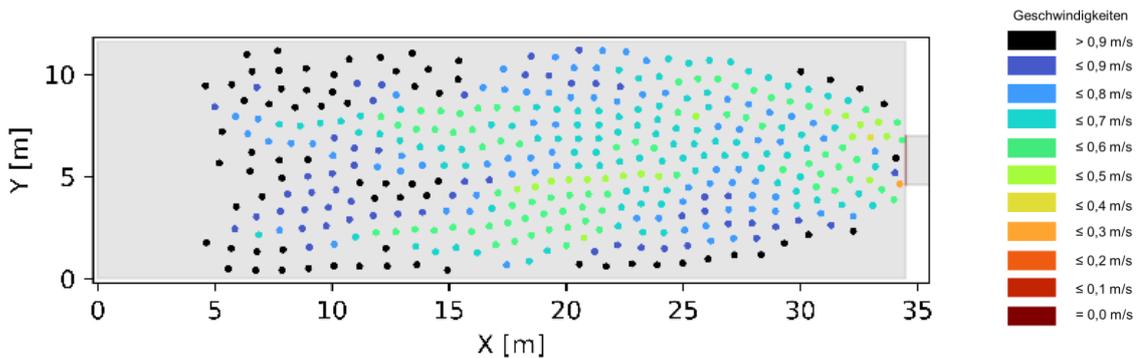


Abbildung 50: Position der Agenten des Szenarios 400-2.4 bei $t = 5s$.

Der Einfluss der Anfangsdichte scheint sich, insbesondere auf die Dynamik der Stauanbindungsphase auszuwirken. Bei zunehmender anfänglicher Agentenzahl vermindert sich die Geschwindigkeit in dieser Phase nicht mehr linear, sondern weist leichte Plateaus und Schwankungen auf. Dennoch lässt sich in dieser Phase in allen Szenarien eine kollektive Geschwindigkeitsreduzierung erkennen. Zum Beginn der darauffolgenden Stauentwicklungsphase ist die mittlere Geschwindigkeit aller Szenarien ungefähr bei knapp unter 0,4 m/s. Allerdings lassen sich gemäß Abbildung 49 weiterhin mit ansteigender Anfänglicher Agentenzahl deutlichere Schwankungen der Geschwindigkeiten verzeichnen. Der Übergang zur stationären Stauphase ist entsprechend der Definition aus Kapitel 3.3.1 in dem Bereich einzuordnen, wo die Amplituden der Geschwindigkeitsschwankungen deutlich nachlassen und die meisten Agenten ihre Geschwindigkeit unter 0,3 m/s halten. Der Zeitpunkt verschiebt sich wie in Abbildung 49 dargestellt je Szenario um ca. 5 s und verlängert die Stauentwicklungsphase.

4.2.3 Stafläche und Stagröße

Im Folgenden werden die Stafläche und Stagröße der Szenarien über die Zeit dargestellt und anschließend in Bezug auf die Stauphasen zusammenhängend näher betrachtet.

Die Abbildung 51 zeigt den Verlauf der Staflächen aller fünf Szenarien über die Zeit. Bis zum Beginn der Stauentwicklungsphase vergrößert sich die Stafläche für alle Szenarien überwiegend kontinuierlich bis zum Maximum im Phasenübergang in die Stauentwicklungsphase. Der darauf folgende Abbau der Stafläche flacht mit der Zeit ab.

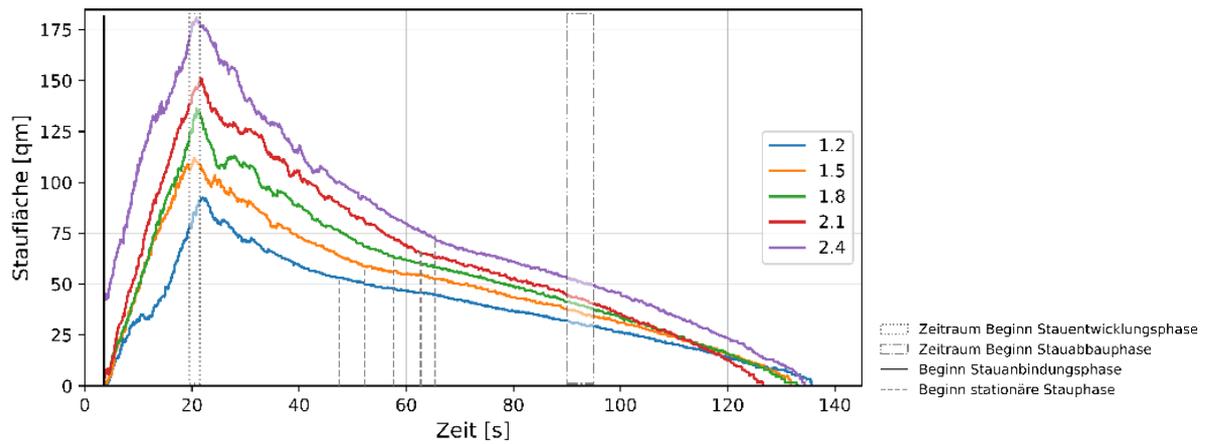


Abbildung 51: Staufläche über die Zeit im Vergleich der 5 Szenarien.

In Bezug auf den Vergleich der Staugrößen über die Zeit ist gemäß der Abbildung 53 ebenfalls ein ähnlicher Verlauf für die untersuchten Szenarien erkennbar. Bis zum Beginn der Stauentwicklungsphase steigt die Anzahl der Agenten im Stau nahezu linear an und verringert sich anschließend wieder kontinuierlich bzw. linear.

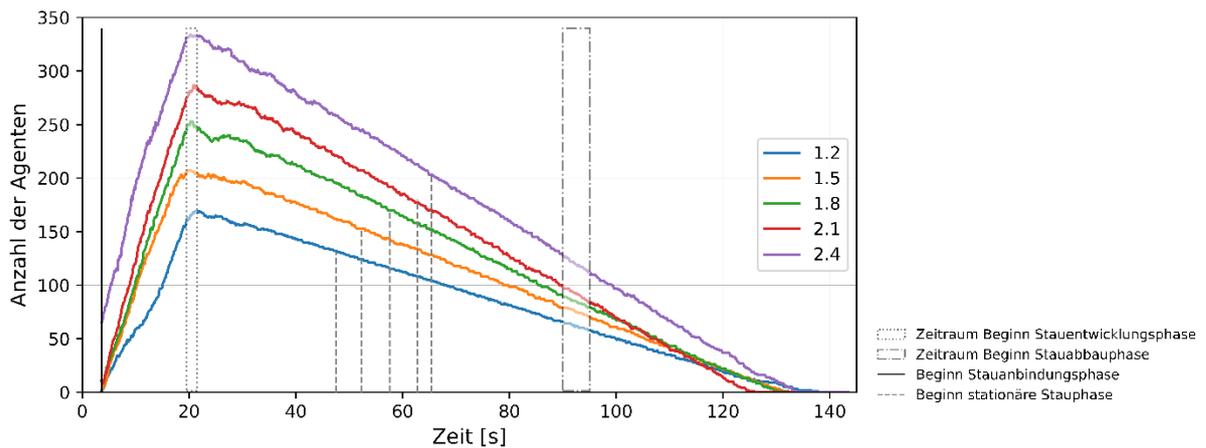


Abbildung 52: Staugröße über die Zeit im Vergleich der fünf Szenarien.

Bei der Betrachtung der Staugröße im prozentualen Verhältnis zur festgelegten maximalen Anzahl an Agenten im Raum, lässt sich in Abbildung 53 über den gesamten Zeitraum ein sehr vergleichbarer Verlauf für alle Szenarien erkennen. Prozentual stehen somit zu jedem Zeitpunkt nahezu gleich viele Agenten im Stau.

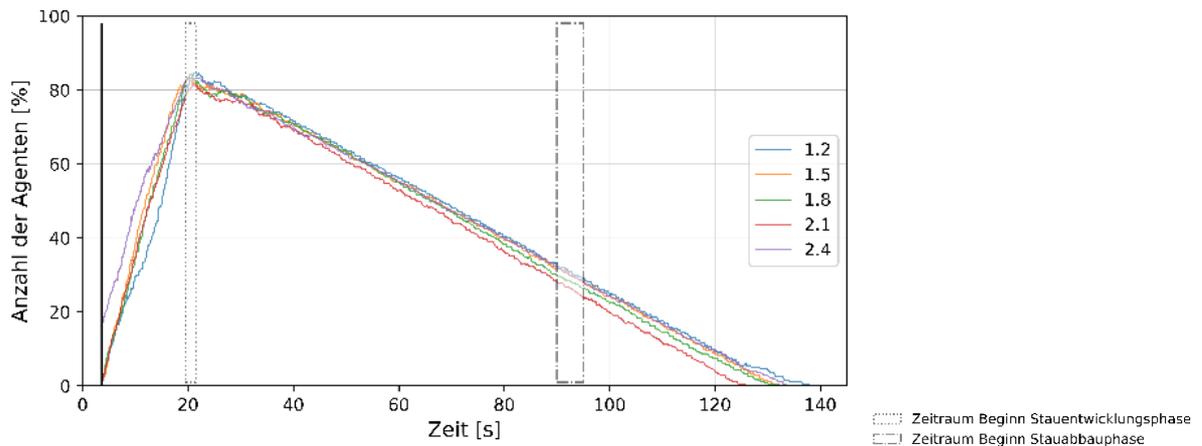


Abbildung 53: Prozentuale Staugröße über die Zeit im Vergleich der fünf Szenarien.

In Bezug auf die Stauphasen fällt zum Betrachtungsbeginn in den Abbildungen 51-53 auf, dass zu Beginn der Betrachtung für das Szenario 400-2.4 die berechnete Stauphase und Staugröße bereits knapp 70 Agenten und 40 qm Stauphase umfasst. Dies steht mit der in Kapitel 4.2.2 thematisierten Anfangsdichte in Zusammenhang.

Anschließend ist in allen fünf Szenarien das Maximum im Übergang der Stauanbindungsphase an die Stauentwicklungsphase erreicht. Dabei sind die Maxima beider Kriterien überwiegend jeweils im gleichen Abstand zueinander und im Fall der prozentualen Staugröße bei allen Szenarien knapp über 80 %. Somit liegt eine Proportionalität der Staukriterien der Szenarien vor. Dabei ist der Abstand der Maxima beider Staukriterien der Szenarien 300-1.8 und 350-2.1 zueinander etwas geringer und zwischen 350-2.1 und 400-2.4 etwas größer. Für das Szenario 300-2.1 ergibt sich somit unter der gewählten Geschwindigkeitsgrenze von 0,6 m/s, im Vergleich zu den anderen Szenarien, eine kleinere maximale Stauphase und Staugröße. Diese Erkenntnis wird jedoch als vernachlässigbar angesehen und folglich wird ein ansteigender Zusammenhang zwischen den maximalen Flächen angenommen.

Für die nähere Untersuchung des Phasenüberganges von der Stauanbindungs- in die Stauentwicklungsphase folgt in Abbildung 54 die Betrachtung der Position der Agenten zum Zeitpunkt der jeweiligen maximalen Stauphase für alle fünf Szenarien in Verbindung mit der Stauphase bzw. Geschwindigkeitsverteilung.

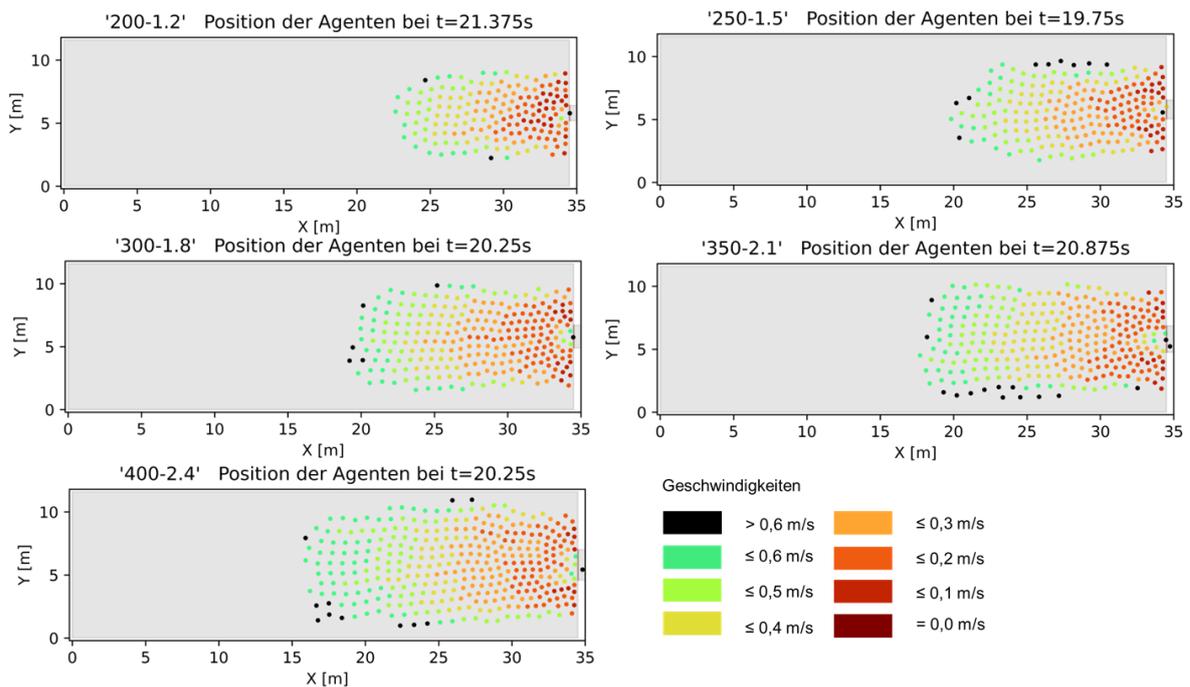


Abbildung 54: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten zum Zeitpunkt der maximale Stauphase und Staugröße der fünf Szenarien.

In dieser Betrachtung ist zu erkennen, dass trotz der größeren Stauphase Ähnlichkeiten zwischen der Stauphase zum Zeitpunkt der maximalen Stauphase aller Szenarien bestehen. Neben der Form des Staus mit der Grenzgeschwindigkeit $0,6 \text{ m/s}$ wirkt auch der Anteil der Agenten mit anderen Geschwindigkeiten in den Szenarien zu diesem Zeitpunkt ähnlich. So liegt beispielsweise der Anteil an Agenten mit einer Geschwindigkeitsgrenze von $0,3 \text{ m/s}$, also mit statischen Stauverhalten (vgl. Kap. 3.3.1), in allen Szenarien zum o.g. Zeitpunkt zwischen 40 und 48 %. Unabhängig von der unterschiedlichen Dynamik in der Stauanbindungsphase scheint sich der Stauphaseprozess zum Übergang zur Stauphaseentwicklung, wie bereits in Abbildung 49 in Bezug auf die Geschwindigkeiten herausgestellt, somit wieder anzugleichen.

In Bezug auf den Verlauf der Stauphaseentwicklung weisen entsprechend der Abbildung 51 und 52 beide Staukriterien leichte Schwankungen beim Abbau der Staugröße bzw. Stauphase auf. Dabei halten die Schwankungen mit anfänglich ansteigender Personenzahl länger an. Dies deckt sich mit den erhöhten Geschwindigkeitsschwankungen aus Abbildung 49. Der Übergang zur stationären Stauphase erfolgt gem. Kapitel 4.3.1 zu dem Zeitpunkt, an dem der dynamische Stau in den statischen Stau übergeht. Dieser Zeitpunkt verschiebt sich wie in Abbildung 49 und 55 dargestellt je Szenario um ca. 5 s.

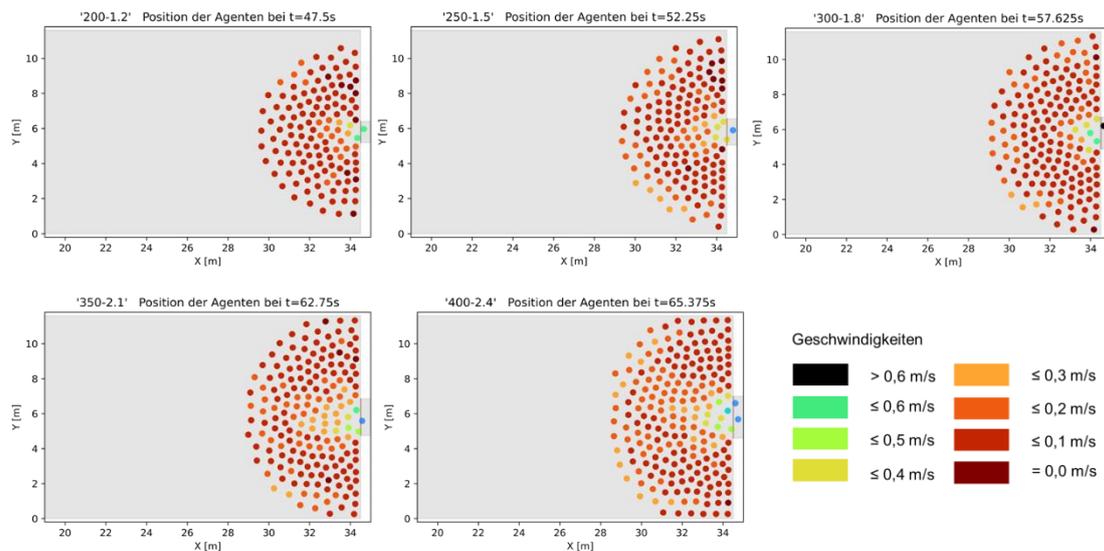


Abbildung 55: Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen der Agenten zum Beginn der stationären Stauphase der fünf Szenarien.

Entsprechend der Definition der stationären Stauphase haben alle Agenten, die sich in den Stau eingliedern, maximal eine Geschwindigkeit von 0,3 m/s und finden sich in Form eines Halbkreises zusammen. In Bezug auf die untersuchten Staukriterien nehmen ab diesem Zeitpunkt die Stauflächen zudem langsamer ab. Dies zeigt zudem, dass sich nach der unterschiedlichen Dynamik in der Stauanbindungsphase und der Angleichung der Staubildung zum Übergang der Stauentwicklungsphase (Abbildung 54) die Dynamik und Form des Staus über die Zeit ähnlich weiterentwickelt.

Anschließend nimmt der Abfall der Graphen der Staufläche bzw. Staugröße in der Stauentwicklungs- und Stauabbauphase gemäß Abbildung 52 und 53 mit ansteigendem Szenario zu, sodass, trotz unterschiedlich hoher Maxima, die Staukriterien der Szenarien in einem ähnlichen Zeitraum den Wert null erreichen. Dabei liegt bezüglich des Szenarios 350-2.1 im Vergleich der anderen Szenarien ein etwas größerer Abfall des Graphen vor, womit eine ähnliche Steigung wie beim Szenario 400-2.4 vorliegt. Dieser Abfall geht mit einer etwas verminderten Evakuierungszeit einher und wird als vernachlässigbar gering eingeordnet.

Zusammenfassend zeigt sich in Bezug auf die Staufläche und Staugröße zwischen den Szenarien ein proportionales Verhältnis der Maxima und Steigungen. Zudem ist eine vergleichbare Entwicklung zum Zeitpunkt der Phasenübergänge erkennbar.

4.2.4 Staudichte

Die folgende Analyse bezieht sich auf die mittlere sowie maximale Dichte der gemäß Kap. 3.5 im dynamischen Stau befindlichen Agenten für die fünf Szenarien.

Die Abbildung 56 betrachtet den gemittelten Dichtewert der Agenten im Verlauf über die Zeit. Dabei steigen die mittleren Dichten der fünf Szenarien zu Beginn etwas unterschiedlich an und flachen teilweise bis zum Ende der Stauanbindungsphase leicht ab, sodass sich dort eine nahezu gleiche Dichte bei ca. 2,2 1/qm entwickelt. Anschließend verzögert sich der Verlauf der mittleren Dichten für die Szenarien mit erhöhter Fluchtbreite je um ca. 5 s, sodass die Maxima der mittleren Dichte mit dem Phasenübergang in die stationäre Stauphase einhergehen. Dabei liegt der Wert der Maxima ungefähr im Bereich von 3,3 1/qm. Ab Beginn der Stauabbauphase fällt die mittlere Dichte nach ungefähr 20 s in allen Szenarien nahezu zeitgleich ab.

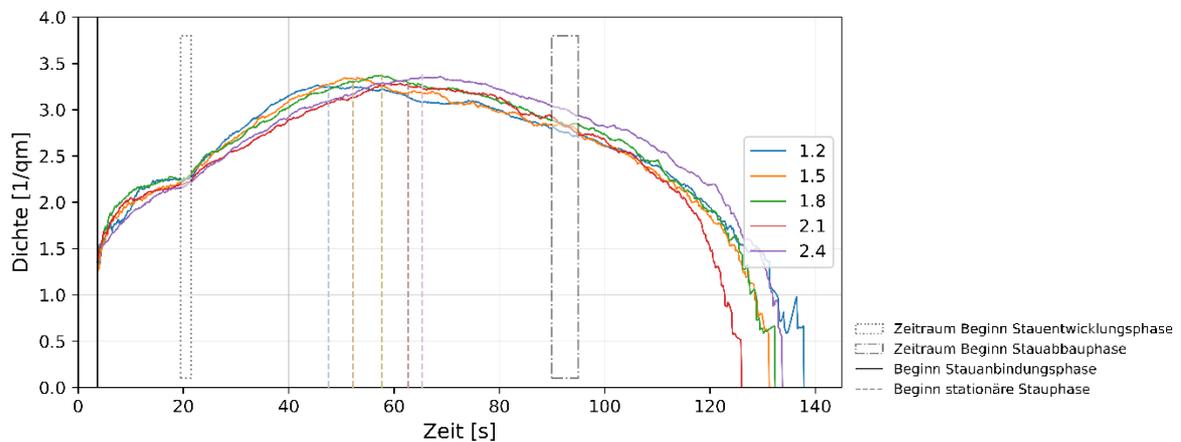


Abbildung 56: Mittlere Staudichte über die Zeit in Bezug zu den Stauphasen.

Es ist somit ein vergleichbarer Verlauf und ein Zusammenhang zu den Stauphasen wiederzuerkennen. Die angleichende Dichte zum Übergang in die Staumentwicklungsphase unterstützt die Erkenntnis, dass die Staudynamik, sich ab diesem Punkt deutlich angleicht. Zudem spiegelt sich die verlängerte Staumentwicklungsphase durch die verschobenen Maxima wider.

Die Abbildung 57 zeigt die im Betrachtungszeitraum auftretende maximale Dichte für jedes der fünf Szenarien. Dabei zeigen sich vergleichbare maximale Dichten um ca. 5,0 1/qm für alle Szenarien außer dem Szenario 300-1.8. Für dieses Szenario wurde eine leicht erhöhte maximale Dichte von 5,44 1/qm gemessen.

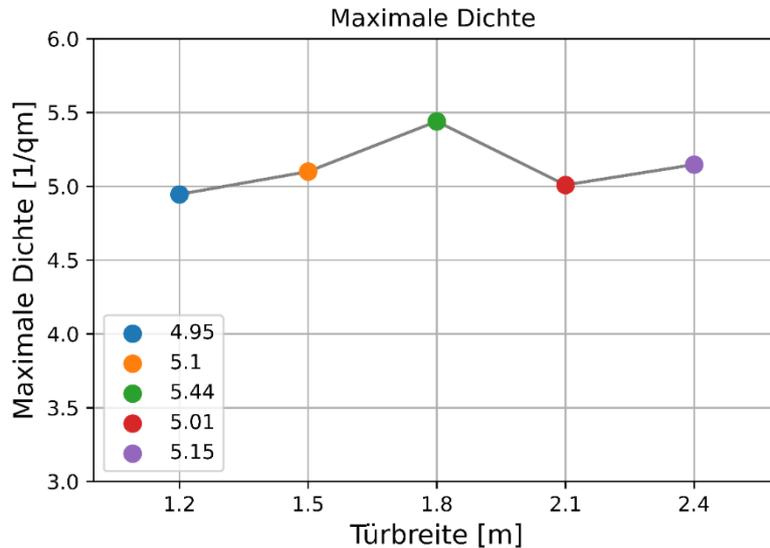


Abbildung 57: Maximalen Dichte im Stau der fünf Szenarien.

Im Folgenden wird die erhöhte maximale Dichte für das Szenario 300-1.8 näher untersucht. Bei dem Vergleich der Positionen gemäß der folgenden Abbildung 58 zeigt sich, dass sich bei dem Szenario 200-1.2 der Stau nicht ganz bis an den Rand ausbreitet (vgl. blauer Pfeil). Dies ändert sich ab dem Szenario 300-1.8. Die Außenwand begrenzt dabei nicht nur den Stau, sondern begrenzt die Ausweichmöglichkeiten von Agenten in diesem Bereich. Somit kann die Begrenzung der Staupläche durch die Außenwand einen Einfluss auf einzelne Dichten und Geschwindigkeiten haben. Der Einfluss nimmt dann ab, wenn der Abstand zur Engstelle und dem Stauende wieder abnimmt und somit weniger Agenten in einer Reihe zwischen Engstelle und Außenwand begrenzt sind (vgl. Abbildung 58 pinker Pfeil). Die Auswahl der Geometrie hat hier somit einen Einfluss auf die maximale Dichte.

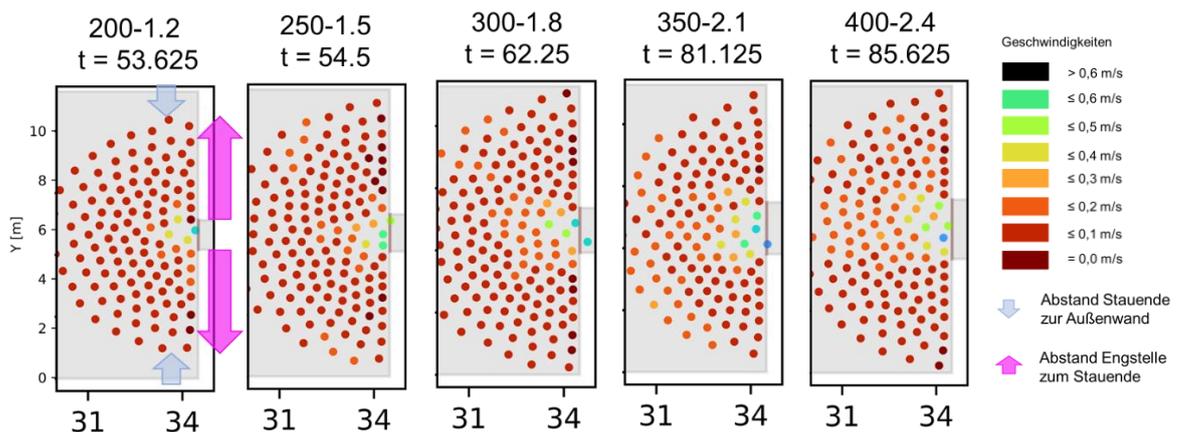


Abbildung 58: Ausschnitt der Individuelle Positionen und Geschwindigkeitsgrenzen zum jeweiligen Zeitpunkt der Maximalen Dichte.

Hinsichtlich der Fragestellung dieser Arbeit bezüglich des Verhaltens des Staus und dessen Dichte bei größeren Türbereiten proportional zur Anzahl der Agenten, wird das kurzzeitig leicht erhöhte Maximum bei dem Szenario 300-1.8 als eine vernachlässigbare Abweichung angesehen.

4.2.5 Warte- und Stauzeiten

In der Folgenden Betrachtung werden die ermittelten Warte- und Stauzeiten der fünf Szenarien in Bezug auf den Stau bzw. der festgelegten Geschwindigkeitsgrenze von 0,6 m/s aufgezeigt und verglichen.

Äquivalent zu den Evakuierungszeiten liegen gemäß folgender Abbildung 59 vergleichbare Stauzeiten vor. Bei der Betrachtung der prozentualen Stauzeit zur Evakuierungszeit ergeben sich ebenfalls nur minimale Differenzen der Stauzeiten. Der gewählte Grenzwert wird somit bei allen Szenarien zeitnah von mindestens einem Agenten unterschritten.

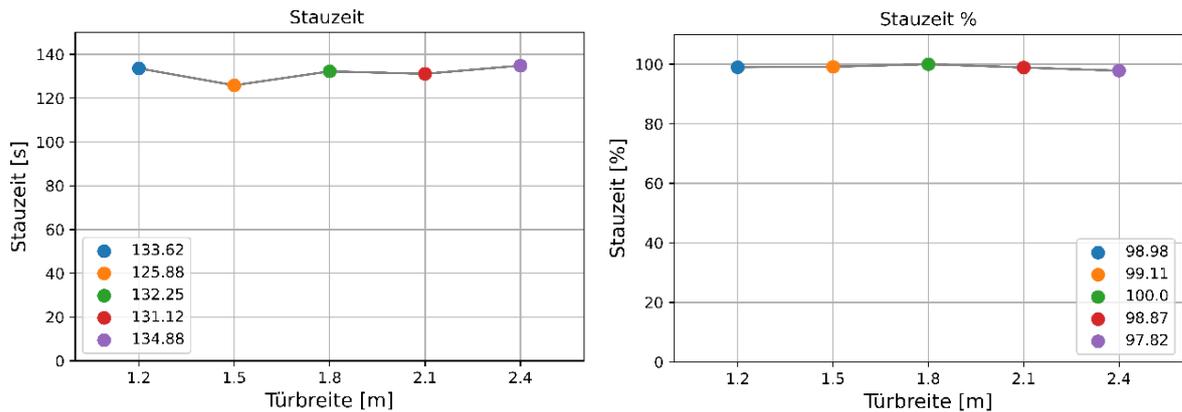


Abbildung 59: Stauzeit (links) und prozentuale Stauzeit (rechts) der fünf Szenarien im Vergleich.

In Bezug auf die Wartezeiten ist gemäß Abbildung 60 in den Szenarien eine ähnliche Verteilung sowie Maxima und Mittelwert der Wartezeit gegeben. Dabei ergeben sich im Szenario 350-1.5 geringfügig kürzere Wartezeiten. Diese ergibt sich in Zusammenhang mit der ebenfalls minimal kürzeren Evakuierungs- und Stauzeit und minimal schnelleren Staumentwicklung.

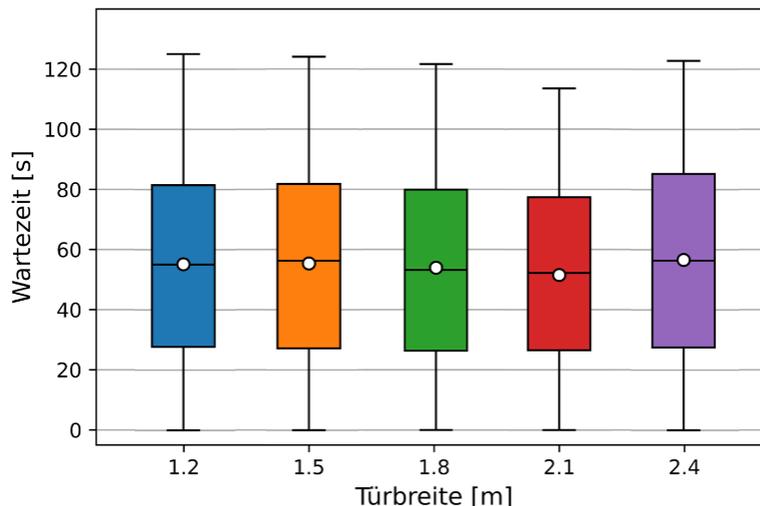


Abbildung 60: Boxplot-Diagramm zur Verteilung der Wartezeiten der 5 Szenarien.

5 Fazit

Räumungsmodelle bieten, unter Annahme einer Geometrie und einer Population, die Möglichkeit Bewegungszeiten und -dynamiken zu untersuchen. In raumkontinuierlichen mikroskopischen bzw. Individual Modellen wie es Räumungssimulationen sind, erfolgt die Berechnung auf Basis einzelner Agenten. Dabei ist beispielsweise in Verbindung mit dem Geschwindigkeitsmodell der Abstand zwischen den benachbarten Agenten ausschlaggebend. Mittels verschiedener Messmethoden, wie unter anderem mit der Abbildung der Voronoi-Zellen, können zudem Daten wie Dichte, Fluss und Geschwindigkeit der Agenten abgeleitet werden.

Die Bewertung von Simulationsergebnissen orientiert sich an Leistungskriterien. In Anlehnung an den Entwurf der DIN 18009-2 können Räumungszeiten, insbesondere die Flucht- und Bewegungszeit oder die Staubildung als Bewertungskriterien herangezogen werden. Dabei liegen in Bezug auf die Staudefinition bisher nur Ansätze auf Basis der Kapazität, Dichte oder individuellen Geschwindigkeit, ohne Konkretisierung und allgemeingültige Anwendbarkeit, vor. Zur Bewertung eines Staus stellt die DIN 18009-2 (Entwurf) zudem folgende Staubeurteilungskriterien vor: Staustelle, Staugröße, Stauzeit, Staudichte und individuelle Wartezeit.

In Bezug auf den Einfluss der Fluchtwegbreite auf den Verlauf einer Räumung geht aus den wissenschaftlichen Erkenntnissen ein linearer Zusammenhang zwischen Fluchtwegbreite und Fluss einer Engstelle hervor. Dieser Zusammenhang wird durch die MVStättVO [18] und ASR A2.3 [9] durch ein proportionales Verhältnis von der Personenanzahl zur Fluchtwegbreite für horizontale Fluchtwege als Vorgabe umgesetzt: ab mindestens 200 Personen wird ein Zusammenhang von 200 Personen zu 1,2 m Türbreite inkl. Interpolation angenommen.

Für die erarbeitete Staudefinition anhand von Grenzgeschwindigkeiten für Agenten wurde ein Szenario in Anlehnung an die MBO, die RiMEA-Richtlinie, den vdfb-Leitfaden, das Fundamentaldiagrammes nach Weidmann, die DIN 18009-2 im Entwurf, das Fachgutachten zur ASR A2.3 und die DIN 33402-2 aufgestellt. Dieses Szenario spiegelt das o.g. Verhältnis der Personenzahl zur vorgegebenen Türbreite in einer einfachen Geometrie eines Raumes wider. Das Parametersetting wurde zudem mit dem Fundamentaldiagramm von Weidmann und die Werte des vdfb-Leitfadens bezüglich des Flusses und der Geschwindigkeiten der Agenten in Engstellenabgeglichen.

Aus dem Szenario wurden in Bezug auf die Staudynamik im Rahmen dieser Arbeit vier Stauphasen abgeleitet: Stauanbindungsphase, Stauentwicklungsphase, stationäre Stauphase und Stauabbauphase. Dabei lassen sich diese Phasen sowohl in Bezug auf den Geschwindigkeits- und Dichteverlauf in dem gesamten Raum als auch in einer kleinen Messfläche im Zentrum des Staus wiedererkennen. Zusätzlich wurde zwischen einem dynamischen Stauverhalten und statischen Stauverhalten unterschieden. Das dynamische Stauverhalten bezieht sich auf den Prozess der Stauentstehung und -veränderung bis zum Erreichen des statischen Stauverhaltens. Im Rahmen dieser Arbeit wurde von den Staubeurteilungskriterien abgeleitet, dass ein statisches Stauverhalten mit dem stationären Zustand und in Verbindung mit dem entwickelten Szenario bei Geschwindigkeitsgrenzen von 0,3 m/s eintritt. Um eine Unterschätzung der Staudynamik und beispielsweise der Wartezeit einzelner Agenten zu verhindern, wurde die Bewertung des dynamischen Stauverhaltens bevorzugt. Somit wurde passend zu den festgelegten Stauphasen und der angleichenden Wartezeit die Geschwindigkeitsgrenze von 0,6 m/s zur Staudefinition weiterverwendet. Es ist zu beachten,

dass die Auswahl der Geschwindigkeitsgrenzen einer individuellen Modell-Betrachtung bedarf und ein unflexibles Bewertungskriterium darstellt. Zudem ist die Wahl von den Entscheidungsgrundlagen abhängig, inwiefern bestimmte Entwicklungen miteinbezogen werden.

Bei dem anschließenden Vergleich der fünf Szenarien bei ansteigender Agentenanzahl, zwischen 200 und 400 Agenten, mit entsprechend angepasster Türbreite, lässt sich bei dem Vergleich des Korridors die Erkenntnis des linearen Zusammenhanges von dem Fluss zur Türbreite nachbilden. Zudem sind entsprechend der festgelegten Charakteristiken die Stauphasen mit einer leichter Verschiebung der Phasendauer wiedererkennbar. Somit zeigt sich eine sehr vergleichbare Entwicklung der Geschwindigkeitsverläufe. Zudem ergeben sich ähnliche Werte in Bezug auf die Wartezeiten, Stauzeiten und zeitlicher Verlauf der mittleren und maximalen Dichten im Verlauf. Im Hinblick auf die Staukriterien der Staugröße und Staufläche entwickeln sich die Szenarien gleichmäßig zueinander und es zeigt sich im prozentualen Vergleich zur maximalen Agentenanzahl eine sehr vergleichbare Entwicklung. Zusammenfassend lässt sich somit bei der entwickelten Staudefinition die proportionale Veränderung der Personenanzahl und der horizontalen Fluchtwegbreite bei der Staubildung wiedererkennen.

Diese Arbeit bietet einen ersten Ansatz zur Staudefinition in Räumungssimulationen. Somit könnte die Thematik als Grundlage für eine weitere Ausarbeitung von Stauphasen, die Staukriterien und die Staudefinition dienen. Dabei könnten sowohl Veränderungen der Geometrie als auch der Parameter untersucht werden, um sich die Thematik der Staubildung in der Simulation weiter zu erschließen. Zudem bleibt eine Bewertung über die Zulässigkeit eines Staus im Rahmen dieser Arbeit aus. Es könnte sich die Fragestellung ergeben, ob ein Stau trotz gleichbleibender Dichte und Zeitfaktoren aufgrund einer größeren Staufläche und Staugröße als gleichermaßen zulässig zu bewerten ist. Dabei könnte zum Beispiel das Thema von Blockaden anderer Fluchtwege einbezogen werden. Des Weiteren könnte der Zusammenhang zu dem Ansatz von Mehl [8] das statischen Stauverhalten bei dem Geschwindigkeitsgrenzwert 0,3 m/s mit einem Zeitbezug untersucht werden. Für eine vollumfängliche Bewertung des Staus wäre die Erforschung der psychologischen Faktoren in Zusammenhang mit dem Übergang vom Stau zur Gefahr bzw. Gefährdung von großer Bedeutung.

6 Literatur

1. (2019) jpsreport inifile. https://www.jupedsim.org/jpsreport_inifile.html
2. (2021) JuPedSim Development. https://www.jupedsim.org/2021-11-04-jupedsim_blog.html
3. (2021) JuPedSim. https://www.jupedsim.org/jupedsim_introduction.html
4. (2022) jpscore Inifile. https://www.jupedsim.org/jpscore_inifile.html
5. (2022) JuPedSim/JPScore-v0.9.5. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6396374>
6. (2022) JuPedSim/JPSreport-v.0.8.6. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7030931>
7. (2022) Test 4: Spezifischer Fluss durch einen Querschnitt. <https://rimea.de/de/rimea-projekt/richtlinie-fuer-mikroskopische-entfluchtungsanalysen/anhang/anhang-2-vorlaeufige-anleitung-zur-validierung-verifizierung-von-simulationsprogrammen/test-4-spezifischer-fluss-durch-einen-querschnitt/>
8. accu:rate GmbH, München (2020) Räumungssimulationen und Staubbewertung - Praxiserfahrungen als Beitrag zur Erarbeitung der DIN 18009-2, München
9. Ausschuss für Arbeitsstätten - ASTA-Geschäftsführung - BAuA (2007) Technische Regeln für Arbeitsstätten - Fluchtwege und Notausgänge, Flucht- und Rettungswegplan. ASR A2.3
10. Bundesministerium der Justiz (1996; Zuletzt geändert durch Art. 12 G v. 2021 I 4906) Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit. (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG)
11. Bundesministerium der Justiz (2004; Zuletzt geändert durch Art. 4 G v. 2020 I 3334) Arbeitsstättenverordnung (Verordnung über Arbeitsstätten). ArbStättV
12. Chraïbi M, Steffen B, Tordeux A (2020) Analysis of Pedestrian Motion Using Voronoi Diagrams in Complex Geometries. In: Zuriguel I, Garcimartin A, Cruz R (Hrsg) Traffic and Granular Flow 2019, Bd 252. Springer International Publishing, Cham, S 39–44
13. DIN Deutsches Normungsinstitut für Normung e.V. (2016) Brandschutzingenieurwesen - Teil 1: Grundsätze und Regeln für die Anwendung 13.220.01(18009-1). Beuth Verlag GmbH, Berlin
14. DIN Deutsches Normungsinstitut für Normung e.V. (2020) DIN 33402-2:2020-12. Ergonomie- Körpermaße des Menschen- Teil 2: Werte. Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/3170386

15. DIN Deutsches Normungsinstitut für Normung e.V. (2021) Brandschutzingenieurwesen - Teil 2: Räumungssimulation und Personensicherheit (Entwurf) 13.220.01(18009-2). Beuth Verlag GmbH, Berlin
16. Dr. Angelika Kneidl, Dr. Rainer Könnecke (2020) Fachgutachten zu Fluchtwegen in Arbeitsstätten - Einfluss von Wegbreite, Treppen, Türen und Einengungen auf Entfluchtung. BAuA: Bericht, 2. Aufl, Dortmund/ Berlin/ Dresden
17. Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz (2002; Zuletzt Geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 2020) Musterbauordnung. MBO
18. Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz (2005) Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten*) (Muster-Versammlungsstättenverordnung – MVStättVO)
19. Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz (Hrsg) (2008) Musterbauordnung (MBO) - Begründung der Fassung Oktober 2008 -
20. Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz (2009) Muster-Richtlinie über bauaufsichtliche Anforderungen an Schulen (Muster-Schulbau-Richtlinie - MSchulbauR)
21. Fachmagazin für Architekten, Planer und Bauingenieure (2021) Flucht- und Rettungswege. Baulicher Brandschutz. bba-online.de/brandschutz/flucht-und-rettungswege/#:~:text=Ein%20Fluchtweg%20ist%20ein%20Weg,Sinne%20dient%20hingegen%20der%20Fremdrettung.
22. Holl S (2016) Methoden für die Bemessung der Leistungsfähigkeit multidirektional genutzter Fußverkehrsanlagen. IAS Serie. Band/ Volume 32, Jülich
23. Meyers RA (Hrsg) (2009) Encyclopedia of Complexity and Systems Science. Springer New York, New York, NY
24. Ministeriums für Heimat, Kommunales, Bau und Gleichstellung – 615 – 170 – (2020) Richtlinie über bauaufsichtliche Anforderungen an Schulen (SchulbauRichtlinie – SchulbauR)
25. Portz A (2009) Eindimensionale Modellierung der Fußgängerdynamik. Quantitative Validierung und Aspekte der Rechenzeit. Forschungszentrum Jülich GmbH
26. RiMEA e.V. (2016) Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. RiMEA
27. Schadschneider A, Klingsch W, Klüpfel H, Kretz T, Rogsch C, Seyfried A (2009) Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications. In: Meyers RA (Hrsg) Encyclopedia of Complexity and Systems Science. Springer New York, New York, NY, S 3142–3176
28. Schäfer C (2019) Schnellstart Python. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden

29. Seyfried A, Passon O, Steffen B, Boltes M, Rupprecht T, Klingsch W (2009) New Insights into Pedestrian Flow Through Bottlenecks. *Transportation Science* Vol. 43(3):395–406. doi:10.1287/trsc.1090.0263
30. Sieben A, Schumann J, Seyfried A (2017) Collective phenomena in crowds—Where pedestrian dynamics need social psychology. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177328>
31. Sonntag F (2018) Staugrößen eines Personenstroms. Sensitivitätsanalyse anhand experimentell ermittelter Daten. Bachelorthesis, Technische Hochschule Köln
32. Steven M.V. Gwynne, Eric R. Rosenbaum (Hrsg) (2018) Empolying the Hydraulic Model in Assessing Emerceny Movement in SFPE handbook of fire protection engineering (s. 2115-2151). Springer; Credo Reference, New York [New York], Boston, Massachusetts
33. Tordeux A, Chraibi M, Seyfried A (2016) Collision-Free Speed Model for Pedestrian Dynamics. In: Knoop VL, Daamen W (Hrsg) *Traffic and Granular Flow '15*. Springer International Publishing, Cham, S 225–232
34. Weidmann U (1992) *Transporttechnik der Fussgänger: Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs, Literatúrauswertung*. Schriftenreihe des IVT Nr. 90. ETH Zurich, Zürich
35. Zehfuß J (2020) *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*. Technischer Bericht vfdb TB 04-01, 4. Aufl, Münster/ Braunschweig
36. Zhang J, Klingsch W, Schadschneider A, Seyfried A (2011) Transitions in pedestrian fundamental diagrams of straight corridors and T-junctions. *J. Stat. Mech.* 2011(06):P06004. doi:10.1088/1742-5468/2011/06/P06004

Anhang

Anhang 1 – Geometrie Datei

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<geometry version="0.8" caption="Projectname" unit="m"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:noNamespaceSchemaLocation="../../../xsd/jps_geometry.xsd">
  <rooms>
    <room id="0" caption="floor">
      <subroom id="1" caption="Room 1" class="Office" A_x="0" B_y="0" C_z="0">
        <polygon caption="wall">
          <vertex px="34.5" py="0"/>
          <vertex px="34.5" py="5.2"/>
        </polygon>
        <polygon caption="wall">
          <vertex px="34.5" py="11.6"/>
          <vertex px="34.5" py="6.4"/>
        </polygon>
        <polygon caption="wall">
          <vertex px="34.5" py="11.6"/>
          <vertex px="0" py="11.6"/>
        </polygon>
        <polygon caption="wall">
          <vertex px="0" py="0"/>
          <vertex px="34.5" py="0"/>
        </polygon>
        <polygon caption="wall">
          <vertex px="0" py="11.6"/>
          <vertex px="0" py="0"/>
        </polygon>
      </subroom>
    </room>
    <room id="1" caption="room2">
      <subroom id="1" caption="room2" class="Not specified" A_x="0" B_y="0" C_z="0">
        <polygon caption="wall">
          <vertex px="34.5" py="5.2"/>
          <vertex px="34.5" py="5.2"/>
        </polygon>
        <polygon caption="wall">
          <vertex px="34.5" py="6.4"/>
          <vertex px="34.5" py="6.4"/>
        </polygon>
        <polygon caption="wall">
          <vertex px="34.5" py="6.4"/>
          <vertex px="40" py="6.4"/>
        </polygon>
        <polygon caption="wall">
          <vertex px="34.5" py="5.2"/>
          <vertex px="40" py="5.2"/>
        </polygon>
      </subroom>
    </room>
  </rooms>
  <transitions>
    <transition id="0" caption="exit" type="emergency" room1_id="0" subroom1_id="1"
      room2_id="1" subroom2_id="1">
      <vertex px="34.5" py="5.2"/>
      <vertex px="34.5" py="6.4"/>
    </transition>
    <transition id="1" caption="exit" type="emergency" room1_id="1" subroom1_id="1"
      room2_id="-1" subroom2_id="-1">
      <vertex px="40" py="5.2"/>
      <vertex px="40" py="6.4"/>
    </transition>
  </transitions>
</geometry>

```

Anhang 2 – Konfigurationsdatei JPScore

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<JuPedSim project="JPS-Project" version="0.7"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
  <header>
    <seed>2232</seed>
    <max_sim_time>250</max_sim_time>
    <geometry>geo_k4_120.xml</geometry>
    <trajectories format="plain" fps="8">
      <file location="k4_200P_traj.txt" />
    </trajectories>
    <logfile>log.txt</logfile>
  </header>

  <!-- traffic information: e.g closed doors -->
  <traffic_constraints>
    <transition id="0" state="open"/>
    <transition id="1" state="open"/>
  </traffic_constraints>

  <routing>
  </routing>

  <!--persons information and distribution -->
  <agents operational_model_id="3">
    <agents_distribution>
      <group group_id="0" agent_parameter_id="1" room_id="0"
        subroom_id="1" number="200" goal_id="-1"
        router_id="1" x_max="30.5"/>
    </agents_distribution>
  </agents>

  <operational_models>
    <model operational_model_id="3" description="Tordeux2015">
      <model_parameters>
        <stepsize>0.01</stepsize>
        <exit_crossing_strategy>8</exit_crossing_strategy>
        <linkedcells enabled="true" cell_size="2"/>
        <force_ped a="2" D="0.2"/>
        <force_wall a="5" D="0.02"/>
      </model_parameters>
      <agent_parameters agent_parameter_id="1">
        <v0 mu="1.34" sigma="0.0233" />
        <bmax mu="0.22" sigma="0.0033" />
        <bmin mu="0.22" sigma="0.0033" />
        <amin mu="0.22" sigma="0.0033" />
        <atau mu="0." sigma="0.0" />
        <tau mu="0.5" sigma="0.0" />
        <T mu="0.7" sigma="0.0" />
      </agent_parameters>
    </model>
  </operational_models>

  <route_choice_models>
    <router router_id="1" description="ff_global_shortest">
      <parameters>
      </parameters>
    </router>
  </route_choice_models>

</JuPedSim>

```

Anhang 3 – Konfigurationsdateien JPSreport

Messfläche M1

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<JPSreport project="200P" version="0.8.5" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">

  <geometry file="geo_k4_120.xml"/>

  <output location="200P_Messfläche1_Output"/>

  <trajectories format="txt" unit="m">
    <file name="k4_200P_traj.txt"/>
    <path location="."/>
  </trajectories>

  <measurement_areas unit="m">
    <area_B id="1" type="BoundingBox" zPos="None">
      <vertex x="32.3" y="5.2" />
      <vertex x="32.3" y="6.4" />
      <vertex x="33.5" y="6.4" />
      <vertex x="33.5" y="5.2" />
      <length_in_movement_direction distance="4.0" />
    </area_B>
  </measurement_areas>

  <velocity frame_step="10" set_movement_direction="None" ignore_backward_movement="false"/>

  <method_A enabled="false">
    <measurement_area id="1" frame_interval="100"/>
  </method_A>

  <method_B enabled="false">
    <measurement_area id="1" />
  </method_B>

  <method_C enabled="false">
    <measurement_area id="1" plot_time_series="true"/>
  </method_C>

  <method_D enabled="true">
    <measurement_area id="1" start_frame="0" stop_frame="1311" local_IFD="true"/>
    <cut_by_circle enabled="true" radius="1.0" edges="10"/>
  </method_D>
</JPSreport>
```

Messfläche M2

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<JPSreport project="200P" version="0.8.5" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">

  <geometry file="geo_k4_120.xml"/>

  <output location="200P_Messfläche2_Output"/>

  <trajectories format="txt" unit="m">
    <file name="k4_200P_traj.txt"/>
    <path location="."/ />
  </trajectories>

  <measurement_areas unit="m">
    <area_B id="1" type="BoundingBox" zPos="None">
      <vertex x="0.1" y="0.1" />
      <vertex x="0.1" y="11.5" />
      <vertex x="34.4" y="11.5" />
      <vertex x="34.4" y="0.1" />
      <length_in_movement_direction distance="4.0" />
    </area_B>
  </measurement_areas>

  <velocity frame_step="10" set_movement_direction="None" ignore_backward_movement="false"/>

  <method_A enabled="false">
    <measurement_area id="1" frame_interval="100"/>
  </method_A>

  <method_B enabled="false">
    <measurement_area id="1" />
  </method_B>

  <method_C enabled="false">
    <measurement_area id="1" plot_time_series="true"/>
  </method_C>

  <method_D enabled="true">
    <measurement_area id="1" start_frame="0" stop_frame="1311" local_IFD="true"/>
    <cut_by_circle enabled="true" radius="1.0" edges="10"/>
  </method_D>
</JPSreport>
```

Messfläche M3

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<JPSreport project="200P" version="0.8.5" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">

  <geometry file="geo_k4_120.xml"/>

  <output location="200P_Messfläche3_Output"/>

  <trajectories format="txt" unit="m">
    <file name="k4_200P_traj.txt"/>
    <path location="."/ />
  </trajectories>

  <measurement_areas unit="m">
    <area_B id="1" type="BoundingBox" zPos="None">
      <vertex x="36" y="5.3" />
      <vertex x="36" y="6.3" />
      <vertex x="37" y="6.3" />
      <vertex x="37" y="5.3" />
      <length_in_movement_direction distance="4.0" />
    </area_B>
    <area_L id="2" type="Line" zPos="None">
      <start x="34.5" y="5.2" />
      <end x="34.5" y="6.4" />
    </area_L>
    <area_L id="4" type="Line" zPos="None">
      <start x="37" y="5.2" />
      <end x="37" y="6.4" />
    </area_L>
  </measurement_areas>

  <velocity frame_step="10" set_movement_direction="None" ignore_backward_movement="false"/>

  <!-- Methoden (Zhang2011a) Flow and Vel -->
  <method_A enabled="true">
    <measurement_area id="2" frame_interval="40"/>
    <measurement_area id="4" frame_interval="40"/>
  </method_A>

  <method_B enabled="false">
    <measurement_area id="1" />
  </method_B>

  <method_C enabled="false">
    <measurement_area id="1" plot_time_series="true"/>
  </method_C>

  <method_D enabled="true">
    <measurement_area id="1" start_frame="0" stop_frame="1120" local_IFD="true"/>
    <cut_by_circle enabled="true" radius="1.0" edges="10"/>
  </method_D>
</JPSreport>
```

Anhang 4 – Visualisierung Stauzeit

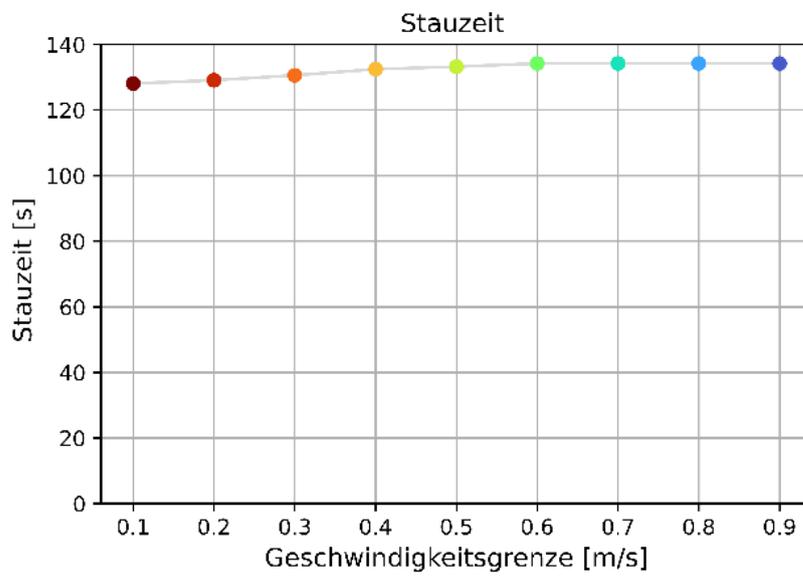


Abbildung A4.1: Stauzeit anhand der Geschwindigkeitsgrenzen

Anhang 5 – Konfigurationsdatei JPScore Version 2

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<JuPedSim project="JPS-Project" version="0.7"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
  <header>
    <seed>2147</seed>
    <max_sim_time>250</max_sim_time>
    <geometry>geo_k4_120.xml</geometry>
    <trajectories format="plain" fps="8">
      <file location="k4_200P_V2traj.txt" />
      <optional_output speed="TRUE" velocity="TRUE"/>
    </trajectories>
    <show_statistics>true</show_statistics>
    <logfile>log.txt</logfile>
  </header>

  <!-- traffic information: e.g closed doors -->
  <traffic_constraints>
    <transition id="0" state="open"/>
    <transition id="1" state="open"/>
  </traffic_constraints>

  <routing>
  </routing>

  <!-- persons information and distribution -->
  <agents operational_model_id="3">
    <agents_distribution>
      <group group_id="0" agent_parameter_id="1" room_id="0" subroom_id="1"
        number="200" goal_id="-1" router_id="1" x_max="30.5"/>
    </agents_distribution>
  </agents>

  <!-- These parameters may be overwritten -->
  <!-- These parameters may be overwritten -->
  <operational_models>
    <model operational_model_id="3" description="Tordeux2015">
      <model_parameters>
        <stepsize>0.01</stepsize>
        <exit_crossing_strategy>8</exit_crossing_strategy>
        <linkedcells enabled="true" cell_size="2"/>
        <force_ped a="5" D="0.2"/>
        <force_wall a="5" D="0.02"/>
      </model_parameters>
      <agent_parameters agent_parameter_id="1">
        <v0 mu="1.34" sigma="0.0233" />
        <bmax mu="0.17" sigma="0.0033" />
        <bmin mu="0.17" sigma="0.0033" />
        <amin mu="0.17" sigma="0.0033" />
        <atau mu="0." sigma="0.0" />
        <tau mu="0.5" sigma="0.0" />
        <T mu="0.8" sigma="0.0" />
      </agent_parameters>
    </model>
  </operational_models>

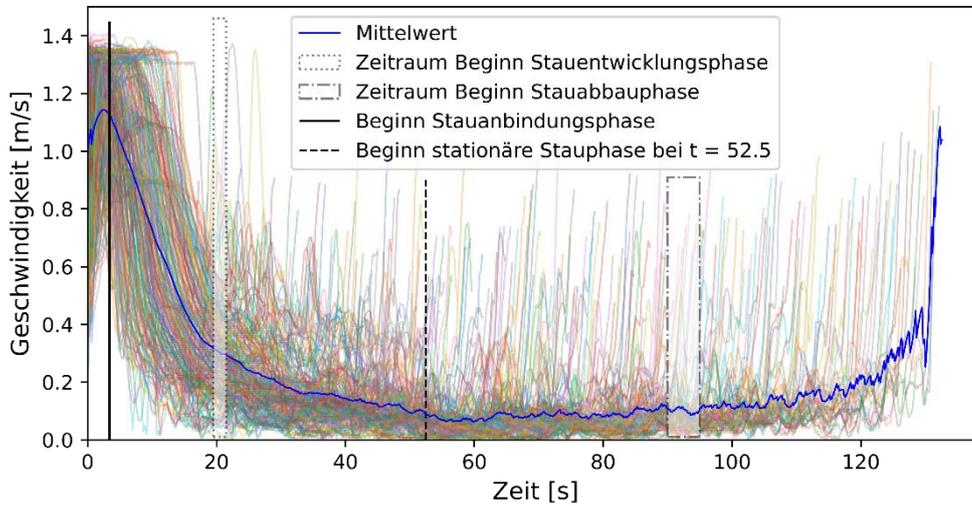
  <route_choice_models>
    <router router_id="1" description="ff_global_shortest">
      <parameters>
      </parameters>
    </router>
  </route_choice_models>

</JuPedSim>

```

Anhang 6 – Ergänzung Abbildung 48

Individuelle Geschwindigkeiten '250-1.5'



Individuelle Geschwindigkeiten '350-2.1'

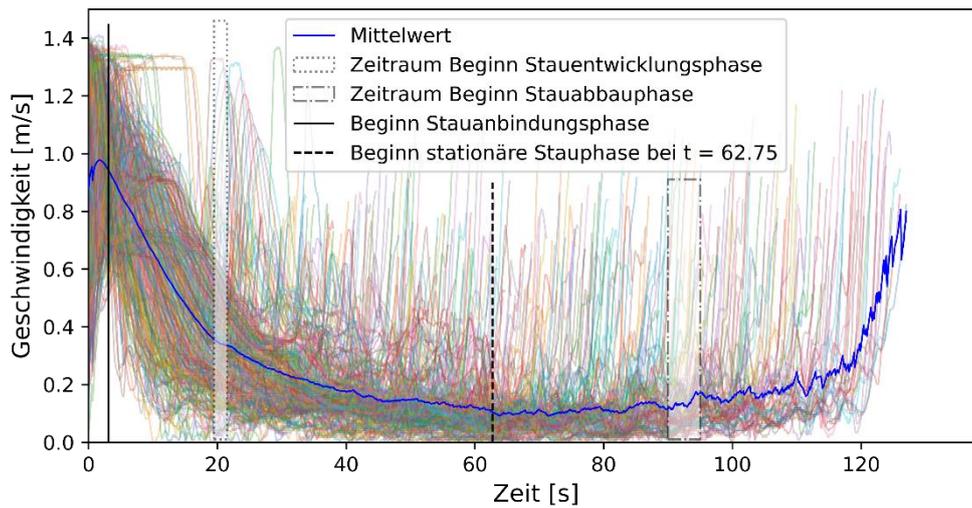


Abbildung A6.1: Verlauf der individuellen Geschwindigkeiten der fünf Szenarien im Raum inkl. Stauphasen von 250-1.5 (oben) 350-2.1 (unten)

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit erkläre ich gemäß §15 (6) PO 2017, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Wuppertal, 01.09.2022