



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

Lehrstuhl Computersimulation für Brandschutz und Fußgängerverkehr

Modellierung von Warteverhalten in JuPedSim

Name:	Lilli Rose Josefine Klein
Matrikelnummer:	2121103
Anschrift:	Kluser Höhe 23, 42119 Wuppertal
1. Prüfer:	Prof. Dr. Armin Seyfried
2. Prüferin:	Dr. Mira Küpper

Wuppertal, 24.11.2024

Erklärung der Verfasserin

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Wuppertal, 24.11.2024

Lilli Rose Josefine Klein

Kurzfassung

Diese Masterarbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Modells zur Simulation des Warteverhaltens von Personen auf Bahnsteigen. Ziel war es, mithilfe eines iterativen und inkrementellen Vorgehensmodells fünf zentrale Einflussfaktoren, den Abstand zu Ein- und Ausgängen, Gefahrenbereiche, Flussvermeidung im Eingangsbereich und Hindernisse in die Modellbildung zu integrieren. Dabei lag der Fokus auf der Verteilung der Wartepositionen.

Zur Modellerstellung wurde die Software JuPedSim verwendet und mittels Python erweitert. Das entwickelte Modell wurde anhand von Laborexperimenten validiert, welche verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Geometrien, Personenzahlen und Wartezeiten untersuchten. Dabei lag der Fokus auf der Analyse der Personenverteilung im Wartebereich unter den jeweiligen Bedingungen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Attraktivitätskarte der zweiten Iteration die Verteilung der wartenden Personen in Szenarien mit 100 Personen realitätsnah abbilden konnte. In Szenarien mit 40 Personen hingegen war die Verteilung zu gleichmäßig, was in späteren Iterationen durch die Anpassung von Gewichtungsfaktoren, Konstanten und Wahrscheinlichkeitskarten optimiert wurde. Allerdings führten diese Anpassungen zu Verschlechterungen in anderen Szenarien, was die Grenzen der Ansätze verdeutlichte.

Das entwickelte Modell stellt eine erste Grundlage zur Simulation von Warteverhalten ohne die Verwendung von Realdaten dar. Es sind weite Implementierungen wie etwa das einander Ausweichen von Agenten oder die Integration des zeitlichen Verlaufs notwendig, um das Modell weiter zu verbessern. Die Validierung wurde lediglich mit einem Modellbahnsteig vorgenommen und bedarf weiterer Untersuchung.

In der Realität sind vielfältigere Geometrien, mehr Einflussfaktoren und dynamischere Personenbelegungen an Bahnsteigen zu erwarten. Ziel ist es jedoch, dass auf dem hier vorgestellten Ansatz aufgebaut werden kann und weitere Einflussfaktoren zukünftig ergänzt werden können.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung der Verfasserin	I
Kurzfassung	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Warteverhalten von Personen an Bahnsteigen	3
2.2 Software zum Abbilden von Warteverhalten von Personen	4
2.3 JuPedSim	7
3 Modellbildung	8
3.1 Geometrie-Inkrement	11
3.1.1 Geometrie-Inkrement Iteration 01	12
3.1.2 Geometrie-Inkrement Iteration 02	12
3.2 Wahrscheinlichkeitskarte-Inkrement	12
3.2.1 Wahrscheinlichkeitskarte-Inkrement 01	13
3.2.2 Wahrscheinlichkeitskarte-Inkrement 02	18
3.2.3 Wahrscheinlichkeitskarte-Inkrement 03	19
3.2.4 Wahrscheinlichkeitskarte-Inkrement 04	21
3.3 Wartepositionen-Inkrement	23
3.3.1 Wartepositionen-Inkrement Iteration 01	23
3.4 Simulations-Inkrement	24
3.4.1 Simulations-Inkrement Iteration 01	25
3.4.2 Simulations-Inkrement Iteration 02	26
4 Validierung durch Laborexperimente	27
4.1 Delaunay-Triangulierung	28
4.2 Pair Distribution Function	29
5 Ergebnisse	30

5.1	Laborexperimente	30
5.1.1	Delaunay-Triangulierung	30
5.1.2	Pair Distribution Function	31
5.2	Iteration 01	31
5.3	Iteration 02	31
5.3.1	Delaunay-Triangulierung	33
5.3.2	Pair Distribution Function	35
5.4	Iteration 03	35
5.4.1	Delaunay-Triangulierung	37
5.4.2	Pair Distribution Function	39
5.5	Iteration 04	39
5.5.1	Delaunay-Triangulierung	42
5.5.2	Pair Distribution Function	43
5.6	Zusammenfassung Ergebnisse Modellbildung	43
6	Diskussion	45
7	Fazit	49
8	Literaturverzeichnis	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehensmodell für die Entwicklung des Modells zum Abbilden des Warteverhaltens von Personen auf Bahnsteigen.....	8
Abbildung 2: Systemkern – Basis Geometrie.....	9
Abbildung 3: Systemkern – Wahrscheinlichkeitskarte und daraus resultierende Wartepositionen für 100 Personen	10
Abbildung 4: Ausschnitte der Simulation des Systemkerns inklusive Anfangszustand, Wartepositionen und dem Verlassen der Wartepositionen	11
Abbildung 5: Attraktivitätskarte Abstand zum Eingang: Basisfunktion.....	14
Abbildung 6: Attraktivitätskarte Abstand zum Eingang: Angepasste Funktion.....	14
Abbildung 7: Attraktivitätskarte Abstand zum Ausgang: Basisfunktion.....	15
Abbildung 8: Attraktivitätskarte Abstand zum Ausgang: Angepasste Funktion.....	15
Abbildung 9: Attraktivitätskarte Gefahrenbereiche: Basisfunktion	16
Abbildung 10: Attraktivitätskarte Gefahrenbereiche: Angepasste Funktion	16
Abbildung 11: Attraktivitätskarte Flussvermeidung: Basisfunktion	16
Abbildung 12: Attraktivitätskarte Flussvermeidung: Angepasste Funktion	16
Abbildung 13: Attraktivitätskarte Hindernisse: Basisfunktion.....	17
Abbildung 14: Attraktivitätskarte Hindernisse: Erweiterung der Funktion	17
Abbildung 15: Attraktivitätskarte ohne Hindernisse	18
Abbildung 16: Attraktivitätskarte inkl. Hindernis	18
Abbildung 17: Wahrscheinlichkeitskarte o. Hindernisse.....	19
Abbildung 18: Wahrscheinlichkeitskarte inkl. Hindernis	19
Abbildung 19: Attraktivitätskarte: Erweiterung für breite Hindernisse	19
Abbildung 20: Wahrscheinlichkeitskarte mit breitem Hindernis	19
Abbildung 21: Wahrscheinlichkeitskarte ohne Potenzierung, ohne Hindernis	20
Abbildung 22: Wahrscheinlichkeitskarte mit Potenzierung, ohne Hindernis	20
Abbildung 23: Wahrscheinlichkeitskarte ohne Potenzierung, schmales Hindernis	20
Abbildung 24: Wahrscheinlichkeitskarte mit Potenzierung, schmales Hindernis	20
Abbildung 25: Wahrscheinlichkeitskarte ohne Potenzierung, breites Hindernis	21
Abbildung 26: Wahrscheinlichkeitskarte mit Potenzierung, breites Hindernis	21
Abbildung 27: Attraktivitätskarte Abstand zum Ausgang: Iteration 02, $a = 0.3$	22
Abbildung 28: Attraktivitätskarte Abstand zum Ausgang: Iteration 04, $a = 0.05$	22
Abbildung 29: Attraktivitätskarte Flussvermeidung: Basisfunktion mit $c = 1$, $d = 3$, $e = 1.5$	22
Abbildung 30: Attraktivitätskarte Flussvermeidung: Angepasste Funktion $c = 1$, $d = 3$, $e = 2$	22
Abbildung 31: Wartepositionen des Experiments 3B050, ohne Hindernis, 41 Personen, 2 Minuten Wartezeit, $t = 270$ s	32

Abbildung 32: Wartepositionen der Simulation 3B050, ohne Hindernis, 41 Personen, 2 Minuten Wartezeit, $t = 150$ s	32
Abbildung 33: Vergleich zwischen den vorgegebenen Wartepunkten und den tatsächlichen Wartepositionen der Simulation, 101 Agenten, breites Hindernis – Iteration 02.....	33
Abbildung 34: Wartepositionen des Experiments 1B060, ohne Hindernis, 40 Personen, 4 Minuten Wartezeit.....	36
Abbildung 35: Wartepositionen der Simulation 1B060, ohne Hindernis, 40 Personen, 4 Minuten Wartezeit.....	36
Abbildung 36: Wartepositionen des Experiments 3B070, ohne Hindernis, 102 Personen, 2 Minuten Wartezeit	36
Abbildung 37: Wartepositionen der Simulation 3B070, ohne Hindernis, 102 Personen, 2 Minuten Wartezeit.....	36
Abbildung 38: Wartepositionen des Experiments 3B090, schmales Hindernis, 40 Personen, 4 Minuten Wartezeit	37
Abbildung 39: Wartepositionen der Simulation 3B090, schmales Hindernis, 40 Personen, 4 Minuten Wartezeit	37
Abbildung 40: Wartepositionen des Experiments 3B130, breites Hindernis, 101 Personen, 2 Minuten Wartezeit	37
Abbildung 41: Wartepositionen der Simulation 3B130, breites Hindernis, 101 Personen, 2 Minuten Wartezeit.....	37
Abbildung 42: Histogramm der Entfernung zu den Nächsten Nachbarn, 100 Personen, kein Hindernis, 2 Minuten Wartezeit, Experimente.....	38
Abbildung 43: Histogramm der Entfernung zu den Nächsten Nachbarn, 100 Personen, kein Hindernis, 2 Minuten Wartezeit, Iteration 02.....	38
Abbildung 44: Histogramm der Entfernung zu den Nächsten Nachbarn, 100 Personen, kein Hindernis, 2 Minuten Wartezeit, Iteration 03.....	38
Abbildung 45: Wartepositionen des Experiments 3B070, kein Hindernis, 102 Personen, 2 Minuten Wartezeit.....	40
Abbildung 46: Wartepositionen der Simulation 3B070, kein Hindernis, 102 Personen, 2 Minuten Wartezeit.....	40
Abbildung 47: Wartepositionen des Experiments 2B080, schmales Hindernis, 41 Personen, 2 Minuten Wartezeit	41
Abbildung 48: Wartepositionen der Simulation 2B080, schmales Hindernis, 41 Personen, 2 Minuten Wartezeit	41
Abbildung 49: Wartepositionen des Experiments 2B110, breites Hindernis, 40 Personen, 2 Minuten Wartezeit	41

Abbildung 50: Wartepositionen der Simulation 2B110, breites Hindernis, 40 Personen, 2 Minuten Wartezeit.....	41
Abbildung 51: Wartepositionen des Experiments 3B130, breites Hindernis, 101 Personen, 2 Minuten Wartezeit	42
Abbildung 52: Wartepositionen der Simulation 3B130, breites Hindernis, 101 Personen, 2 Minuten Wartezeit.....	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Szenarien Laborexperimente inklusive Hinderniskonfiguration, Personenanzahl, Wartezeit und der Bezeichnung der Läufe	27
Tabelle 2: Mediane der Entfernung der nächsten Nachbarn nach der Delaunay-Triangulierung der Laborexperimente und Iterationen der Modellbildung.....	44

1 Einleitung

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Modells zur Simulation des Warteverhaltens von Fußgängern auf Bahnsteigen. Ziel der Arbeit ist es, durch ein iteratives und inkrementelles Vorgehen ein Modell zu entwickeln, welches das Warteverhalten von Personen auf Bahnsteigen möglichst realitätsnah abbildet. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Verteilung der Wartepositionen.

Das Warteverhalten von Personen an Bahnsteigen ist sowohl bei der Planung von Personenverkehrsanlagen, bei der Kapazitätsanalyse aber auch bei sicherheitsrelevanten Fragestellungen von Bedeutung. Die ungleichmäßige Verteilung von Personen auf Bahnsteigen beeinflusst die Aufenthaltsqualität von Personen und die Effizienz von Bahnhöfen erheblich (Johansson et al. 2015). Bei Sicherheitsrelevanten Themen, wie beispielsweise der Untersuchung der Räumung von Personenverkehrsanlagen durch Ingenieurmethoden im Brandschutz, hat die Anfangsverteilung der Personen auf dem Bahnsteig einen Einfluss auf die Gesamträumungsdauer, sowie die Verweilzeiten von Personen in Stauungen. (DIN 18009-2:2022)

Es wurden bereits Modelle entwickelt, die das Warteverhalten von Personen abbilden. Allerdings sind dafür noch Realdaten notwendig, um die attraktiven Wartepositionen zu identifizieren. (Yang et al. 2018; Schrödter und Chraibi 2020) Dadurch ist die Anwendung limitiert, da das Erheben von Daten an Bahnsteigen einen großen Aufwand darstellt und für zukünftige Planungen nicht möglich ist.

In dieser Arbeit wird ein Modell entwickelt, welches das Warteverhalten von Personen, insbesondere die Wahl der Wartepositionen, abbildet. Dabei werden fünf zentrale Einflussfaktoren auf die Wahl der Warteposition in die Modellerstellung mit Einbezogen. Der Abstand zum Eingang, der Abstand zum Ausgang, Gefahrenbereiche, Flussvermeidung am Eingangsbereich sowie der Einfluss von Hindernissen. Das Modell berücksichtigt dabei zunächst nur einfache Geometrien.

Zur Bewertung des Modells werden explorative Beobachtungen sowie die Delaunay-Triangulierung herangezogen. Zusätzlich werden die Ergebnisse der Simulationen mittels der Pair Distribution Function untersucht. In mehreren Iterationen werden unterschiedliche Ansätze evaluiert, um das Warteverhalten zu modellieren und das Modell zu optimieren.

In Kapitel 2 wird zunächst der Stand der Technik dargestellt. Dabei wird relevante Literatur zum Warteverhalten von Personen an Bahnsteigen herangezogen. Anschließend werden Programme vorgestellt, die zur Simulation von Fußgängerbewegungen eingesetzt werden, und es wird

erläutert, inwiefern diese das Warteverhalten von Personen abbilden. Abschließend wird das für die Modellerstellung verwendete Programm JuPedSim näher beschrieben.

Kapitel 3 befasst sich mit dem Ansatz zur Modellerstellung für das Abbilden des Warteverhaltens von Personen auf Bahnsteigen sowie mit der detaillierten Beschreibung des Modells selbst. Kapitel 4 widmet sich der Methodik zur Bewertung des erstellten Modells und beschreibt die Laborexperimente, die für den Vergleich herangezogen wurden. Die Ergebnisse der Bewertung werden im darauffolgenden Kapitel dargestellt. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse kritisch diskutiert und mit der Literatur verglichen. Zudem wird ein Ausblick gegeben, wie man die Simulation des Warteverhaltens weiter verbessern kann. Abschließend folgt ein Fazit.

2 Stand der Technik

Im folgenden Kapitel werden zunächst wissenschaftliche Erkenntnisse zum Warteverhalten von Personen an Bahnsteigen vorgestellt, wobei der Fokus auf Aspekten liegt, die für die spätere Modellerstellung von Bedeutung sind. Anschließend werden verschiedene Ansätze zur Simulation des Warteverhaltens behandelt. Zuletzt wird das für die Modellerstellung verwendete Programm JuPedSim detailliert vorgestellt.

2.1 Warteverhalten von Personen an Bahnsteigen

Bei der Untersuchung des Warteverhalten ist es essenziell, den geographischen Ursprung zu berücksichtigen. Das Verhalten von Fahrgästen variiert signifikant zwischen verschiedenen Ländern. Diese Unterschiede sind nicht nur auf kulturelle Faktoren, sondern auch auf das Design und die Infrastruktur der jeweiligen Bahnhöfe zurückzuführen (Pettersson 2011).

Das Verhalten von Personen an Bahnsteigen wird hauptsächlich untersucht, um Infrastrukturen zu planen sowie die Effizienz und die Personensicherheit zu optimieren. Dabei konzentrierten sich die Untersuchungen stark auf die „Dwell Time“, also die Verweildauer des Zuges am Gleis, sowie deren Einflussfaktoren. Die Verteilung von Personen während der Wartezeit spielt mit ein, da eine unregelmäßige Verteilung zu einer längeren Verweildauer des Zuges führt (Lam et al. 1999; Pettersson 2011; Ernst 2015).

In einem Vergleich von 2011 zwischen dem Warteverhalten von schwedischen und japanischen Personen stellte Pettersson Unterschiede dahingehend fest, wie weit die Personen zu der nächstgelegenen Tür warten. Schwedische Fahrgäste warten weiter von der nächsten Einstiegsmöglichkeit entfernt. Innerhalb dieser Bevölkerungsgruppe lassen sich Unterschiede zwischen Fahrgästen mit einem höheren Wissen darüber, an welcher Position der Zug hält und zu Fahrgästen mit weniger Hintergrundwissen identifizieren. In Japan ist das Verhalten homogener. Die Passagiere wissen, wo der Zug hält und die nächstliegende Tür ist und verteilen sich gleichmäßiger auf die Einstiegsmöglichkeiten. Vor den Türen bilden sich Warteschlangen aus. Die genaue Position der wartenden Personen wurde nicht erfasst. Es wurde erfasst, in welchem Bereich des Gleises die Personen stehen und wie lange sie warten. Qualitativ wurde beschrieben, dass zu Beginn eine Clusterbildung um die Bereiche mit Sitzmöglichkeiten stattfindet. (Pettersson 2011)

Besonders aus Beobachtungen des Warteverhaltens von Personen in Zürich lassen sich zahlreiche Einflussfaktoren auf die Verteilung der wartenden Personen ableiten. Dazu gehören unter anderem der Zeitpunkt der Ankunft, der Reisezweck, das Alter, die Gruppengröße, Wetterbedingungen sowie geometrische Einflussfaktoren und viele weitere Aspekte. Diese Erkenntnisse wurden jedoch lediglich im Rahmen einer Konferenzpräsentation und nicht in einem wissenschaftlichen Artikel veröffentlicht. (Ernst 2015) Es ist zu beachten, dass Daten darüber,

wie Personen auf Bahnsteigen warten, häufig nicht öffentlich zugänglich gemacht oder wissenschaftlich ausgewertet werden.

In neueren Publikationen wurden die einzelnen Einflussfaktoren näher untersucht und ihre Auswirkungen identifiziert. Das Warteverhalten von Gruppen unterscheidet sich zu dem Warteverhalten von Individualisten. Gruppen stehen zwecks Kommunikation eher in Kreisen zusammen. Zudem warten Gruppen häufig im Bereich der Zugänge zu den Bahnsteigen. Bei längeren Wartezeiten werden Bereiche mit einer geringeren Personendichte bevorzugt. (Küpper und Seyfried 2023a)

Die wichtigste Grundlage für die Modellerstellung bilden die Laborexperimente von Küpper et al. In diesen Untersuchungen wurden auf einem Modellbahnsteig unterschiedliche Szenarien mit variierender Personenzahl, Geometrie und Wartezeiten getestet. Dabei wurden fünf zentrale Einflussfaktoren identifiziert, die die Wahrscheinlichkeit des Wartens in einem Bereich beeinflussen. Diese umfassen den Abstand zum Eingang, den Abstand zum Ausgang, Gefahrenbereiche, Bereiche am Eingang zur Flussvermeidung und Hindernisse. Personen bevorzugen Wartepositionen in der Nähe von Eingängen und Ausgängen, wobei die Ausgänge die Züge repräsentieren, in die die wartenden Personen einsteigen möchten. Durch Linien markierte Gefahrenbereiche an der Bahnsteigkante werden von den Personen gemieden. Ebenso wird der direkte Eingangsbereich vermieden, um den Personenfluss auf den Bahnsteig nicht zu behindern. Hindernisse, wie beispielsweise Werbeplakate, haben ebenfalls einen starken Einfluss. Vor Hindernissen sammeln sich bevorzugt wartende Personen, während die Bereiche dahinter eher gemieden werden. (Küpper und Seyfried 2023b) Die Arbeit von Küpper et al. wird als Grundlage für die Modellerstellung gewählt, da sie systematisch den Einfluss zentraler Faktoren auf das Warteverhalten untersucht hat. Zudem stehen die Daten der Laborexperimente zur Verfügung, was einen quantitativen Abgleich und damit eine Validierung des Modells ermöglicht.

2.2 Software zum Abbilden von Warteverhalten von Personen

In diesem Abschnitt wird der Fokus auf das Warteverhalten von Personen am Bahnsteig gelegt. Die Darstellung von Warteverhalten in anderen Situationen, wie beispielsweise Warteschlangen, wird daher nicht näher erläutert.

Bevor auf die wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur Simulation von Warteverhalten eingegangen wird, werden zunächst eine Auswahl gängiger Programme und deren Möglichkeiten zur Darstellung von Warteverhalten vorgestellt. Dabei werden die Programme crowd:it, Pathfinder und Viswalk betrachtet. Das verwendete Programm JuPedSim wird in Kapitel 2.3 vorgestellt.

Im Folgenden werden die in der Simulation dargestellten Personen als „Agenten“ bezeichnet, um den Unterschied zwischen der simulierten Umgebung und der realen Welt hervorzuheben.

Aus der crowd:it Dokumentation wird deutlich, dass Warteverhalten von Agenten mit dem Programm abgebildet werden kann. In crowd:it lassen sich Wartebereiche einschließlich der Kapazitäten und der Kriterien, unter denen das Warten endet, definieren. Dies kann entweder zeitgesteuert oder abhängig von einer bestimmten Kapazitätsgrenze erfolgen. Zudem bietet das Programm die Möglichkeit festzulegen, ob wartende Agenten anderen ausweichen können und in welchem Umfang sie dafür den Wartebereich verlassen dürfen. Für die Auswahl der Wartepositionen kann eingestellt werden, ob Agenten vollständig im Wartebereich sein müssen oder die Körpermitte im Wartebereich liegen muss. Als Anwendungsbeispiel für das Ausweichen wird das Warten an engen Bahnsteigen genannt. Darüber hinaus kann crowd:it verschiedene Warteverhalten simulieren, wie das Anstehen an einer Kasse oder das Warten auf eine Gruppe an einem Sammelpunkt vor dem gemeinsamen Weitergehen. (accu:rate GmbH 2024)

Aus den Projektreferenzen von crowd:it wird ersichtlich, dass Projekte mit dem Programm untersucht wurden, auf die das Warteverhalten von Personen einen Einfluss hat. Es wurde zum einen eine Passagierflussanalyse der Haltestelle Hamburg Hauptbahnhof der Linie U 5 durchgeführt und die Aufenthaltsqualität untersucht. Bei diesem Projekt wurden Realdaten mit einbezogen. Zum anderen wurde bei der Haltestelle Hauptbahnhof in München eine Fahrgaststrom-Simulation durchgeführt und für die Linien U 4 und U 5 die Optimierung der wechselnden Fahrgäste untersucht. (Kneidl 2024)

In dem Benutzerhandbuch von Pathfinder wird beschrieben, dass Agenten in einem definierten Bereich warten können. Sie können warten bis ein definierter Zeitraum verstrichen ist, oder bis sie von einem anderen Agenten Unterstützung erhalten. Die Position, an der die Agenten warten hängt von der Art des vorherigen Weg-Elements ab. War das vorherige Ziel ein Weg-Punkt, so warten sie so nah wie möglich an diesem. War das vorherige Ziel ein Raum, so warten sie so weit wie möglich von diesem entfernt. In der Standardeinstellung gehen Agenten anderen aus dem Weg, wenn diese vorbei gehen. (Thunderhead Engineering 2020)

PTV Viswalk ist ein Programm, dass mit der Anwendung für verkehrstechnische Infrastruktur wirbt. Es können Warteschlangen und Wartesysteme wie an Ticketschaltern simuliert werden. Es sind Verhaltensregeln für Wartende in dem Programm vorgegeben, so können Agenten beispielsweise nicht auf Rampen oder Treppen warten. (PTV Group 2024) Die genaue Methodik zur Modellierung des Warteverhaltens wird jedoch in der verfügbaren Dokumentation nicht offengelegt.

Zusammenfassend werden Programme wie crowd:it und Pathfinder genutzt, um Personenflüsse und die Aufenthaltsqualität von Personen auf Bahnsteigen zu untersuchen. Die Wartepositionen werden dabei durch einfache Abhängigkeiten festgelegt. Häufig werden die Warteposition mit Realdaten der betrachteten Haltestellen verglichen und händisch verteilt, bis das Modell die Realität abbilden kann. Daraus resultiert ein höherer Aufwand in der Benutzung und eine

Limitierung der Anwendungsmöglichkeiten. Mit dieser Vorgehensweise können nur Bahnsteige abgebildet werden über die Realdaten vorliegen.

Im Folgenden werden Ansätze zur Simulation des Warteverhaltens im wissenschaftlichen Kontext dargelegt.

Es wurde bereits gezeigt, dass das Warteverhalten von Personen einen erheblichen Einfluss auf die Fußgängerdynamik an Bahnsteigen hat. Eine Arbeit von Davidich et al. (2013) beschäftigte sich mit Simulationen unter Verwendung von zellulären Automaten und konnte nachweisen, dass die Gestaltung von Wartezonen die Fußgängerdynamik beeinflusst. Dabei wurden die Wartebereiche anhand von Videodaten ermittelt, wobei der Fokus jedoch nicht auf der Entwicklung eines Modells zur Abbildung des Warteverhaltens lag. (Davidich et al. 2013)

In weiteren Untersuchungen zum Ein- und Ausstiegsverhalten von Personen wurde festgestellt, dass insbesondere die Positionen der wartenden Agenten eine entscheidende Rolle bei der Beeinflussung von Warte- und Umsteigezeiten spielen. Krstanoski zeigte in seiner Arbeit, dass das Warteverhalten einen signifikanten Einfluss auf diese Zeiten hat. (Krstanoski 2014)

Des Weiteren wurden in einer Publikation von Johansson bereits Simulationen vorgestellt, in denen das Ausweichen von wartenden Agenten untersucht wurde, um die Fußgängerdynamik auf Bahnsteigen darzustellen. Dabei lag der Schwerpunkt nicht auf der Wahl der Wartepositionen, sondern auf der Interaktion der wartenden Personen untereinander. (Johansson et al. 2015)

In jüngeren Veröffentlichungen wurden bereits Ansätze vorgestellt, das Warteverhalten von Personen inklusive der Wahl von Wartepositionen zu modellieren. Ein solcher Ansatz nutzt eine Kostenfunktion zur Modellierung der Verteilung von Personen an einer U-Bahn-Station. Dabei werden Faktoren wie die Distanz zum Einstiegspunkt in den Zug sowie die Personendichte berücksichtigt. Das entwickelte Wartebereich-Wahlmodell wird mit einem Social Force Modell kombiniert. Zur Kalibrierung werden Daten des U-Bahnhofs Xuanwumen in Peking verwendet. (Yang et al. 2018)

Ein weiterer Ansatz verwendet Potentialfelder und einen zellulären Automaten, um Personen zu plausiblen Wartepositionen zu leiten. Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen wurden mit Videomaterial eines Bahnsteiges in Bern kalibriert und konnten die Beobachtungen gut widerspiegeln. Ein Problem der durchgeführten Simulationen ist, dass sich die Agenten zu sehr bewegen, da sie keine festen Wartepositionen haben. (Schrödter und Chraibi 2020)

Zusammenfassend ist mit Simulationen zum Abbilden von Fußgängerdynamiken bereits gezeigt worden, dass das Warteverhalten Einfluss auf die Bewegungsmuster von Personen an Bahnsteigen hat. Es liegen bereits erste Ansätze vor, um das Warteverhalten von Personen abzubilden. Allerdings sind dafür häufig noch Realdaten notwendig, um die attraktiven Wartepositionen zu identifizieren.

2.3 JuPedSim

JuPedSim ist ein mikroskopisches Simulationsmodell, das speziell für akademische Anwendungen entwickelt wurde. Aufgrund seiner offenen Struktur und Flexibilität eignet es sich besonders für die Untersuchung und Entwicklung von Modellen zur Simulation des Wartverhaltens (Chraibi et al. 2024). Im Gegensatz zu kommerziellen Programmen bietet JuPedSim durch seinen Open-Source-Ansatz volle Transparenz hinsichtlich Funktionsweise und Modellparametern. Dadurch können Simulationsergebnisse präzise analysiert und für spezifische Fragestellungen weiterentwickelt werden (Wagoum et al. 2015).

Ein zentraler Bestandteil von JuPedSim ist die Routenfindung, die den Prozess beinhaltet, wie Fußgänger in der Simulation ihre Wege bestimmen. Dieser Prozess gliedert sich in die Routenplanung, welche die strategischen Entscheidungen der Agenten zur Wahl eines Ziels abbildet und die Wegfindung, welche die tatsächliche Auswahl eines Pfades innerhalb der Umgebung modelliert. (Chraibi et al. 2024)

Neben der Routenfindung stellt JuPedSim verschiedene mikroskopische Fußgängermodelle bereit, um Bewegungsdynamiken von Agenten darzustellen. Zu den zentralen Modellen zählt das **Collision Free Speed Model**, das darauf abzielt, Kollisionen zwischen Agenten zu vermeiden, indem Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung dynamisch an die Umgebung angepasst werden (Tordeux et al. 2015). Ein weiteres Modell ist das **Generalized Centrifugal Force Model**, bei dem Agenten durch elliptische Repräsentationen beschrieben werden. Dieses Modell berücksichtigt Abstoßungskräfte zwischen Agenten, um realitätsnahe Bewegungsdynamiken, insbesondere in engen Räumen, zu simulieren. Zusätzlich wird das **Social Force Model** eingesetzt, ein kräftebasierter Ansatz, bei dem die Bewegung der Agenten durch eine Kombination aus Anziehungs-, Abstoßungs- und Hinderniskräften beschrieben wird. Diese Kräfte simulieren sowohl die zielgerichtete Bewegung der Fußgänger als auch ihre Interaktionen mit anderen Agenten und der Umgebung. (Chraibi et al. 2024)

3 Modellbildung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Modells zur Simulation des Wartevertaltens auf Bahnsteigen. Dazu wird die Open-Source Software JuPedSim als Grundlage verwendet. In diesem Kapitel wird die Modellbildung beschrieben, einschließlich der Erläuterung des Vorgehensmodells.

Das Vorgehen orientierte sich an bewährten Vorgehensmodellen, die an die spezifische Fragestellung angepasst wurden. Vorgehensmodelle bieten „systematische, organisatorische, ingenieurmäßige und quantifizierbare Vorgehensweisen, um Aufgaben einer bestimmten Klasse wiederholbar zu lösen“ (Broy und Kuhrmann 2021). Aspekte der Organisationsstrukturen in Vorgehensmodellen wurden in dieser Arbeit jedoch nicht weiter behandelt, da sie für die vorliegende Fragestellung nicht relevant sind.

Für die Entwicklung des Modells wurde ein kombinierter Ansatz aus iterativer und inkrementeller Entwicklung gewählt. Dieser Ansatz ermöglicht es, das Modell schrittweise zu erweitern und kontinuierlich zu verbessern. Das inkrementelle Vorgehen zeichnet sich dadurch aus, dass zunächst ein funktionsfähiger Systemkern erstellt wird, auf welchen in der weiteren Projektentwicklung aufgebaut wird (Broy und Kuhrmann 2021). Da JuPedSim bereits als funktionsfähiges Programm vorliegt, ist der kombinierte iterative und inkrementelle Ansatz besonders geeignet, um das Warteverhalten als Erweiterung zu implementieren und systematisch zu testen.

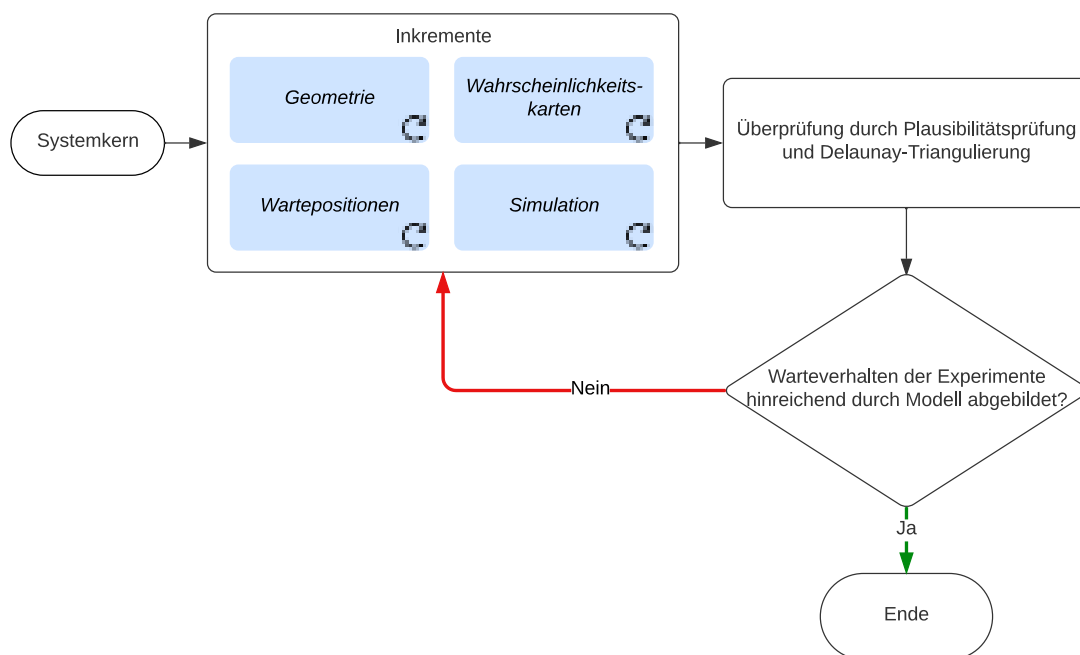


Abbildung 1: Vorgehensmodell für die Entwicklung des Modells zum Abbilden des Wartevertaltens von Personen auf Bahnsteigen

In Abbildung 1 ist das angepasste Vorgehensmodell dargestellt. Zunächst wird ein Systemkern implementiert, aus dem die vier Inkremente Geometrie, Wahrscheinlichkeitskarten, Wartepositionen und Simulation, hervorgehen. Nach jeder Iteration erfolgt eine Überprüfung des Modells, woraufhin entschieden wird, ob weitere Iterationen notwendig sind. Die Bewertung des entwickelten Modells erfolgte sowohl quantitativ als auch qualitativ anhand von Daten aus Laborexperimenten. Die Methodik zur Überprüfung des Modells wird in Kapitel 4 beschrieben.

Im Folgenden wird zunächst der Systemkern erläutert. Dieser dient als Basis für die Entwicklung und bildet das Warteverhalten von Personen auf dem Bahnsteig nicht ab. Anschließend werden in den Kapiteln 3.1 bis 3.4 die einzelnen Inkremente inklusive der durchgeführten Iterationen beschrieben.

In dem Systemkern wurde zunächst eine einfache Geometrie erstellt. Dieses Inkrement wird im Folgenden als „Geometrie-Inkrement“ bezeichnet. Es beinhaltet, wie in Abbildung 2 zu sehen, eine Zone, in welcher Agenten zum Start der Simulation erstellt werden und eine Ziel-Zone. Zusätzlich wurde in der Geometrie ein Wartebereich definiert, welcher in grau dargestellt ist. Zunächst verfügt die Geometrie über keine Funktionen, welche über die bereits in JuPedSim vorhandenen hinausgehen. Ziel der Modellbildung ist es, in der Geometrie Elemente wie „Bahnsteigkante“ und „Hindernisse“ zu implementieren, welche Einfluss auf die Wahrscheinlichkeitskarte haben sollen. Zu dem Geometrie-Inkrement wird die Vorbereitung der Geometrie für das nachfolgende Inkrement gezählt.

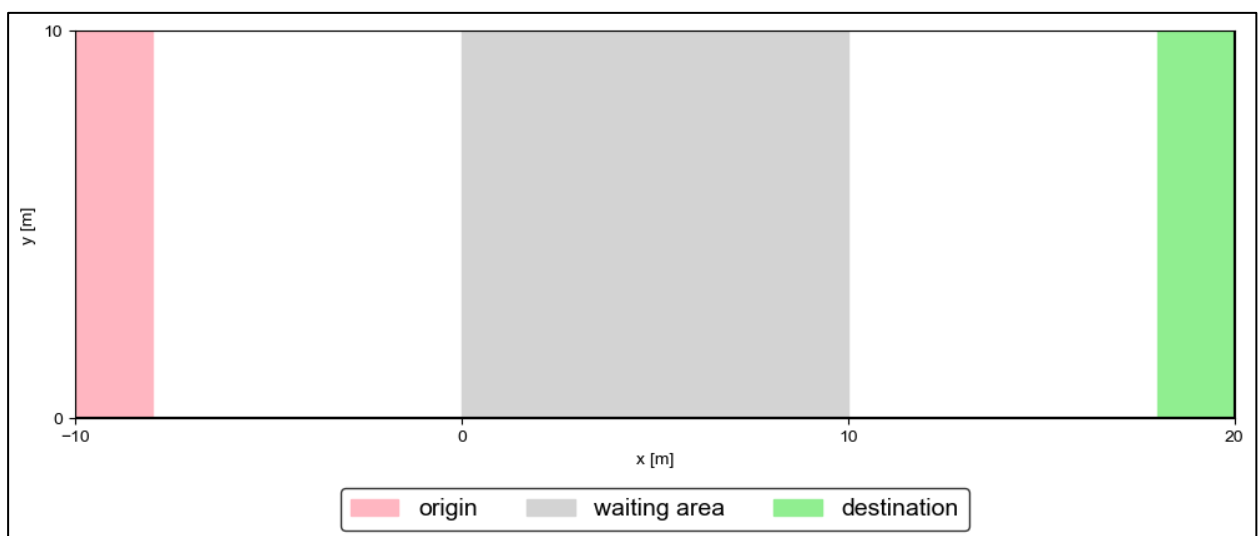


Abbildung 2: Systemkern – Basis Geometrie

In dem Systemkern wurde zudem eine Basis-Wahrscheinlichkeitskarte implementiert. Die anfänglich gewählte Verteilung entspricht nicht der zu erwartende Verteilung von Personen. Es wurde eine einfache Verteilung gewählt, um die nachfolgenden Schritte und das Zusammenspiel der Inkremente auf Funktionsfähigkeit testen zu können. Dieses Inkrement wird im Weiteren als „Wahrscheinlichkeitskarten-Inkrement“ bezeichnet.

Die Wahrscheinlichkeitskarte wurde genutzt, um Wartepositionen für die Agenten zu bestimmen. Dies stellt das „Wartepositionen-Inkrement“ dar. Dieses Inkrement ist in dem Systemkern in einer grundlegenden Version implementiert. Es werden Wartezellen basierend auf Wahrscheinlichkeiten ausgewählt, ohne Abstandskriterien zu berücksichtigen. Es wird als eigenständiges Inkrement betrachtet, da bei der Auswahl der Wartepunkte zukünftig zusätzliche Parameter einbezogen werden sollen, wodurch die Auswahl komplexer wird.

In Abbildung 3 ist links die Wahrscheinlichkeitskarte des Systemkerns zu sehen. Die Wahrscheinlichkeit an einer Position zu warten, nimmt mit steigenden x - und y -Werten zu. Die Summe aller Zellwahrscheinlichkeiten beträgt 100 %, sodass die einzelnen Zellen nur Werte von maximal 0,25 % erreichen. Im rechten Teil der Abbildung sind beispielhaft Wartepositionen dargestellt, welche zufällig mit der vorgegeben Wahrscheinlichkeitskarte ausgewählt wurden. Zur besseren Visualisierung wurden mehr Wartepositionen dargestellt, als in der ersten Simulation verwendet wurden.

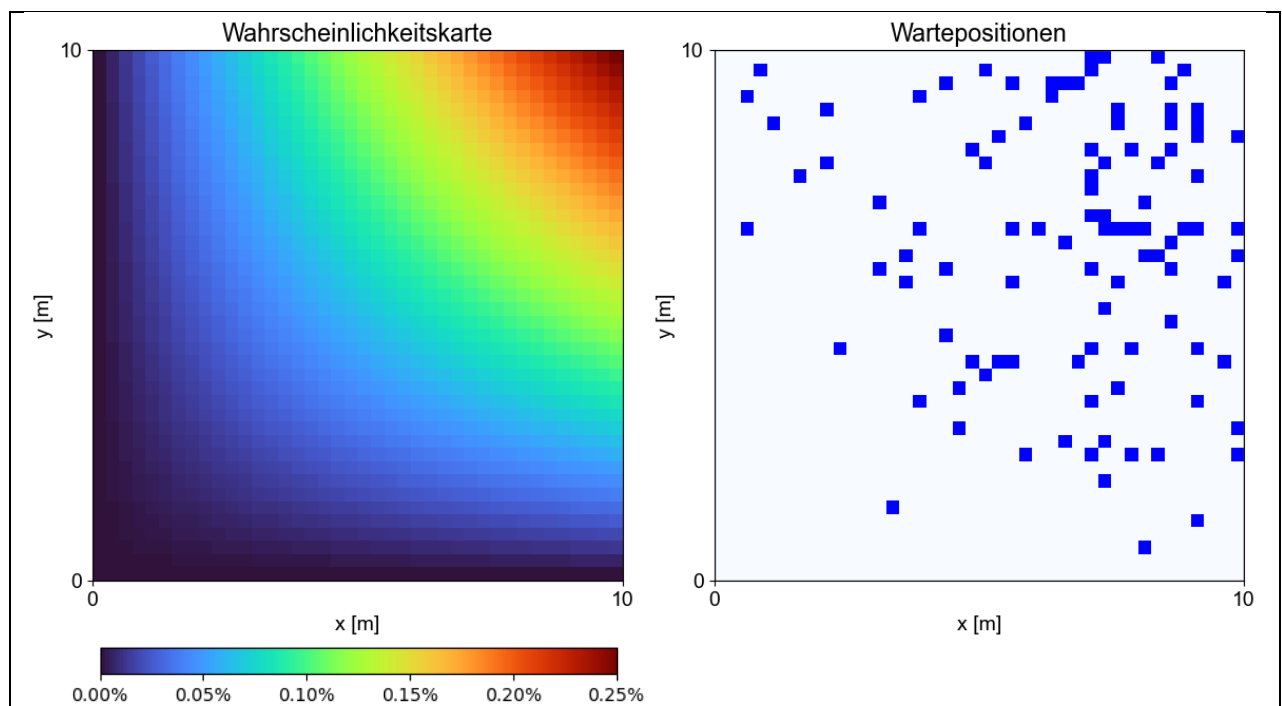


Abbildung 3: Systemkern – Wahrscheinlichkeitskarte und daraus resultierende Wartepositionen für 100 Personen

Das letzte Inkrement, das „Simulations-Inkrement“, umfasst zeitabhängige Eingaben wie das Starten der Agenten und die Dauer des Wartens. Zusätzlich werden hier die Routenwahl und das Verhalten der Agenten definiert, wobei die Informationen der vorherigen Inkremente einbezogen werden. Im Systemkern laufen alle Agenten gleichzeitig zu den Wartepositionen und verlassen diese synchron. Die Wartepositionen wurden als **waiting set** in JuPedSim hinterlegt.

Abbildung 4 zeigt Ausschnitte der Simulation des Systemkerns. Zu Beginn starten alle Agenten gleichzeitig im linken Bereich der Geometrie. Daraufhin laufen sie zu den Wartepositionen, wobei

alle Agenten zunächst denselben Wartepunkt ansteuern. Sobald dieser besetzt ist, ändern die Agenten ihr Ziel und steuern die nächste Warteposition an. Schließlich erreicht jeder Agent einen Wartepunkt und bleibt dort stehen. Nach einer vorgegebenen Anzahl an Zeitschritten verlassen alle Agenten zeitgleich ihre Wartepositionen und bewegen sich zum Ziel im rechten Bereich der Geometrie.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Inkremente und die dazugehörigen Iterationen detailliert erläutert.

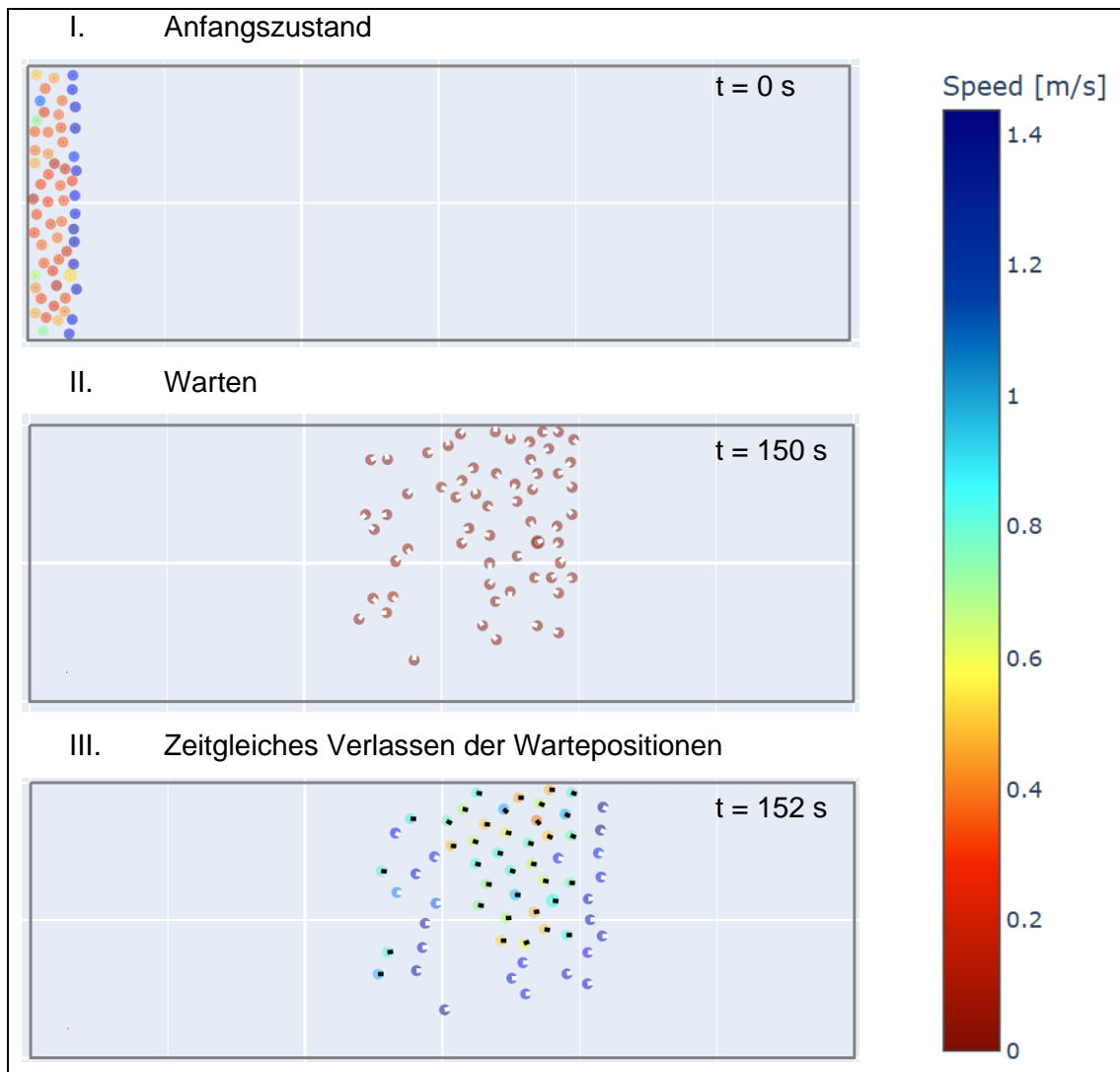


Abbildung 4: Ausschnitte der Simulation des Systemkerns inklusive Anfangszustand, Wartepositionen und dem Verlassen der Wartepositionen

3.1 Geometrie-Inkrement

Für das Geometrie Inkrement wurden insgesamt zwei Iterationen durchgeführt. Diese werden im Folgenden beschrieben. Da im Systemkern lediglich eine einfache Beispielgeometrie verwendet wurde, die keinen tatsächlichen Bahnsteig darstellt, dient die erste Iteration dazu, die Geometrie der Laborexperimente abzubilden.

In der nachfolgenden Iteration wird zunächst die Benutzerfreundlichkeit erhöht, indem durch fest definierte Abfragen der Eingabeaufwand reduziert wird.

3.1.1 Geometrie-Inkrement Iteration 01

Wie schon beschrieben, besteht das Geometrie-Inkrement in dem Systemkern lediglich aus einer einfachen Basisgeometrie, welche in den weiteren Inkrementen des Systemkerns genutzt wird.

Ziel ist es, dass Bereiche wie die Bahnsteigkante oder Hindernisse für die Erstellung der Wahrscheinlichkeitskarte verwendet werden können. In dem Geometrie-Inkrement muss daher eine Transformation der eingegebenen Daten in eine Form erfolgen, welche im Weiteren genutzt werden kann.

In JuPedSim kann die Geometrie durch die Eingabe von Polygonen erstellt werden (Chraibi et al. 2024). Dies kann mit der Python Bibliothek **shapely** erfolgen, welche für die Manipulation und Analyse von geometrischen Objekten genutzt werden kann. Damit können geometrische Objekte wie Punkte, Linien oder Polygone erstellt werden (Gillies 2024). Daraufhin können den Polygonen Funktionen wie „Ausgangsbereich“ zugewiesen werden oder innerhalb der Polygone Startpunkte der Agenten bestimmt werden (Chraibi et al. 2024).

Um sich an der bisher implementierten Herangehensweise von JuPedSim zu orientieren, sollen daher zunächst Polygone implementiert werden, welchen daraufhin Funktionen zugewiesen werden sollen. Es werden Elementen Funktionen zugeordnet, welche einen Einfluss auf die Wartepositionswahl von Personen haben. Die Einflüsse werden in Kapitel 3.3 genauer erläutert.

Aus der Modellbildung gehen geometrische Einschränkungen hervor, um die Komplexität des Modells zu reduzieren. Das Modell ist insbesondere für die Abbildung des Modellbahnsteiges geeignet und kann damit einfache rechteckige Wartebereiche abbilden.

3.1.2 Geometrie-Inkrement Iteration 02

Die Anpassungen des Geometrie-Inkrementes in der zweiten Iteration haben keinen Einfluss auf die Ergebnisse des Modells und dienen ausschließlich der Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit. Dazu zählen weitere fest implementierte Abfragen, die den Eingabeaufwand im Skript verringern. Ein Beispiel ist die Überprüfung der eingegeben Geometrie der Hindernisse und deren Einteilung in schmal und breit. Auf eine detaillierte Beschreibung wird aufgrund mangelnder Relevanz verzichtet.

3.2 Wahrscheinlichkeitskarte-Inkrement

Die Wahrscheinlichkeitskarte wurde in vier Iteration weiterentwickelt. Im Systemkern wurde zunächst eine einfache Beispielverteilung der Wahrscheinlichkeiten verwendet, die das Verhalten von Personen an Bahnsteigen nicht abbildet. In der ersten Iteration wurde der Ansatz von Küpper et al. (Küpper und Seyfried 2023b) als Basis zur Beschreibung der Attraktivität von

Wartepositionen auf Bahnsteigen verwendet, um das Verhalten von Personen im Modell besser abzubilden. In den darauffolgenden Iterationen wurde der Ansatz modifiziert weiterverwendet und eigenständig weiterentwickelt.

Im Folgenden werden die Begriffe Attraktivitätskarte und Wahrscheinlichkeitskarte verwendet. Dabei beschreibt eine Attraktivitätskarte welche Bereiche für Personen anziehend oder abstoßend sind. Die Attraktivitätskarten werden als Hilfsmittel verwendet, um zunächst einzelne Einflussfaktoren darstellen zu können. Aus der Kombination der verschiedenen Attraktivitätskarten lässt sich eine Wahrscheinlichkeitskarte ableiten. Sie gibt an, wie wahrscheinlich eine Stelle des Wartebereiches als Warteposition ausgewählt wird.

3.2.1 Wahrscheinlichkeitskarte-Inkrement 01

Im Folgenden werden zunächst die berücksichtigten Einflussfaktoren auf die Wahrscheinlichkeitskarte näher erläutert. Daraufhin wird die Erstellung der Wahrscheinlichkeitskarte mittels Python beschrieben.

Insgesamt werden fünf Einflussfaktoren bei der Erstellung der Wahrscheinlichkeitskarte berücksichtigt. Diese umfassen den Abstand zum Eingang, den Abstand zum Ausgang, Gefahrenbereiche, Flussvermeidungsbereiche und Hindernisse. Aus diesen entsteht eine Attraktivitätskarte, welche aufzeigt in welchen Bereich Personen bevorzugt warten.

Zunächst werden Attraktivitätskarten für die einzelnen Faktoren erzeugt und daraufhin gewichtet aufsummiert. Im Folgenden werden die relevanten Einflussfaktoren genauer erläutert und die zugrundeliegenden Formeln für ihre Anwendung in den Simulationen angepasst. Die entstehenden Attraktivitätskarten werden anhand eines Modellbahnsteiges anschaulich visualisiert. Ziel der angepassten Formel ist es, dass der Wertebereich zwischen -1 und 1 liegt. Je kleiner der Wert ist, desto weniger wahrscheinlich ist es, dass diese Stelle als Warteposition ausgewählt wird. Negative Werte stehen für unattraktive und positive Werte für attraktive Bereiche.

Die Geometrie des Modellbahnsteiges wurde aus den zur Validierung genutzten Laborexperimenten übernommen. Er weist eine Breite von 7 m und eine Länge von 20 m auf. In den folgenden Visualisierungen werden durch Pfeile die Positionen des Einganges und der Ausgänge markiert.

Der erste Faktor, welcher mit in die Wahrscheinlichkeit eingeht, ist der Abstand zu dem Eingang des Bahnsteiges. Personen warten eher in der Nähe des Einganges, nutzen aber auch den mittleren Bereich des Bahnsteiges. Die Basisfunktion für die Attraktivität eines Wartepunktes ist in Formel 1 beschrieben. Die Variable x repräsentiert die Position entlang der Länge des Bahnsteiges, während x_{min} den am weitesten entfernten Punkt des Bahnsteiges bezeichnet. Die Attraktivitätskarte soll nur Werte zwischen 0 und 1 beinhalten. (Küpper und Seyfried 2023b)

$$D_b(x) = (x + x_{min})^3$$

Formel 1

Die Basisformel ergibt für die Beispielkarte die in Abbildung 5 abgebildete Attraktivitätskarte. Dabei ist die Attraktivität am Eingang am niedrigsten. Der vorgegebene Wertebereich wird nicht eingehalten.

Die Funktion wurde entlang der $D(x)$ -Achse gespiegelt und unter anderem normiert, damit sie für die Berechnung der Wahrscheinlichkeitskarte für die Simulationen genutzt werden kann. Die angepasste Attraktivitätsfunktion ist Formel 2 zu entnehmen. Die Koordinate des Einganges wird durch x_E abgebildet. Die Position des weitentferntesten Punktes, also des Bahnsteigendes, ist x_{BE} .

$$D(x) = 1 - \left(\frac{x - x_E}{x_{BE} - x_E} \right)^3$$

Formel 2

In Abbildung 6 ist die angepasste Verteilung der Attraktivität abhängig vom Abstand zum Eingang visualisiert. Hierbei ist $x_E = 0$ und $x_{BE} = 20$. Es wird deutlich, dass Bereiche in der Nähe des Einganges attraktiver sind. Damit bildet die angepasste Attraktivitätsfunktion den in der Literatur vorgegebenen Zusammenhang ab.

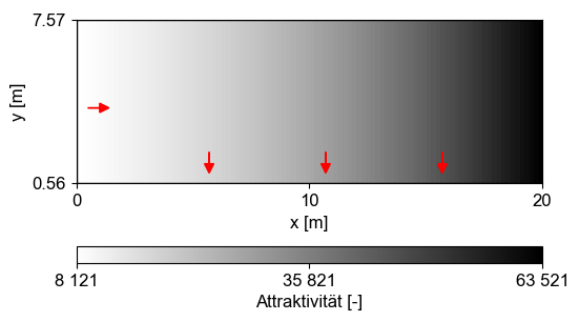


Abbildung 5: Attraktivitätskarte Abstand zum Eingang: Basisfunktion

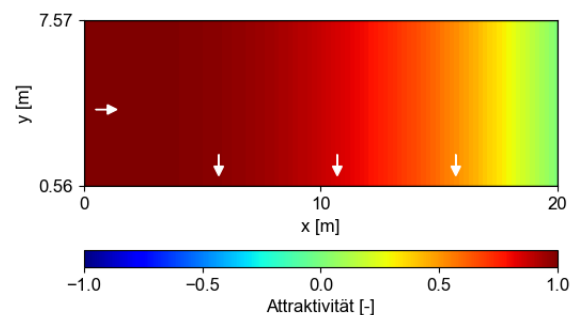


Abbildung 6: Attraktivitätskarte Abstand zum Eingang: Angepasste Funktion

Die Basisfunktion für die Attraktivität in Abhängigkeit vom Abstand zur Bahnsteigkante auf der Seite des einfahrenden Zuges ist in Formel 3 dargestellt. Personen bevorzugen es auf der Seite des Bahnsteiges zu stehen, an der der Zug einfahren wird. (Küpper und Seyfried 2023b)

$$T_b(y) = (1 + e^{-ay})^{-1}$$

Formel 3

Die Basisfunktion $T_b(y)$ erzeugt für die Beispielgeometrie die in Abbildung 7 dargestellte Attraktivitätskarte. Es wird deutlich, dass die Attraktivität in weit vom Ausgang entfernten Bereichen am größten ist. Der angestrebte Wertebereich wird nicht getroffen. Für die angepasste Funktion, welche in Formel 4 gegeben ist, wurde zunächst eine Spiegelung an der $T(y)$ -Achse durchgeführt. Es erfolgte eine Anpassung an den vorgegebenen Wertebereich. Die angepasste Attraktivitätsfunktion ist in Formel 4 gegeben. Dabei stellt y_{min} die Position der Bahnsteigkante

an der Seite des einfahrenden Zuges und y_{max} den weit entferntesten Punkt zum Ausgang in y -Richtung dar.

$$T(y) = \frac{(1 + e^{-a(y_{max}-y)})^{-1} - 0.5}{(1 + e^{-a(y_{max}-y_{min})})^{-1} - 0.5} \quad \text{Formel 4}$$

Abbildung 8 zeigt die Visualisierung der angepassten Attraktivitätsfunktion, wobei der Wert der Konstante $a = 0.3$ beträgt. Im Gegensatz zu der, mit der Basisformel erzeugten Karte, sind nah am Ausgang liegende Bereiche attraktiver. Damit wird der beschriebene Zusammenhang zwischen der Entfernung zum Ausgang und der Attraktivität korrekt abgebildet.

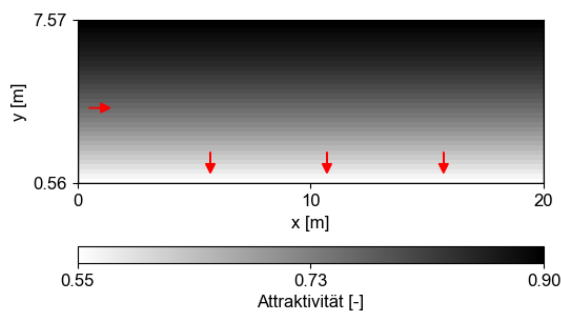


Abbildung 7: Attraktivitätskarte Abstand zum Ausgang: Basisfunktion

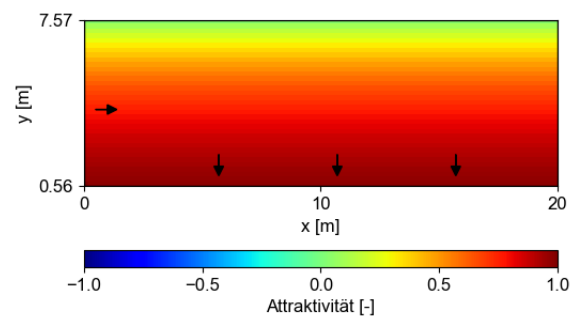


Abbildung 8: Attraktivitätskarte Abstand zum Ausgang: Angepasste Funktion

Der dritte Faktor in der Wahl der Warteposition stellt die Lage der Gefahrenbereiche dar. An Bahnsteigen werden diese durch Leitstreifen markiert. Personen vermeiden es in den Gefahrenbereichen zu warten. In den Laborexperimenten hat keine Person in diesen gewartet. Die Basisfunktion ist in Formel 5 gegeben. Dabei beschreibt B_{ij} den kleinsten möglichen Abstand zu dem nächstliegenden Leitstreifen. Der Wertebereich soll zwischen -1 und 0 liegen. (Küpper und Seyfried 2023b)

$$E_b = (1 + e^{-b \cdot B_{ij}})^{-1} \quad \text{Formel 5}$$

Die Visualisierung der Basisfunktion ist Abbildung 7 zu entnehmen. Der angestrebte Wertebereich wird nicht getroffen. Es erfolgte eine Anpassung der Funktion, um den korrekten Wertebereich abzubilden. Die resultierende Funktion ist in Formel 6 dargestellt.

$$E = \frac{(1 + e^{-b \cdot B_{ij}})^{-1} - 1}{(1 - 1e^{-b \cdot 0}) - 1} \quad \text{Formel 6}$$

Diese lässt sich weiter zu Formel 7 vereinfachen. Der kleinste Abstand zu dem nächstliegenden Leitstreifen B_{ij} wird in Python ermittelt, indem von der jeweiligen Koordinate die Abstände zu allen Leitstreifen ermittelt werden. Daraufhin wird davon der kleinste Wert als B_{ij} verwendet.

$$E = \frac{(1 + e^{-b \cdot B_{ij}})^{-1} - 1}{0.5}$$

Formel 7

In Abbildung 10 ist die mit der angepassten Formel erzeugte Attraktivitätskarte dargestellt. Dabei beträgt der Wert für die Konstante $b = 4$. Diese Konstante steuert wie fließend der Übergang zwischen niedrigen und hohen Attraktivitätswerten verläuft.

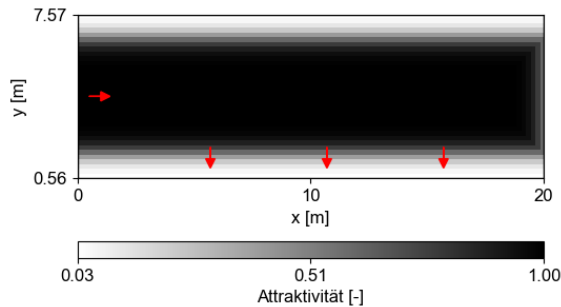


Abbildung 9: Attraktivitätskarte Gefahrenbereiche: Basisfunktion

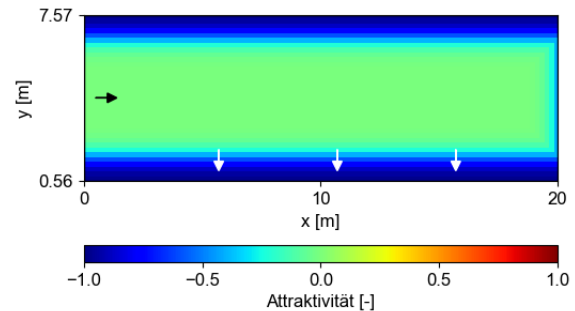


Abbildung 10: Attraktivitätskarte Gefahrenbereiche: Angepasste Funktion

Der vierte Faktor, der betrachtet wird, ist die Flussvermeidung. Bereiche in denen zu erwarten ist, dass man ankommenden Personen im Weg steht, werden vermieden. Die Basisfunktion wird in Formel 8 dargestellt. Dabei sind c , d , und e positive Konstanten. Entscheidend sind die Konstanten d und e , welche die Ausdehnung des abstoßenden Bereiches in x und y Richtung steuern.

$$F_b(x, y) = -c \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{d^2} - \frac{(y-y_0)^2}{e^2}}$$

Formel 8

In Abbildung 11 ist die Visualisierung der Basisfunktion für $c = 10$ zu sehen. Es fällt auf, dass der angestrebte Wertebereich zwischen -1 und 0 zehnfach überschritten ist. In Abbildung 12 ist die Basisfunktion für $c = 1$ visualisiert. Mit dem Wert der Konstanten wird der in der Literatur beschriebene Zusammenhang erfüllt. Die Basisfunktion muss nicht weiter angepasst werden.

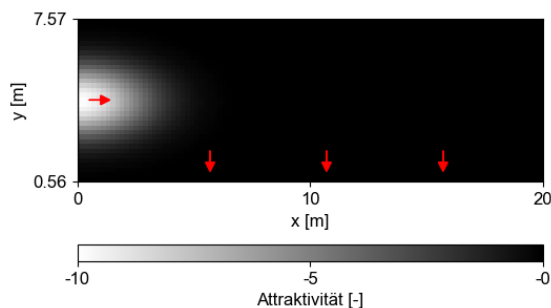


Abbildung 11: Attraktivitätskarte Flussvermeidung: Basisfunktion

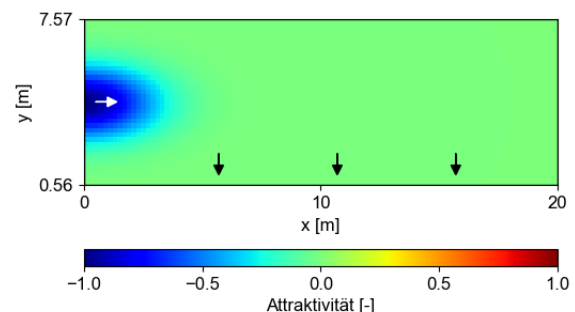


Abbildung 12: Attraktivitätskarte Flussvermeidung: Angepasste Funktion

Die Attraktivitätsfunktion, welche den Einfluss der Hindernisse abbildet, ist in Formel 9 dargestellt. Dabei stellen x_1 , x_2 , y_1 , y_2 , die Eckpunkte des Hindernisses dar. Konstanten sind durch f , g und

h gegeben, wobei g die Glocke in x -Richtung und h die Funktion in y -Richtung streckt. Die Basisfunktion ist lediglich für schmale Hindernisse geeignet. (Küpper und Seyfried 2023b)

$$O_b(x, y) = f \cdot \left(y - \frac{y_1 - y_2}{2} \right) \cdot e^{-\frac{(x-x_1) \cdot (x-x_2)}{g^2} - \frac{(y-y_1) \cdot (y-y_2)}{h^2}} \quad \text{Formel 9}$$

Abbildung 13 zeigt die Visualisierung der Basisfunktion. Es fällt auf, dass der Bereich zwischen Hindernis und Ausgang unattraktiver ist als der Bereich hinter dem Hindernis. Daher muss die Basisfunktion durch Multiplikation mit -1 angepasst werden. Es ist notwendig die Werte zu normieren.

Aufgrund der Komplexität das Maximum der Funktion analytisch zu bestimmen, wurde auf eine Anpassung der Formel verzichtet. In dem Modell wird die Basisfunktion mit -1 multipliziert und anschließend alle Elemente durch das in Python bestimmte Maximum dividiert. Die resultierende Attraktivitätskarte ist in Abbildung 14 visualisiert.

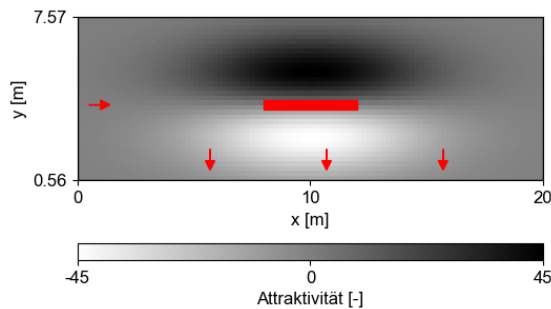


Abbildung 13: Attraktivitätskarte Hindernisse: Basisfunktion

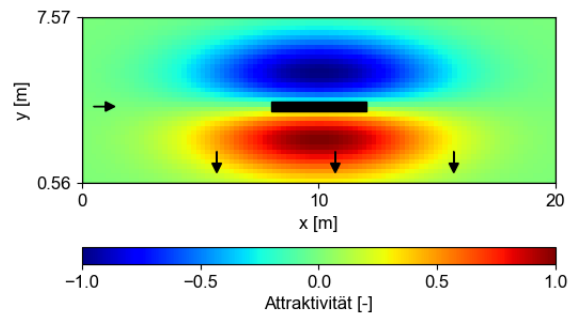


Abbildung 14: Attraktivitätskarte Hindernisse: Erweiterung der Funktion

Durch gewichtete Summenbildung der einzelnen Attraktivitätskarten entsteht eine Gesamt-Attraktivitätskarte für den Bahnsteig. Durch die Faktoren ω_i können die Einflüsse auf die Attraktivitätskarte gewichtet werden. (Küpper und Seyfried 2023b)

$$A = \omega_1 \cdot D + \omega_2 \cdot T + \omega_3 \cdot E + \omega_4 \cdot F + \omega_5 \cdot O \quad \text{Formel 10}$$

Abbildung 15 zeigt die Visualisierung der Attraktivitätskarte für eine Geometrie ohne Hindernisse, bei der die Gewichtungen $\omega_1 = 1$, $\omega_2 = 2$, $\omega_3 = 3$, $\omega_4 = 1$ und $\omega_5 = 0$ verwendet wurden. In Abbildung 16 ist die Attraktivitätskarte für eine Geometrie mit kleinem Hindernis dargestellt, wobei die Gewichtung von ω_5 auf 3 erhöht wurde. (Küpper und Seyfried 2023b)

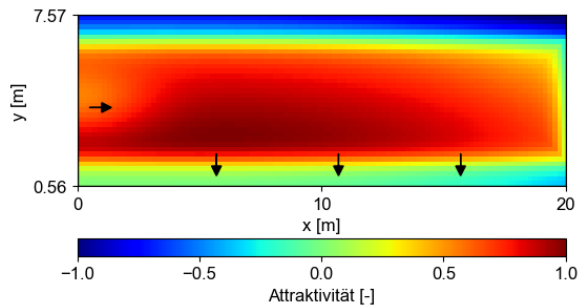


Abbildung 15: Attraktivitätskarte ohne Hindernisse

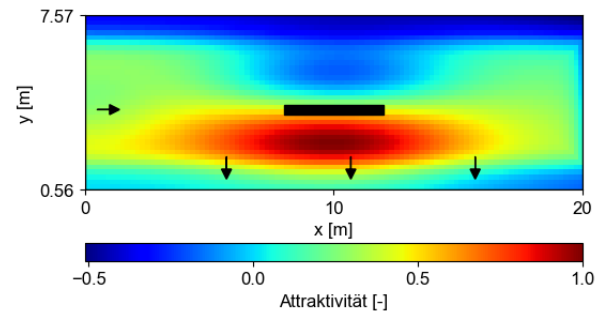


Abbildung 16: Attraktivitätskarte inkl. Hindernis

Aus einer Attraktivitätskarte wird die Wahrscheinlichkeitskarte abgeleitet. Die Wahrscheinlichkeitskarte zeichnet sich dadurch aus, dass Zellen nur positive Werte beinhalten und die Summe aller Wahrscheinlichkeitswerte 1 ergibt. Dazu werden die Werte der Attraktivitätskarte zunächst so verschoben, dass der kleinste Wert 0 ergibt. Anschließend wird jedes Feld der Karte durch die Summe aller Felder geteilt.

In diesem Inkrement werden die im Geometrie-Inkrement übergebenen Informationen weiterverwendet. Diese umfassen die Position des Einganges, des Ausganges, möglicher Hindernisse sowie der Bahnsteigkante und werden für die Erstellung der Wahrscheinlichkeitskarte genutzt.

In dem Systemkern wurden die Daten der Wahrscheinlichkeitskarten in einem **NumPy-Array** gespeichert. Der Systemkern verfügt über eine einfache Beispielgeometrie, wodurch mit dem Index des Wertes für die Wahrscheinlichkeit die dazugehörigen Koordinaten ermittelt werden konnten. Auch wenn Grundsätzlich die Empfehlung besteht, so weit wie möglich native Datenstrukturen von Python zu verwenden (Boschetti 2018, S. 107), wurde an der ersten Datenstruktur festgehalten. Native Datenstrukturen in Python sind beispielsweise Listen, Mengen oder Dictionaries (Abdel-Karim et al. 2022, S. 22–32). Nachteil der nativen Datenstrukturen ist, dass diese einen vergleichsweise hohen Speicherbedarf und eine langsame Geschwindigkeit beim Bearbeiten der Daten im Vergleich zu **NumPy-Arrays** aufweisen. (Boschetti 2018, S. 107)

3.2.2 Wahrscheinlichkeitskarte-Inkrement 02

Die bisherige Implementierung zur Erzeugung der Wahrscheinlichkeitskarten zeigte deutliche Schwächen, die in dieser Iteration behoben wurden.

Die Wahrscheinlichkeit in den Gefahrenbereichen zu warten war zu hoch, sodass bei allen Durchläufen mehrere Wartepositionen in diesen vergeben wurden. Zudem war die Wahrscheinlichkeit, innerhalb von Hindernissen zu warten, größer als null, was die Nutzung der bisherigen Implementierung für Geometrien mit Hindernissen einschränkte. Beide Probleme wurden gelöst, indem die entsprechenden Bereiche im **numpy array** der Attraktivitätskarte auf null gesetzt wurden. Die daraus resultierenden Wahrscheinlichkeitskarten sind in Abbildung 19

für Geometrien ohne Hindernisse und in Abbildung 20 für eine Geometrie mit einem schmalen Hindernis dargestellt.

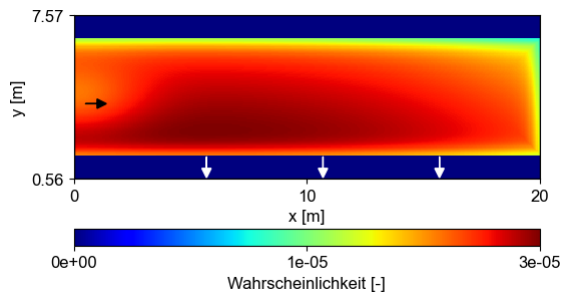


Abbildung 17: Wahrscheinlichkeitskarte o. Hindernisse

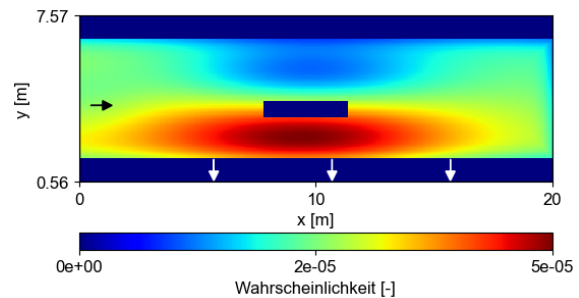


Abbildung 18: Wahrscheinlichkeitskarte inkl. Hindernis

Der bisherige Ansatz zur Erstellung der Attraktivitätskarten war zudem nur für schmale Hindernisse geeignet. Daher wird im Folgenden ein Ansatz zur Abbildung breiter Hindernisse vorgestellt. Hierzu wird die, in Iteration 01 vorgestellte, Attraktivitätskarte für Geometrien mit Hindernissen in Python angepasst. In der ersten Iteration entstand vor dem Hindernis ein ovaler Bereich mit erhöhten Attraktivitätswerten, während sich hinter dem Hindernis ein ovaler Bereich mit reduzierten Werten bildete.

Für die Anpassung wurden die Ovale, wie in Abbildung 19 zu sehen, gestaucht beibehalten. Die Stauchung erfolgte, indem bestimmte Elemente des `numpy arrays` entfernt wurden. Um die Größe des `numpy arrays` beizubehalten, wurden die Werte zwischen den Ovalen mit Nullen aufgefüllt. Für die Gesamtgeometrie entsteht inklusive der vorherigen Anpassungen der Iteration die in Abbildung 20 visualisierte Wahrscheinlichkeitskarte.

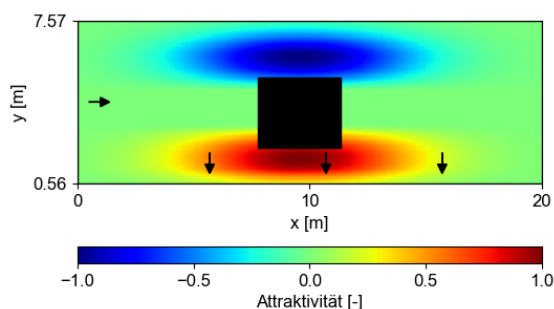


Abbildung 19: Attraktivitätskarte: Erweiterung für breite Hindernisse

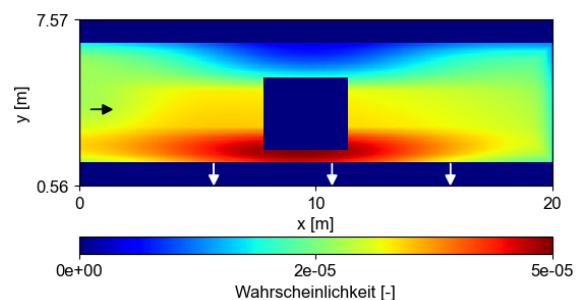


Abbildung 20: Wahrscheinlichkeitskarte mit breitem Hindernis

3.2.3 Wahrscheinlichkeitskarte-Inkrement 03

Mit der Wahrscheinlichkeitskarte der vorherigen Iteration konnten alle angestrebten Geometrien, inklusive breiter Hindernisse abgebildet werden. Die Ergebnisse der Punkteverteilung, welche in Kapitel 5.3 aufgezeigt wurden, zeigten jedoch Schwächen bei der Verteilung der Agenten für Szenarien mit 40 Personen. Daher ist eine Anpassung notwendig. Die Agenten verteilen sich zu gleichmäßig in dem Wartebereich und die Abstände zwischen den Wartepositionen sind zu groß. Zur Optimierung der Wahrscheinlichkeitskarte sind zwei Ansätze denkbar. Zum einen kann die

Attraktivitätskarte potenziert werden, bevor sie zur Wahrscheinlichkeitskarte normiert wird. Dadurch werden die Unterschiede in den Wahrscheinlichkeiten größer und die Verteilung der Wartepositionen ungleichmäßiger. Außerdem ist eine Anpassung der Konstanten α bis f sowie der Gewichtungsfaktoren w_i möglich.

In dieser Iteration wird zunächst der Ansatz verfolgt, eine Potenzierung der Attraktivitätskarte durchzuführen, bevor diese zur Wahrscheinlichkeitskarte transformiert wird. Dadurch sollen sich die attraktiven Bereiche stärker von unattraktiven Bereichen unterscheiden und eine unregelmäßigere Verteilung, wie sie in den experimentellen Daten zu beobachten ist, erreicht werden.

Die einzelnen Attraktivitätskarten wurden zunächst wie zuvor gewichtet und aufsummiert. Anschließend erfolgte eine Transformation, bei der der kleinste Wert auf 0 gesetzt wurde. Schließlich wurden die resultierenden Werte mit dem Exponenten 3 potenziert. In den folgenden Abbildungen werden jeweils Wahrscheinlichkeitskarten ohne Potenzierung (links) und Wahrscheinlichkeitskarten mit Potenzierung (rechts) für die drei untersuchten Geometrien ohne Hindernis, mit einem schmalen Hindernis sowie mit einem breiten Hindernis gegenübergestellt.

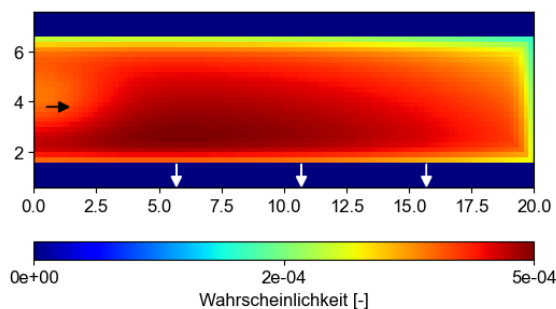


Abbildung 21: Wahrscheinlichkeitskarte ohne Potenzierung, ohne Hindernis

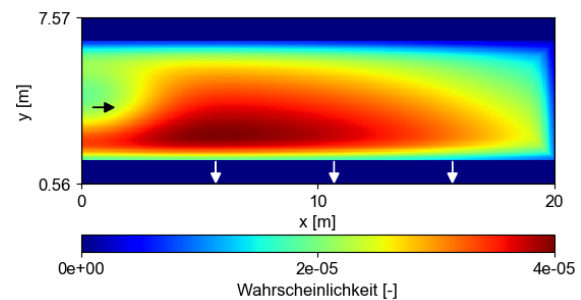


Abbildung 22: Wahrscheinlichkeitskarte mit Potenzierung, ohne Hindernis

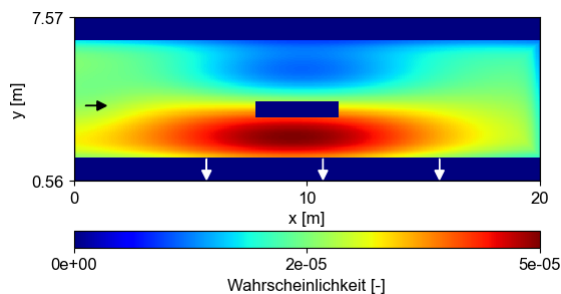


Abbildung 23: Wahrscheinlichkeitskarte ohne Potenzierung, schmales Hindernis

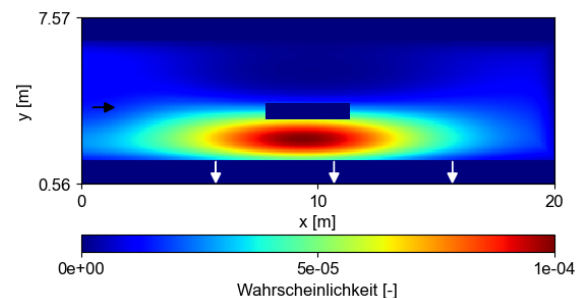


Abbildung 24: Wahrscheinlichkeitskarte mit Potenzierung, schmales Hindernis

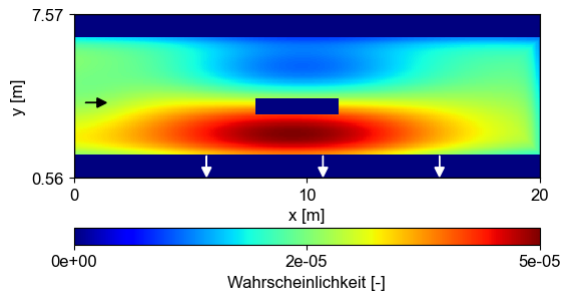


Abbildung 25: Wahrscheinlichkeitskarte ohne Potenzierung, breites Hindernis

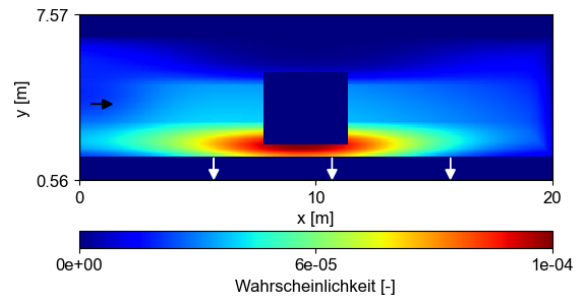


Abbildung 26: Wahrscheinlichkeitskarte mit Potenzierung, breites Hindernis

Es wird deutlich, dass durch die Potenzierung die Bereiche nah am Ausgang deutlich höhere Wahrscheinlichkeitswerte als die weit vom Ausgang entfernten Bereiche annehmen. Bei den Geometrien mit Hindernis gibt es nach der Potenzierung nur noch kleine Bereiche, an denen die Wahrscheinlichkeit zu warten hoch ist.

3.2.4 Wahrscheinlichkeitskarte-Inkrement 04

Da die Potenzierung der Attraktivitätskarte in den Szenarien mit etwa 100 Personen zu einer schlechteren Verteilung führte, wird in diesem Inkrement ein alternativer Ansatz verfolgt. Statt die erzeugte gesamte Attraktivitätskarte anzupassen, wird durch die Anpassung der Konstanten α bis h sowie der Gewichtungsfaktoren w_i gezielt versucht, die Verteilung der Agenten in den Simulationen zu verbessern. Ein genaueres Fitting der tatsächlichen Verteilung könnte durch eine gezielte Auswahl der Konstanten und Gewichtungsfaktoren erreicht werden, welches idealerweise durch eine Sensitivitätsanalyse erreicht werden könnte. Bei dieser werden die relevanten Parameter systematisch untersucht und optimiert. Allerdings bleibt es fraglich, ob das optimierte Modell auch auf andere Rahmenbedingungen anwendbar wäre oder ob es ausschließlich auf den spezifischen Modellbahnsteig angepasst würde. Aufgrund der hohen Komplexität und des Rechenaufwandes einer solchen Analyse wurde dies im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht umgesetzt.

Eine Anpassung der Konstanten und der Gewichtungsfaktoren erfolgt im Folgenden daher, indem die in Kapitel 5.3 beschriebenen Abweichungen der Verteilung von Agenten der zweiten Iteration systematisch analysiert und mit den experimentellen Daten abgeglichen werden. Zunächst werden dafür die fünf Einflussfaktoren Abstand zum Eingang, Abstand zum Ausgang, Gefahrenbereiche, Flussvermeidung und Hindernisse sowie die zugehörigen Konstanten überprüft und bei Bedarf angepasst. Anschließend wird näher auf die Gewichtungsfaktoren eingegangen.

Die Funktion, welche den Einfluss des Abstandes zum Eingang beschreibt, weist keine Konstanten auf, welche angepasst werden können. Daher wird die Formel nicht verändert.

Die Attraktivitätswerte in Abhängigkeit der Distanz zum Ausgang sind durch die Konstante α anzupassen. Mit dieser wird gesteuert, wie nah am Ausgang weniger attraktive Bereiche

beginnen. Die Ergebnisse der Simulationen zeigten, dass sich die Agenten nicht nah genug am Ausgang aufhalten und sich deshalb zu gleichmäßig auf dem Bahnsteig verteilen. In dieser Iteration wird der Wert verkleinert, um den attraktiven Bereich zu verringern. In Abbildung 27 ist die Attraktivitätskarte für den ursprünglich verwendeten Wert der Konstante und in Abbildung 28 ist die angepasste Attraktivitätskarte abgebildet.

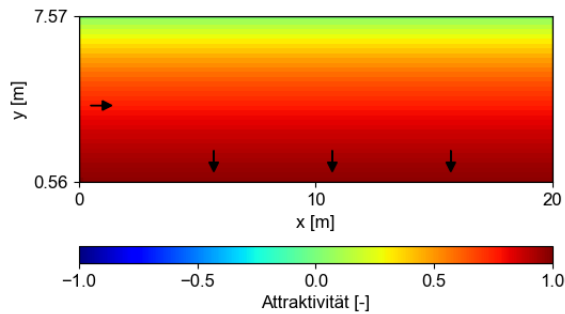


Abbildung 27: Attraktivitätskarte Abstand zum Ausgang: Iteration 02, $a = 0.3$

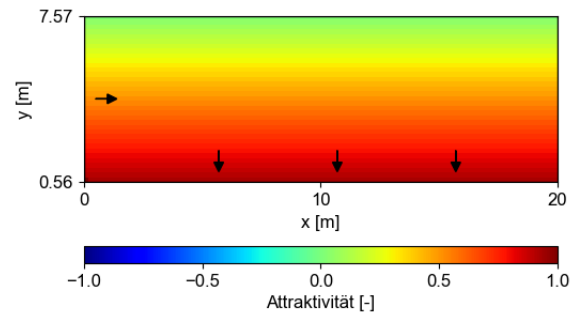


Abbildung 28: Attraktivitätskarte Abstand zum Ausgang: Iteration 04, $a = 0.05$

Die Gefahrenbereiche benötigen keine Anpassung, da ihr Einfluss durch das gezielte setzen der Wahrscheinlichkeiten in diesen Bereich auf null bereits optimiert wurde.

Die Flussvermeidung wurde initial mit den drei Konstanten c , d und e gesteuert. Die Konstante c wurde bereits in der ersten Iteration herausgekürzt, wodurch sie keine weitere Anpassung benötigt. Mit den Konstanten d und e wird gesteuert, wie lang und wie breit der abstoßende Bereich am Eingang ist, mit dem verhindert werden soll, dass wartende Personen den Eingang verstopfen. Da Agenten in den vorher durchgeführten Iterationen den Bereich um den Eingang verstopften, werden die Konstanten angepasst, um den abstoßenden Bereich zu vergrößern. Die nachfolgenden Abbildungen visualisieren die ursprüngliche und die angepasste Attraktivitätskarte.

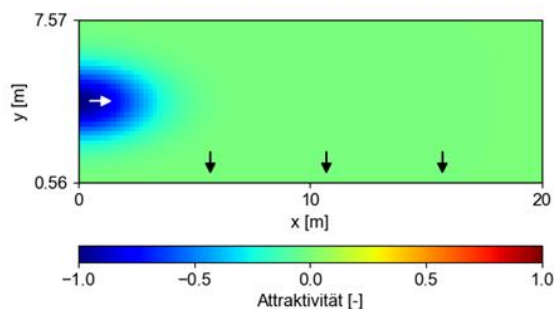


Abbildung 29: Attraktivitätskarte Flussvermeidung: Basisfunktion mit $c = 1$, $d = 3$, $e = 1.5$

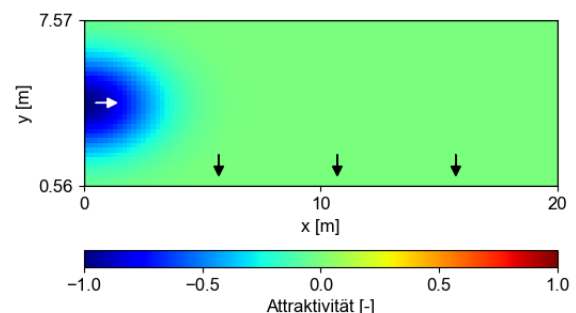


Abbildung 30: Attraktivitätskarte Flussvermeidung: Angepasste Funktion $c = 1$, $d = 3$, $e = 2$

Die Attraktivitätskarte der Hindernisse wird durch die drei Konstante f , g und h beeinflusst. Da bei der Auswertung der bisherigen Iterationen kein Zusammenhang zwischen einer unplausiblen Verteilung und der Attraktivitätskarte der Hindernisse festgestellt werden konnte, wird daran keine Veränderung vorgenommen und die ursprünglichen Werte beibehalten.

Abschließend sind die Gewichtungsfaktoren zu prüfen. Die Attraktivitätskarten der fünf Einflussfaktoren werden gewichtet zu einer Attraktivitätskarte aufsummiert. Ursprünglich hatten dabei die Distanz zum Eingang und die Flussvermeidung mit den Gewichtungsfaktoren $w = 1$ den geringsten Einfluss, daraufhin folgte mit $w = 2$ die Distanz zum Ausgang. Den stärksten Einfluss hatten mit $w = 3$ die Gefahrenbereiche und Hindernisse. Da in der bisherigen Iteration besonders stark auffiel, dass der Abstand zum Ausgang nicht genug in die Verteilung der Agenten einfluss, wurde in dieser Iteration der Gewichtungsfaktor auf $w = 3$ gesetzt.

3.3 Wartepositionen-Inkrement

Bei der Festlegung der Wartepositionen wird bestimmt, an welcher Stelle die Agenten warten. Es soll sichergestellt werden, dass sowohl die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Positionen im Wartebereich als auch der Mindestabstand zu anderen Agenten in die Auswahl einfließen. In dem Systemkern wurde der Mindestabstand nicht eingehalten und die Wartepositionen nur in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeitskarte gewählt. Daraus resultierte, dass Punkte ohne Abstand zueinander ausgewählt wurden.

In der ersten Iteration soll daher zunächst implementiert werden, dass die Punkte so weit voneinander entfernt sind, dass sich Agenten nicht berühren. Es wurde keine weitere Iteration durchgeführt.

3.3.1 Wartepositionen-Inkrement Iteration 01

Im Folgenden wird beschrieben, welche Faktoren bei der Auswahl der Wartepositionen in Bezug auf den Mindestabstand mit einbezogen werden und der Ansatz, um dies in der Simulation dazustellen.

In den Experimenten, welche zur Modellerstellung als Basis herangezogen werden, wählten die Teilnehmer geringe Abstände zu anderen bei der Auswahl ihrer Wartepositionen. Der persönliche Raum wurde dabei nicht so stark wie in anderen sozialen Kontexten beachtet. In den Experimenten warteten einige Personen nicht starr an einem Ort, sondern gingen in einer langsamen Geschwindigkeit umher. (Küpper und Seyfried 2023b) Dies wird zunächst vernachlässigt.

Der Systemkern wurde, wie in Codeblock 1 zu sehen, erweitert. In Zeile 24 erfolgt zunächst die Auswahl eines Punktes unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit. Ab Zeile 29 wird der Mindestabstand überprüft. Nur Punkte, die das Abstandskriterium erfüllen, werden in der Punkteauswahl beachtet. Die Punkte stellen in der Simulation den Mittelpunkt der Agenten dar. Mit der vereinfachten Annahme, dass Personen aus der Vogelperspektive die Form eines Kreises aufweisen, muss der Abstand mindestens der Kreisdurchmesser eines Agenten sein. Somit kann eine Überlappung verhindert werden. In den Experimenten trugen die Personen weder Jacken noch Gepäck. Nach Predtečenskij und Milinskij hat eine Person in Sommerbekleidung bzw.

Hausbekleidung einen Flächenbedarf von $0.1 \frac{m^2}{p}$. (Predtečenskij und Milinskij 2010). Daraus ergibt sich ein Kreisdurchmesser von $0.36 m$. Dieser Wert ist für die makroskopische Berechnung von Personenströmen gegeben. In dem mikroskopischen Modell JuPedSim beträgt der standardmäßig eingestellte Durchmesser $0.4 m$ (Chraibi et al. 2024). In dieser Iteration wird zunächst mit dem Standardwert von JuPedSim gearbeitet. Eine Anpassung in späteren Inkrementen ist jedoch nicht ausgeschlossen.

```

1  num_agents = 40
2
3  probabilities_flat = probabilities.ravel()
4  indices = np.arange(probabilities_flat.size)
5
6  num_points = num_agents
7  max_attempts = 5000 # Maximale Anzahl der Versuche
8  min_distance = 0.4 # Mindestabstand
9
10 def is_valid_point(new_point, existing_points, min_distance):
11     # Überprüft, ob neuer Punkt Mindestabstand zu vorhandenen Punkten einhält
12     for point in existing_points:
13         if np.linalg.norm(np.array(new_point) - np.array(point)) < min_distance:
14             return False
15     return True
16
17 # Sammlung von Punkten
18 selected_points = []
19
20 for _ in range(num_points):
21     attempts = 0
22     while attempts < max_attempts:
23         # Auswahl eines zufälligen Punktes basierend auf den Wahrscheinlichkeiten
24         selected_index = np.random.choice(indices, p=probabilities_flat)
25         selected_index_2d = np.unravel_index(selected_index, probabilities.shape)
26         candidate_point = (X[selected_index_2d], Y[selected_index_2d])
27
28         # Überprüfen des Abstands
29         if is_valid_point(candidate_point, selected_points, min_distance):
30             selected_points.append(candidate_point)
31             break
32         attempts += 1
33
34 # Konvertieren der Liste von Punkten in ein numpy-Array
35 selected_points = np.array(selected_points)

```

Codeblock 1 Auszug des Wartepositionen-Inkrementes inklusive Überprüfung des Abstandskriterium

Es ist zu prüfen, ob die Implementierung zu einer unplausiblen Auswahl der Wartepositionen führt. Bei einem zu großen Abstandskriterium ist zu erwarten, dass sich die Agenten gleichmäßig verteilen. Je höher die Zahl der Personen und je größer das Abstandskriterium, desto gleichmäßiger ist die Verteilung der Punkte zu erwarten.

3.4 Simulations-Inkrement

Im Simulations-Inkrement muss das Modell zur Abbildung des Warteverhaltens von Personen in Python mit JuPedSim verknüpft werden.

In dem Systemkern wurde das **collision free speed model** gewählt und die Wartepunkte als **waiting sets** definiert. Der Wartevorgang wurde nach einer willkürlichen Anzahl an Zeitschritten beendet, woraufhin die Agenten das Ziel ansteuerten.

In der ersten Iteration sollen diese initialen Festlegungen überprüft und verbessert werden. Zusätzlich sollen weitere Festlegungen, wie der Durchmesser der Agenten, getroffen werden. Um die Laborexperimente abbilden zu können, muss es möglich sein, mehrere Ziele in die Geometrie einzupflegen und eine plausible Verteilung auf diese zu ermöglichen.

3.4.1 Simulations-Inkrement Iteration 01

Im Folgenden werden zunächst die Routenfindung und anschließend das Fußgängermodell erläutert. Anschließend wird auf weitere spezifische Aspekte zur korrekten Abbildung der Laborexperimente eingegangen, welche, wie in Kapitel 4 beschrieben, zur Bewertung des Modells herangezogen werden.

Die Routenfindung in der Fußgängersimulation beschreibt den Prozess, wie Agenten ihren Weg bestimmen. In JuPedSim besteht dieser Prozess im grundlegenden aus der Routenplanung und der Wegfindung. Die Routenplanung modelliert den Entscheidungsprozess der Agenten innerhalb der Simulation, während die Wegfindung den Auswahlprozess einer Route zum Erreichen des Ziels beschreibt. (Chraibi et al. 2024) Für die Simulation des Warteverhaltens auf Bahnsteigen ist von besonderer Bedeutung, dass die Agenten zu ihren Wartepunkten gelangen und den Bahnsteig über die zur Verfügung stehenden Ausgänge verlassen. Für das Simulations-Inkrement ist es daher entscheidend, die Routenplanung so zu gestalten, dass sie den spezifischen Anforderungen des Wartens und Verlassens der Bahnsteige gerecht wird.

Für die Routenfindung in JuPedSim zu den Wartepositionen können zwei Varianten ausgewählt werden. In dem Systemkern wurden **waiting sets** verwendet, um die Agenten zu den Wartepositionen zu navigieren. Dazu wurden die Wartepunkte in Form eine Liste übergeben. Dabei bewegten sich alle Agenten zunächst zu einer Warteposition. Nachdem der erste Wartepunkt der übergebenen Liste besetzt war, bewegten sich die Agenten simultan zum nächsten Element der Wartepunkt-Liste. Dies stellt kein realistisches Bewegungsmuster von Personen an Bahnsteigen dar. Eine Alternative für die Simulation stellt die **direct steering** Variante dar, welche in dieser Iteration implementiert wurde. Hierbei läuft jeder Agent direkt zu einer festgelegten Warteposition. Ziel ist es damit ein realistischeres Bewegungsmuster der Agenten zu erzielen. Durch das Verwenden von **switch agent journey** kann, nachdem die Agenten ihre Wartposition erreicht haben, bzw. ausreichend Zeitschritte in der Simulation vergangen sind, das Ziel der Agenten zu den Ausgängen geändert werden.

Weiter ist bei der Routenfindung zu beachten, dass der Modellbahnsteig über drei Ausgänge verfügt. Es ist nicht möglich eine Fläche für den Ausgang zu definieren, da die Agenten die Mitte

der Ausgänge ansteuern. Eine Verteilung von Agenten auf mehrere Ausgänge kann in JuPedSim beispielsweise mithilfe der **round-robin transition** erfolgen, bei der die Ziele abwechselnd den Agenten zugeordnet werden, sowie der **least-targeted transition**, bei der die Agenten das Ziel mit der geringsten Auslastung wählen. (Chraibi et al. 2024) In der Beschreibung der Laborexperimente wird die Wahl der Ausgänge nicht detailliert erläutert (Küpper und Seyfried 2023b). Daher wird in dieser Iteration ein Ansatz verfolgt, bei dem die Personen das nächstgelegene Ziel wählen. Die Verteilung auf die Ausgänge erfolgt dabei basierend auf den Koordinaten der Wartepositionen und wird ohne in JuPedSim implementierte Funktionen umgesetzt.

In JuPedSim stehen verschiedene mikroskopische Fußgängermodelle zur Verfügung. Diese bilden das Verhalten von Agenten ab und berücksichtigen beispielsweise individuelle Ziele, Wechselwirkungen mit anderen Agenten und dienen dazu realistische Verhaltensmuster und Entscheidungsprozesse zu simulieren. (Chraibi et al. 2024)

Da der Schwerpunkt der Modellentwicklung auf der Wahl der Wartepositionen lag, wurde die Wahl des Fußgängermodells nur in einem geringeren Maße berücksichtigt, was eine Limitation der Arbeit darstellt. Es wurde das **Collision Free Speed Model** verwendet, welches bereits im Systemkern verwendet wurde.

3.4.2 Simulations-Inkrement Iteration 02

Im zweiten Simulations-Inkrement wurden lediglich Anpassungen vorgenommen, die vor allem die Verwendung des Modells vereinfachten und einer präziseren Darstellung der zeitlichen Abfolgen der Experimente dienten. Diese Änderungen hatten jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die grundlegende Modellstruktur und die Ergebnisse der Simulation, sodass auf eine detaillierte Erläuterung verzichtet wird.

4 Validierung durch Laborexperimente

Zur Validierung des Modells wurden Laborexperimente von Küpper et. al verwendet. (Küpper und Seyfried 2023b) Die durchgeführten Laborexperimente werden sowohl quantitativ als auch qualitativ mit den Simulationsergebnissen verglichen. Für die quantitative Analyse wurden die, in Kapitel 4.1 erläuterte, Delaunay-Triangulierung und die, in Kapitel 4.2 beschriebene, Pair Distribution Funktion (PDF) verwendet.

Bei den Laborexperimenten wurde das Warteverhalten von Personen auf einem Modellbahnsteig untersucht. Dieser hatte Abmessungen von 7 m · 20 m und eine Höhe von 0.8 m. Auf dem Bahnsteig wurde entweder kein Hindernis, ein schmales Hindernis oder ein breites Hindernis platziert. Die Geometrien wurden jeweils mit etwa 40 und mit etwa 100 Personen untersucht. Die Wartezeit betrug 2 Minuten. Zusätzlich wurde bei den Experimenten mit 40 Personen eine Wartezeit von 4 Minuten untersucht. Jede Kombination wurde dreifach durchgeführt. Insgesamt stehen daher 9 Szenarien mit 27 Läufen zum Vergleich mit der Simulation zur Verfügung. Eine Übersicht ist in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: Übersicht Szenarien Laborexperimente inklusive Hinderniskonfiguration, Personenanzahl, Wartezeit und der Bezeichnung der Läufe

	40 Personen, 2 min Wartezeit	40 Personen, 4 min Wartezeit	100 Personen, 2 min Wartezeit
Kein Hindernis	1B050, 2B050, 3B050	1B060, 2B060, 2B060	1B070, 2B070, 3B070
Schmales Hindernis	1B080, 2B080, 3B080	1B090, 2B090, 3B090	1B100, 2B100, 2B100:
Breites Hindernis	1B0110, 2B0110, 3B0110	1B0120, 2B0120, 3B0120	1B0130, 2B0130, 3B0130

Neben den zwei quantitativen Bewertungskriterien, der PDF und der Delaunay-Triangulierung, sollen die Ergebnisse auch explorativ auf Auffälligkeiten untersucht werden. Dabei wird insbesondere auf unplausible Bewegungsmuster geachtet, welche z.B. in dem Systemkern durch die Wahl der **waiting sets** zu beobachten waren. In dem Systemkern gingen zunächst alle Agenten zu einer Wartepositionen und änderten ihre Route erst, nachdem diese belegt war. Da bei der PDF hauptsächlich die Positionen der Agenten während der Wartezeit und bei der Delaunay-Triangulierung ausschließlich der Positionen während der Wartezeit Einfluss auf die Ergebnisse liefern, können solche unplausiblen Bewegungsmuster damit nicht erkannt werden.

Für die explorative Analyse werden daher die Bewegungsmuster der Agenten inklusive des zeitlichen Verlaufs der Simulation betrachtet. Diese Auswertung erfolgt beschreibend, um die quantitativen Ergebnisse zu ergänzen und mögliche Schwachstellen des Modells zu identifizieren.

4.1 Delaunay-Triangulierung

Um die Abstände zwischen den Wartepositionen auf dem Bahnsteig zu den nächsten Nachbarn zu erfassen, wird die Delaunay-Triangulierung herangezogen. Bei der Delaunay-Triangulierung werden Punkte einer Menge in einer Ebene so verbunden, dass sich aus dieser Struktur Dreiecke bilden (Berg 2008, S. 191–208). Dadurch wird ein Netz erzeugt, das insbesondere bei der Analyse von Abständen und Verteilungen innerhalb eines definierten Raumes, wie des Bahnsteiges, nützlich ist. Bei der Bildung der Dreiecke wird darauf geachtet möglichst gleichmäßige Winkel zu erhalten, wodurch längere Dreiecke verhindert werden und die Dreiecke möglichst die nächsten Nachbarn enthalten (Berg 2008, S. 191–208).

Bei den zum Vergleich herangezogenen Labordaten wurden ebenfalls die Abstände zu den nächsten Nachbarn bestimmt. Dabei wurde die gesamte Warteperiode miteinbezogen. Bei den Experimenten begann die Wartezeit, nachdem die letzte Person den Bahnsteig betreten hatte. Die Wartezeit beinhaltet daher den Gang zu den endgültigen Wartepositionen von einzelnen Agenten. (Küpper und Seyfried 2023b) Da bei der Modellbildung der Fokus primär auf der Auswahl der Wartepositionen und weniger auf dem zeitlichen Verlauf der Bewegung liegt, wurde die Delaunay-Triangulierung für die Experimentaldaten erneut auf einen feststehenden Zustand angewendet, bei dem möglichst viele Agenten sich an einer Stelle befinden. In den Experimenten bewegten sich einige Personen über den gesamten Zeitraum (Küpper und Seyfried 2023b). Dieses Phänomen kann mit der vorliegenden Modellbildung nicht abgebildet werden. Es wurde ein zufälliger Zeitpunkt zur Auswertung ausgewählt und die Bewegungsmuster aufgrund der Limitierung der Arbeit vernachlässigt.

Zur Auswertung der Abstände der nächsten Nachbarn wurden nach der Delaunay-Triangulation die Distanzen der verbundenen Punkte weiter betrachtet. In den Experimenten wurden für jedes Szenario jeweils drei Durchläufe durchgeführt. Die drei Läufe wurden zusammen ausgewertet, um die Stichprobe zu erhöhen. Die Simulationen wurden analog zu den Experimenten durchgeführt, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Um zu bewerten welches statistische Maß geeignet ist, um die Distanzen aus den Experimenten mit denen der Simulationen zu vergleichen, wurde zunächst überprüft, ob diese einer bestimmten Verteilung, wie der Normalverteilung oder der Logarithmischen Normalverteilung, folgen. Hierfür wurden unter anderem der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest angewendet (Bracke 2022, S. 304–310). Da keine Verteilung den Daten zugeordnet werden konnte, können die Datensätze

nicht mit parametrischen Tests verglichen werden, welche aussagekräftiger wären (Bracke 2022, S. 297–298).

Zum Vergleich wurden daher der Mittelwert und der Median herangezogen. Ziel ist es, die beiden statistischen Maße der Simulationen und Experimente so weit wie möglich anzugleichen. Der Fokus lag auf dem Angleichen des Medians, da dieser das gegen Ausreißer robustere Maß darstellt.

4.2 Pair Distribution Function

Die Pair Distribution Function (PDF) wurde entwickelt, um die atomare oder molekulare Struktur von Materialien zu beschreiben. Sie dient dazu, die Verteilung von Objekten in einem Medium darzustellen. (Olaj und Lantschbauer 1977) Bei der Analyse von Bewegungsmustern von Fußgängern, beschreibt die Funktion, wie die Abstände zwischen Paaren von Fußgängern in einem bestimmten Bereich verteilt sind. Paare sind dabei zwei interagierende Fußgänger, wobei hier davon ausgegangen werden muss, dass alle Fußgänger des Betrachtungsbereiches miteinander agieren. (Cordes et al. 2024)

Die Funktion $g(r)$ gibt ausgehend von einem Fußgänger an, wie wahrscheinlich es ist, dass sich im Abstand r ein weiterer Fußgänger befindet. Durch Hochpunkte werden damit bevorzugte Abstände zu anderen Fußgängern ersichtlich. Ein Wert von 1 deutet auf eine zufällige Verteilung von Abständen hin. Für große Abstände verliert die PDF an Aussagekraft. (Cordes et al. 2024)

Vor der Verwendung der PDF wurden sowohl die experimentellen Daten als auch die Daten der Simulation gefiltert. Der Schwerpunkt der Modellbildung liegt auf der Wahl der Wartepositionen und nicht etwa auf dem Verhalten, wie die Personen beziehungsweise Agenten zu den Ausgängen gelangen. Bei den Labordaten wurde daher eine zeitliche Filterung eingeführt, welche den Zeitraum von Beginn des Versuches, bei dem die erste Person den Bahnsteig betritt, bis zum Ende der Wartezeit einschließt. Daher wird nicht der Zeitraum betrachtet, indem die Personen von ihren Wartepositionen zum Ausgang laufen.

Bei den Simulationen wurde neben diesem zeitlichen Filter auch ein geometrischer Filter eingesetzt, um den Betrachtungsraum an die Experimentaldaten anzupassen. Dabei wurde ausschließlich der Wartebereich berücksichtigt, während der Bereich, in dem die Agenten ihre Bewegung in der Simulation starten, ausgeschlossen blieb.

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden zunächst die Beobachtungen der Laborexperimente zusammengefasst, welche als Grundlage für die Bewertung der Modellbildung dienen. Anschließend werden die Ergebnisse der vier Iterationen vorgestellt. Dabei wird jeweils zunächst auf allgemeine Beobachtungen eingegangen, bevor die Ergebnisse der Delaunay-Triangulierung und der PDF dargestellt werden. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Modellbildung, welche alle Iterationen einschließt.

5.1 Laborexperimente

Da die Ergebnisse der Simulationen mit den experimentellen Daten verglichen werden, folgt eine kurze Zusammenfassung der Beobachtungen sowie eine Beschreibung der Resultate der durchgeführten Delaunay-Triangulierung und der PDF. Eine detaillierte Darstellung der Laborexperimente und ihrer Ergebnisse findet sich in Küpper et al. (Küpper und Seyfried 2023b)

5.1.1 Delaunay-Triangulierung

Alle Ergebnisse der Delaunay-Triangulierung inklusive Visualisierung der Wartepositionen sind Anhang A.1 zu entnehmen. Mittels der Delaunay-Triangulierung wurden die Abstände zu den nächsten Nachbarn bestimmt. Im Folgenden werden die Mediane der Abstände zu den nächsten Nachbarn vorgestellt und erläutert.

In den Szenarien ohne Hindernisse zeigten sich für 40 Personen mit 2 Minuten oder 4 Minuten Wartezeit nur kleine Abstände. Die Mediane lagen bei 1.41 m bzw. bei 1.49 m. Bei 100 Personen und einer Wartezeit von 2 Minuten verringerten sich die Abstände zu den nächsten Nachbarn und der Median lag bei 1.29 m.

In den Szenarien mit schmalen Hindernis stehen die Personen näher an ihren nächsten Nachbarn. Im Median ist nur ein kleiner Unterschied zwischen den Experimenten mit 40 Personen und einer Wartezeit von 2 Minuten und den Experimenten mit 100 Personen und derselben Wartezeit zu beobachten. Bei 40 Personen beträgt dieser 1.25 m und bei 100 Personen 1.21 m. In den Experimenten mit 40 Personen und 4 Minuten Wartezeit beträgt der Median 1.36 m und liegt somit darüber. In diesem Szenario bewegten sich mehr Personen innerhalb des Wartebereiches umher, statt eine feste Warteposition zu wählen (Küpper und Seyfried 2023b).

Bei den Experimenten mit breitem Hindernis traten die geringsten Unterschiede zwischen den Abständen zu den nächsten Nachbarn der einzelnen Szenarien auf. Bei 40 Personen mit 2 Minuten Wartezeit betrug der Median 1.34 m, bei 4 Minuten Wartezeit 1.41 m und bei 100 Personen mit 2 Minuten Wartezeit 1.38 m. Die Personen haben größere Abstände zu den nächsten Nachbarn als bei den Szenarien mit einem schmalen Hindernis, obwohl weniger Platz

zu Verfügung steht. Bei der Delaunay-Triangulierung werden die Hindernisse nicht betrachtet, dementsprechend kann ein Nachbar auch auf der anderen Seite des Hindernisses stehen.

5.1.2 Pair Distribution Function

Alle Ergebnisse der PDF für die Experimente inklusive der Angaben über die ersten drei Hochpunkte sind dem Anhang B.1 zu entnehmen. In der PDF weist ein Wert von 1 auf eine zufällige Verteilung der Personen hin. Maxima hingegen deuten darauf hin, dass sich in diesem Radius eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten weiterer Personen ergibt. Im Folgenden wird vereinzelt auf die Maxima der Szenarien eingegangen.

Das erste Maximum liegt bei allen Läufen zwischen 0.5 m und 1.0 m, das zweite zwischen 0.8 m und 1.6 m und das dritte zwischen 1.1 m und 1.9 m.

Die Schwankungen für ein Szenario sind recht groß, so liegt das erste Maximum bei den Experimenten mit breitem Hindernis, 40 Personen und 2 Minuten Wartezeit in einem Lauf bei 0.5 m und in einem weiteren bei 1.0 m. Es sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien zu erkennen.

Zusammenfassend zeigten die Ergebnisse, dass die PDF für die Szenarien nur eine schlechte Reproduzierbarkeit aufweist. Die Maxima sind über die Radien gleichmäßig verteilt. Daher wurden die Iterationen zwar mittels PDF untersucht, in der Entscheidung, ob weitere Anpassungen erfolgen müssen, jedoch die Delaunay-Triangulierung als quantitatives Maß herangezogen.

5.2 Iteration 01

Die erste Iteration ist ausschließlich für die Simulation ohne Hindernisse geeignet. Im Wahrscheinlichkeitskarten-Inkrement wird die Wahrscheinlichkeit für das Warten innerhalb eines Hindernisses nicht auf null gesetzt und in dem Wartepositionen-Inkrement erfolgt keine Überprüfung, ob die Punkte in einem erreichbaren Bereich liegen. Simulationen mit Hindernissen können daher nicht durchgeführt werden. Aus diesem Grund ist eine weitere Iteration erforderlich, in der das Modell angepasst wird, um die Geometrien der Experimente korrekt abzubilden. Auf eine detaillierte Auswertung der Simulationen ohne Hindernisse wird verzichtet, da das Modell nicht die Anforderungen erfüllt.

5.3 Iteration 02

Nach der zweiten Iteration können alle Geometrien simuliert werden. Daher wird diese vollständig ausgewertet. Im Folgenden wird zunächst auf explorativ beobachtete Besonderheiten eingegangen, bevor in Kapitel 5.3.1 detailliert auf die Werte der Delaunay-Triangulierung und in Kapitel 5.3.2 auf die PDF eingegangen wird. Im Anhang B.2 befinden sich Visualisierungen der Delaunay-Triangulierung, aus denen auch die Wartepositionen der Agenten in den einzelnen Simulationsläufen hervorgehen.

Mit dem Modell wird die Verteilung der Agenten besonders für die Szenarien mit 40 Personen nicht getroffen. Die Agenten verteilen sich zu gleichmäßig über den Bahnsteig. Um die Ursachen der unpassenden Verteilung zu beleuchten, wird zunächst auf die fünf Einflussfaktoren der Wahrscheinlichkeitskarte eingegangen. Abschließend werden die Unterschiede zwischen der geplanten Verteilung und der tatsächlichen Verteilung von Wartepositionen erläutert.

Der Abstand zum Ausgang hat in den Simulationen nur einen geringen Einfluss auf die Verteilung der Agenten auf dem Bahnsteig. Die erzeugte Attraktivitätskarte wies große attraktive Bereiche auf. Diese Verteilung wird in der Simulation erreicht. Es werden keine deutlichen Unterschiede zwischen dem Abstand der Wartepositionen zum Eingang zwischen Simulation und Laborexperimenten beobachtet.

Der Zusammenhang zwischen der Verteilung der Agenten und dem Abstand der Ausgänge spiegelt nicht die beobachteten Verteilungen von Personen in den Experimenten mit 40 Personen wider. Während in diesen Experimenten der hintere Bereich des Bahnsteiges kaum genutzt wurde, fällt in den Simulationen kein ein Unterschied zwischen den vorderen und hinteren Bereichen auf. Am deutlichsten ist dies in den Szenarien mit etwa 40 Personen und ohne Hindernis zu beobachten. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 31 die Wartpositionen aus dem Experiment mit 41 Personen, ohne Hindernis und mit 2 Minuten Wartezeit und in Abbildung 32 die Wartpositionen der dazugehörigen Simulation dargestellt.

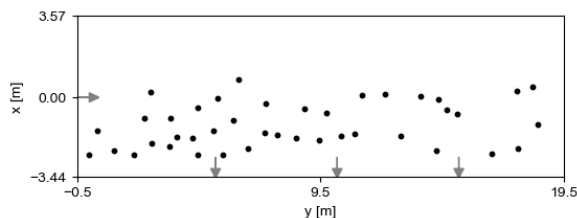


Abbildung 31: Wartepositionen des Experiments 3B050, ohne Hindernis, 41 Personen, 2 Minuten Wartezeit, $t = 270$ s

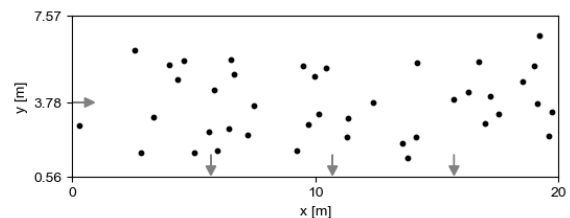


Abbildung 32: Wartepositionen der Simulation 3B050, ohne Hindernis, 41 Personen, 2 Minuten Wartezeit, $t = 150$ s

In keinem der Szenarien warteten Agenten in den Gefahrenbereichen, was das Verhalten der Personen in den Experimenten widerspiegelt.

Trotz der abstoßenden Bereiche der Flussvermeidung, warten Agenten im direkten Eingangsbereich. In den Laborexperimenten zeigte sich, dass Personen den Eingangsbereich erst dann nutzten, wenn der vorgesehene Wartebereich eine hohe Auslastung aufwies. Im Gegensatz dazu warten Agenten in den Simulationen, bei denen zeitliche Faktoren unberücksichtigt bleiben, bereits zu Beginn der Simulation im Eingangsbereich. Dieses Verhalten führte in zwei Simulationsläufen zu einer vollständigen Blockade des Zugangs, wodurch andere Agenten den Bahnsteig nicht erreichen konnten. Folglich mussten diese Simulationsläufe wiederholt werden.

Die Attraktivitätskarte der Hindernisse soll dazu führen, dass vor den Hindernissen mehr und hinter den Hindernissen kaum Personen warten. Bei den Szenarien mit schmalen Hindernissen und 40 Personen warten in den Simulationen keine Agenten hinter diesen und bei 100 Personen vereinzelt. Ähnlich verhält es sich bei den Szenarien mit breitem Hindernis. Vor den Hindernissen lässt sich tendenziell eine hohe Dichte an Agenten beobachten. Lediglich bei zwei Simulationsläufen mit breitem Hindernis und 100 Personen wird der Weg zu diesem Bereich von anderen wartenden Agenten blockiert, wodurch die Wartepositionen nicht besetzt werden können.

Eine weitere Ursache, neben den Wahrscheinlichkeitskarten, für eine unpassende Verteilung ist, dass nicht alle geplanten Wartepositionen von den Agenten in den Simulationen besetzt werden. Dieses Phänomen tritt besonders ausgeprägt in Simulationen mit etwa 100 Agenten oder bei Szenarien mit Hindernissen auf. Abbildung 33 veranschaulicht die vorgegebenen und tatsächlichen Wartepositionen der Simulation mit 101 Agenten, einem breiten Hindernis und 2 Minuten Wartezeit. Dabei zeigt sich deutlich, dass Wartepositionen in Bereichen mit hoher Dichte sowie in weiter vom Ausgang entfernten Regionen schlechter besetzt werden. Einige Agenten bleiben stecken, da andere Agenten, die ihre Warteposition bereits erreicht haben, ein zusätzliches Hindernis darstellen und den Durchgang verhindern.

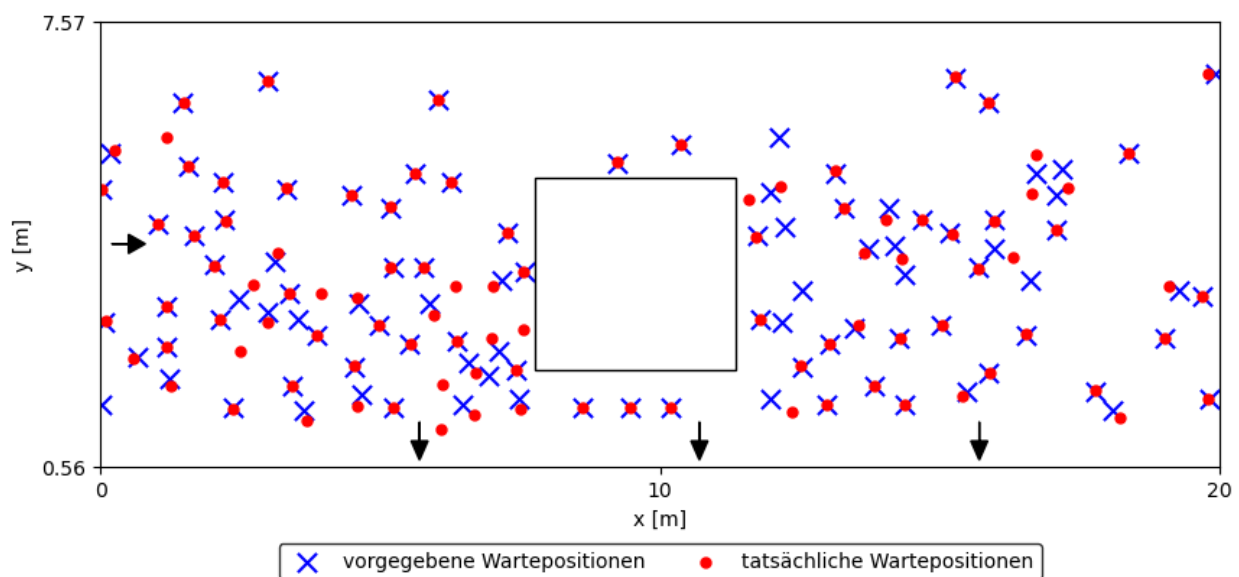


Abbildung 33: Vergleich zwischen den vorgegebenen Wartepunkten und den tatsächlichen Wartepositionen der Simulation, 101 Agenten, breites Hindernis – Iteration 02

5.3.1 Delaunay-Triangulierung

Die Auswertung der durchgeführten Simulationen erfolgte mittels der Delaunay-Triangulierung. Hierbei wurden sowohl Abbildungen erstellt als auch die Abstände zu den nächsten Nachbarn analysiert. Für jedes Szenario wurden der Median und Mittelwert der Abstände zu den nächsten Nachbarn berechnet und mit den experimentellen Daten verglichen. Eine Übersicht der Ergebnisse der 27 durchgeführten Simulationen ist in Anhang A.2 gegeben. Im Folgenden

werden die Ergebnisse der Szenarien ohne Hindernisse, mit einem schmalen Hindernis und abschließend mit einem breiten Hindernis vorgestellt.

Bei den Szenarien ohne Hindernis wurde bereits erläutert, dass bei 40 Agenten die Wartepositionen deutlich mehr über den gesamten Wartebereich verteilt sind, als in den Experimenten beobachtet wurde. Dies ist auch im Median der Entfernung zu den nächsten Nachbarn zu beobachten. In den Simulationen mit einer Wartezeit von 2 Minuten beträgt dieser 1.86 m und mit einer Wartezeit von 4 Minuten 1.88 m. Die Unterschiede zwischen den beiden Werten sind rein zufällig, da die Wartezeit in dem Modell keinen Einfluss auf die Wahl der Wartepositionen hat. In den Experimenten betrug der Median für die Szenarien mit 40 Personen und 2 Minuten Wartezeit 1.41 m und mit 4 Minuten Wartezeit 1.49 m. Damit beträgt der Unterschied bis zu 0.45 m. Die Personen in den Experimenten stehen näher zusammen als in den Simulationen.

In dem Szenario ohne Hindernis und mit 100 Agenten beträgt der Median 1.13 m, während er in den Laborexperimenten 1.29 m beträgt. Der Unterschied beträgt 0.16 m und ist damit geringer als bei den Szenarien mit 40 Personen. Bei einer hohen Belegung stehen die Agenten in der Simulation etwas dichter aneinander als in den Laborexperimenten, die Ergebnisse sind jedoch vergleichbar.

Auch bei dem Szenario mit schmalen Hindernis ist bei einer Belegung von 100 Personen zu beobachten, dass die Agenten in der Simulation näher beieinander warten als die Personen in den Laborexperimenten. Der Median der Simulation beträgt 1.10 m und ist damit 0.11 m kleiner als in den Laborexperimenten. Dies stellt die kleinste Abweichung des Medians aller Szenarien dar. Die Entfernungen der nächsten Nachbarn der Simulationen sind mit den Entfernungen der Experimente vergleichbar.

Zu deutlichen Unterschieden bei der Geometrie mit schmalen Hindernis kommt es bei den Szenarien mit etwa 40 Personen. Der Median der Simulation mit 2 Minuten Wartezeit beträgt 1.73 m und für 4 Minuten Wartezeit 1.65 m. In den Laborexperimenten betrug der Median für die Simulation mit 2 Minuten Wartezeit 1.25 m und bei 4 Minuten Wartezeit 1.36 m. Damit stehen die Personen in den Experimenten deutlich näher beieinander als in den Simulationen. Auch hier nutzen die Agenten in den Simulationen den gesamten Wartebereich aus, während die Personen in den Laborexperimenten den hinteren Bereich, welcher weit vom Ausgang entfernt ist, meiden.

Dies ist auch bei den Szenarien mit breitem Hindernis zu beobachten. Hier liegt der Median für Szenarien mit 40 Personen und einer Wartezeit von 2 Minuten bei 1.55 m und für 4 Minuten bei 1.52 m. In den Experimenten standen die Personen dichter aneinander, der Median beträgt für die Simulationen mit 2 Minuten Wartezeit 1.34 m und mit 4 Minuten Wartezeit 1.41 m.

Bei 100 Personen und breitem Hindernis liegt der Median bei 1.12 m in der Simulation und bei 1.38 m in den Experimenten. Damit beträgt der Unterschied 0.26 m und ist größer als bei den anderen Szenarien mit 100 Personen. Die Agenten stehen in den Simulationen dichter aneinander. Bei 100 Personen und breitem Hindernis kommt es besonders häufig vor, dass Agenten den Übrigen den Weg versperren. Dadurch entstehen Gruppen von sehr dicht aneinander stehenden Agenten.

Zusammengefasst ist die Abweichung der Abstände zu den nächsten Nachbarn bei den Szenarien mit 100 Personen kleiner. Die Wartepositionen der Agenten sind besonders bei den Szenarien ohne und mit schmalen Hindernis mit den Wartepositionen der Personen der Laborexperimente vergleichbar. Bei 40 Personen sind die Unterschiede signifikanter. Die Verteilung der Agenten weicht stark von den Laborexperimenten ab. Die zweite Iteration ist nicht geeignet, um Szenarien mit einer geringen Belegung des Wartebereichs abzubilden.

5.3.2 Pair Distribution Function

Die Ergebnisse der PDF wurden nicht als Bewertungskriterium herangezogen, ob eine weitere Iteration des Modells notwendig ist. Dennoch werden die Ergebnisse kurz umrissen. Die gesamten Ergebnisse der 27 Simulationsläufe der zweiten Iteration sind in Anhang B.2 dargestellt.

In nahezu allen Simulationsläufen liegt das erste Maximum bei einem Radius von 0.7 m. Dieser wird bedingt durch den Durchmesser der Agenten und den Mindestabstand, den sie untereinander halten wollen. Lediglich bei einem Lauf des Szenarios ohne Hindernis, mit 40 Personen und 2 Minuten Wartezeit liegt das erste Maximum bei 0.8 m.

Die Werte des zweiten Maximums liegen zwischen 0.9 m und 1.3 m. Die Werte des Dritten liegen zwischen 1.2 m und 1.9 m. Es ist kein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Szenarien zu erkennen. Ebenfalls ist, bis auf die verringerte Varianz in den Werten, kein signifikanter Unterschied zu den experimentellen Daten zu erkennen.

5.4 Iteration 03

In der dritten Iteration erfolgte eine Potenzierung der Wahrscheinlichkeitskarte. Im Folgenden werden relevante Beobachtungen erläutert, bevor in Kapitel 5.4.1 detailliert auf die Ergebnisse der Delaunay Triangulierung und in Kapitel 5.4.2 kurz auf die Ergebnisse der PDF eingegangen wird.

Es wird deutlich, dass die Agenten in allen Simulationen näher beieinanderstehen als in den Simulationen der zweiten Iteration. Besonders in den Szenarien mit 40 Personen ist die Verteilung mehr mit den Laborexperimenten zu vergleichen.

In den Szenarien ohne Hindernis stehen die Agenten näher an den Ausgängen als in der vorherigen Iteration. Bei den Szenarien mit 40 Personen führt dies zu einer den Experimenten besser entsprechenden Verteilung. Zur Visualisierung sind in Abbildung 34 die Wartepositionen einer Simulation mit 40 Personen und 4 Minuten Wartezeit und in Abbildung 35 die Wartepositionen der dazugehörigen Simulation dargestellt.

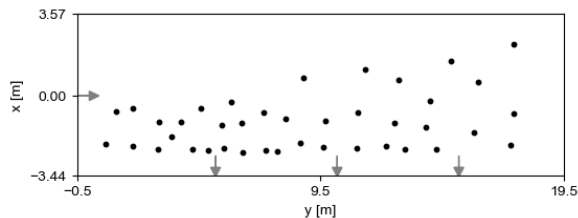


Abbildung 34: Wartepositionen des Experiments 1B060, ohne Hindernis, 40 Personen, 4 Minuten Wartezeit

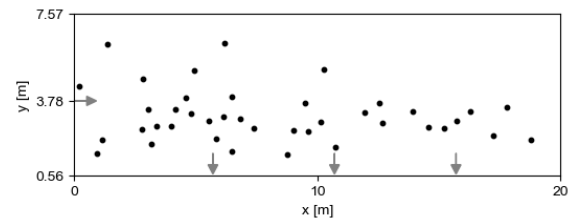


Abbildung 35: Wartepositionen der Simulation 1B060, ohne Hindernis, 40 Personen, 4 Minuten Wartezeit

Auch bei den Szenarien ohne Hindernis mit 100 Personen warten die Agenten näher an den Ausgängen. Dadurch stehen sie allerdings zu nah beieinander. In den Laborexperimenten verteilen sich die Personen bei dieser Personenzahl über den gesamten Wartebereich. Die folgenden Abbildungen zeigen die Wartepositionen eines Experiments mit 102 Wartepositionen und der dazugehörigen Simulation. Die Wartepositionen der Personen in den Experimenten sind deutlich gleichmäßiger verteilt als die Wartepositionen der Agenten der Simulation.

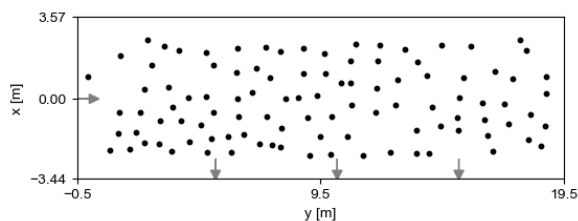


Abbildung 36: Wartepositionen des Experiments 3B070, ohne Hindernis, 102 Personen, 2 Minuten Wartezeit

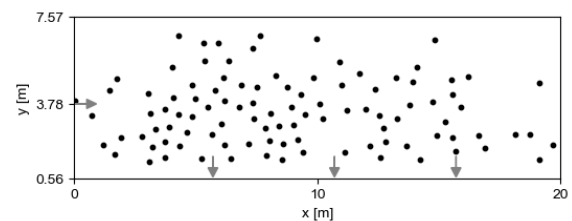


Abbildung 37: Wartepositionen der Simulation 3B070, ohne Hindernis, 102 Personen, 2 Minuten Wartezeit

Die Iteration verbesserte auch die Verteilung der Wartepositionen für die Szenarien mit schmalen Hindernis und 40 Personen. Die Agenten warteten auch hier näher am Ausgang, wodurch plausible Ergebnisse erzielt wurden. Zu Veranschaulichung ist in Abbildung 38 die Verteilung der Wartepositionen für ein Experiment mit 40 Personen und 4 Minuten Wartezeit und in Abbildung 39 die Simulation dargestellt. Die Agenten verteilen sich hauptsächlich vor dem Hindernis. Auffällig ist, dass die Personen in diesem Lauf nicht bevorzugen, nah am Eingang zu warten. Dies ist in vereinzelten Läufen der Experimente zu beobachten.

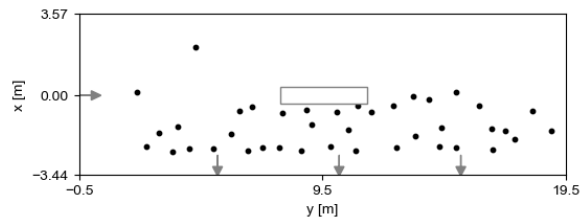


Abbildung 38: Wartepositionen des Experiments 3B090, schmales Hindernis, 40 Personen, 4 Minuten Wartezeit

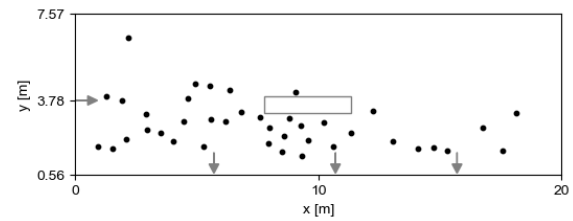


Abbildung 39: Wartepositionen der Simulation 3B090, schmales Hindernis, 40 Personen, 4 Minuten Wartezeit

Bei 100 Personen und schmalen Hindernis tritt das gleiche Phänomen wie bei 100 Personen ohne Hindernis auf. Die Personen warten nah am Eingang und verteilen sich nicht ausreichend.

Auch bei dem breiten Hindernis ist dies zu beobachten. Während die Verteilung für die Simulationen mit 40 Agenten verbessert wurden, stehen sie bei Szenarien mit 100 Agenten zu nah aneinander. Zur Veranschaulichung ist in den folgenden Abbildungen der Vergleich zwischen Experiment und Simulation für ein Lauf mit 101 Personen dargestellt.

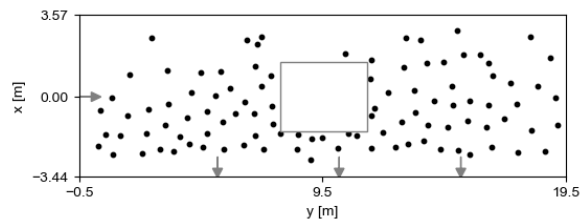


Abbildung 40: Wartepositionen des Experiments 3B130, breites Hindernis, 101 Personen, 2 Minuten Wartezeit

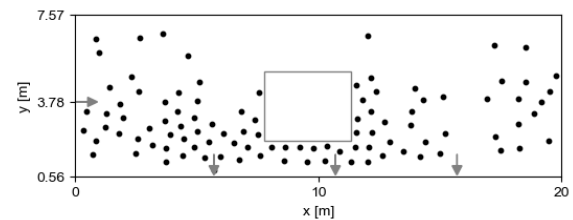


Abbildung 41: Wartepositionen der Simulation 3B130, breites Hindernis, 101 Personen, 2 Minuten Wartezeit

Auch in dieser Iteration können nicht alle Agenten ihre Warteposition erreichen. Agenten, die im Eingang oder in Engstellen ihre Warteposition bereits erreicht haben, versperren den Weg für andere.

5.4.1 Delaunay-Triangulierung

Alle Ergebnisse der durchgeführten Delaunay-Triangulierung für die dritte Iteration inklusive Visualisierungen sind Anhang A.3 zu entnehmen. Im Folgenden wird auf die relevanten Kennwerte eingegangen.

Die Entfernungen der nächsten Nachbarn für die Simulationen ohne Hindernis nähern sich für die Szenarien mit 40 Personen den Laborexperimenten leicht an. Der Median hat sich für die Simulation mit 2 Minuten Wartezeit von 1.86 m auf 1.72 m verringert. In dem zugehörigen Experiment beträgt er 1.41 m. In dem Lauf mit 4 Minuten Wartezeit hat er sich von 1.88 m auf 1.74 m verringert, während er für das zugehörigen Experiment 1.49 m beträgt. Damit ist die größte Differenz von 0.45 m auf 0.31 m gesunken. Die Agenten stehen näher zusammen, da sie den hinteren Teil des Wartebereichs weniger nutzen.

Für die Simulation ohne Hindernis und mit 100 Personen zeigt sich im Median nur ein kleiner Unterschied. Dieser ist von 1.13 m auf 1.08 m gesunken und damit 0.21 m kleiner als der Median

der dazugehörigen Experimente. In dem Median spiegelt sich nicht die Beobachtung wider, dass die Agenten in dieser Iteration näher am Ausgang und damit näher beieinanderstehen. In Abbildung 42 bis Abbildung 44 sind daher die Histogramme der Entfernungen der nächsten Nachbarn für die Experimente, sowie der Simulationen der Iterationen 02 und 03 dargestellt. Es fällt auf, dass in der dritten Iteration ein deutliches Maximum bei den sehr kleinen Entfernungen auftritt. In den Experimenten liegt das Maximum bei dem Median, bei Entfernung von etwa 1.2 m. Auch wenn der Median der dritten Iteration ähnlich zur zweiten Iteration ist, stehen die Agenten näher zusammen.

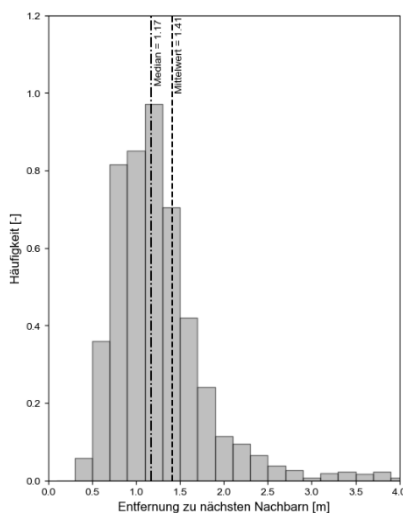


Abbildung 42: Histogramm der Entfernung zu den nächsten Nachbarn, 100 Personen, kein Hindernis, 2 Minuten Wartezeit, Experimente

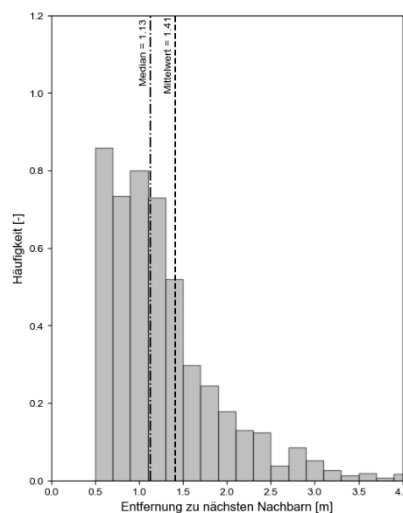


Abbildung 43: Histogramm der Entfernung zu den nächsten Nachbarn, 100 Personen, kein Hindernis, 2 Minuten Wartezeit, Iteration 02

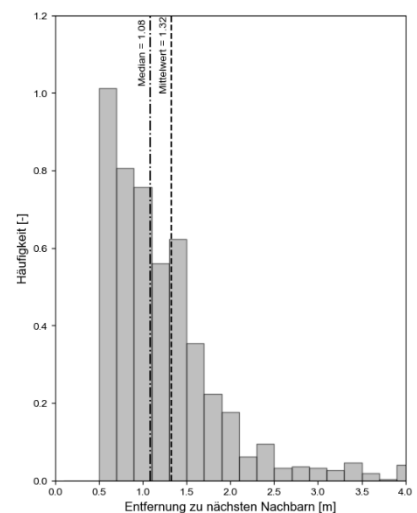


Abbildung 44: Histogramm der Entfernung zu den nächsten Nachbarn, 100 Personen, kein Hindernis, 2 Minuten Wartezeit, Iteration 03

Bei den Szenarien mit schmalem Hindernis und 40 Personen führte Iteration 03 zu der Verteilung, die die Laborexperimente am besten widerspiegelt. Der Median für die Simulationen mit 2 Minuten Wartezeit betrug 1.26 m, während der Median der Experimente bei 1.25 m lag. Der Median für die Simulationen mit 4 Minuten Wartezeit betrug 1.32 m, während der Median der Experimente bei 1.36 m lag. In den Experimenten bewegten sich mehr Personen bei einer Wartezeit von 4 Minuten über den Wartebereich. Die Verteilung der Agenten passen für die Szenarien mit schmalem Hindernis und 40 Personen gut zu der Verteilung der Personen in den Experimenten.

Bei den Simulationen mit schmalem Hindernis und 100 Personen verringerte sich der Median im Vergleich zu der vorherigen Iteration von 1.10 m auf 0.86 m. Der Median der dazugehörigen Experimente betrug 1.21 m. Dementsprechend stieg die Differenz auf 0.35 m. Dies passt zu den Beobachtungen, dass die Agenten zu dicht aneinander stehen. Die Potenzierung der Wahrscheinlichkeitskarte führt bei 100 Personen und schmalem Hindernis zu einer deutlichen Verschlechterung der Verteilung.

Bei den Szenarien mit breitem Hindernis führte die Anpassung für die Szenarien mit 40 Personen ebenfalls zu einer Annäherung an die Experimente. Der Median für die Simulationen mit 2 Minuten Wartezeit verringerte sich im Vergleich zu Iteration 02 von 1.71 m auf 1.55. Der Median der dazugehörigen Experimente beträgt 1.34 m, woraus eine Differenz von 0.21 m resultiert. Der Median für die Simulationen mit einer Wartezeit von 4 Minuten beträgt 1.52 m, wohingegen er in der Iteration 02 1.72 m beträgt. In der zugehörigen Laborexperimenten beträgt er 1.41 m. Die Differenz beträgt 0.11 m. In der dritten Iteration spiegeln die Abstände der nächsten Nachbarn besser die Experimente wider. Das Modell trifft die Verteilung der Wartepositionen für 40 Personen.

Dahingegen verschlechtert sich die Verteilung für die Simulationen mit breitem Hindernis und 100 Personen. Der Median verringert sich von 1.12 m auf 0.96 m, während der Median der Experimente 1.36 m beträgt. Insgesamt gibt es deutlich mehr sehr kleine Abstände zu den nächsten Nachbarn, als in der vorherigen Iteration, was auch schon in dem Szenario mit schmalem Hindernis und 100 Personen zu beobachten war.

Zusammenfassend führt die Potenzierung der Wahrscheinlichkeitskarte in allen Szenarien dazu, dass sich die Agenten dichter angeordnet haben. Dies führt bei den Szenarien mit 40 Personen zu verbesserten Abständen zu den nächsten Nachbarn. Die Szenarien ohne Hindernis weisen die größten Unterschiede auf, während die Szenarien mit breitem Hindernis nur noch kleine Unterschiede aufweisen und für die Szenarien mit schmalem Hindernis die Verteilung der Laborexperimente getroffen wird. Jedoch führt die Potenzierung der Wahrscheinlichkeitskarte für die Szenarien mit 100 Personen zu einer schlechteren Verteilung. Die Agenten stehen zu nah aneinander, wodurch die Abweichung zu den Laborexperimenten im Vergleich zur vorherigen Iteration weiter erhöht wird.

5.4.2 Pair Distribution Function

Die Ergebnisse der PDF für die dritte Iteration sind vollständig in Anhang B.3 gegeben. Es ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Maxima im Vergleich zu den Ergebnissen der zweiten Iteration zu erkennen. Das erste Maximum liegt bei allen Läufen bei einem Radius von 0.7 m. Das Zweite liegt zwischen 0.9 m und 1.4 m. Das dritte Maximum Peak liegt zwischen 1.1 m und 1.8 m.

5.5 Iteration 04

In der vierten Iteration erfolgte eine Anpassung der Konstanten zur Erstellung der Attraktivitätskarten, wobei insbesondere die Attraktivitätskarte Abstand zum Ausgang sowie die Attraktivitätskarte der Flussvermeidung angepasst wurden. Zudem wurden die Gewichtungsfaktoren angepasst, um den Einfluss des Abstandes zum Ausgang zu erhöhen. Als Basis wurde Iteration 02 verwendet und der Ansatz zur Erstellung der Attraktivitätskarte aus Iteration 03 verworfen. Im Folgenden werden zunächst Beobachtungen erläutert, bevor in den

darauffolgenden Abschnitten detailliert auf die Ergebnisse der Delaunay-Triangulierung und anschließend kurz auf die PDF eingegangen wird. Die Wartepositionen aller Läufe lassen sich den Visualisierungen der Delaunay-Triangulierung entnehmen, welche in Anhang A.4 dargestellt sind.

In den Simulationen ohne Hindernis mit 40 Personen waren die Agenten über den gesamten Bahnsteig verteilt, während sie in den Experimenten hauptsächlich Wartepositionen in der Nähe der Ausgänge wählten. Zwar befanden sich in dem hinteren Bereich weniger Personen als im vorderen Bereich, wodurch im Vergleich zu Iteration 02 eine leichte Verbesserung erzielt wurde, jedoch wurde die Verteilung der Laborexperimente mit der Iteration 04 nicht dargestellt.

Auch in den Simulationen ohne Hindernis und mit 100 Personen treten Unterschiede zwischen Iteration 04 und den Experimenten auf. Die Verteilung der Wartepositionen eines Experiments mit 102 Personen ist in Abbildung 45 und die Verteilung der Wartepositionen der dazugehörigen Simulation in Abbildung 46 dargestellt. Die Verteilung des Experiments ist deutlich gleichmäßiger als die Verteilung der Simulation. Die Verteilung ist auch in der Iteration 02 gleichmäßiger.

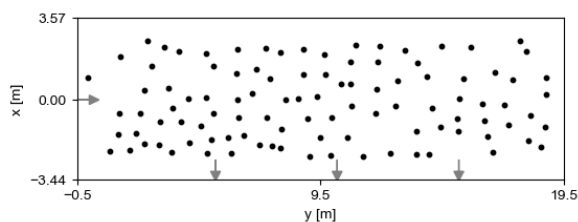


Abbildung 45: Wartepositionen des Experiments 3B070, kein Hindernis, 102 Personen, 2 Minuten Wartezeit

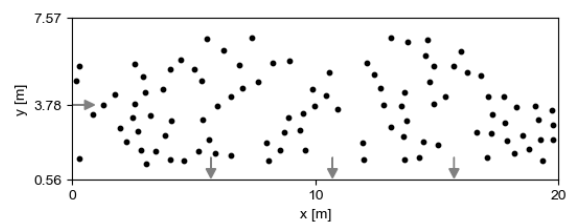


Abbildung 46: Wartepositionen der Simulation 3B070, kein Hindernis, 102 Personen, 2 Minuten Wartezeit

In den Simulationen mit einem schmalen Hindernis und 40 Personen nutzen die Agenten Wartepositionen mit großem Abstand zu den Ausgängen, allerdings befinden sich weniger Agenten in dem hinteren Bereich als bei Iteration 02. Der Einfluss des Hindernisses wird gut abgebildet, da hinter diesem nur vereinzelt Agenten warten. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 47 die Wartepositionen eines Experiments mit 41 Personen und 2 Minuten Wartezeit und in Abbildung 48 die Wartepositionen der dazugehörigen Simulation dargestellt. Es wird deutlich, dass die Personen in den Experimenten den Bahnsteig im hinteren Bereich nicht nutzen und sich ungleichmäßiger verteilen als in der Simulation.

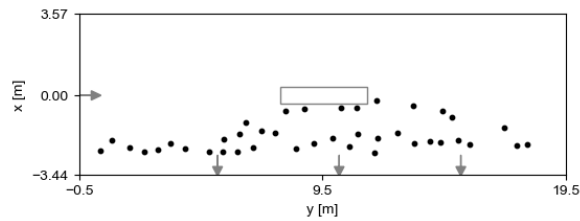


Abbildung 47: Wartepositionen des Experiments 2B080, schmales Hindernis, 41 Personen, 2 Minuten Wartezeit

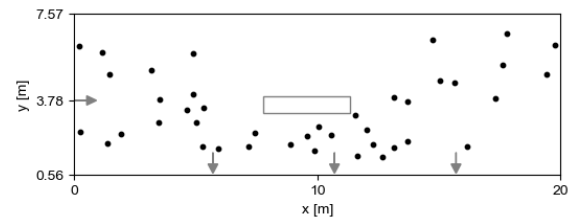


Abbildung 48: Wartepositionen der Simulation 2B080, schmales Hindernis, 41 Personen, 2 Minuten Wartezeit

Bei den Simulationen mit schmalen Hindernis und 100 Personen lässt sich eine ähnliche Verteilung wie in den Simulationen ohne Hindernis mit 100 Personen beobachten. Die Agenten sind ungleichmäßiger auf dem Bahnsteig verteilt.

Die Ergebnisse der Simulationen mit breitem Hindernis haben sich im Vergleich zu den vorangegangenen Iterationen verschlechtert. In den Simulationen mit 40 Personen verteilen sich die Agenten zu gleichmäßig auf dem Bahnsteig. Sie nutzen auch weit vom Ausgang entfernte Wartebereiche. Zur Anschauung sind in Abbildung 50 die Wartepositionen einer Simulation mit 40 Agenten und einer Wartezeit von 2 Minuten und in Abbildung 49 die Wartepositionen der dazugehörigen Simulation abgebildet.

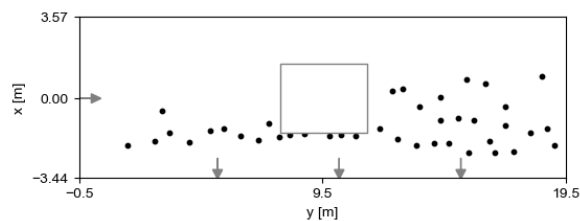


Abbildung 49: Wartepositionen des Experiments 2B110, breites Hindernis, 40 Personen, 2 Minuten Wartezeit

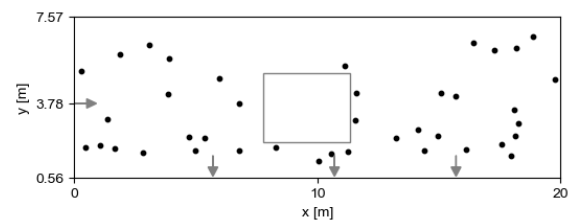


Abbildung 50: Wartepositionen der Simulation 2B110, breites Hindernis, 40 Personen, 2 Minuten Wartezeit

Bei den Simulationen mit breitem Hindernis und 100 Personen sind die Wartepositionen der Agenten ähnlich verteilt wie in der zweiten Iteration, sie warten jedoch im Durchschnitt näher an den Ausgängen. In Abbildung 51 ist die Verteilung der Wartepositionen eines Experiments mit 101 Personen und in Abbildung 52 die Wartepositionen der dazugehörigen Simulationen abgebildet. Es wird deutlich, dass besonders viele Agenten in der Simulation zwischen dem Eingang und dem Hindernis stehen. Ein Agent verweilt im Gefahrenbereich, obwohl dort keine Wartepositionen vorgegeben wurde. Die Wartepositionen der Personen der Experimente sind deutlich gleichmäßiger verteilt.

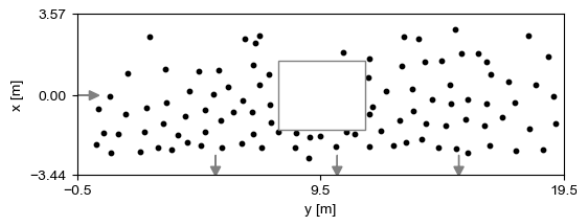


Abbildung 51: Wartepositionen des Experiments 3B130, breites Hindernis, 101 Personen, 2 Minuten Wartezeit

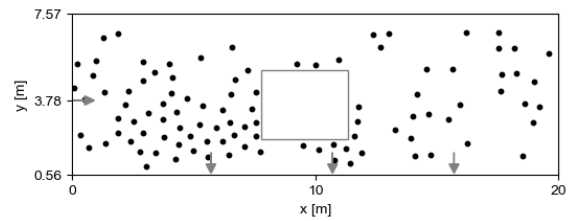


Abbildung 52: Wartepositionen der Simulation 3B130, breites Hindernis, 101 Personen, 2 Minuten Wartezeit

Auch in dieser Iteration konnten nicht alle Agenten ihre gewählten Wartepositionen belegen, da Agenten, welche bereits ihre Warteposition erreicht haben, den Weg blockieren.

5.5.1 Delaunay-Triangulierung

Die gesamten Ergebnisse der durchgeführten Delaunay-Triangulierungen inklusive der Visualisierung für die vierte Iteration sind Anhang A.4 zu entnehmen. Im Folgenden wird auf die relevanten Ergebnisse für die Geometrien ohne Hindernis, mit schmalem Hindernis und mit breitem Hindernis eingegangen.

Die Mediane der Simulationen mit schmalem Hindernis und mit 40 Personen sind nahezu identisch zu denen der Iteration 03. Sie betragen für die Simulationen mit einer Wartezeit von 2 Minuten 1.72 m und für die Simulationen mit 4 Minuten Wartezeit 1.75 m. Damit haben sie eine Differenz von 0.31 m bei 2 Minuten Wartezeit und 0.26 m bei 4 Minuten Wartezeit zu den Medianen der Experimente. Die Iteration stellt eine Verbesserung zu der zweiten Iteration dar, bei der die Differenz bis zu 0.45 m beträgt. Bei allen Iterationen ist die Entfernung größer als bei den Laborexperimenten.

Bei der Simulation ohne Hindernis und 100 Personen liegt der Median der Entfernungen zu den nächsten Nachbarn bei 1.16 m und ähnelt damit denen der vorherigen Iterationen. Er liegt 0.13 m unter dem der Laborexperimente. Die Anpassung der vierten Iteration hat daher kaum Auswirkungen auf den mittleren Abstand zu den nächsten Nachbarn dieses Szenarios.

Bei den Simulationen mit schmalem Hindernis und 40 Personen sind die Mediane der Szenarien mit 2 Minuten und 4 Minuten Wartezeit ebenfalls mit den Ergebnissen der zweiten Iteration vergleichbar. Sie betragen 1.74 m und 1.73 m und liegen damit deutlich über den Ergebnissen der Experimente mit 1.25 m bzw. 1.36 m. Die Iteration stellt keine Verbesserung zu der zweiten Iteration dar. Die Agenten stehen zu weit voneinander entfernt. Iteration 03 war besser geeignet, um die Szenarien abzubilden.

Der Median der Simulationen mit schmalem Hindernis und 100 Personen ist identisch mit Iteration 02. Er beträgt 1.10 m und liegt damit 0.11 m unter dem Median der Experimente. Die Personen halten in den Experimenten im Schnitt einen größeren Abstand zueinander.

Die Verteilungen der Wartepositionen der Simulationen mit breitem Hindernis und 40 Personen sind deutlich schlechter als in der vorherigen Iteration. Der Median der Entfernung zu den nächsten Nachbarn liegt bei den Simulationen mit einer Wartezeit von 2 Minuten bei 1.94 m und mit einer Wartezeit von 4 Minuten bei 2.01 m. In den Experimenten lag dieser bei 1.34 m bzw. 1.41 m. Die Personen verteilen sich in der Simulation zu gleichmäßig und nutzen den gesamten Wartebereich, wodurch die großen Abstände zueinander resultieren.

Der Median für die Simulationen mit breitem Hindernis und 100 Personen liegt bei 1.13 m und ähnelt damit dem der zweiten Iteration, welcher bei 1.12 m liegt. Er ist 0.25 m geringer als in den Laborexperimenten. Die Personen in den Experimenten verteilten sich gleichmäßiger, wodurch der höhere Median entsteht.

Zusammenfassend stellt die vierte Iteration also insgesamt keine Verbesserung zu den vorherigen Iterationen dar. Zwar werden die Abstände bei Szenarien ohne Hindernis und mit 40 Personen leicht verbessert, aber bei den übrigen Szenarien hat die Iteration keine Auswirkungen auf die Abstände oder führt zu einer Verschlechterung.

Es ist unklar, inwiefern sich die positiven Effekte der Anpassung der Konstanten und Gewichtungsfaktoren auf einzelne Szenarien verstärken lassen, ohne die negativen Auswirkungen auf die übrigen Szenarien zu erhöhen.

5.5.2 Pair Distribution Function

Die Ergebnisse der PDF für die vierte Iteration sind vollständig in Anhang B.4 gegeben. Es ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Maxima im Vergleich zu den Ergebnissen der zweiten oder der dritten Iteration zu erkennen. Das erste Maximum liegt bei allen Läufen bei einem Radius von 0.7 m. Das zweite Maximum liegt zwischen 0.9 m und 1.4 m. Das Dritte liegt zwischen 1.1 m und 1.8 m.

5.6 Zusammenfassung Ergebnisse Modellbildung

Für die Bewertung der Iterationen wurden explorative Beobachtungen und die mittels Delaunay-Triangulierung ermittelten Abstände zu den nächstliegenden Nachbarn herangezogen. Die PDF zeigte keine signifikanten Unterschiede und war daher für die Bewertung der Iterationen ungeeignet. Die Ergebnisse wurden lediglich informativ aufgeführt.

Ein grundlegendes Problem der Simulationen besteht darin, dass Agenten, die bereits ihre Warteposition eingenommen haben, den Weg für andere Agenten blockieren. Dieses Problem konnte in keiner der Iterationen vollständig gelöst werden.

Die Verteilung der Wartepositionen lässt sich weiter durch die Delaunay-Triangulierung bewerten. Die Mediane der Entfernungen der nächsten Nachbarn der 9 Szenarien sind für die Laborexperimente und die Iterationen in Tabelle 2 dargestellt. Es sind die Mediane der Iterationen

hervorgehoben, welche am nächsten an die Laborexperimente herankommen. Es fällt auf, dass unterschiedliche Iterationen verschiedenen Szenarien am besten Abbilden. Für die Simulationen mit 100 Personen erzeugen, unabhängig der Geometrie, die Iterationen 02 und 04 die besten Verteilungen. Die Potenzierung der Wahrscheinlichkeitskarte, welche in Iteration 03 durchgeführt wurde, verringert die Abstände zu den nächsten Nachbarn zu stark und führt in diesen Szenarien zu deutlich schlechteren Ergebnissen. Für die Szenarien mit 40 Personen ist Iteration 03 am besten geeignet, um die Verteilung der Personen aus den Experimenten nachzubilden. Bei 40 Personen ohne Hindernis ist Iteration 04 gleich gut geeignet.

Tabelle 2: Mediane der Entfernung der nächsten Nachbarn nach der Delaunay-Triangulierung der Laborexperimente und Iterationen der Modellbildung

	Wartezeit	Bezeichnung	Personenzahl	Entfernung zu nächsten Nachbarn, Median			
	[min]	[-]	[-]	[m]			
				Experimente	I02	I03	I04
Kein Hindernis	2	1B050	40	1.41	1.86	1.72	1.72
	2	2B050	42				
	2	3B050	41				
	4	1B060	40	1.49	1.88	1.74	1.75
	4	2B060	42				
	4	3B060	41				
	2	1B070	58	1.29	1.13	1.08	1.16
	2	2B070	59				
	2	3B070	102				
Schmales Hindernis	2	1B080	40	1.25	1.73	1.26	1.74
	2	2B080	41				
	2	3B080	40				
	4	1B090	35	1.36	1.65	1.32	1.73
	4	2B090	40				
	4	3B090	40				
	2	1B100	83	1.21	1.10	0.86	1.10
	2	2B100	88				
	2	3B100	104				
Breites Hindernis	2	1B110	43	1.34	1.71	1.55	1.94
	2	2B110	40				
	2	3B110	40				
	4	1B120	39	1.41	1.72	1.52	2.01
	4	2B120	40				
	4	3B120	40				
	2	1B130	82	1.38	1.12	0.96	1.13
	2	2B130	87				
	2	3B130	101				

6 Diskussion

Die vorliegende Arbeit präsentiert einen Ansatz, um das Warteverhalten von Personen auf Bahnsteigen abzubilden. Der Schwerpunkt dabei war die Abbildung der Verteilung der Wartepositionen. Dafür wurde mit Hilfe eines iterativen und inkrementellen Entwicklungsprozesses unter Verwendung der Software JuPedSim ein Modell erstellt. Die Ergebnisse zeigen, dass das entwickelte Modell für einige Szenarien eine realitätsnahe Verteilung von Personen auf Bahnsteigen erzielen kann. Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse der durchgeführten Iterationen diskutiert und mit bestehenden Arbeiten verglichen, sowie die Limitation der Arbeit analysiert. Abschließend wird dargelegt, wie man auf dem bestehenden Modell aufbauen kann, um das Modell weiter zu verbessern.

Insgesamt wurden 4 Iterationen durchgeführt, um das Modell weiterzuentwickeln. In der ersten Iteration konnten keine Geometrien mit Hindernissen simuliert werden, da Wartepositionen innerhalb der Hindernisse vergeben wurden.

In der zweiten Iteration wurde der Fehler behoben, sodass keine Wartepositionen mehr innerhalb von Hindernissen vergeben wurden. Dadurch konnten alle Geometrien der Laborexperimente abgebildet werden, die zur Validierung des Modells herangezogen wurden. Die Wahrscheinlichkeitskarte für die Wartepositionen basierend auf dem in Küpper et al. vorgestellten Ansatz erzeugt. Dabei werden zunächst fünf Einflussfaktoren zur Erstellung von Attraktivitätskarten herangezogen, die anschließend gewichtet aufsummiert werden (Küpper und Seyfried 2023b). Lediglich für den Einflussfaktor der Gefahrenbereiche und für breite Hindernisse wurden Anpassungen vorgenommen. Anstatt die Attraktivitätskarte der Gefahrenbereiche ebenfalls gewichtet aufzusummieren, wurde die Wahrscheinlichkeit, in diesen Bereichen zu warten, nach Erstellung der Gesamtkarte auf null gesetzt. Da die Formel zum Erstellen der Attraktivitätskarte für Hindernisse nur für schmale Hindernisse geeignet war, wurde in Python ein Ansatz implementiert, um die Attraktivitätskarte auch für breite Hindernisse anzupassen.

Die Simulationen der zweiten Iterationen erzeugten besonders für die Szenarien mit 100 Personen eine Verteilung von Wartepositionen, die mit den Wartepositionen der Personen der Laborexperimente vergleichbar sind. Für die Szenarien mit 40 Personen waren deutlich mehr Unterschiede zwischen Simulationen und Experimenten ersichtlich. Insbesondere der Einflussfaktor des Abstandes zum Ausgang konnte in den Simulationen mit weniger Personen nicht gut abgebildet werden, da sich die Personen zu gleichmäßig auf dem Bahnsteig verteilten. Die größten Unterschiede zwischen den Entfernungen der nächsten Nachbarn der Simulationen und der Experimente traten bei dem Szenario mit schmalen Hindernis, 40 Personen und 2 Minuten Wartezeit auf. Der Median wies eine Differenz von 0.48 m auf. Die Personen standen in diesem Szenario bei den Experimenten am dichtesten zusammen, da sie sich sehr nah an den

Ausgängen aufhielten, insbesondere vor dem schmalen Hindernis. Die Simulationen mit 100 Personen und schmalem Hindernis zeigten die besten Übereinstimmungen zu den Experimenten.

In zwei weiteren Iterationen wurden Anpassungen vorgenommen, mit dem Ziel die Verteilung der Agenten auf dem Wartebereich auch für die Szenarien mit 40 Personen zu verbessern.

In der dritten Iteration wurden Werte der Wahrscheinlichkeitskarte potenziert. Dies führt dazu, dass die Unterschiede der Werte der Wahrscheinlichkeit für attraktive Bereiche sich stärker von unattraktiven Bereichen unterscheiden. Für alle Szenarien mit 40 Personen führte dies zu einer besseren Verteilung der Wartepositionen. Insbesondere für die Szenarien mit Hindernis konnten damit Verteilungen der Agenten erzielt werden, die den in den Experimenten beobachteten, entsprechen. Für das Szenario ohne Hindernis konnte die Verteilung leicht verbessert werden, insbesondere da Agenten näher an den Ausgängen warteten, der Effekt fiel aber im Vergleich mit den Szenarien mit Hindernis deutlich geringer aus. Dahingegen verschlechterten sich die Werte der Entfernungen zu den nächsten Nachbarn für die Szenarien mit 100 Personen und Hindernissen deutlich. Die Agenten standen nach der Potenzierung zu nah aneinander.

Auch in der vierten Iteration sollte die Verteilung der Agenten durch eine Anpassung der Wahrscheinlichkeitskarte verbessert werden. Dazu wurde die Attraktivitätskarte, die den Einfluss des Abstandes zum Ausgang sowie die Attraktivitätskarte, welche die Flussvermeidung beschreibt, angepasst. Damit wurden der hintere Bereich des Bahnsteiges und ein größerer Bereich im Eingangsbereich unattraktiver. Abschließend wurde der Gewichtungsfaktor erhöht, um den Abstand zum Ausgang stärker zu gewichten. Lediglich für die Szenarien ohne Hindernis und mit 40 Personen konnte eine leichte Verbesserung gegenüber Iteration 02 erzielt werden, jedoch keine gegenüber Iteration 03. Dahingegen führte die Iteration zu einer erheblichen Verschlechterung der Verteilung bei den Szenarien mit breitem Hindernis und mit 40 Personen. Die Agenten verteilten sich gleichmäßig über den Bahnsteig, wohingegen die Personen in den Experimenten in der Nähe des Ausganges warteten. Ob durch die Anpassung der Attraktivitätskarten durch die zugehörigen Konstanten sowie der Gewichtungsfaktoren eine Verbesserung erreicht werden kann, ist aufgrund der vorgestellten Ergebnisse zu bezweifeln. Es ist nicht zu erwarten, dass durch eine stärkere Gewichtung der Attraktivitätskarte, welche den Zusammenhang des Abstandes zum Ausgang beschreibt, die Agenten sich wie in den Experimenten verteilen. Der Wertebereich dieser Attraktivitätskarte liegt lediglich im positiven Bereich. Daher sind in dem hinteren Bereich des Bahnsteiges keine abstoßenden Bereiche vorhanden und eine Verteilung in diesen würde weiterhin wahrscheinlich sein.

Zusammenfassend sind die Iteration 02 bis 04 teilweise zum Abbilden des Warteverhaltens von Personen auf dem Bahnsteig nutzbar. Allerdings weist Iteration 04 keine Verbesserung zu den anderen auf. Iteration 02 ist besser für die Szenarien mit 100 Personen und Iteration 03 ist besser für die Szenarien mit 40 Personen geeignet. Da die Anpassungen der Attraktivitätskarte nur für

einzelne Szenarien Verbesserungen herbeiführte und zeitgleich die Verteilung in anderen Szenarien verschlechtert, wird deutlich, dass nicht allein über die Attraktivitätskarten das Modell verbessert werden kann.

Außerdem ist es für das Abbilden des Warteverhaltens entscheidend, dass auch das Ausweichen von Agenten in das Modell aufgenommen wird. In den durchgeführten Simulationen konnten nicht alle Agenten ihre Wartepositionen erreichen, da andere Agenten, die bereits ihre Warteposition erreicht haben, den Durchgang versperren.

In dem Modell konnte zudem nicht abgebildet werden, dass einige Agenten während des Wartens umhergingen, wie es in den Laborexperimenten beobachtet wurde. Bei längerer Wartezeit bewegten sich mehr Personen umher (Küpper und Seyfried 2023b). Inwiefern sich dieses Verhalten auf Anwendungsgebiete auswirkt, bei denen das Warteverhalten von Personen entscheidend ist, ist unklar. Der Einfluss könnte begrenzt sein, da bei Kapazitätsanalysen die Position von Agenten zu bestimmten Ereignissen, wie etwa bei dem Einfahren des Zuges, und bei Räumungssimulation nach Ende der Reaktionszeit entscheidend ist. Stimmt die Verteilung der Agenten zu diesen Zeitpunkten, könnten die Auswirkungen gering sein.

Das entwickelte Modell wurde bislang nur an sehr einfachen Geometrien getestet, die durch eine begrenzte Anzahl von Einflussfaktoren und wenig dynamisches Warteverhalten gekennzeichnet sind. Die zugrunde liegenden Daten stammen aus kontrollierten Laborexperimenten. Diese Einfachheit schränkt die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf komplexere Szenarien ein. Zudem wurden pro Szenario lediglich drei Läufe durchgeführt. Um die Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen, wäre es sinnvoll, mehr Simulationen durchzuführen, wie es beispielsweise im Rahmen von Monte-Carlo-Simulationen üblich ist.

Im Vergleich zu bestehenden Arbeiten ist der Ansatz, mit dem Modellierungsverfahren den Bedarf an Realwelt-Daten für Planungsprozesse zu reduzieren, grundsätzlich sinnvoll. Dennoch zeigen die bisherigen Ergebnisse, dass weitere Forschung notwendig ist, um die Anwendbarkeit des Modells auf realistische und komplexere Szenarien sicherzustellen.

Da das Modell grundsätzlich geeignet ist, um das Warteverhalten von Personen und insbesondere die Wahl der Wartepositionen abzubilden ist eine Erweiterung des Ansatzes denkbar. Eine deutliche Verbesserung ließe sich erzielen, wenn es um die Funktion erweitert wird, dass wartende Agenten anderen Platz machen können. Somit können ungewollte Stauungen vermieden werden. Die Funktion anderen Platz zu machen ist bereits in etablierten Programmen wie crowd:it und Pathfinder vorhanden (accu:rate GmbH 2024; Thunderhead Engineering 2020) und verschiedene Ansätze dafür, wie und ob Agenten nach dem Ausweichen an ihre ursprüngliche Warteposition zurückkehren oder eine neue Warteposition suchen, wurden bereits im wissenschaftlichen Kontext untersucht (Johansson et al. 2015).

Schon die zweite Iteration ist insbesondere geeignet, um die Wartepositionen der Szenarien mit 100 Personen abzubilden. Die Verteilung der Agenten in der Simulation kann die Verteilung der Laborexperimente plausibel abbilden, auch wenn die Agenten im Durchschnitt etwas näher beieinanderstehen, verteilen sie sich ähnlich über den Wartebereich.

Es ist denkbar, dass die Verteilung für die Szenarien mit 40 Personen durch einen anderen Ansatz als durch das Anpassen der Wahrscheinlichkeitskarte, verbessert werden kann. Nicht betrachtet wurde ein zeitlicher Verlauf bei der Wahl von Wartepositionen. Bei einer niedrigen Auslastung wählen die Personen auf dem Bahnsteig Positionen, die in der Nähe der Ausgänge liegen. Erst wenn diese Bereiche eine hohe Personendichte aufweisen, wird auch der hintere Wartebereichs genutzt. Eine Verknüpfung der bereits implementierten Wahrscheinlichkeitskarte und Auswahl der Wartepositionen mit einer Komponente, die die Wartepositionen danach sortiert, welche Positionen zuerst besetzt werden, könnte auch für niedrigere Personenzahlen bessere Ergebnisse erzielen. Um die Regeln für den zeitlichen Verlauf zu identifizieren, könnten die Aufzeichnungen der bereits durchgeführten und hier zur Validierung herangezogenen Laborexperimente auf den zeitlichen Verlauf untersucht werden.

Der zeitliche Verlauf der Wahl der Wartepositionen wäre auch für Kapazitätsanalysen von Personenverkehrsanlagen elementar, um Schwachstellen zu identifizieren und Fahrpläne optimal aufeinander abzustimmen.

Abschließend sollte das entwickelte Modell auf unterschiedliche Geometrien und Personenzahlen angewendet werden, um seine Übertragbarkeit und Robustheit zu prüfen. Zudem sollte das hier implementierte Modell, potenziell mit der vorgeschlagenen Erweiterung, mit anderen Ansätzen zum Abbilden von Warteverhalten auf Bahnsteigen verglichen werden.

7 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Modell zur Simulation des Warteverhaltes von Personen auf Bahnsteigen entwickelt und mithilfe von Laborexperimenten validiert. Das iterative und inkrementelle Vorgehen ermöglichte eine schrittweise Implementierung und Optimierung zentraler Modellbestandteile. Der Fokus lag auf der Verteilung der Wartepositionen.

Das entwickelte Modell wurde anhand von Laborexperimenten von Küpper et. al validiert. Dabei wurden Geometrien ohne Hindernis, mit einem schmalen und mit einem breiten Hindernis betrachtet. Es warteten 40 Personen 2 Minuten oder 4 Minuten und 100 Personen 2 Minuten auf einem Modellbahnsteig. Insgesamt standen 9 Szenarien mit je 3 Läufen für die Validierung zu Verfügung.

Das entwickelte Model konnte in der zweiten Iteration alle Szenarien abbilden. Die Verteilung der wartenden Personen aus den Experimenten wurde damit besonders für die Szenarien mit 100 Personen getroffen. Dies deutet darauf hin, dass die in Küpper et al. beschriebene Attraktivitätskarte gut geeignet ist die Verteilung von Personen in diesen Szenarien abzubilden. Allerdings konnte die zweite Iteration die Verteilung von Wartepositionen bei Szenarien mit 40 Personen nur ungenügend abbilden. Die Personen verteilten sich zu gleichmäßig auf dem Bahnsteig. Insbesondere der starke Einfluss des Abstandes zum Ausgang wurde durch die Modellbildung nicht getroffen.

In der dritten Iteration wurde eine Potenzierung der Wahrscheinlichkeitskarte vorgenommen, um die Verteilung der Personen für die Szenarien mit 40 Personen der Verteilung der Experimente anzunähern. Dies führte zu einer besseren Verteilung. Insbesondere in den Szenarien mit schmalen Hindernis wurden die Verteilungen von Wartepositionen den Experimenten angeglichen. Allerdings führte die dritte Iteration zu einer erheblichen Verschlechterung bei den Szenarien mit 100 Personen. Die Agenten standen zu nah beieinander.

In der vierten Iteration wurde ein alternativer Ansatz verfolgt, bei dem die Konstanten der Formeln zur Erstellung der Attraktivitätskarten sowie die Gewichtungsfaktoren angepasst wurden. Ziel war es, den Einfluss des Abstandes zum Ausgang zu erhöhen und einen größeren abstoßenden Bereich zur Flussvermeidung zu schaffen. Dies führte zu leichten Verbesserungen in den Szenarien ohne Hindernis und 40 Personen, allerdings verschlechterte sich die Modellgenauigkeit für Szenarien mit breiten Hindernissen deutlich. Die Personen verteilten sich zu gleichmäßig und nutzten auch die weit entfernten Bereiche des Bahnsteigs. In dieser Arbeit wurde keine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um die Konstanten und Gewichtungsfaktoren auszuwählen, sondern eine gezielte Anpassung vorgenommen.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass die Attraktivitätskarte der zweiten Iteration bereits gut geeignet war, die Szenarien mit 100 Personen realistisch abzubilden. Die späteren Ansätze erzielten zwar

punktuell Verbesserungen, konnten aber keine durchgängige Optimierung für alle Szenarien erreichen. Eine zielführende Weiterentwicklung könnte in der Erweiterung der zweiten Iteration liegen, etwa durch die Berücksichtigung eines zeitlichen Faktors bei der Auswahl der Wartepositionen. Zudem wäre es wichtig, das Ausweichverhalten der Agenten stärker zu integrieren und das Modell mit Realdaten sowie an weiteren Geometrien zu testen.

Die vorliegende Arbeit bietet mit der entwickelten Attraktivitätskarte eine erste Grundlage für die Modellierung von Warteverhalten. Zukünftige Arbeiten sollten diese Ansätze mit anderen Modellierungsansätzen vergleichen und weiterentwickeln, um das Warteverhalten von Personen für verschiedene Personendichten präziser darzustellen. Hierdurch könnten zukünftig Bahnsteige zur Kapazitätsanalyse und Räumungssimulation ohne die Verwendung von Realdaten simuliert werden.

8 Literaturverzeichnis

- Abdel-Karim, Benjamin M.; Bauer, Kevin; Franzmann, Daniel; Jöntgen, Hendrik; Keller, Katharina; Zeuch, Marcel (2022): Data Science. Best Practices mit Python. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg.
- accu:rate GmbH (Hg.) (2024): crowd:it Dokumentation. Online verfügbar unter https://www.accu-rate.de/wp-content/uploads/2024/06/crowdit_Documentation_de-2.31.0.pdf, zuletzt geprüft am 01.07.2024.
- Berg, Mark Theodoor de (2008): Computational geometry. Algorithms and applications. 3. ed. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Boschetti, Alberto (2018): Python Data Science Essentials. A Practitioner's Guide Covering Essential Data Science Principles, Tools, and Techniques, 3rd Edition. Unter Mitarbeit von Luca Massaron. 3rd ed. Birmingham: Packt Publishing Ltd.
- Bracke, Stefan (2022): Technische Zuverlässigkeit. Datenanalytik, Modellierung, Risikoprognose. 1. Aufl. 2022. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Broy, Manfred; Kuhrmann, Marco (2021): Einführung in die Softwaretechnik. Berlin, Heidelberg: SpringerVieweg (Xpert.press).
- Chraibi, Mohcine; Kratz, Kai; Schrödter, Tobias; The JuPedSim Development Team (2024): JuPedSim. DOI: 10.5281/zenodo.1293771.
- Cordes, Jakob; Schadschneider, Andreas; Nicolas, Alexandre (2024): Dimensionless numbers reveal distinct regimes in the structure and dynamics of pedestrian crowds. PNAS nexus 3(4), pgae120 (2024). doi:10.1093/pnasnexus/pgae120 / pages pgae120. DOI: 10.34734/FZJ-2024-01997.
- Davidich, Maria; Geiss, Florian; Mayer, Hermann Georg; Pfaffinger, Alexander; Royer, Christian (2013): Waiting zones for realistic modelling of pedestrian dynamics: A case study using two major German railway stations as examples. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 37, S. 210–222. DOI: 10.1016/j.trc.2013.02.016.
- DIN 18009-2:2022. Brandschutzingenieurwesen - Teil 2: Räumungssimulation und Personensicherheit.
- Ernst, Bosina (2015): Distribution of passengers on railway platforms.
- Gillies, Sean (2024): Shapely. Shapely documentation. Online verfügbar unter <https://shapely.readthedocs.io/en/stable/>, zuletzt aktualisiert am 19.08.2024.
- Johansson, Fredrik; Peterson, Anders; Tapani, Andreas (2015): Waiting pedestrians in the social force model. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 419, S. 95–107. DOI: 10.1016/j.physa.2014.10.003.
- Kneidl, Angelika (2024): accu:rate Projektreferenzen. Online verfügbar unter <https://www.accu-rate.de/beratung/referenzen/>, zuletzt geprüft am 01.07.2024.

-
- Krstanoski, Nikola (2014): MODELLING PASSENGER DISTRIBUTION ON METRO STATION PLATFORM. In: *IJTTE* 4 (4), S. 456–465. DOI: 10.7708/ijtte.2014.4(4).08.
- Küpper, Mira; Seyfried, Armin (2023a): Identification of social groups and waiting pedestrians at railway platforms using trajectory data. In: *PloS one* 18 (3), e0282526. DOI: 10.1371/journal.pone.0282526,
- Küpper, Mira; Seyfried, Armin (2023b): Waiting in crowded places: influence of number of pedestrians, waiting time and obstacles. In: *Journal of the Royal Society, Interface* 20 (206), S. 20230193. DOI: 10.1098/rsif.2023.0193.
- Lam, William H.K.; Cheung, Chung-Yu; Lam, C. F. (1999): A study of crowding effects at the Hong Kong light rail transit stations. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 33 (5), S. 401–415. DOI: 10.1016/S0965-8564(98)00050-0.
- Olaj, O. F.; Lantschbauer, W. (1977): The Pair Distribution Function of Athermal Model Chains. In: *Ber Bunsenges Phys Chem* 81 (10), S. 985–989. DOI: 10.1002/bbpc.19770811017.
- Pettersson, Pierre (2011): Passenger Waiting Strategies on Railway - Platforms Effects of Information and Platform Facilities -. Case Study Sweden and Japan. Maserthesis.
- Predtečenskij, Vsevolod M.; Milinskij, Anatolij I. (2010): Personenströme in Gebäuden. Berechnungsmethoden für die Projektierung. Erg. Reprint, 1. Aufl. Leipzig: BBV Beilicke-Brandschutz-Verl.
- PTV Group (Hg.) (2024): PTV Vissim & Viswalk 2024 Release Notes. Stand: 2024-07-0.
- Schrödter, Tobias; Chraibi, M. (2020): Modelling waiting behaviour at train stations with cellular automaton.
- Thunderhead Engineering (Hg.) (2020): Pathfinder - User Manual. Version 2020-3.
- Tordeux, Antoine; Chraibi, Mohcine; Seyfried, Armin (2015): Collision-free speed model for pedestrian dynamics. DOI: 10.48550/arXiv.1512.05597.
- Wagoum, A. K.; Chraibi, M.; Zhang, J.; Lämmel, G. (2015): JuPedSim: an open framework for simulating and analyzing the dynamics of pedestrians. In: *3rd Conference of Transportation Research Group of India* 12. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Gregor-Laemmel/publication/289377829_JuPedSim_an_open_framework_for_simulating_and_analyzing_the_dynamics_of_pedestrians/links/568c1ce708aeb488ea2faf1c/JuPedSim-an-open-framework-for-simulating-and-analyzing-the-dynamics-of-pedestrians.pdf.
- Yang, Xiaoxia; Yang, Xiaoli; Wang, Zhenling; Kang, Yuanlei (2018): A Cost Function Approach to the Prediction of Passenger Distribution at the Subway Platform. In: *Journal of Advanced Transportation* 2018, S. 1–15. DOI: 10.1155/2018/5031940.

Anhangsverzeichnis

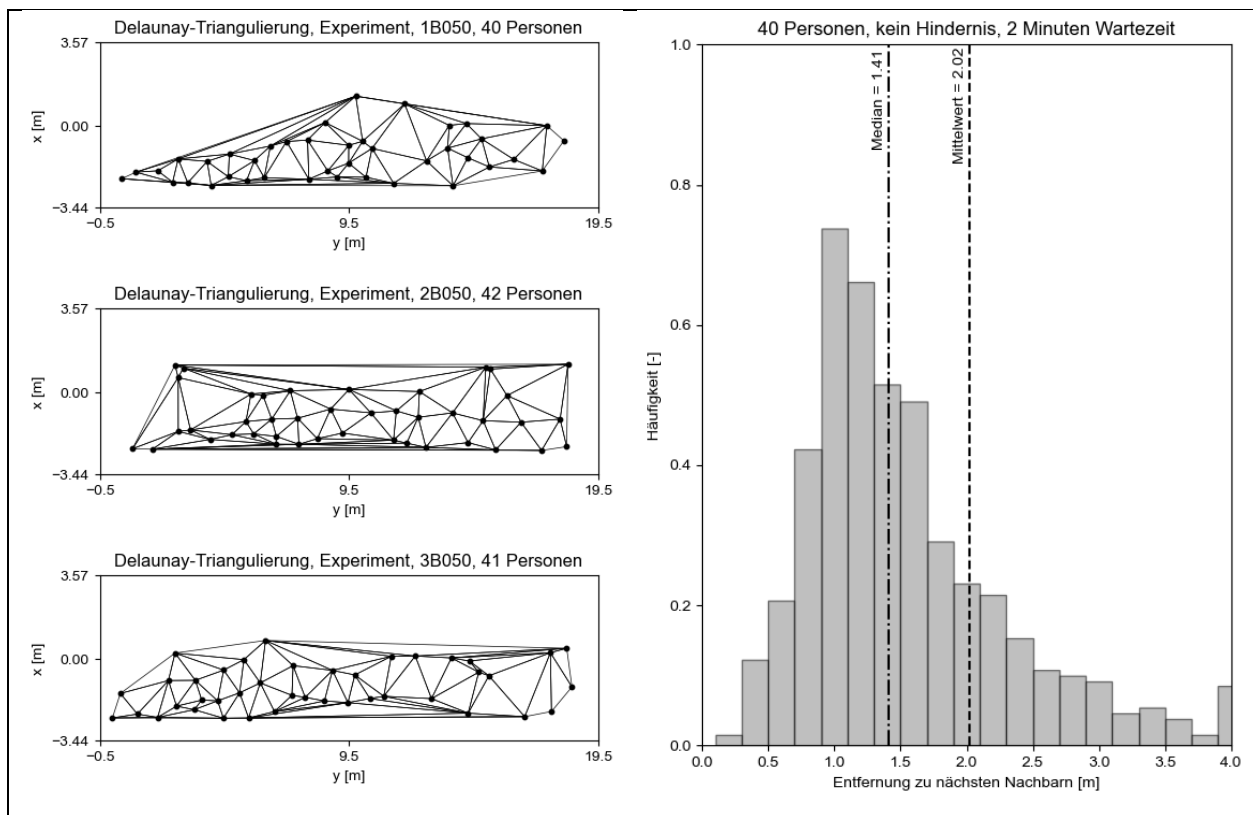
Anhang A	– Ergebnisse der Delaunay-Triangulierung	ii
Anhang A.1	Experimente	ii
Anhang A.2	Iteration 02	vii
Anhang A.3	Iteration 03	xii
Anhang A.4	Iteration 04	xvi
Anhang A.5	Zusammenfassung	xxi
Anhang B	– Ergebnisse der Pair Distribution Function	xxii
Anhang B.1	Experimente	xxii
Anhang B.2	Iteration 02	xxvi
Anhang B.3	Iteration 03	xxix
Anhang B.4	Iteration 04	xxxiii
Anhang B.5	Zusammenfassung	xxxvii
Anhang C	– Modell [Auf Datenträger]	
Anhang D	– Simulationsergebnisse [Auf Datenträger]	
Anhang E	– Auswertung Laborexperimente [Auf Datenträger]	

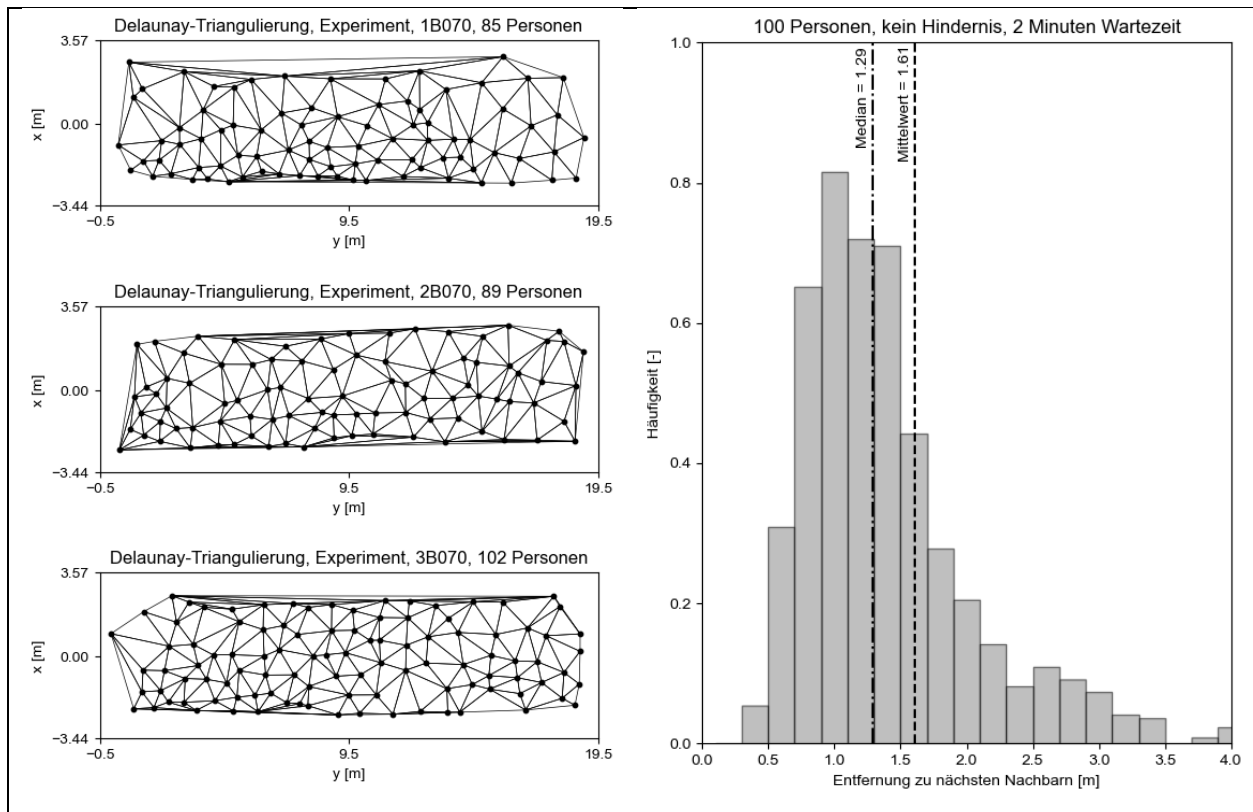
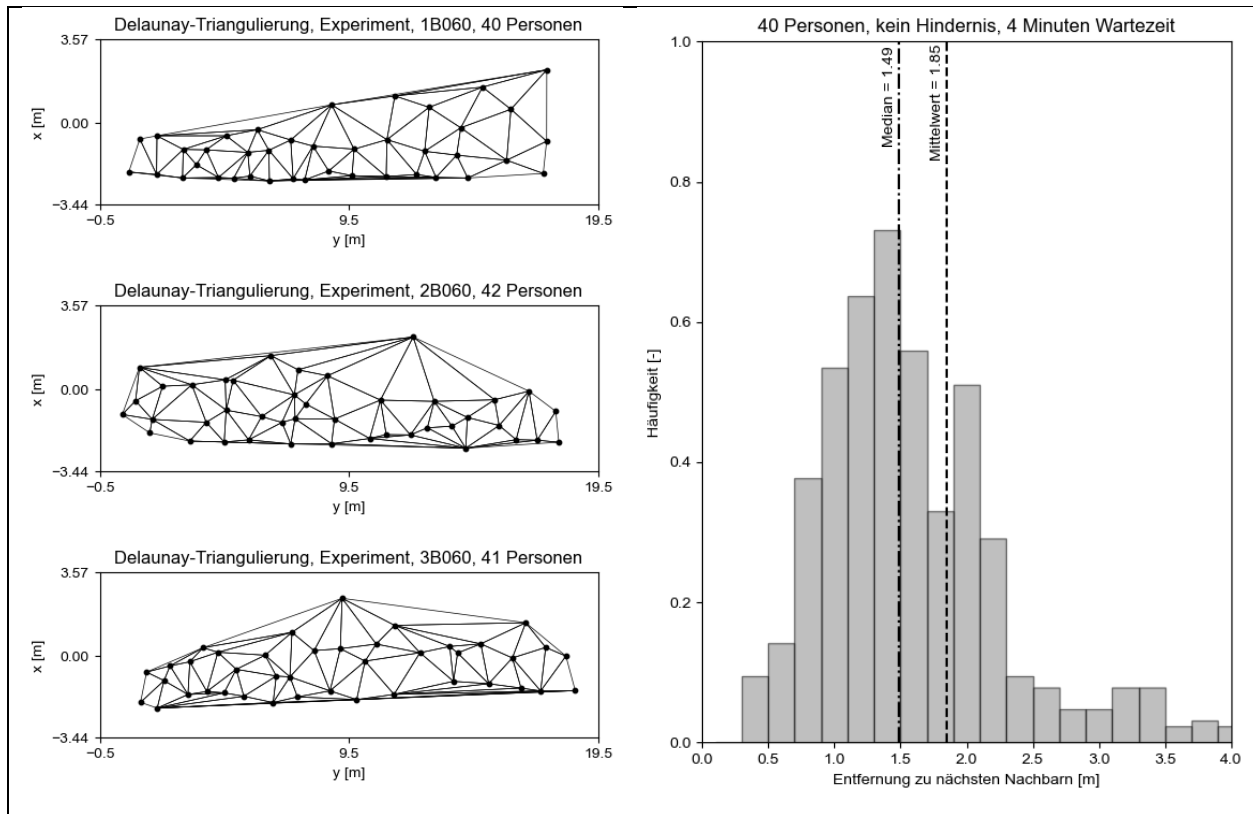
Anhang A – Ergebnisse der Delaunay-Triangulierung

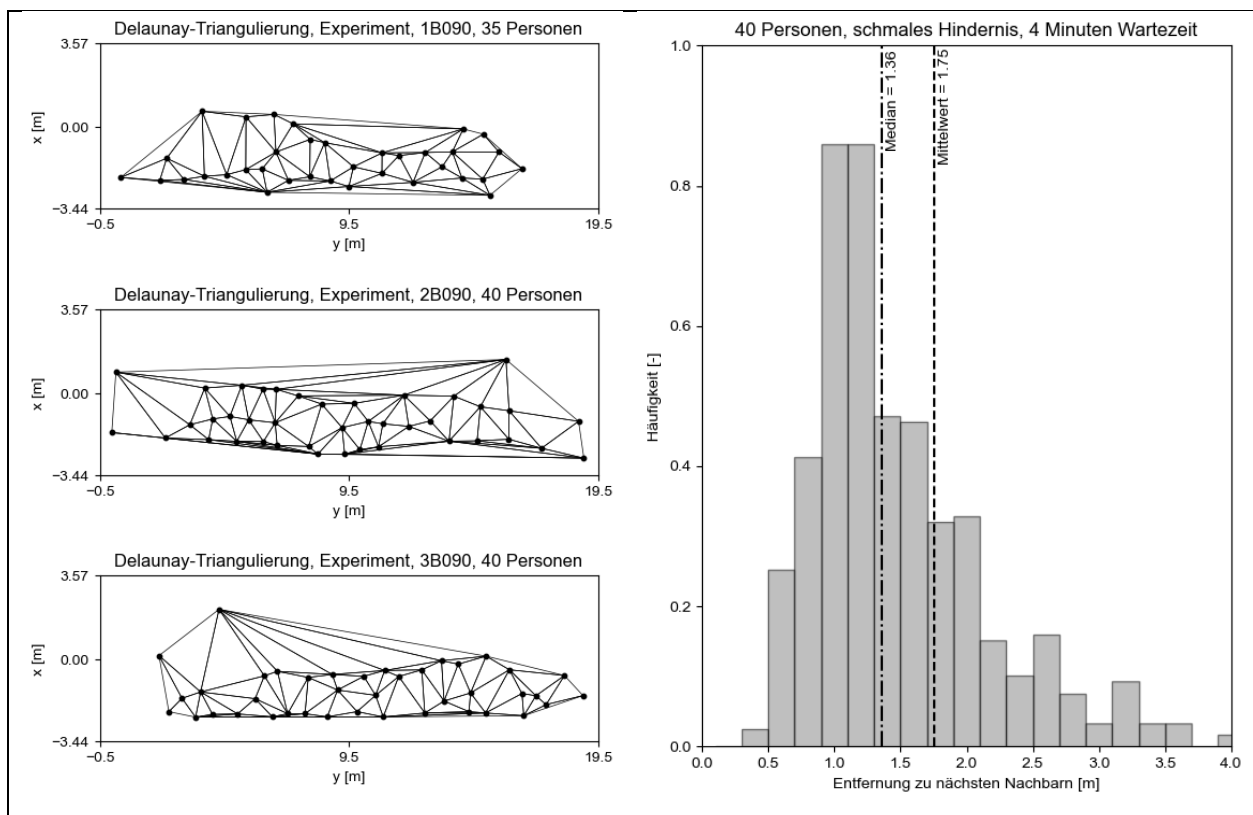
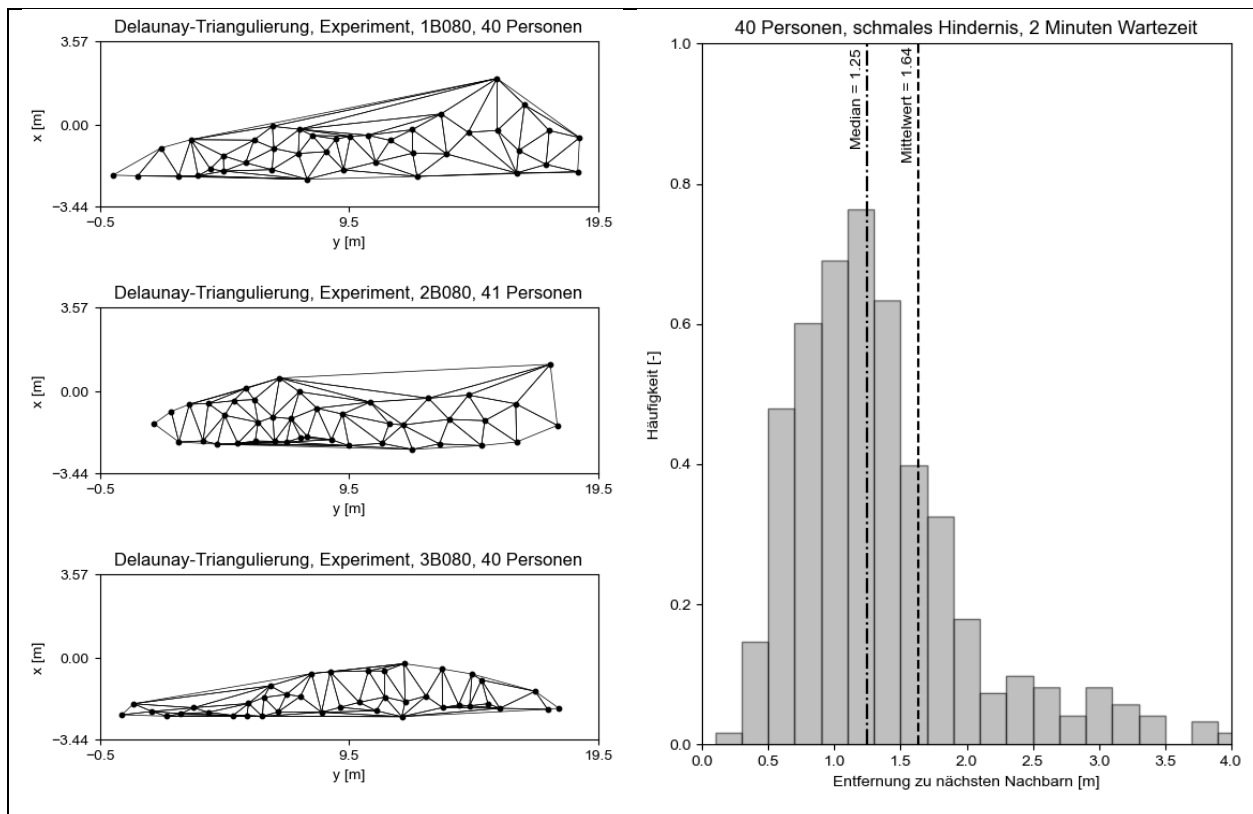
Im Folgenden werden die Ergebnisse der Delaunay-Triangulierung für die neun Szenarien präsentiert. Jedes Szenario wurde in drei Durchläufen untersucht, deren Ergebnisse mithilfe der Delaunay-Triangulierung ausgewertet und visualisiert wurden. Ein Histogramm zeigt für jedes Szenario die Verteilung der Abstände zu den nächsten Nachbarn.

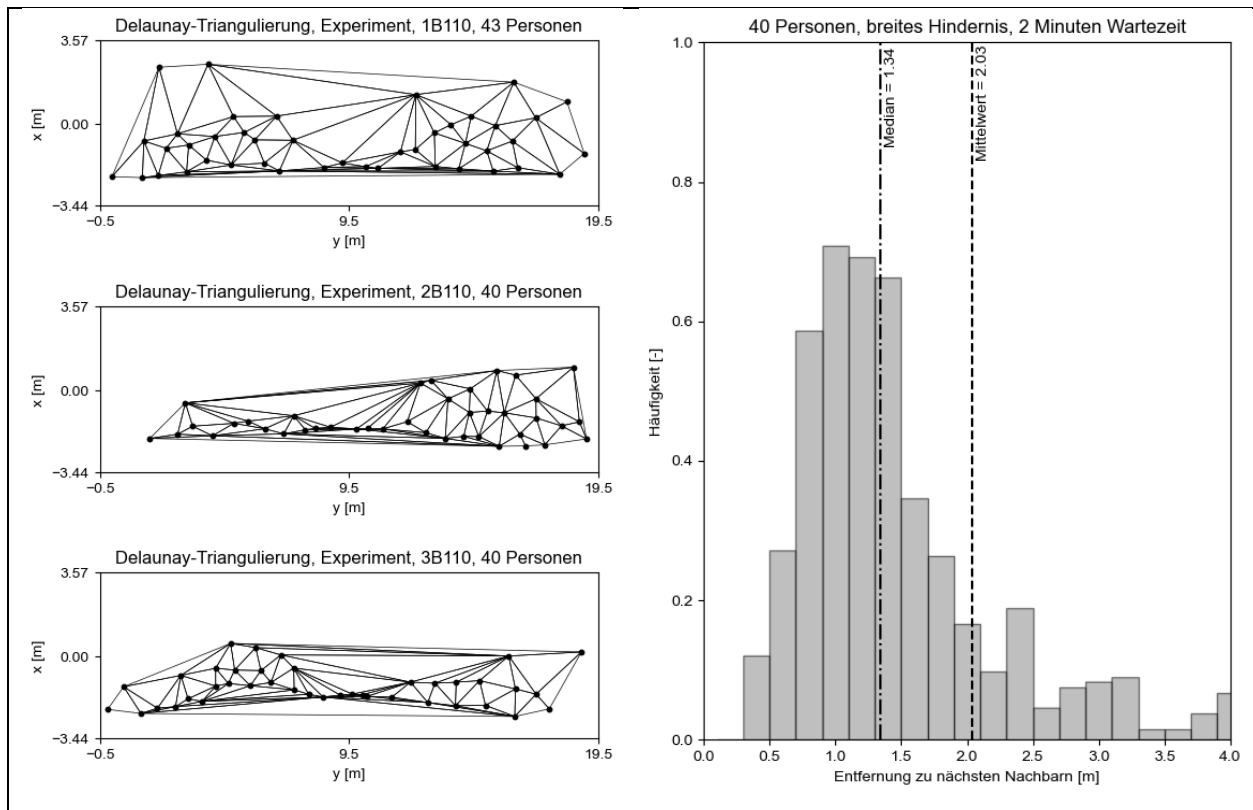
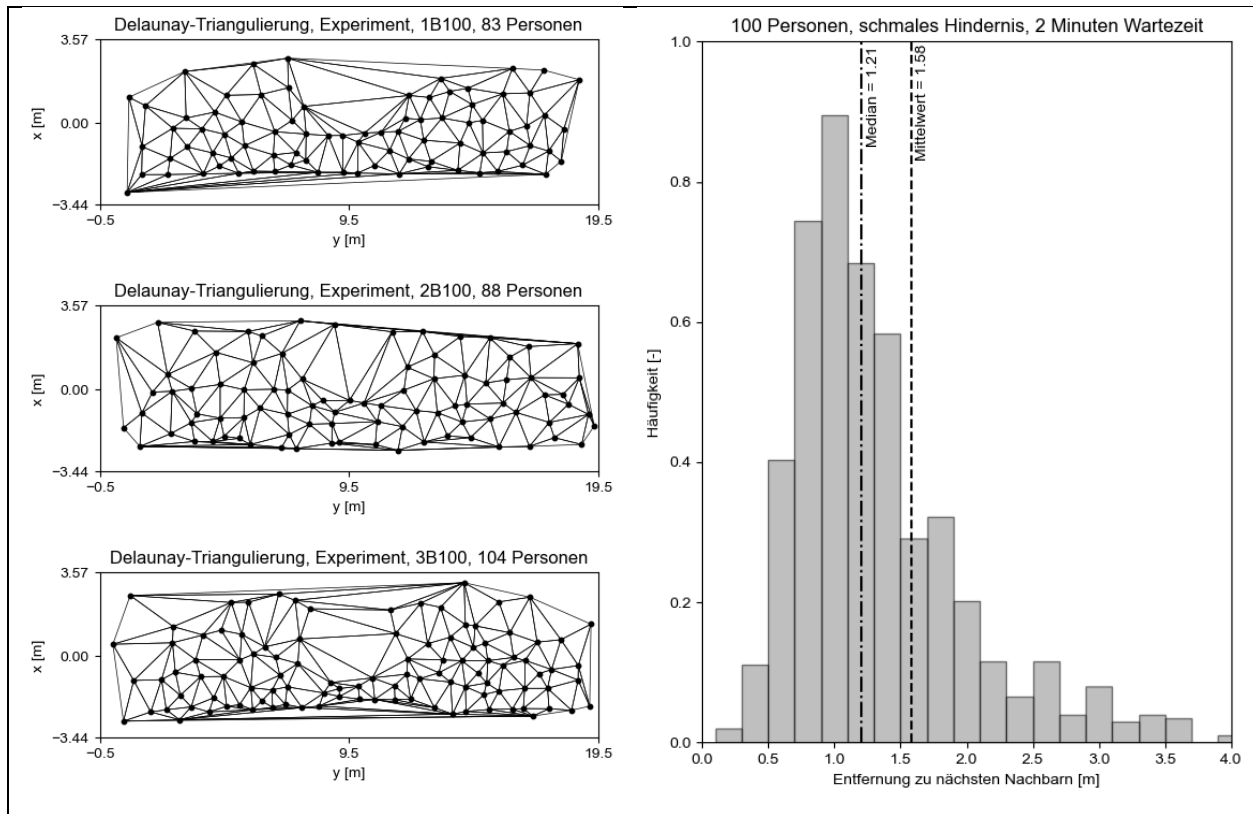
Anhang A.1 Experimente

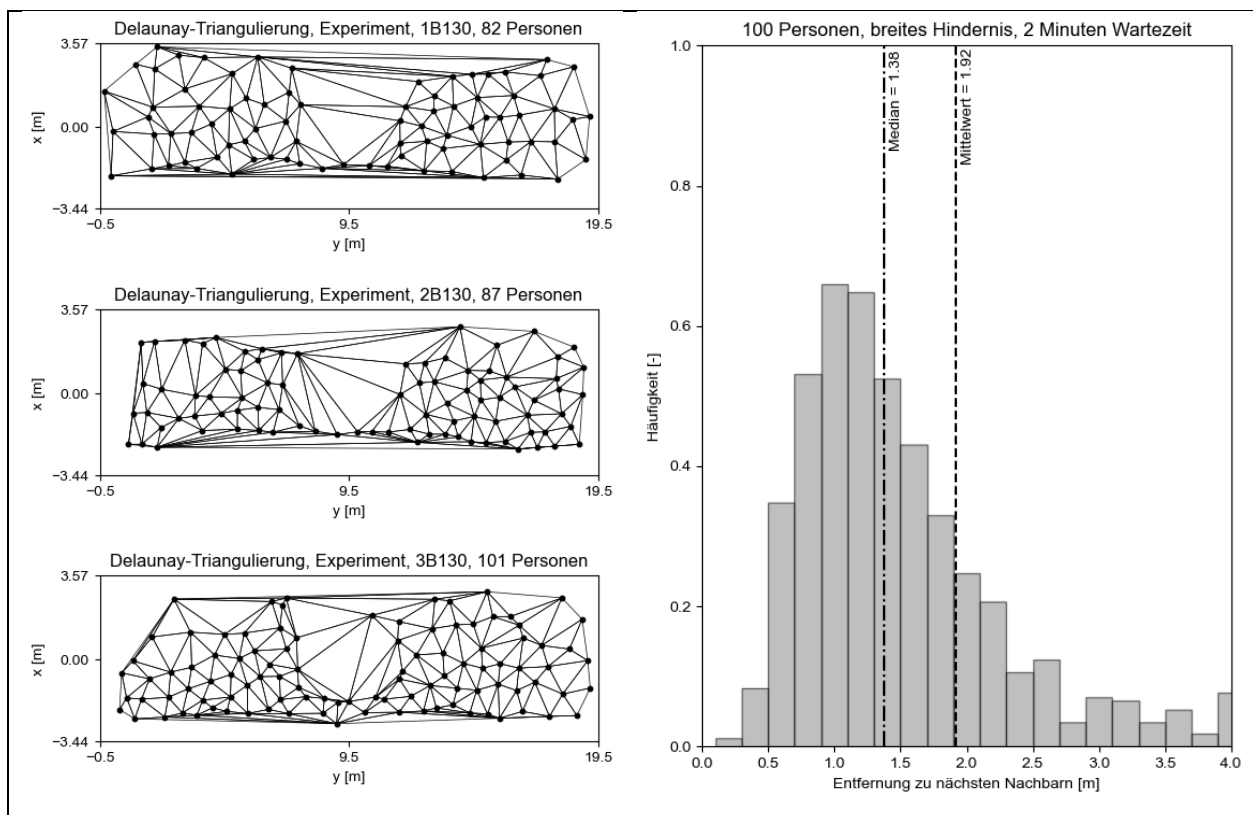
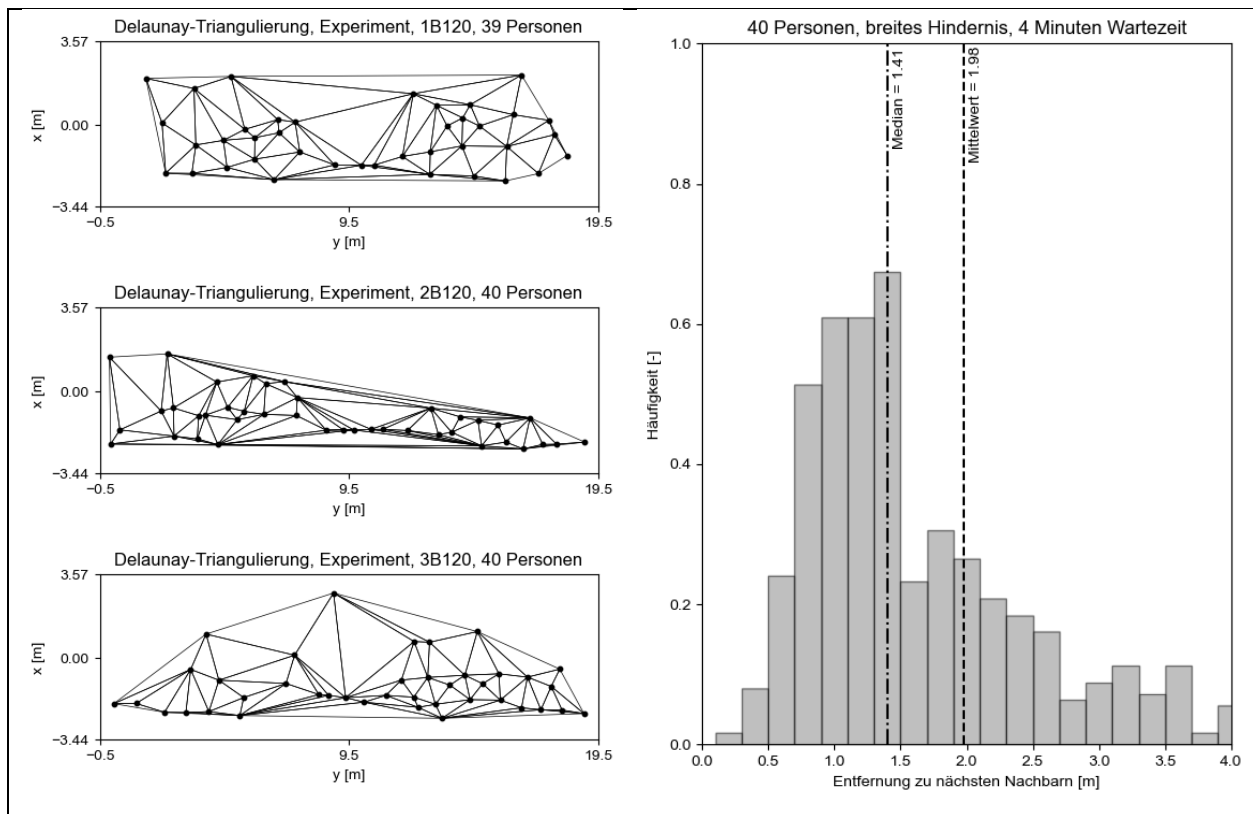
Im Folgenden sind die Ergebnisse der Delaunay-Triangulierung für die Laborexperimente dargestellt.





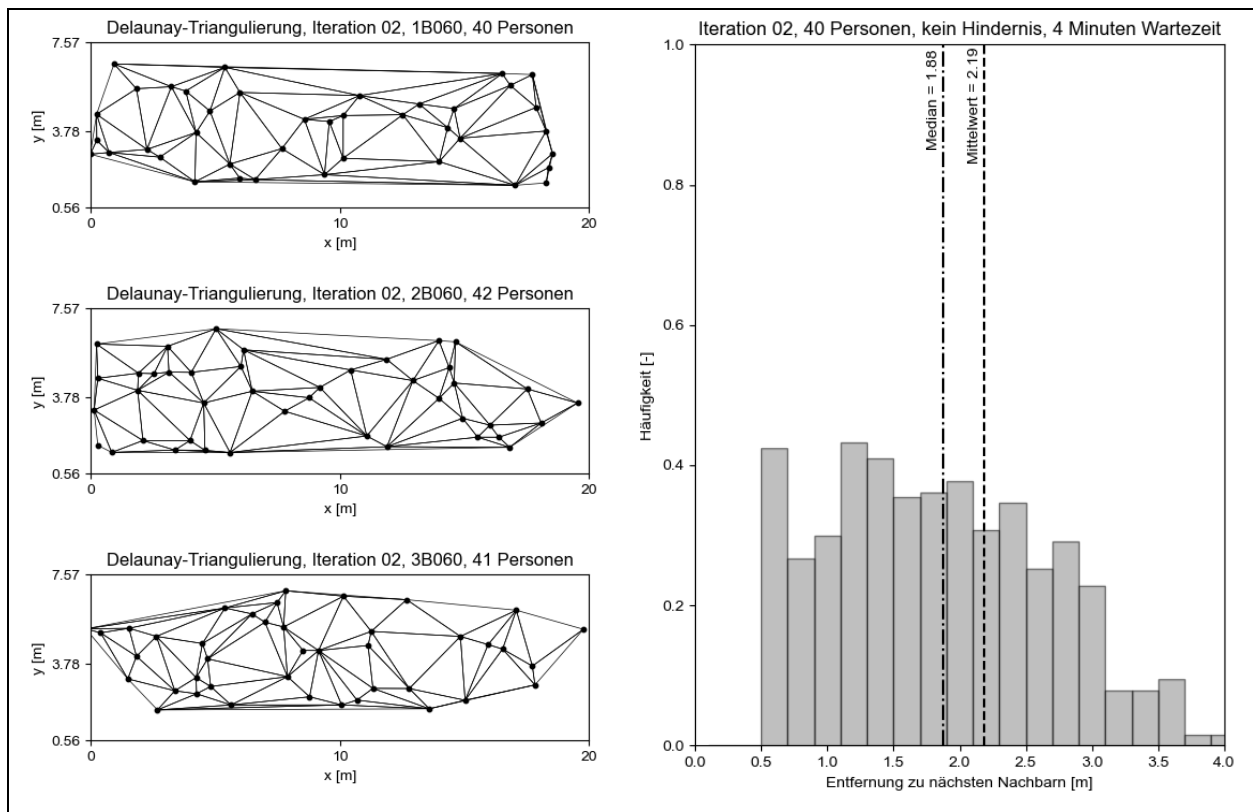
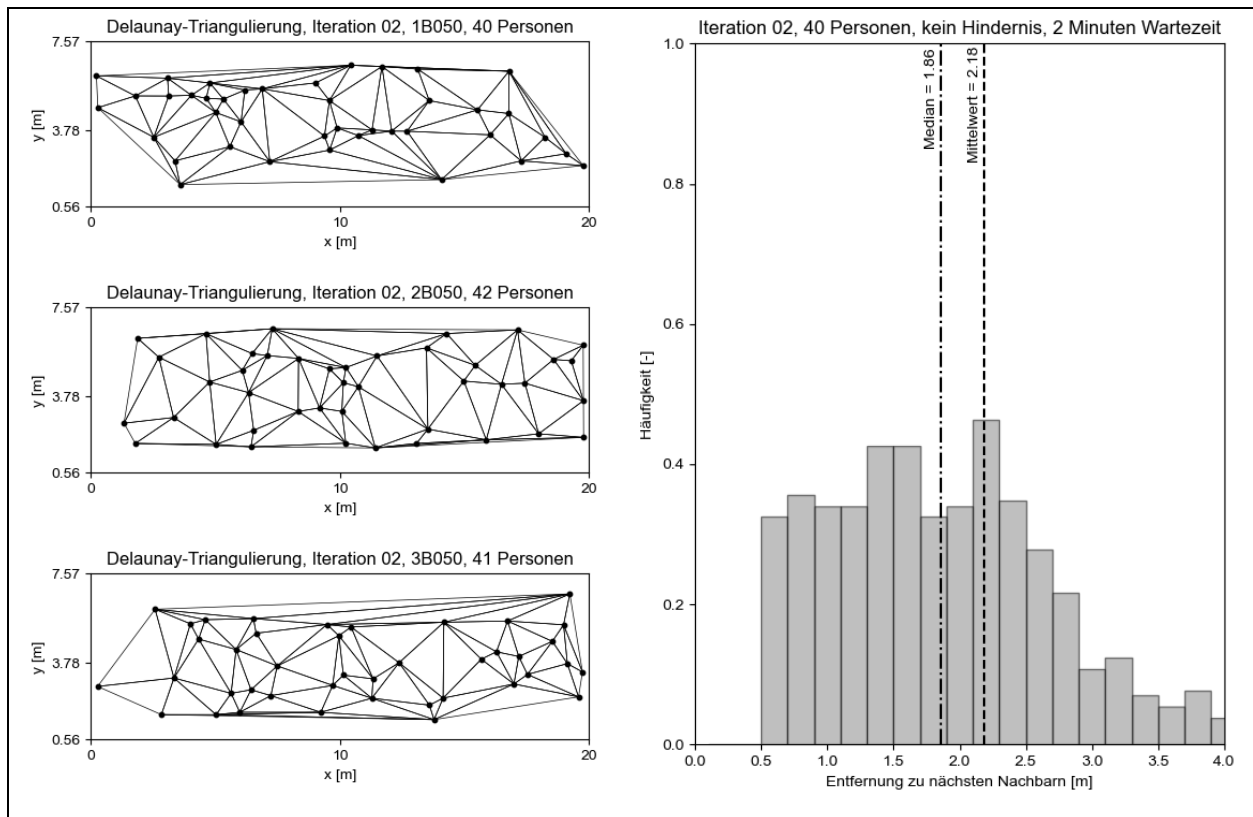


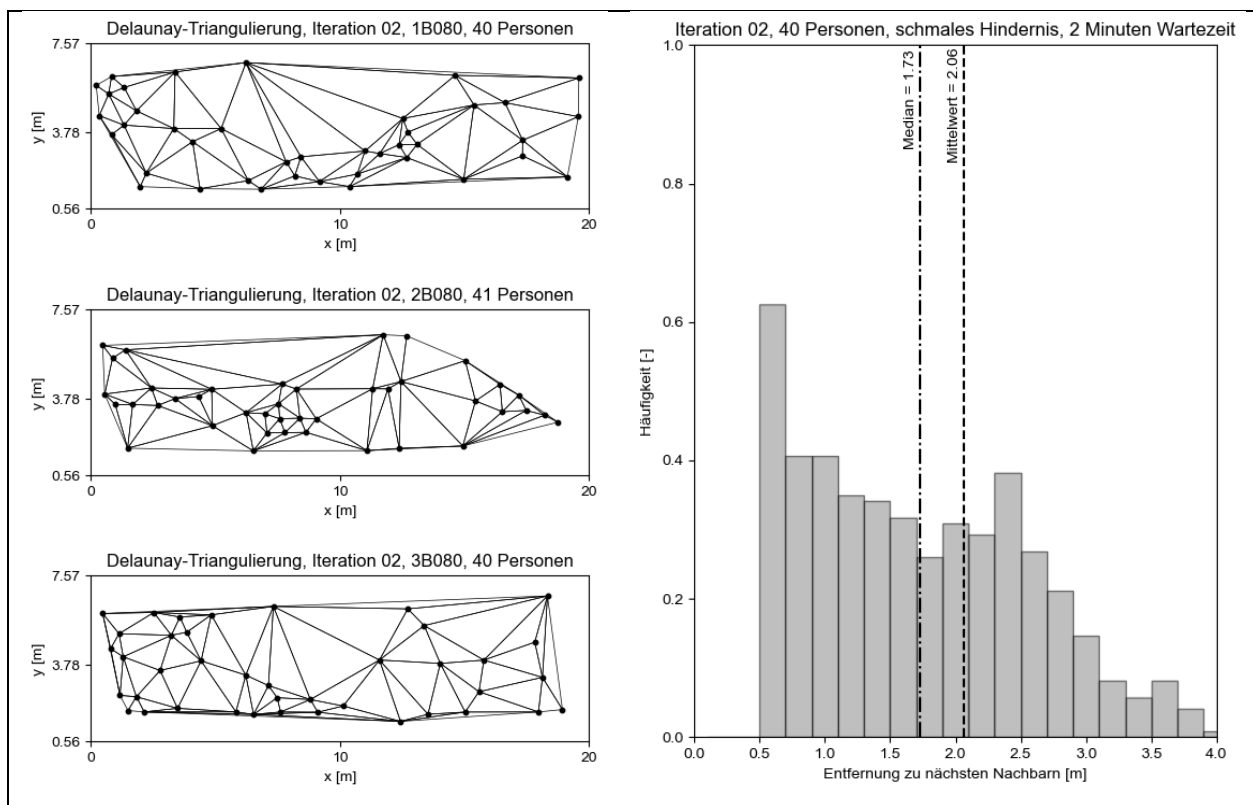
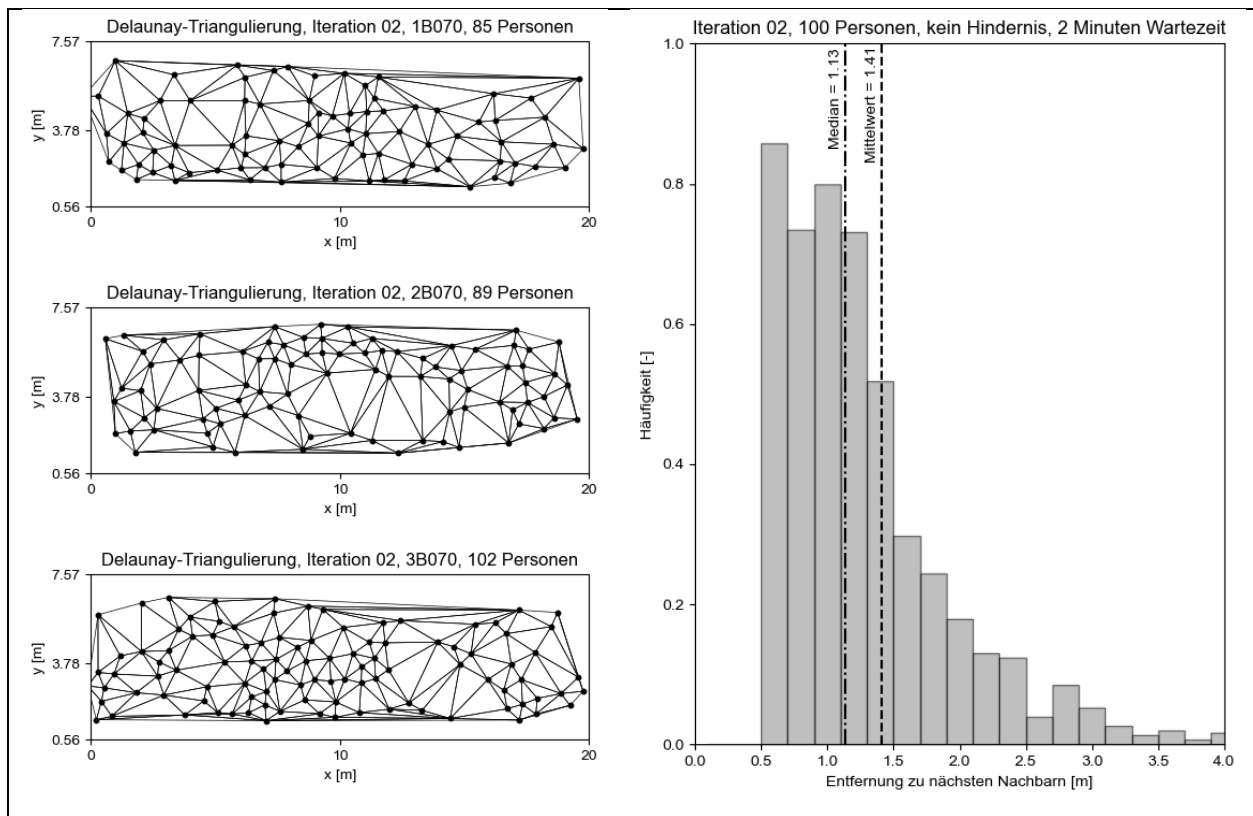


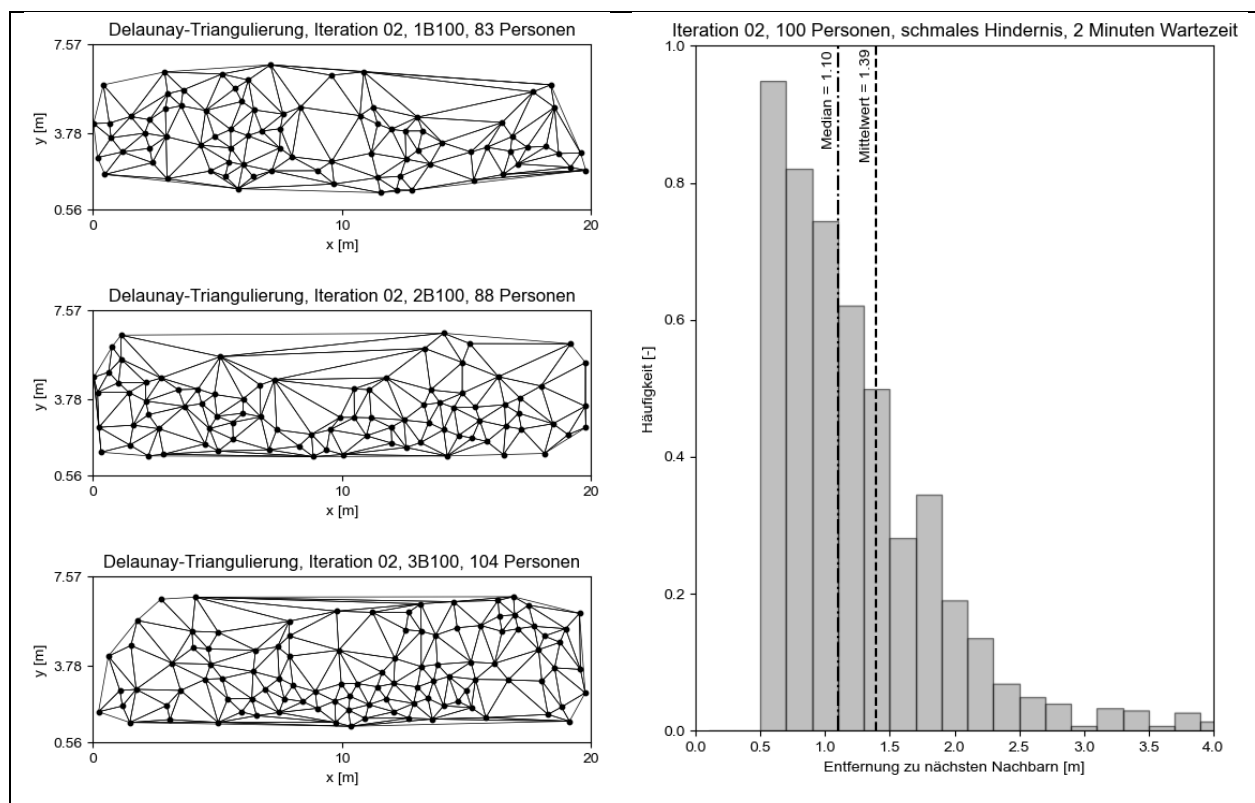
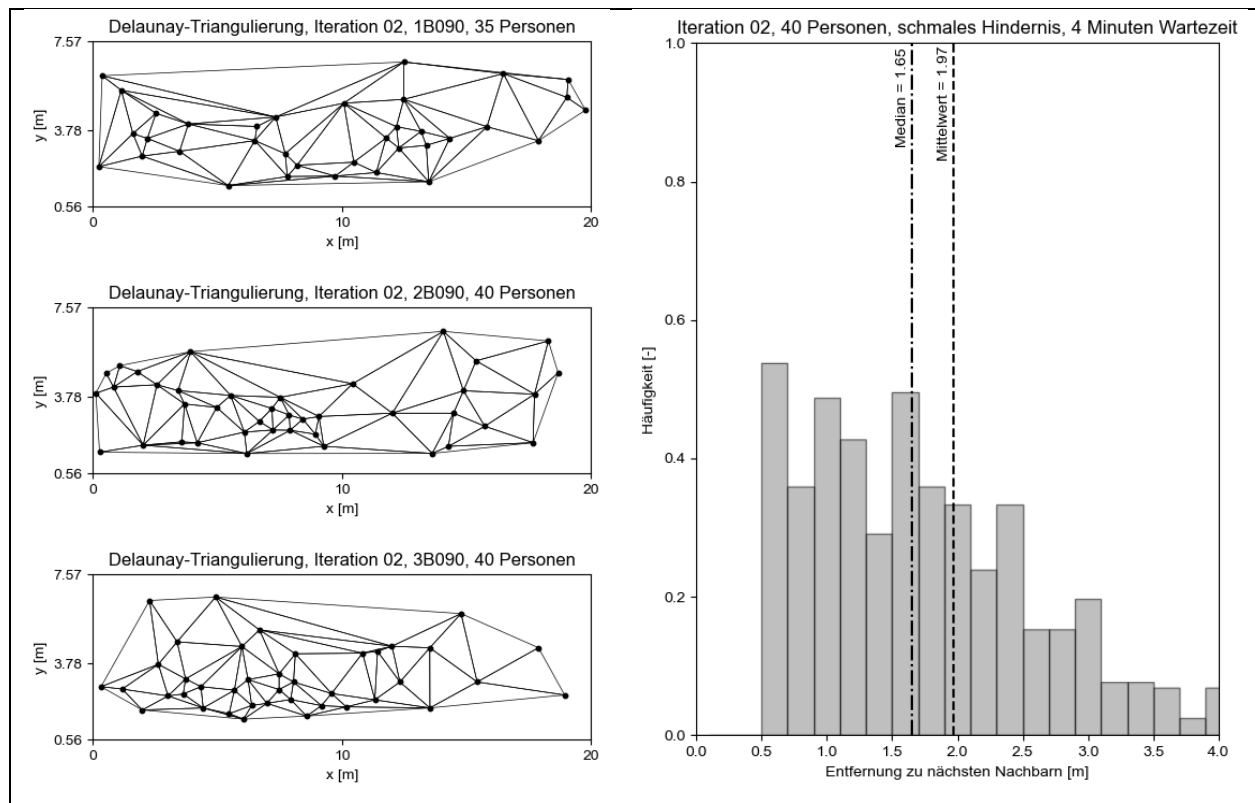


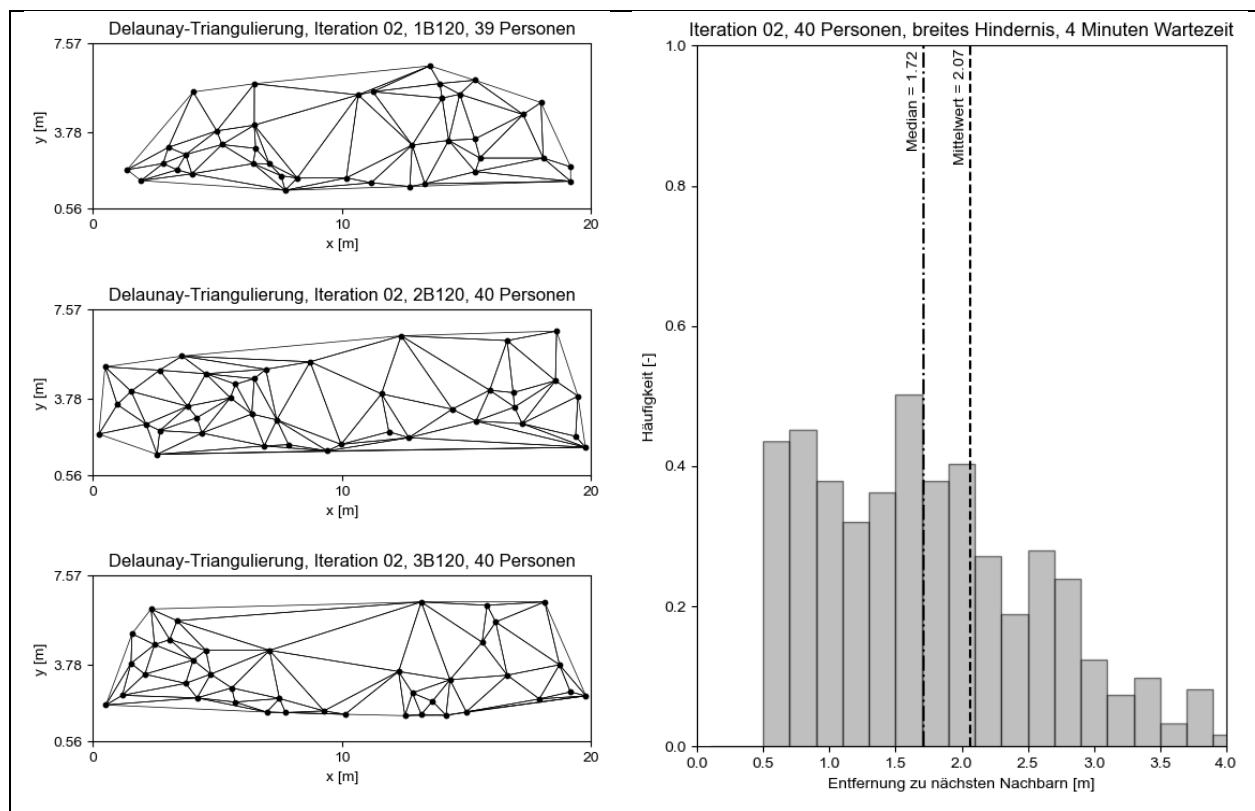
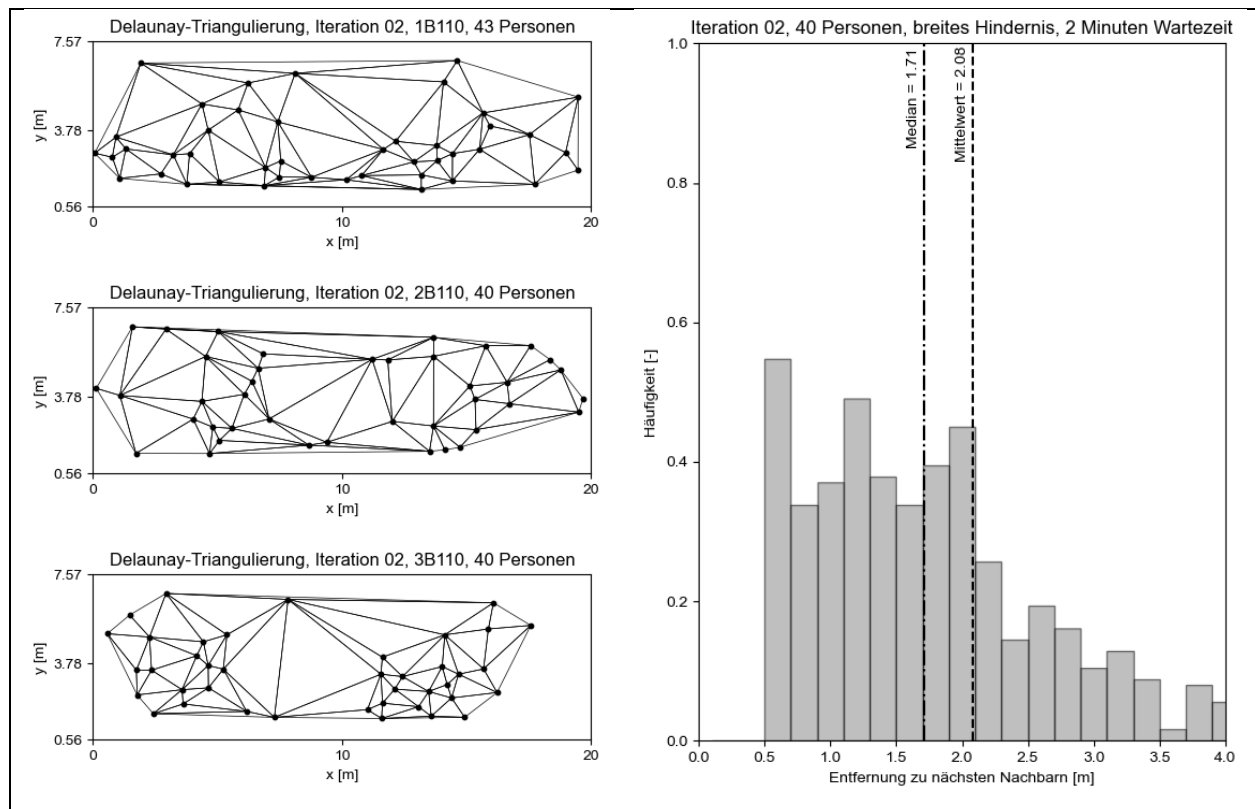
Anhang A.2 Iteration 02

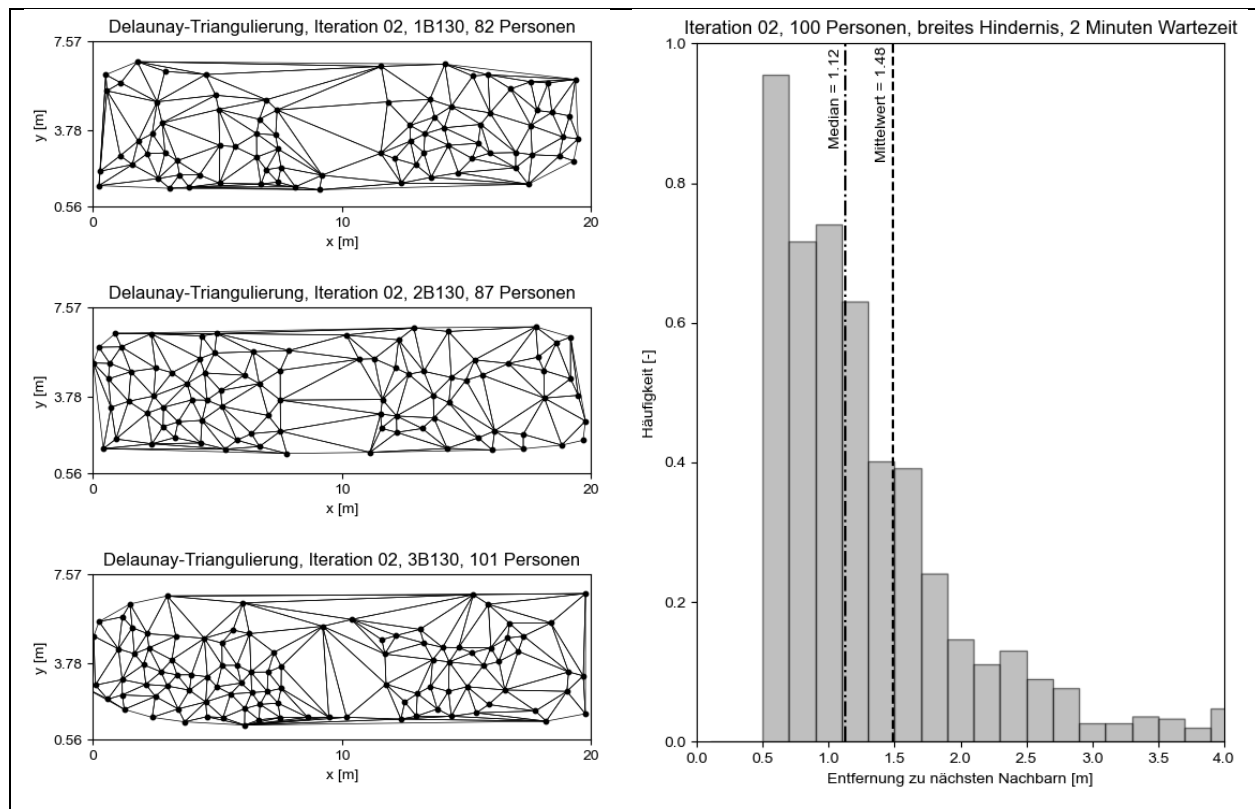
Nachfolgend sind die Ergebnisse der zweiten Iteration dargestellt.





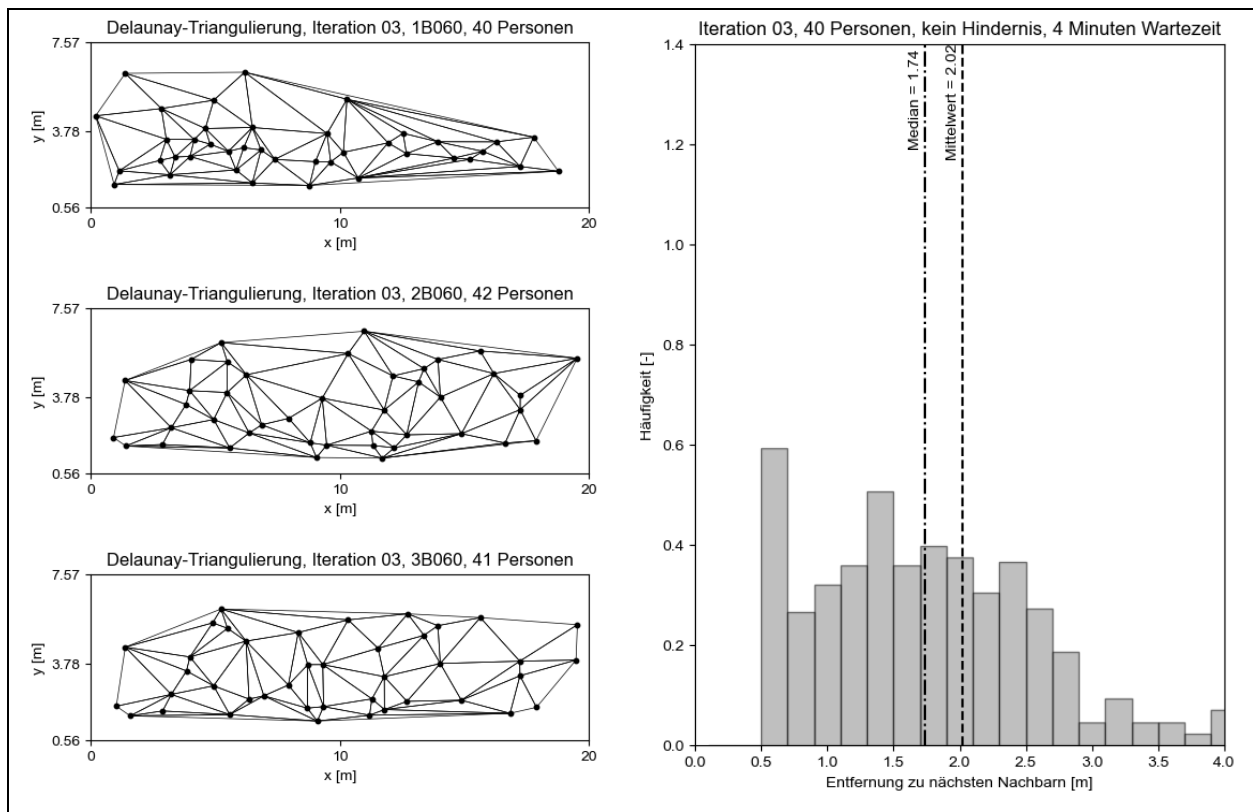
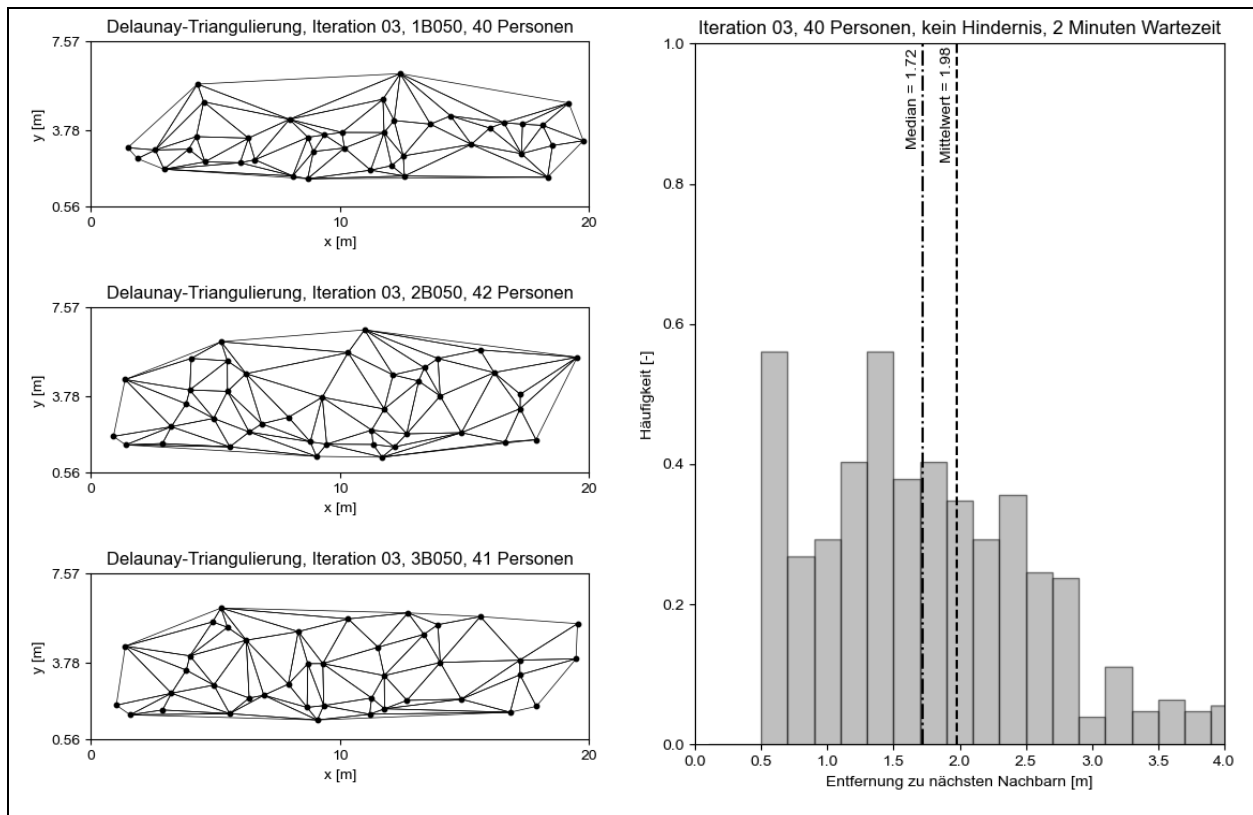


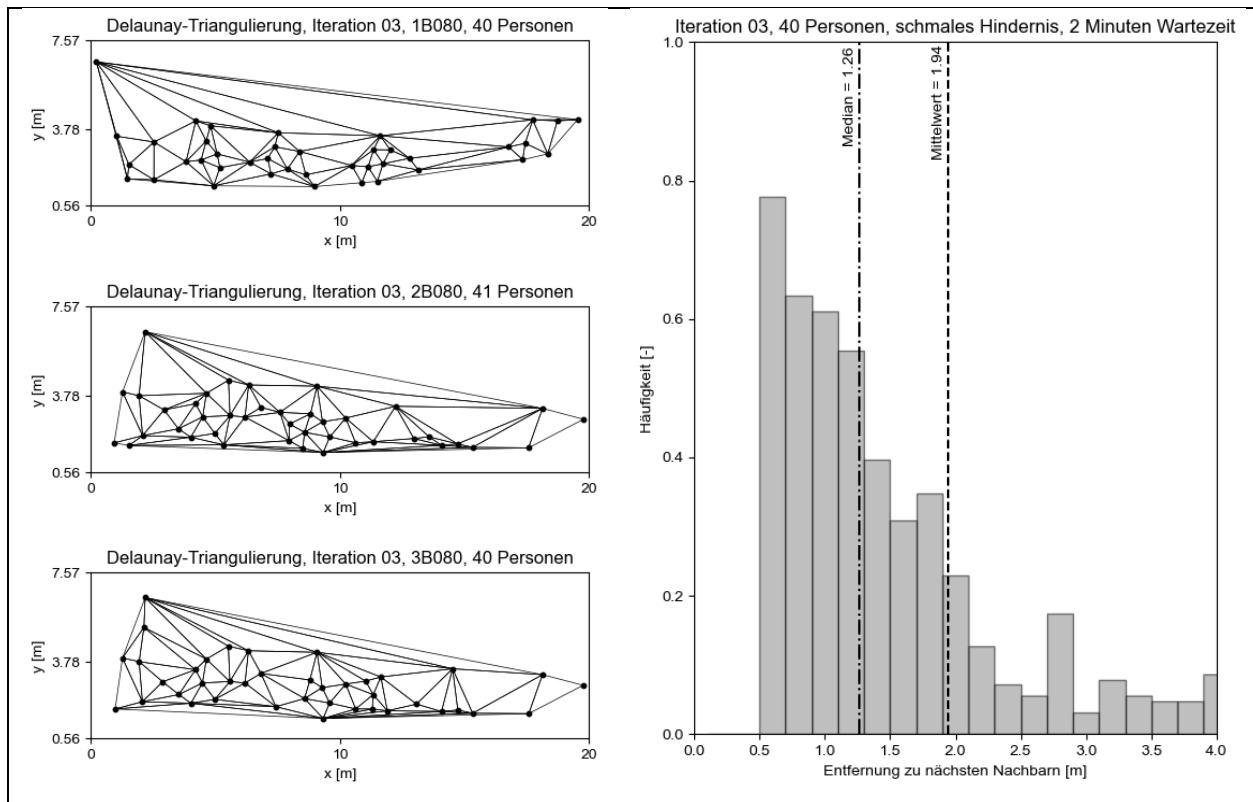
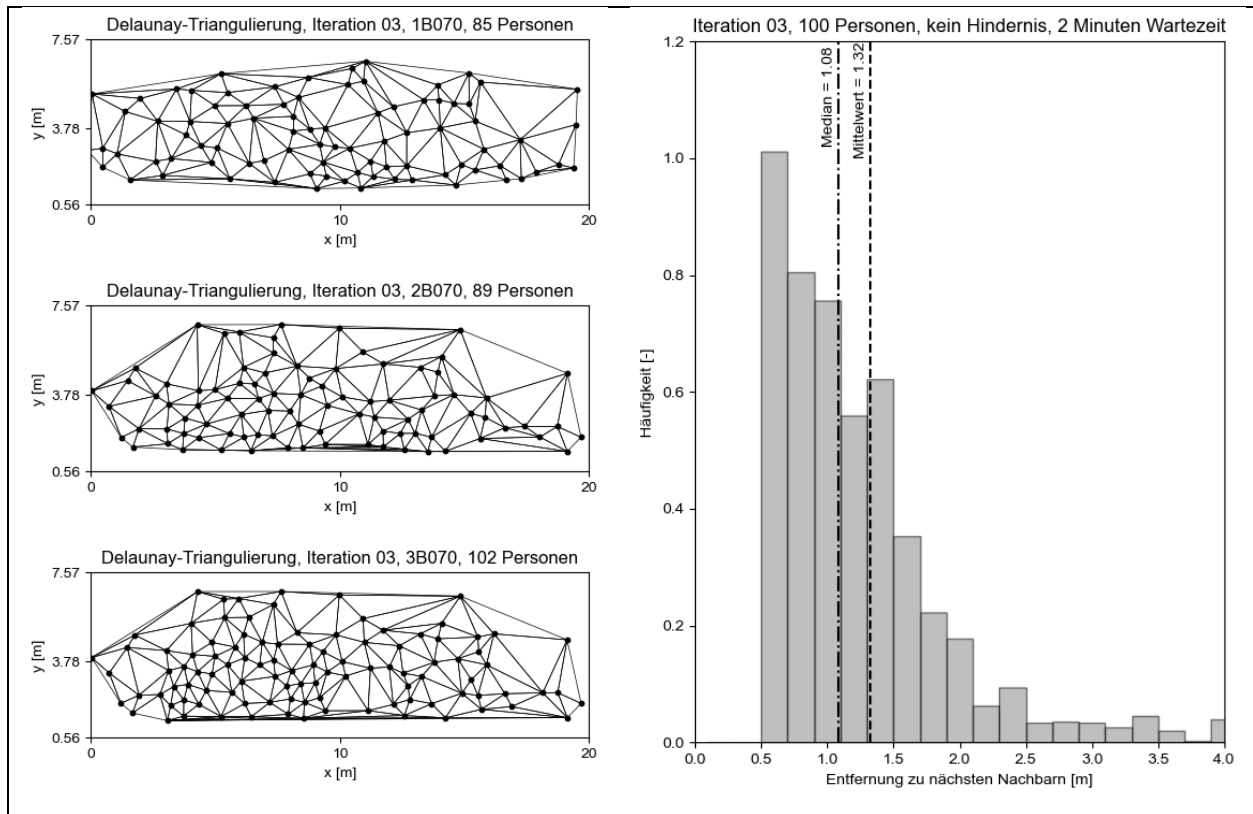


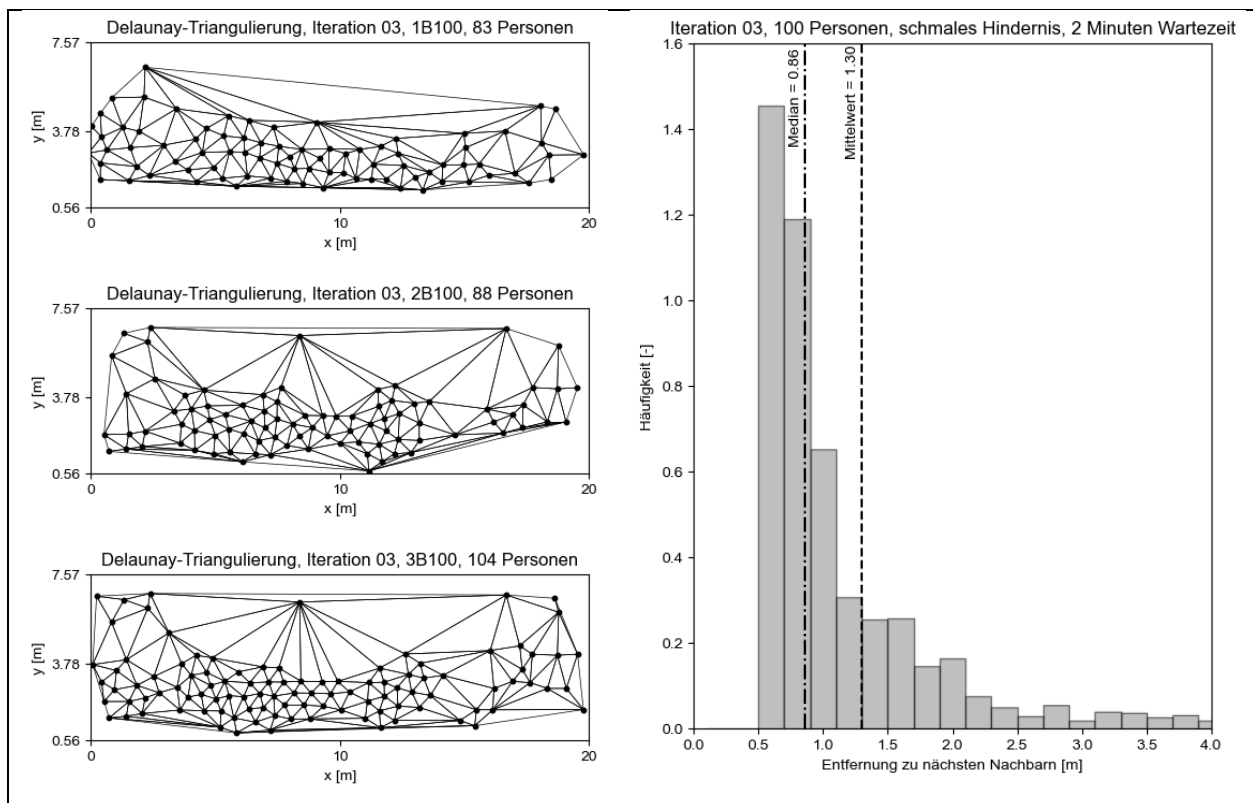
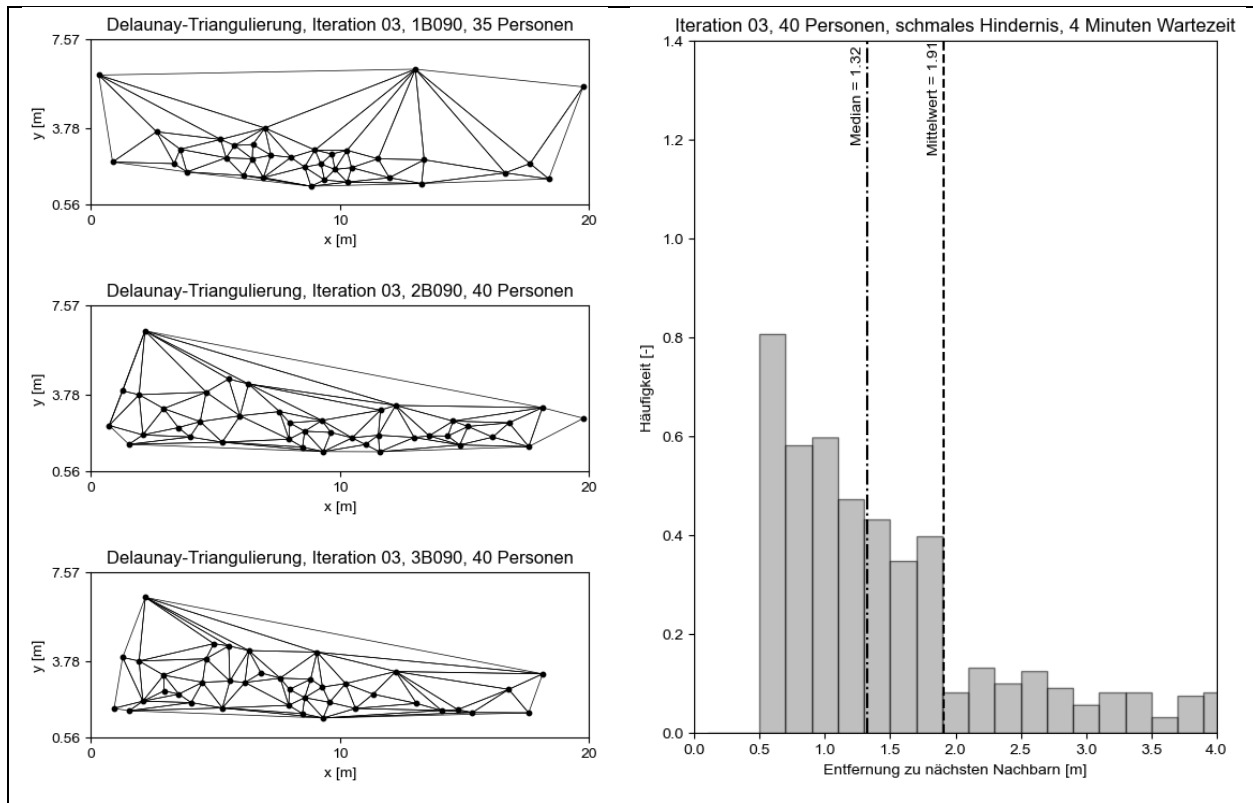


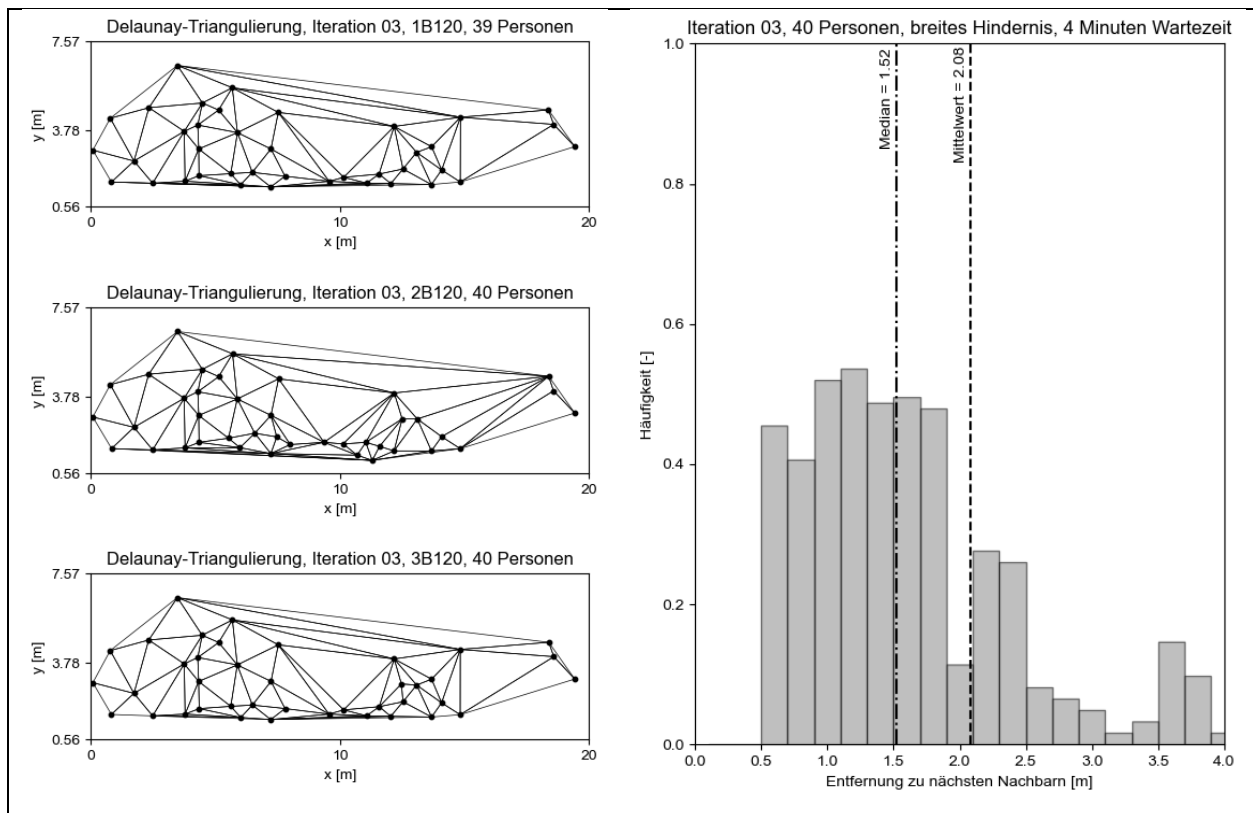
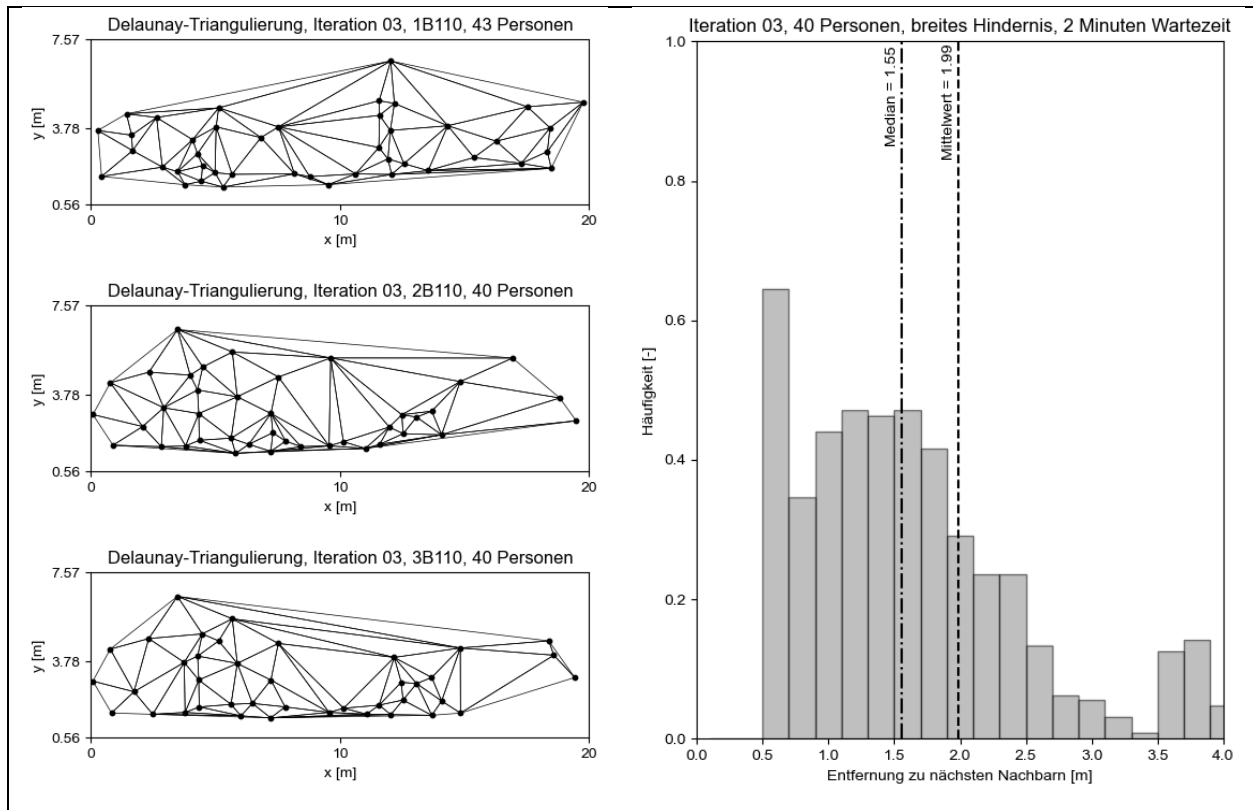
Anhang A.3 Iteration 03

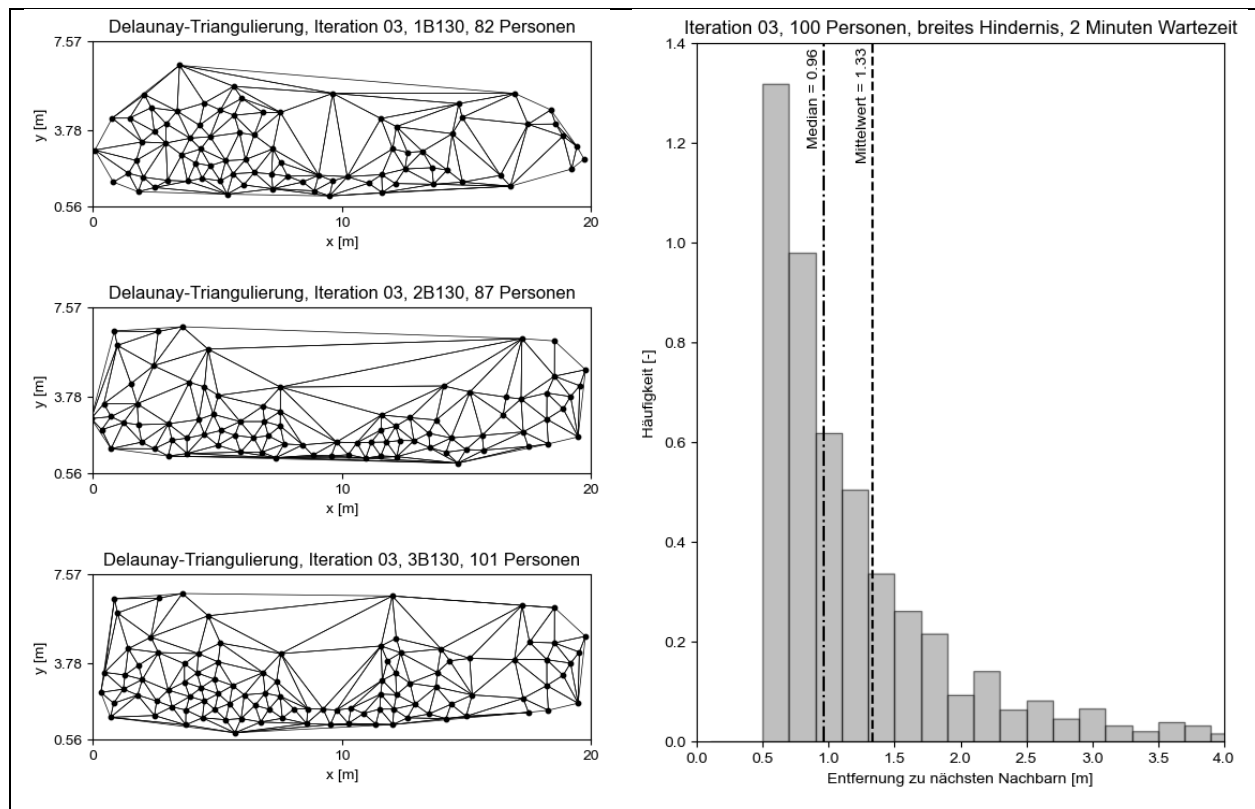
Nachfolgend sind die Ergebnisse der dritten Iteration dargestellt.





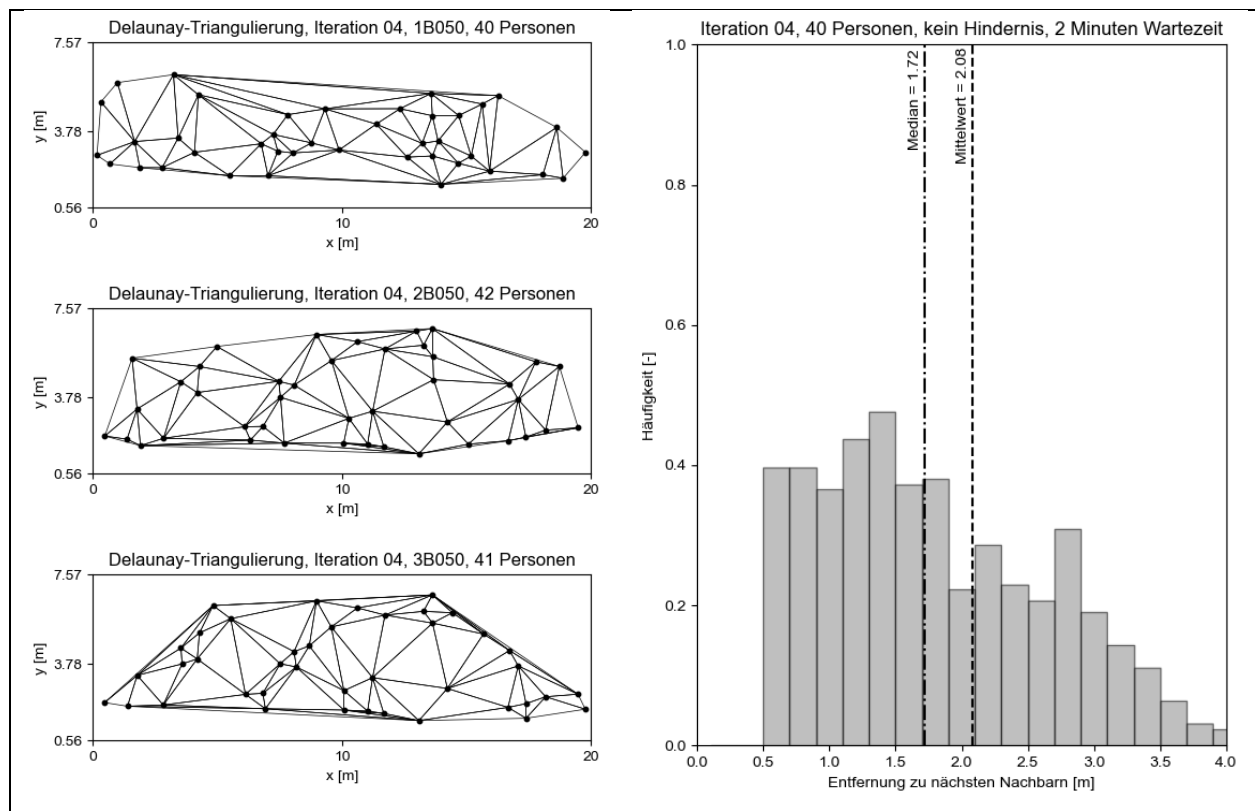


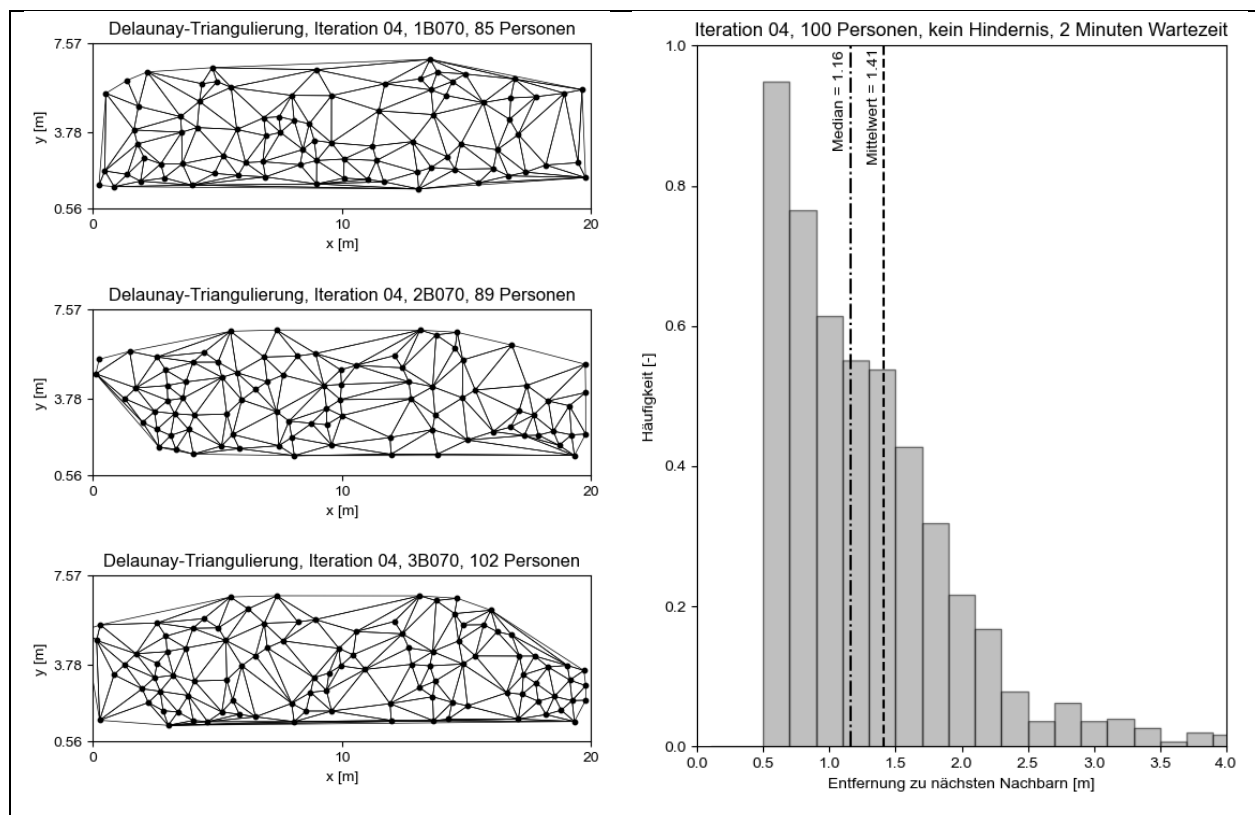
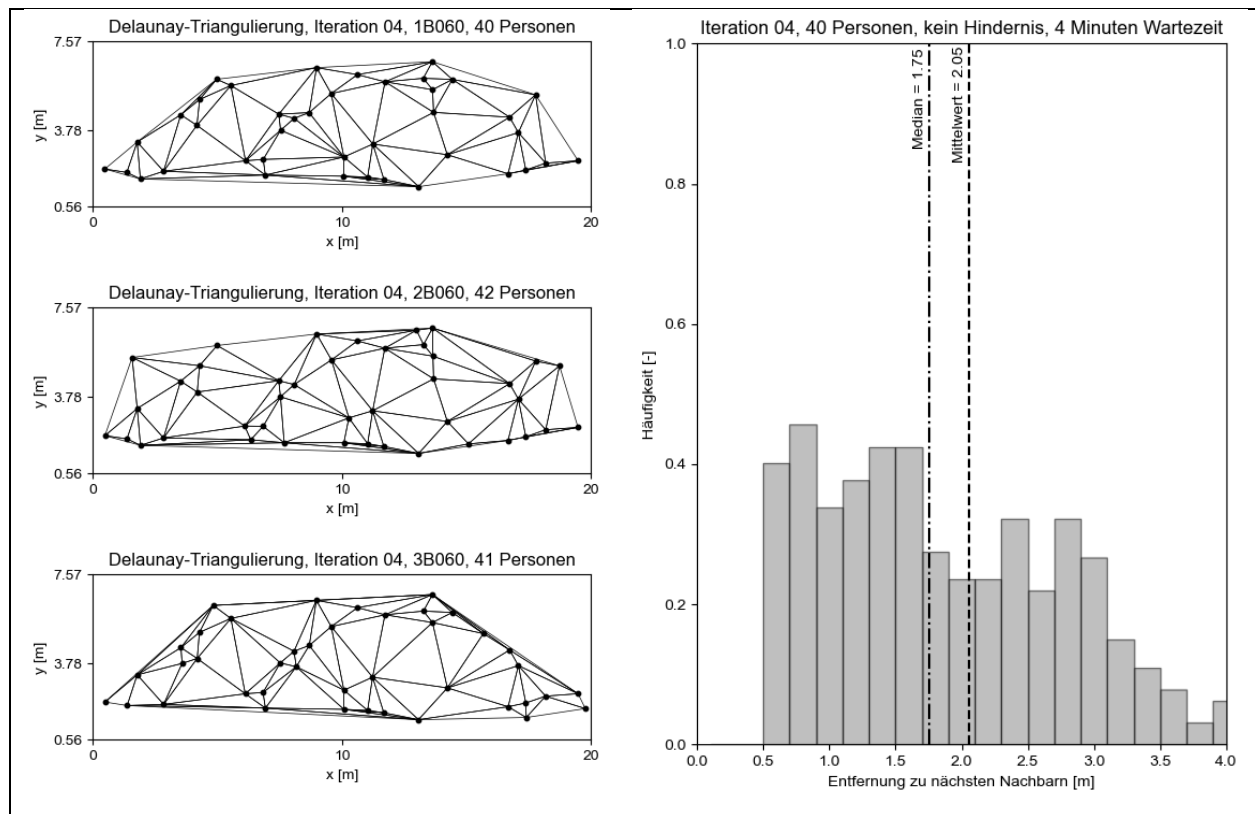


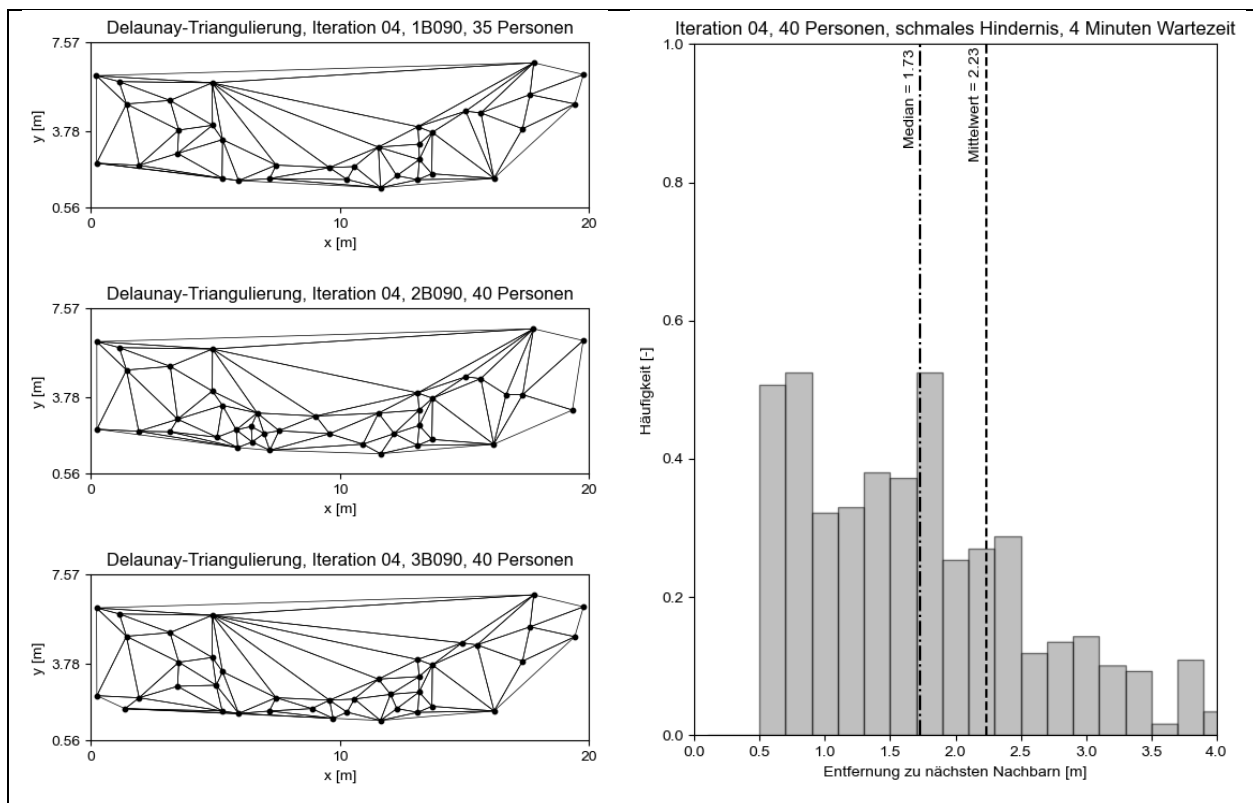
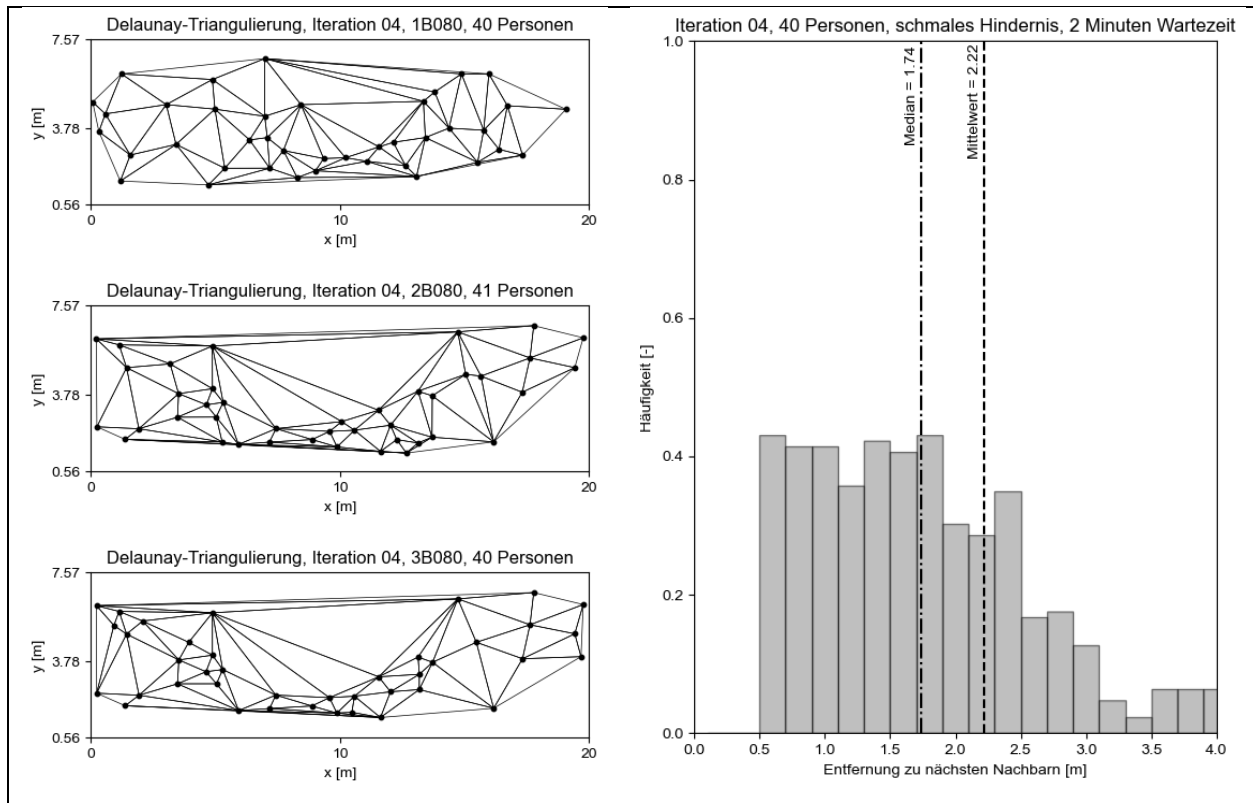


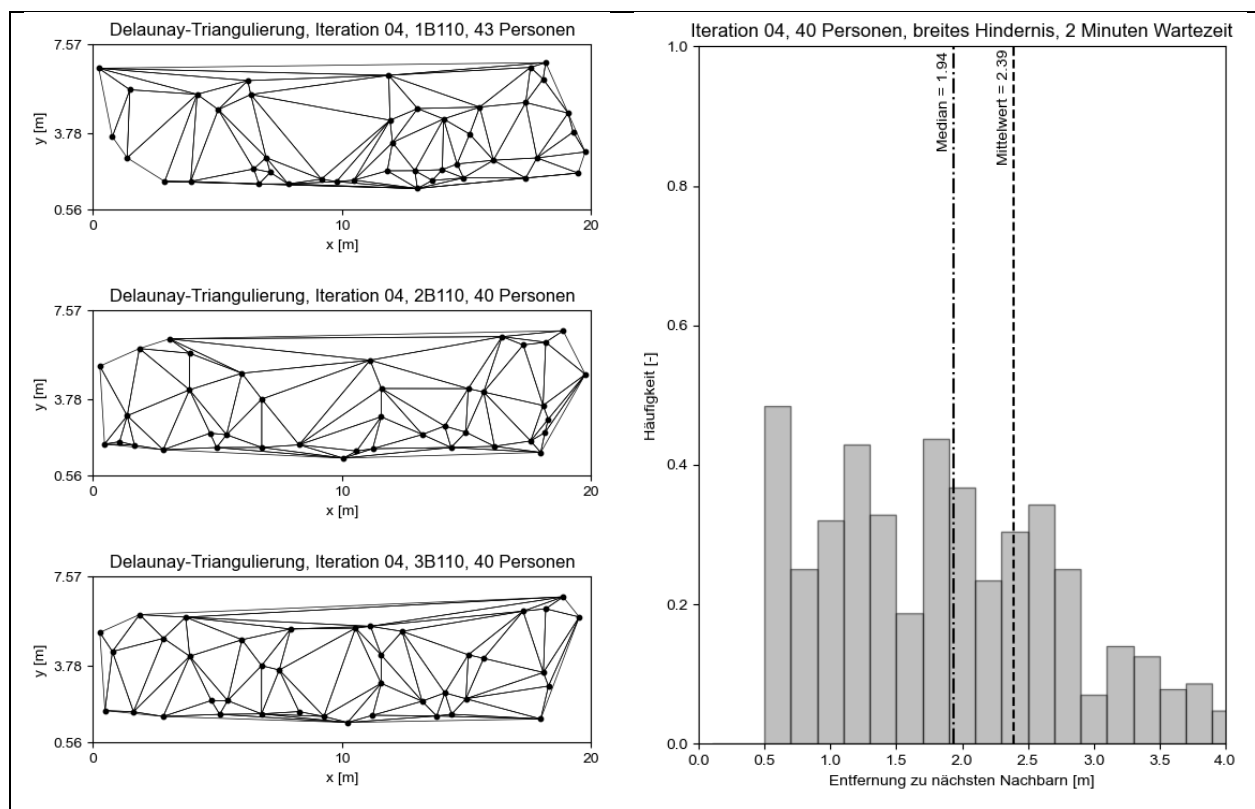
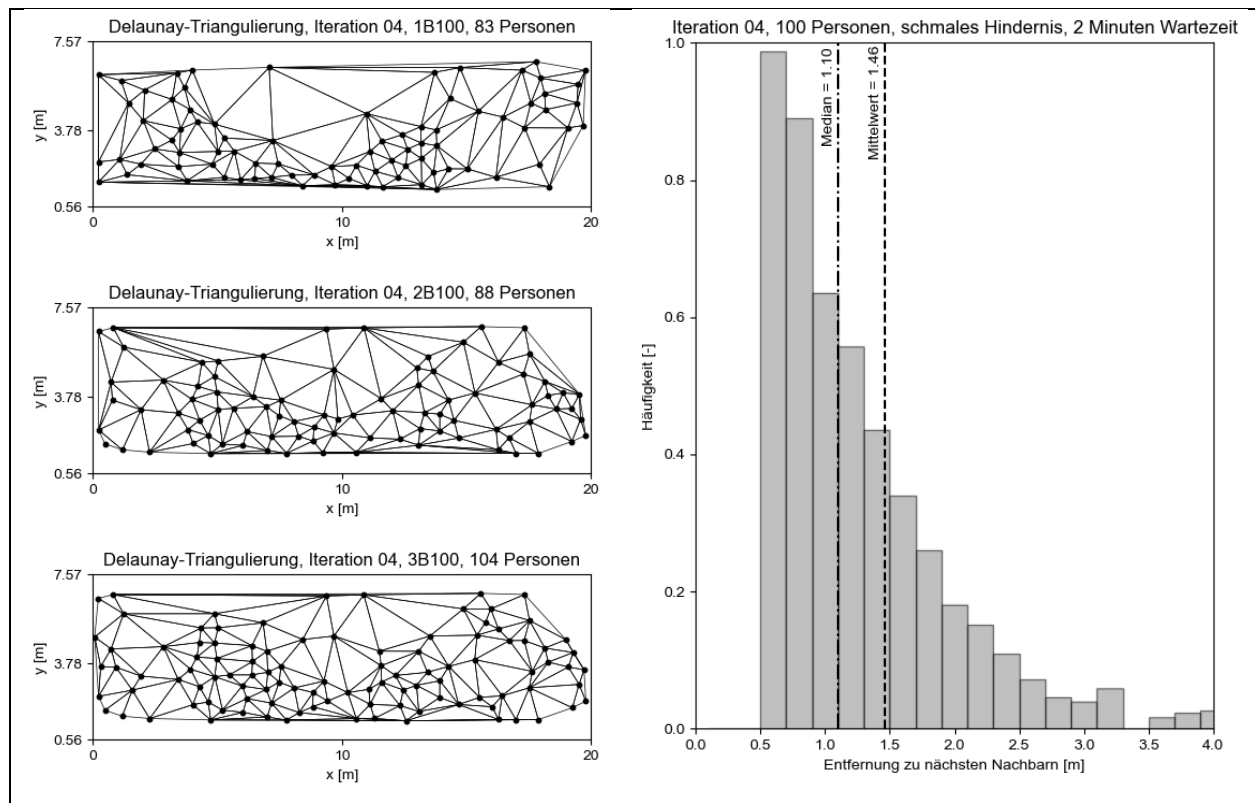
Anhang A.4 Iteration 04

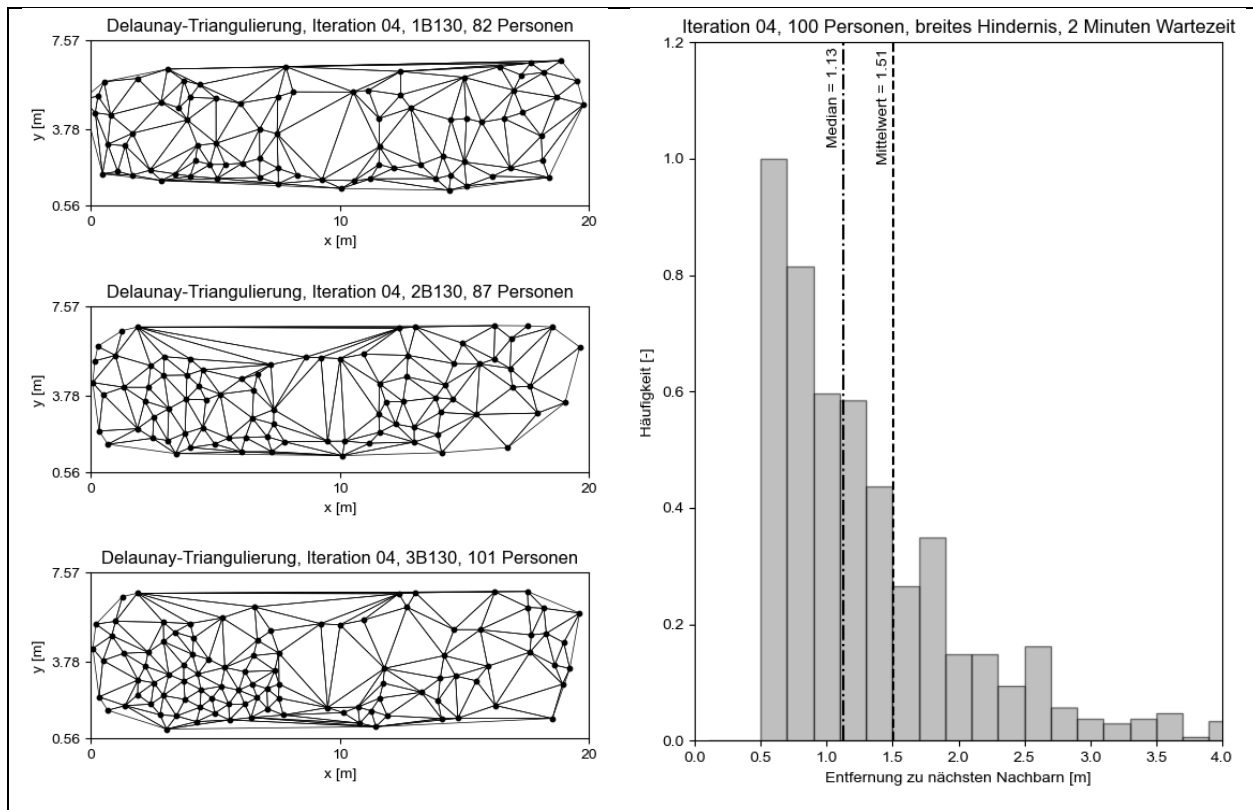
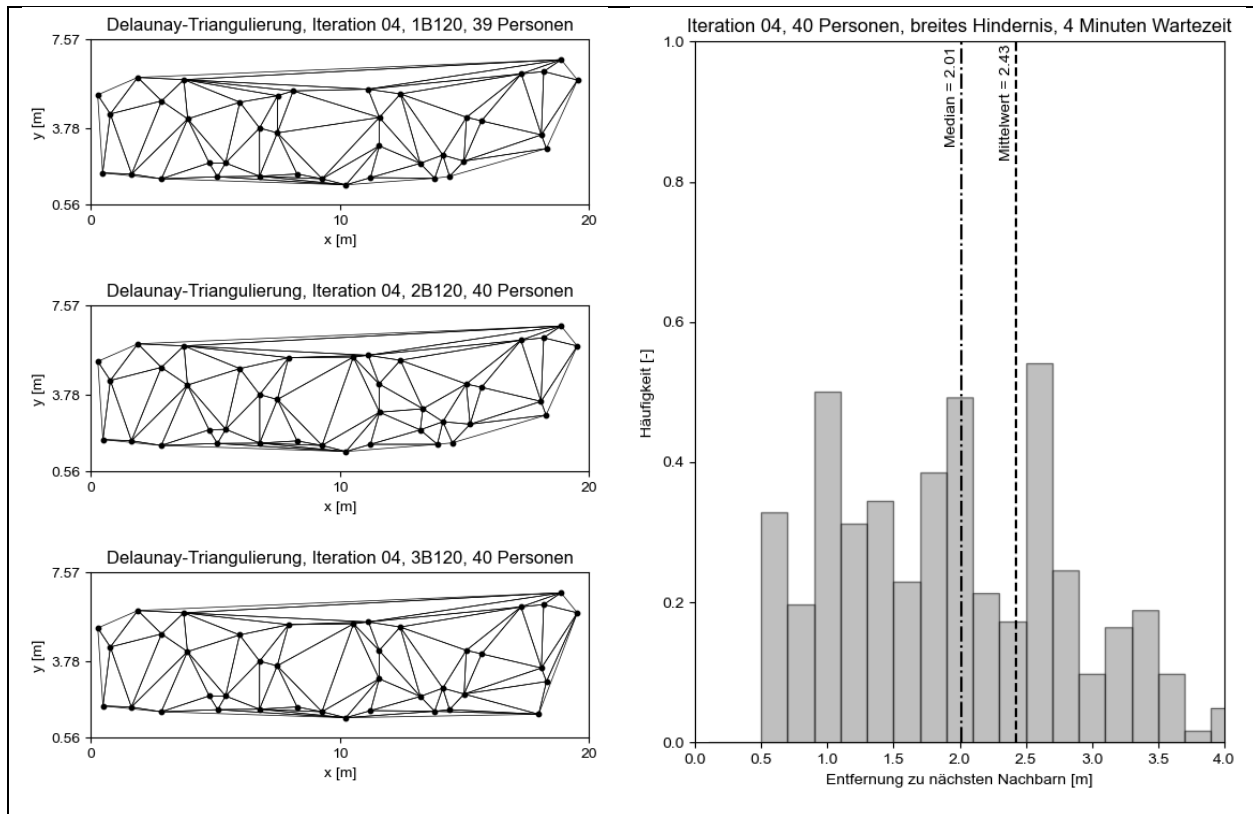
Nachfolgend sind die Ergebnisse der vierten Iteration dargestellt.











Anhang A.5 Zusammenfassung

In der folgenden Tabelle sind die Mediane und Mittelwerte für Experimente sowie die Simulation aufgeführt.

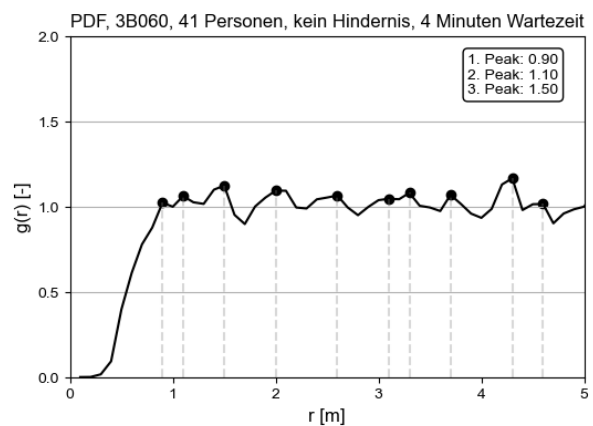
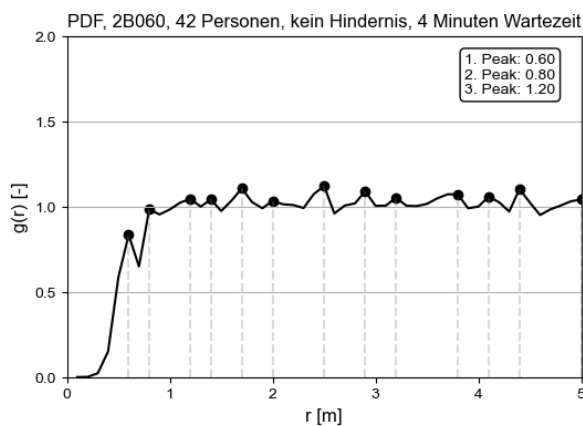
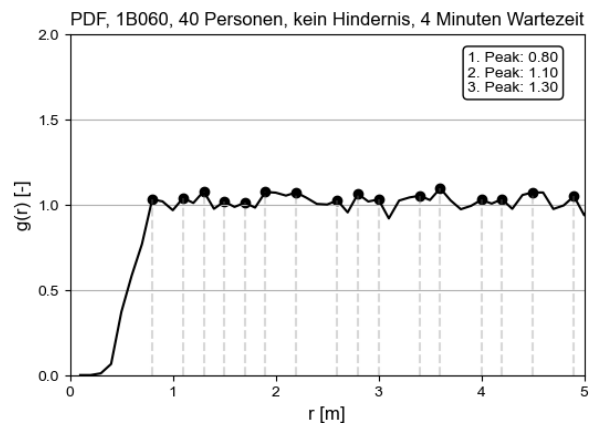
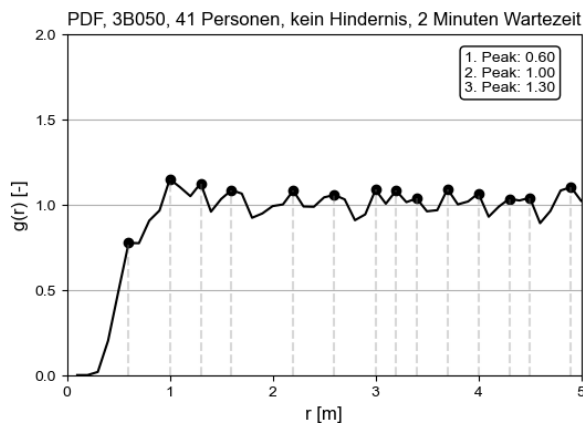
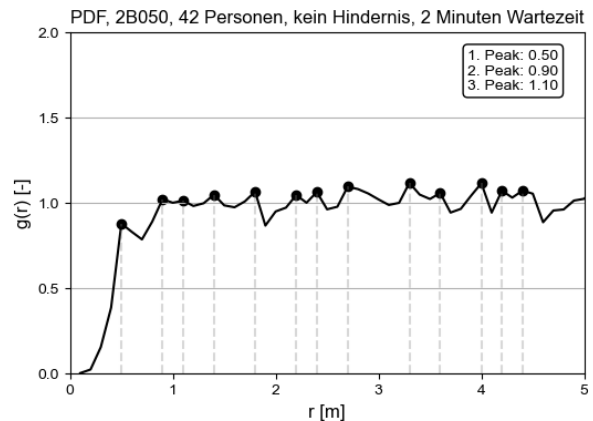
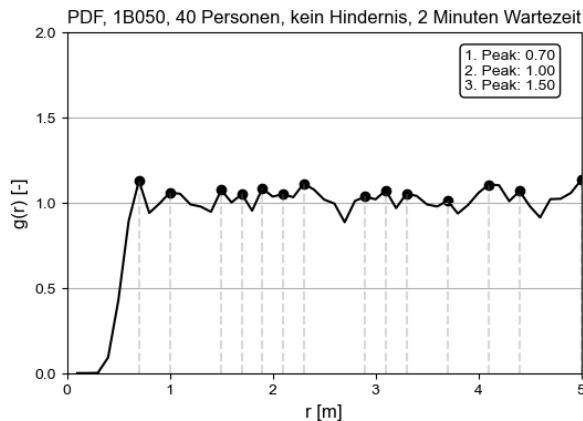
kein Hindernis			Entfernung nächste Nachbarn, Median [m]				Entfernung nächste Nachbarn, Mittelwert [m]			
Wartezeit [min]	Bezeichnung [-]	Personenzahl [-]	Experimente	I02	I03	I04	Experimente	I02	I03	I04
	2 1B050	40	1.41	1.86	1.72	1.72	2.02	2.18	1.98	2.08
	2 2B050	42								
	2 3B050	41								
	4 1B060	40	1.49	1.88	1.74	1.75	1.85	2.19	2.02	2.05
	4 2B060	42								
	4 3B060	41								
	2 1B070	58	1.29	1.13	1.08	1.16	1.61	1.41	1.32	1.41
	2 2B070	59								
	2 3B070	102								
schmales Hindernis			Entfernung nächste Nachbarn, Median [m]				Entfernung nächste Nachbarn, Mittelwert [m]			
Wartezeit [min]	Bezeichnung [-]	Personenzahl [-]	Experimente	I02	I03	I04	Experimente	I02	I03	I04
	2 1B080	40	1.25	1.73	1.26	1.74	1.64	2.06	1.94	2.08
	2 2B080	41								
	2 3B080	40								
	4 1B090	35	1.36	1.65	1.32	1.73	1.75	1.97	1.91	2.23
	4 2B090	40								
	4 3B090	40								
	2 1B100	83	1.21	1.10	0.86	1.10	1.58	1.39	1.30	1.46
	2 2B100	88								
	2 3B100	104								
breites Hindernis			Entfernung nächste Nachbarn, Median [m]				Entfernung nächste Nachbarn, Mittelwert [m]			
Wartezeit [min]	Bezeichnung [-]	Personenzahl [-]	Experimente	I02	I03	I04	Experimente	I02	I03	I04
	2 1B110	43	1.34	1.71	1.55	1.94	2.03	2.08	1.99	2.39
	2 2B110	40								
	2 3B110	40								
	4 1B120	39	1.41	1.72	1.52	2.01	1.98	2.07	2.08	2.43
	4 2B120	40								
	4 3B120	40								
	2 1B130	82	1.38	1.12	0.96	1.13	1.92	1.48	1.33	1.51
	2 2B130	87								
	2 3B130	101								

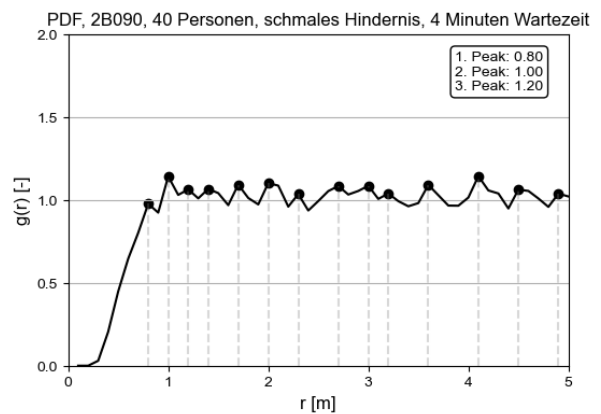
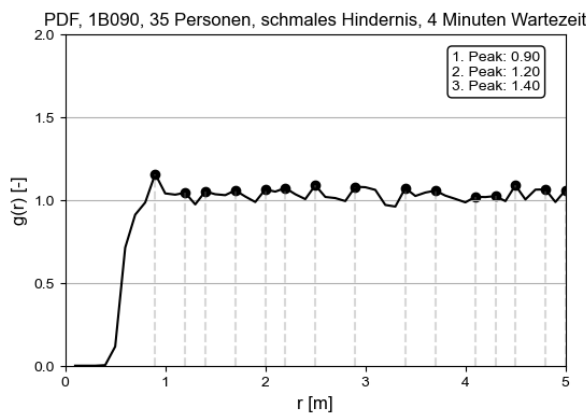
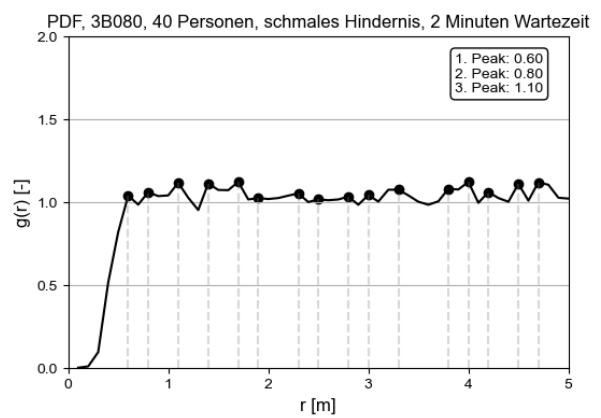
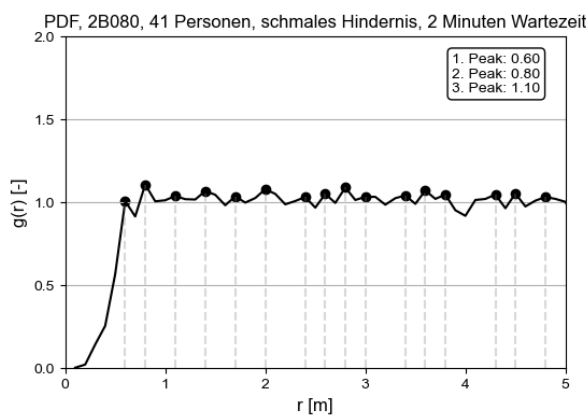
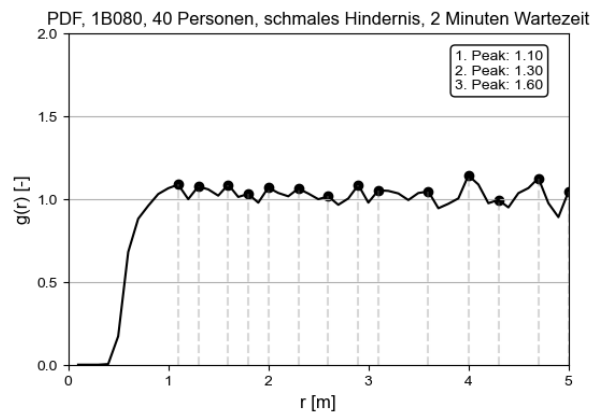
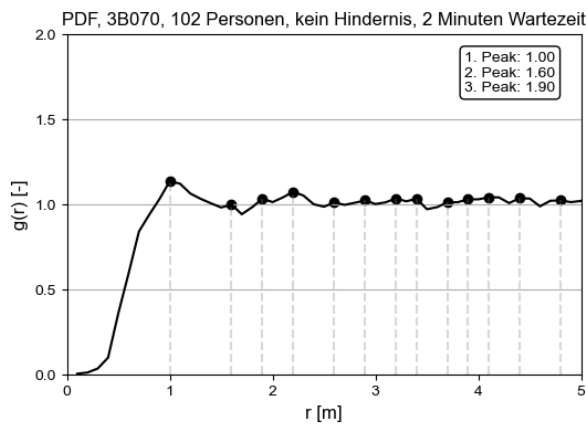
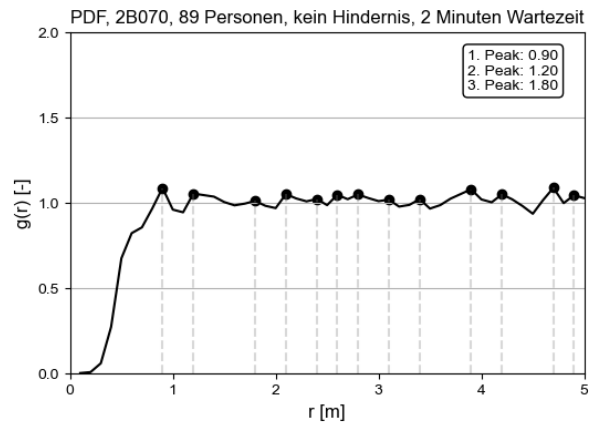
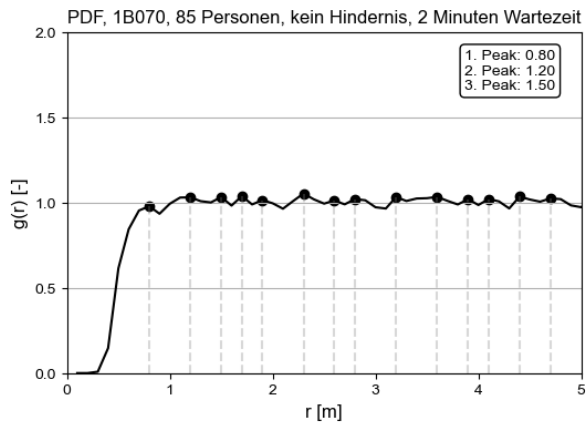
Anhang B – Ergebnisse der Pair Distribution Function

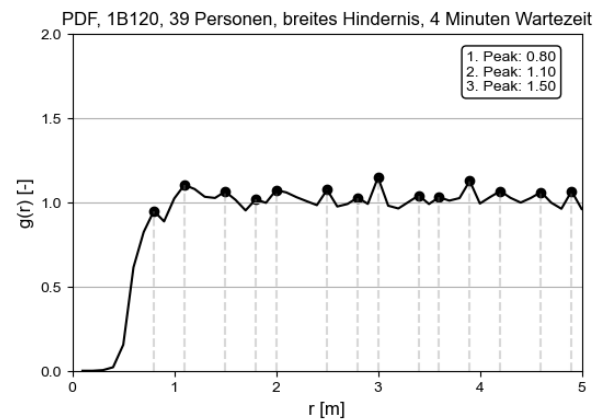
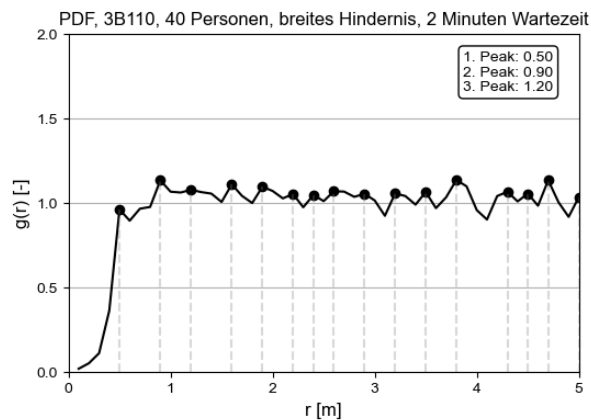
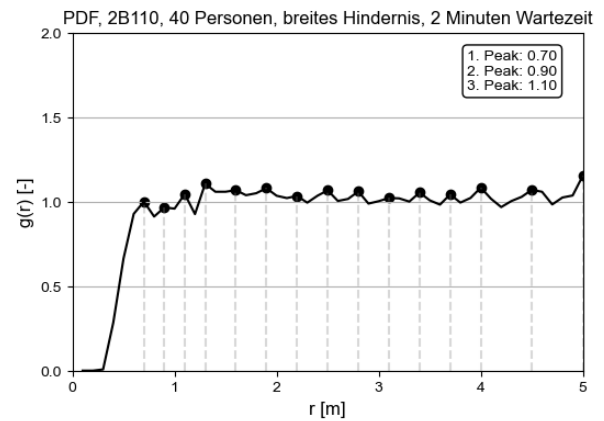
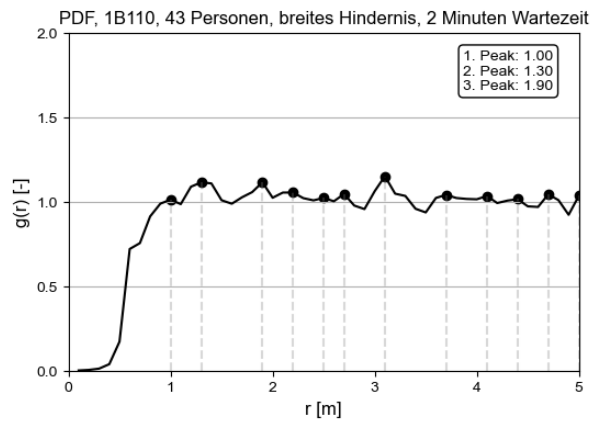
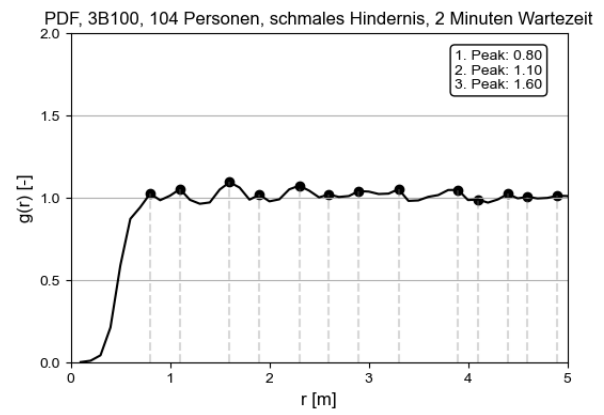
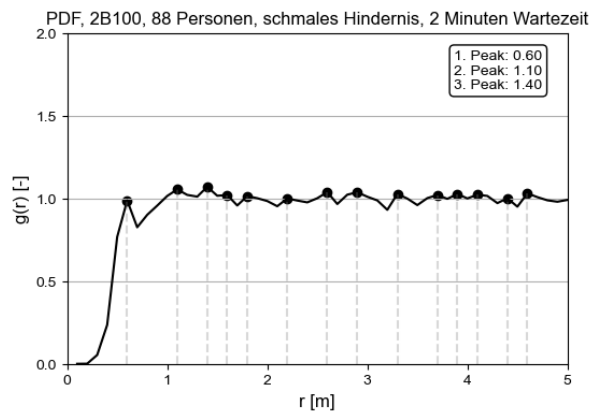
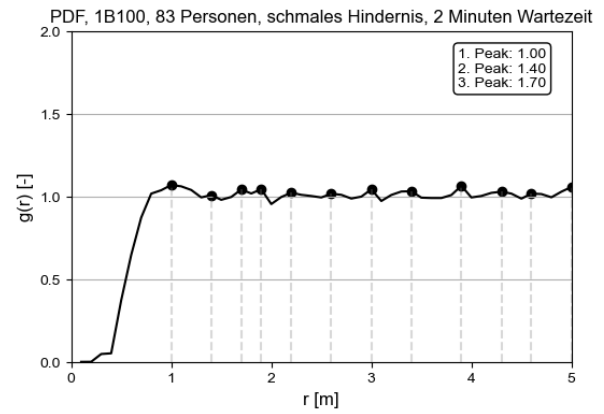
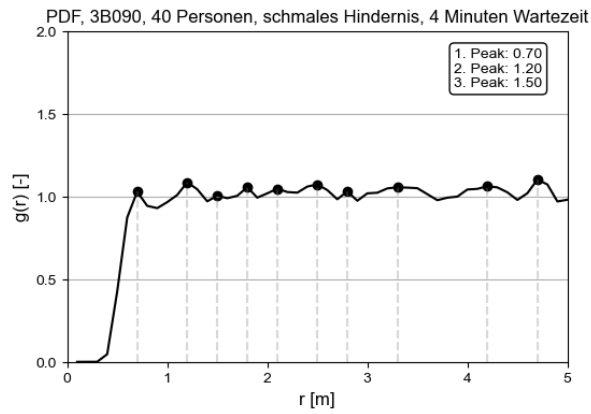
Im Folgenden werden die Ergebnisse der PDF für die experimentellen Daten sowie für die Iterationen der Modellbildung dargestellt. Für die Interpretation der Ergebnisse sind die Radien der ersten drei Maxima in einem Textfeld dargestellt.

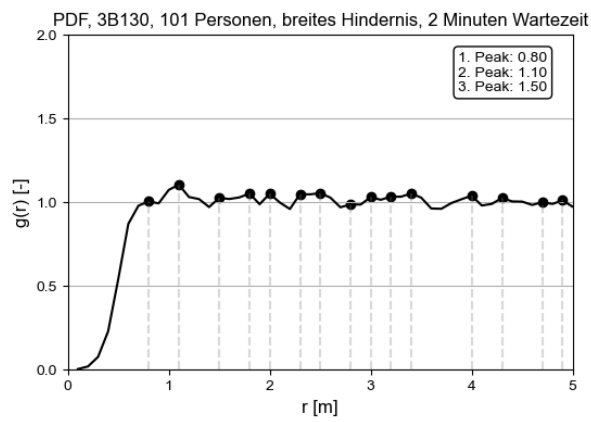
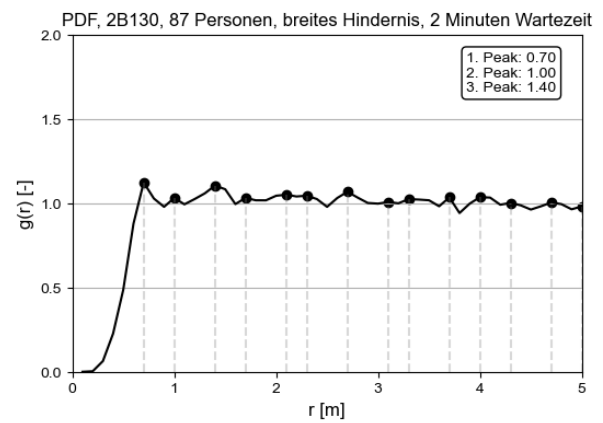
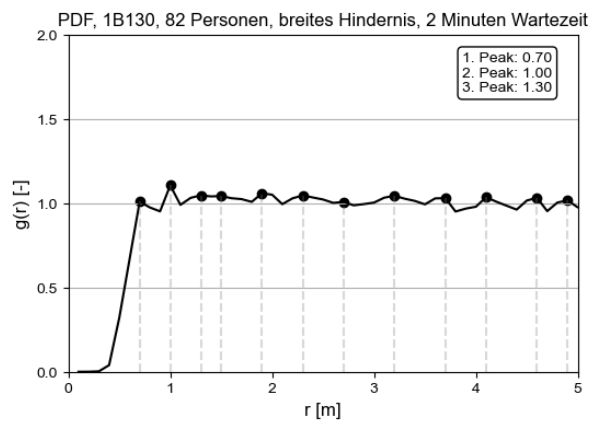
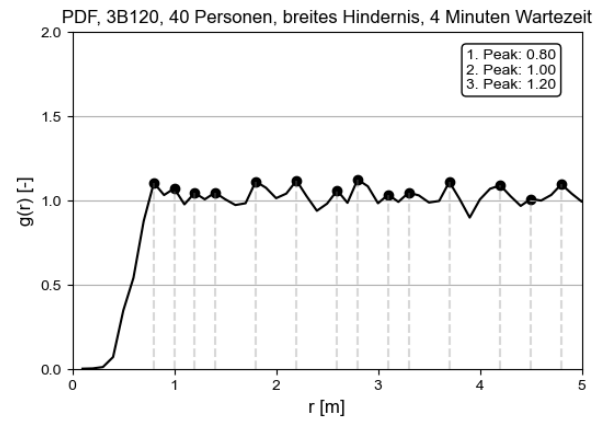
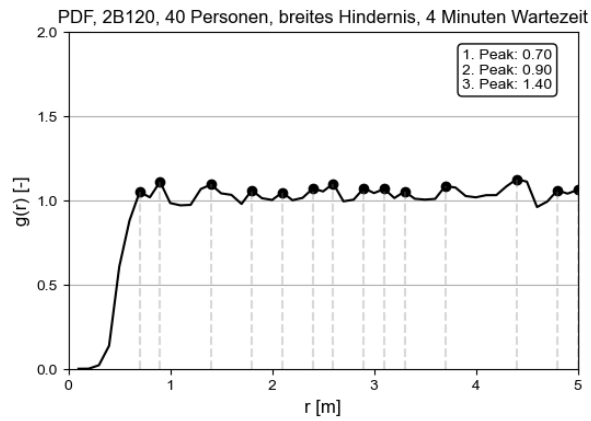
Anhang B.1 Experimente

Nachfolgend sind die Ergebnisse der PDF für die experimentellen Daten visualisiert.



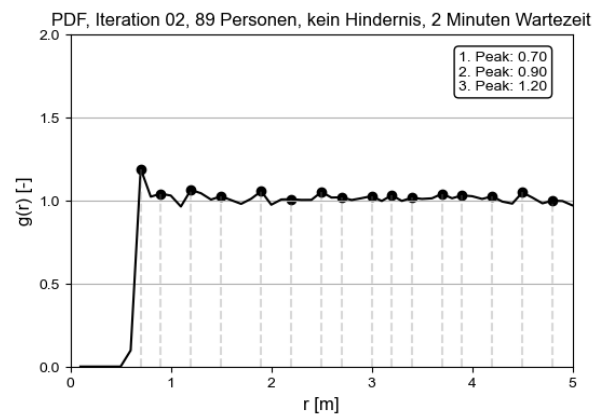
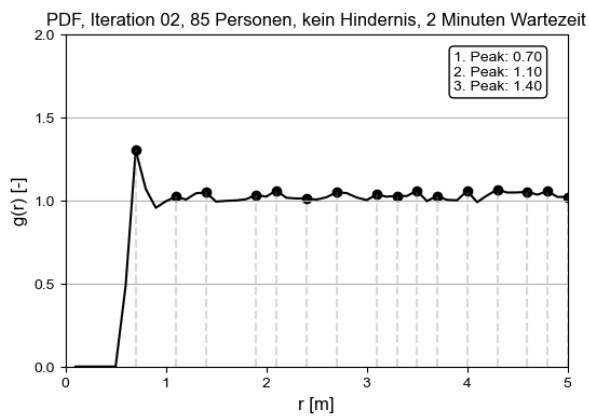
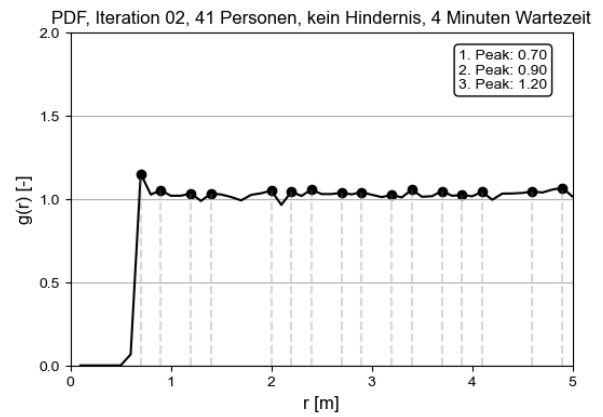
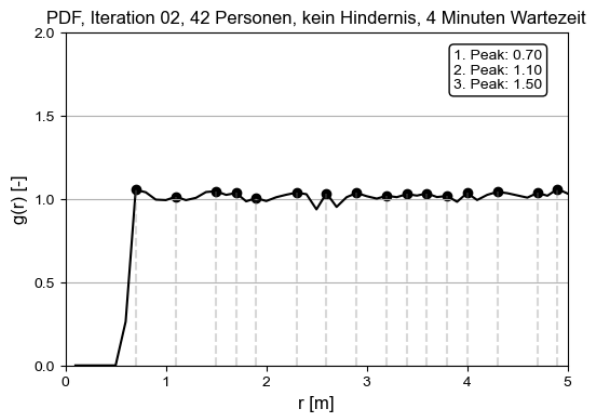
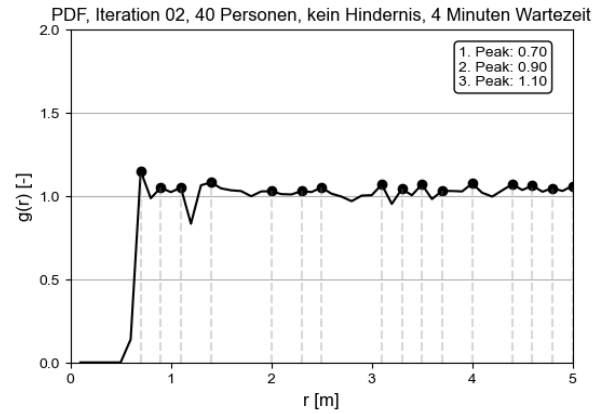
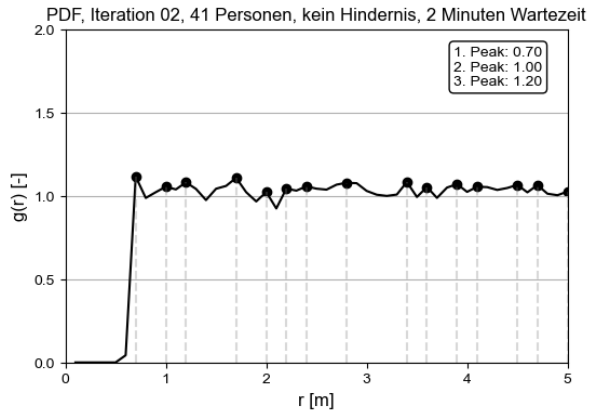
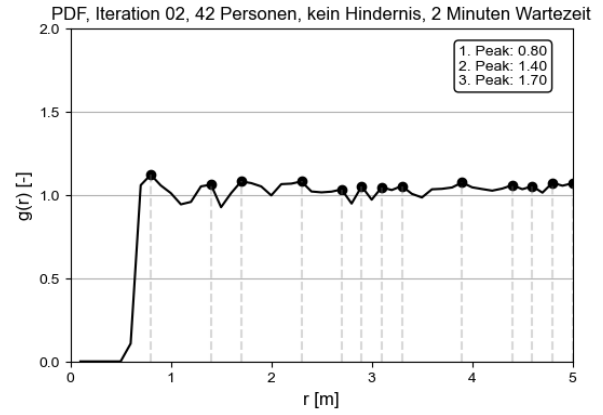
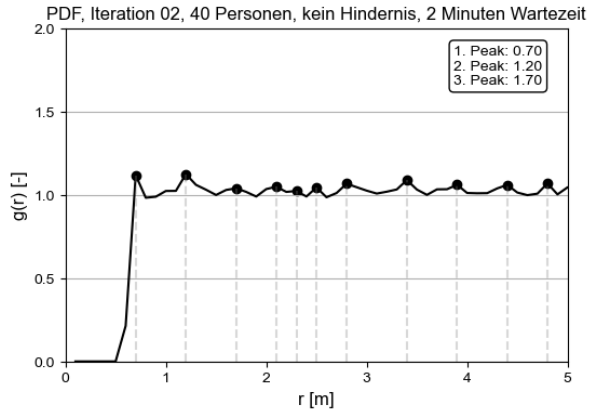


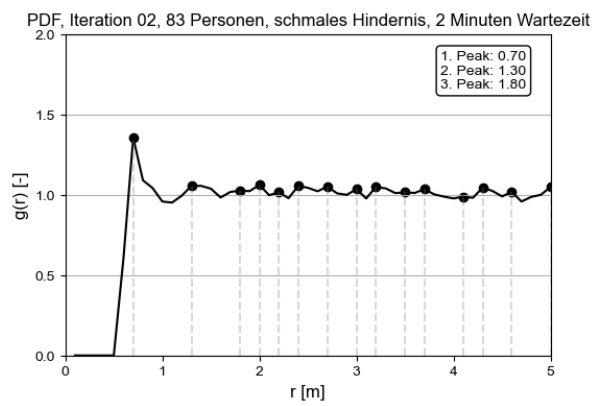
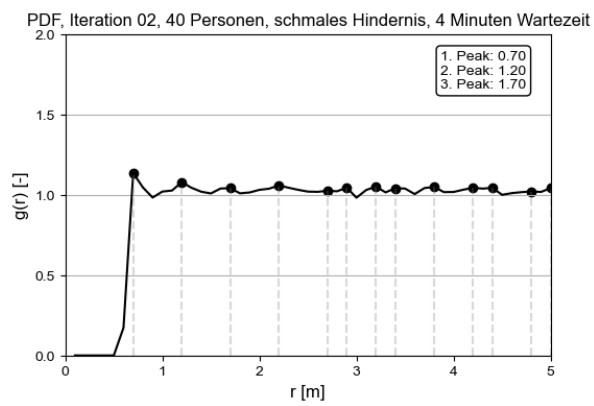
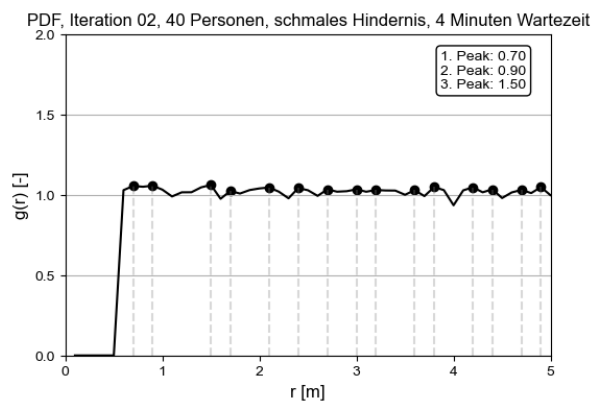
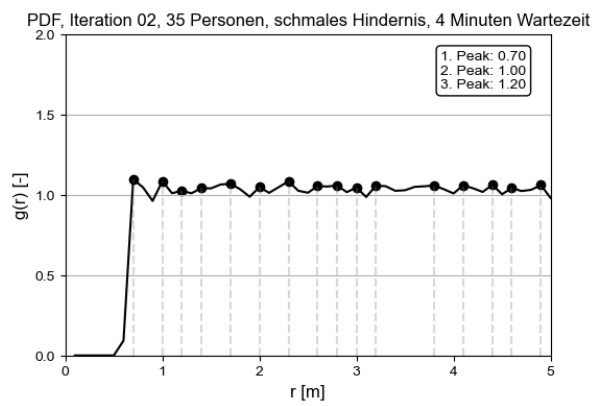
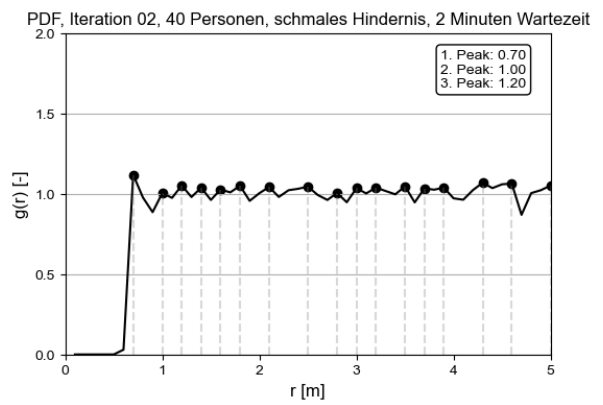
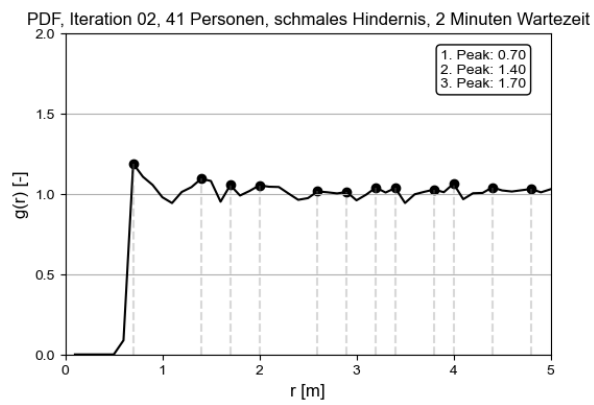
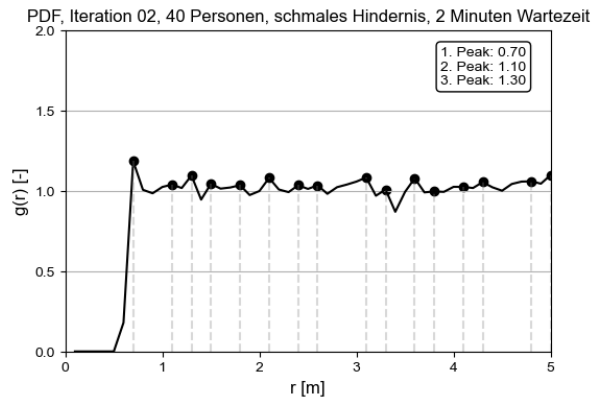
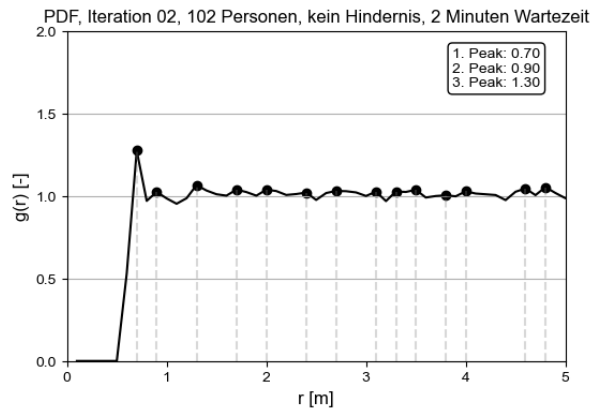




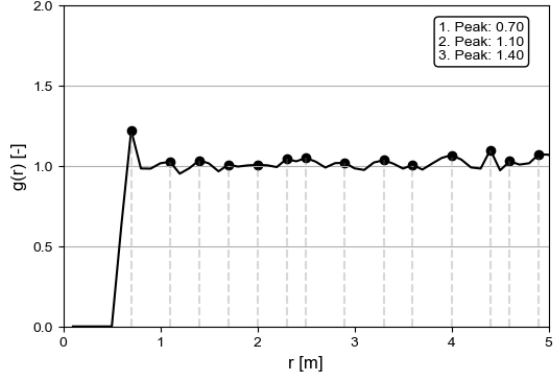
Anhang B.2 Iteration 02

Nachfolgend sind die Ergebnisse der PDF für die zweite Iteration visualisiert.

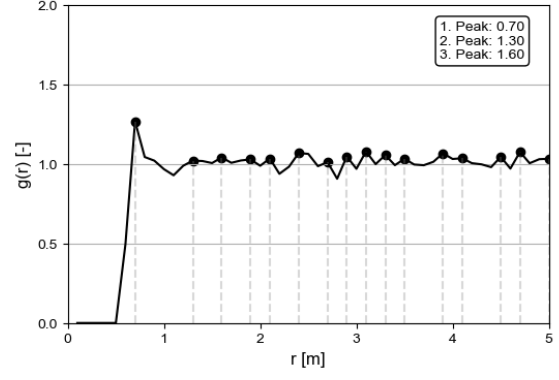




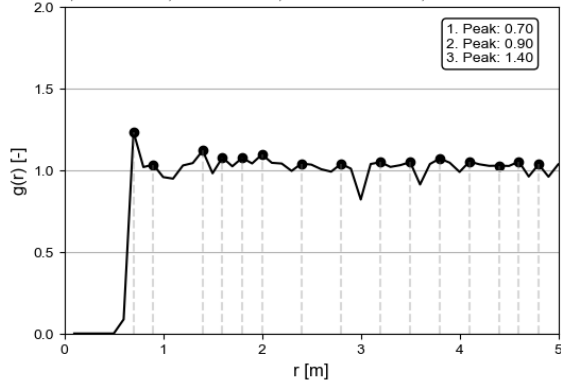
PDF, Iteration 02, 88 Personen, schmales Hindernis, 2 Minuten Wartezeit



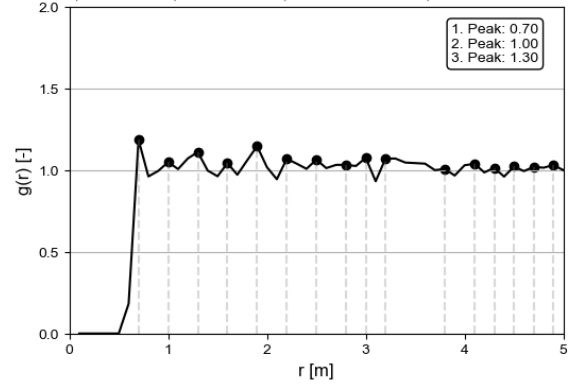
PDF, Iteration 02, 104 Personen, schmales Hindernis, 2 Minuten Wartezeit



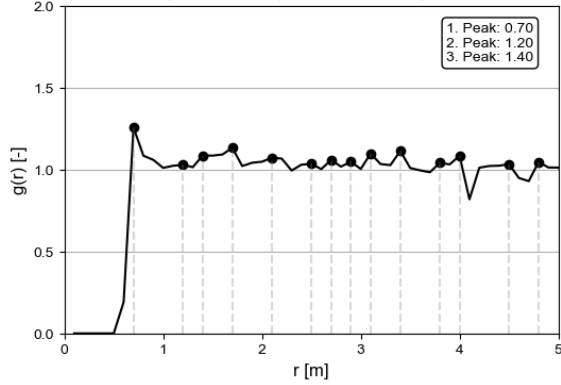
PDF, Iteration 02, 43 Personen, breites Hindernis, 2 Minuten Wartezeit



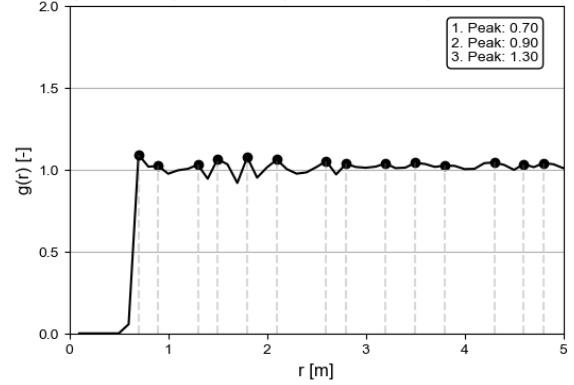
PDF, Iteration 02, 40 Personen, breites Hindernis, 2 Minuten Wartezeit



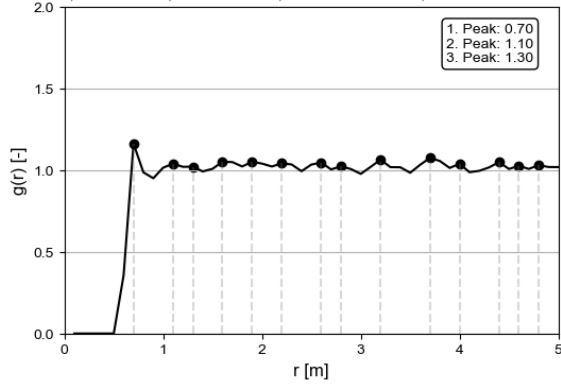
PDF, Iteration 02, 40 Personen, breites Hindernis, 2 Minuten Wartezeit



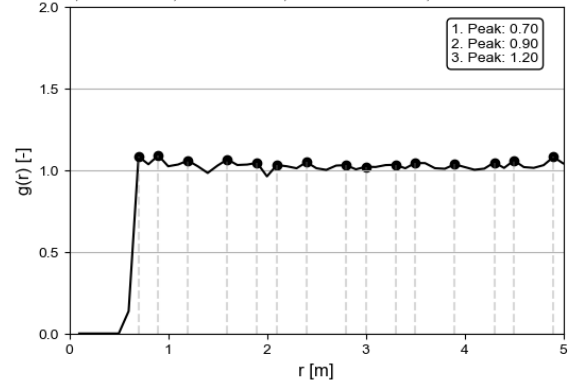
PDF, Iteration 02, 39 Personen, breites Hindernis, 4 Minuten Wartezeit

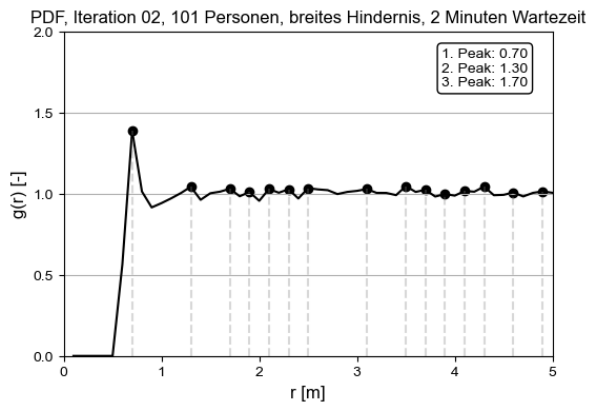
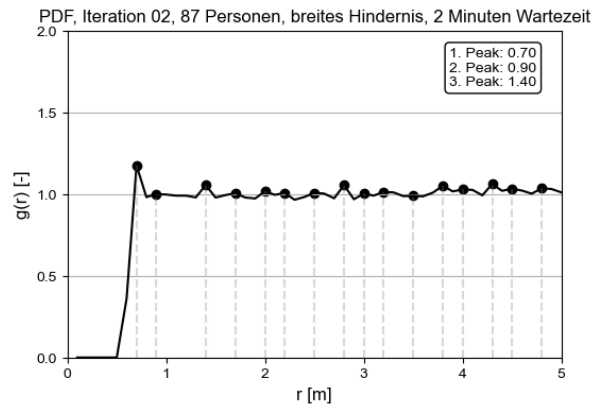
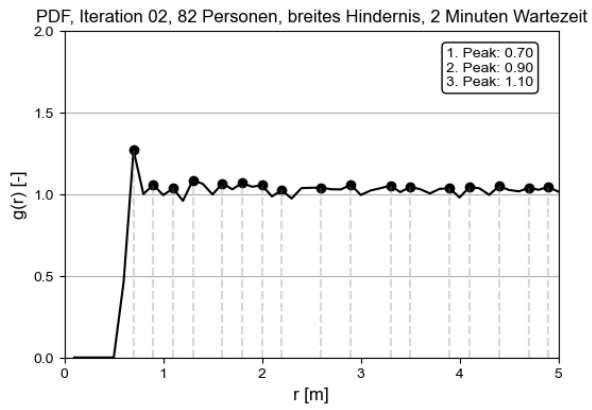


PDF, Iteration 02, 40 Personen, breites Hindernis, 4 Minuten Wartezeit



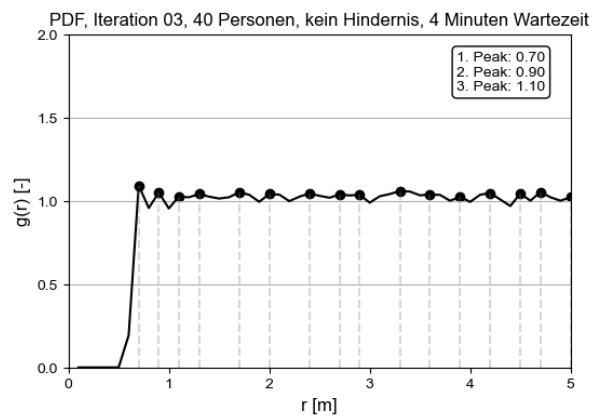
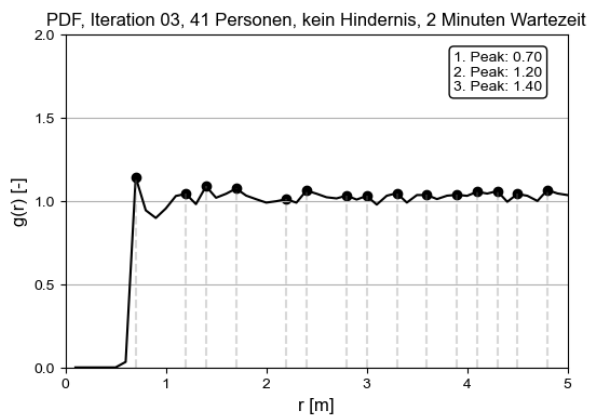
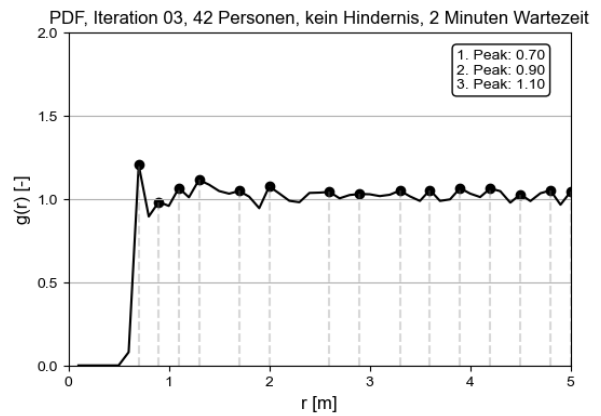
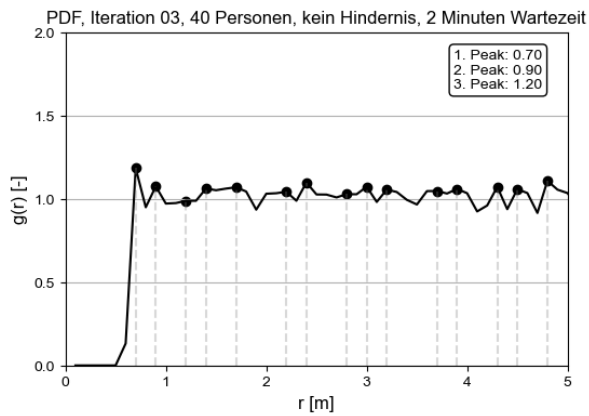
PDF, Iteration 02, 40 Personen, breites Hindernis, 4 Minuten Wartezeit

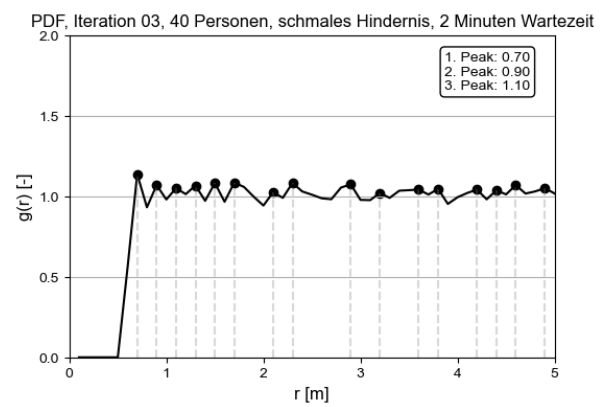
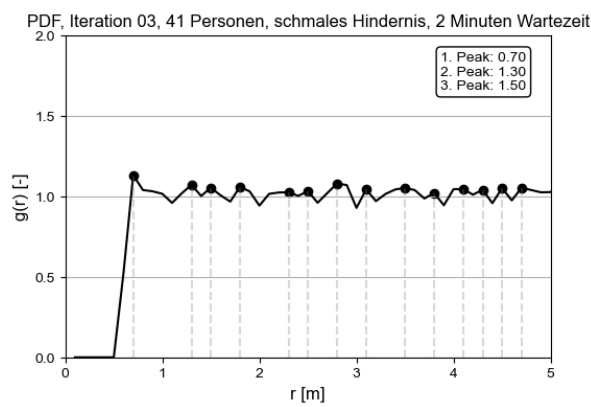
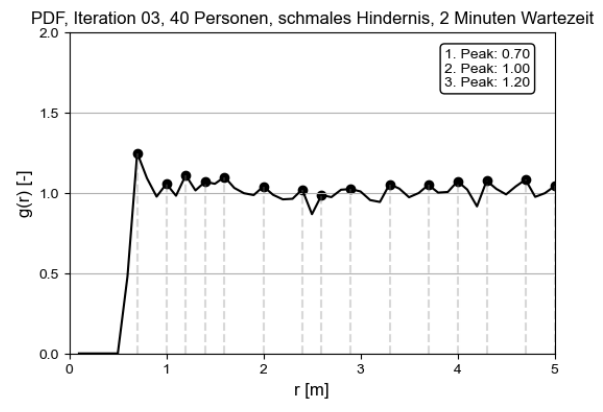
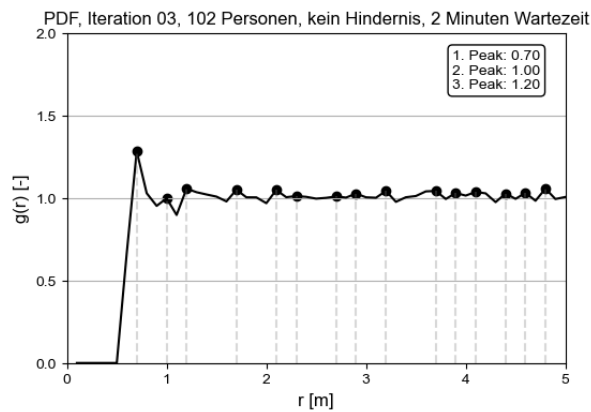
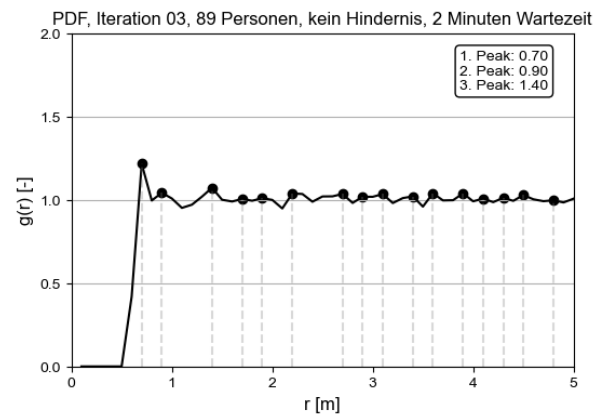
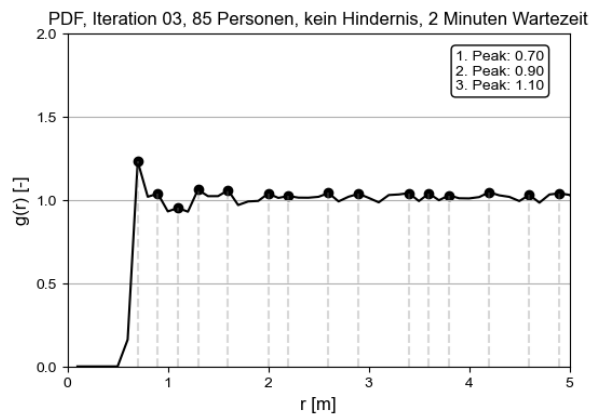
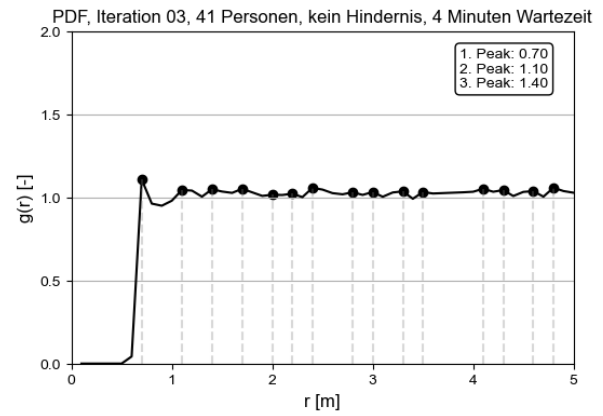
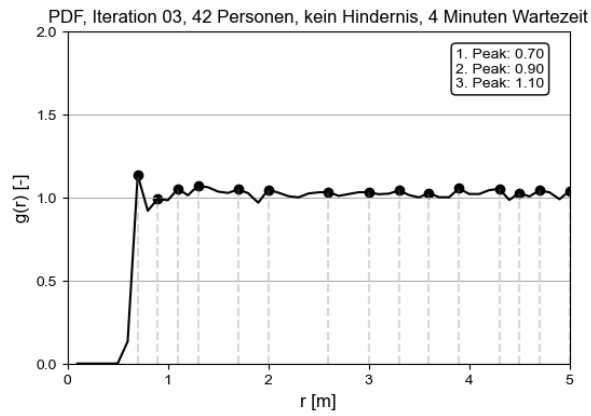




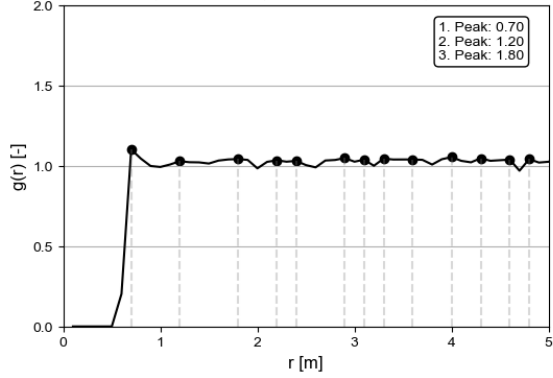
Anhang B.3 Iteration 03

Nachfolgend sind die Ergebnisse der PDF für die dritte Iteration visualisiert.

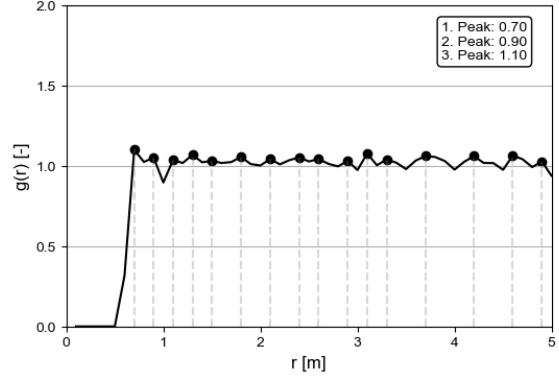




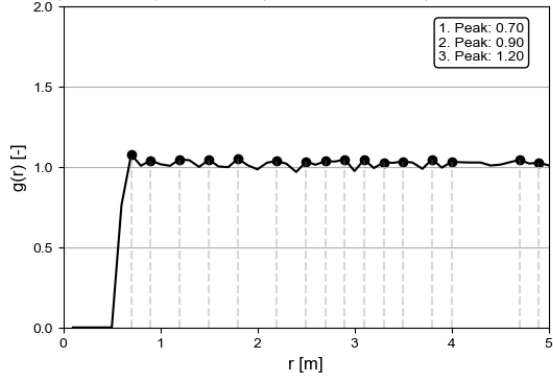
PDF, Iteration 03, 35 Personen, schmales Hindernis, 4 Minuten Wartezeit



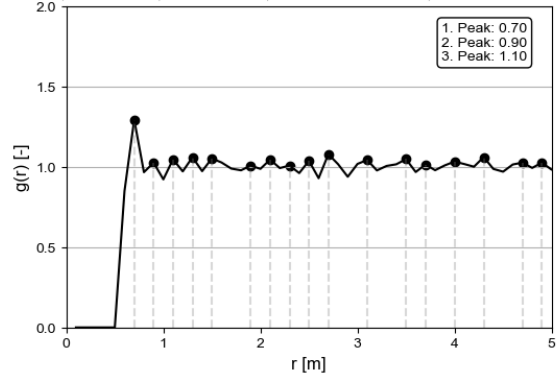
PDF, Iteration 03, 40 Personen, schmales Hindernis, 4 Minuten Wartezeit



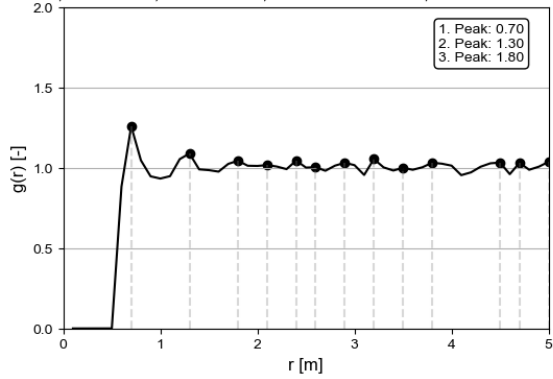
PDF, Iteration 03, 40 Personen, schmales Hindernis, 4 Minuten Wartezeit



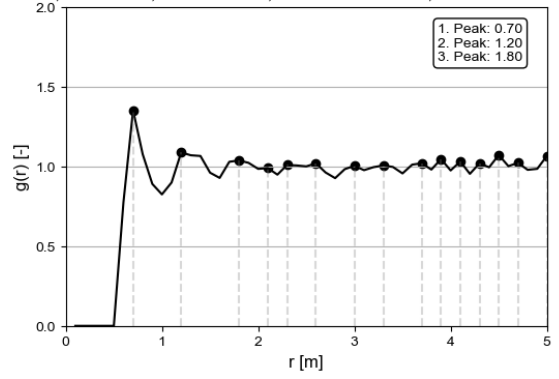
PDF, Iteration 03, 83 Personen, schmales Hindernis, 2 Minuten Wartezeit



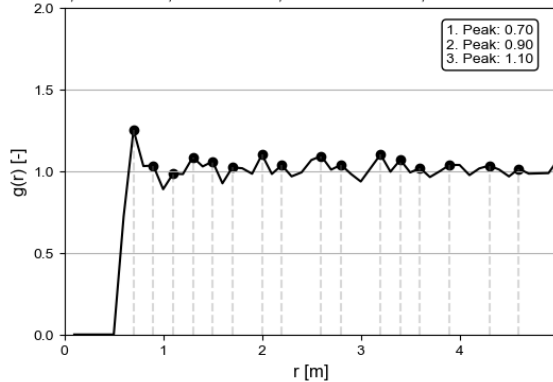
PDF, Iteration 03, 88 Personen, schmales Hindernis, 2 Minuten Wartezeit



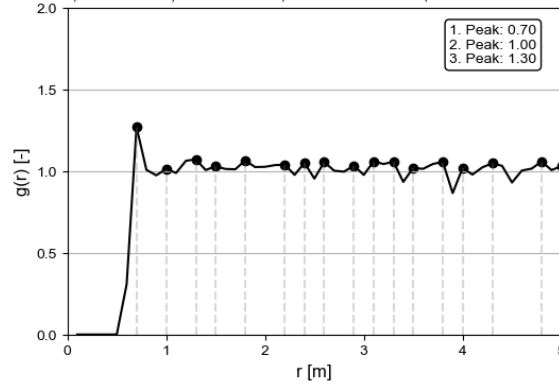
PDF, Iteration 03, 104 Personen, schmales Hindernis, 2 Minuten Wartezeit

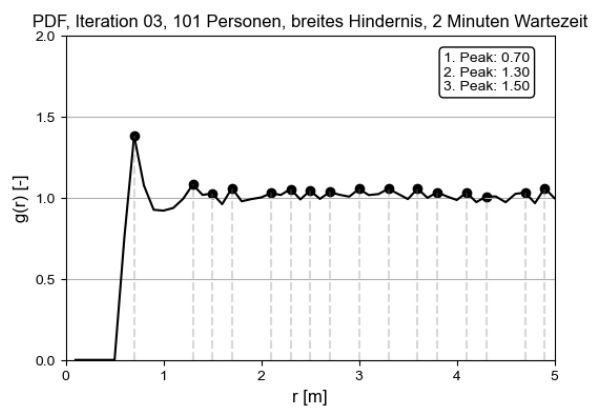
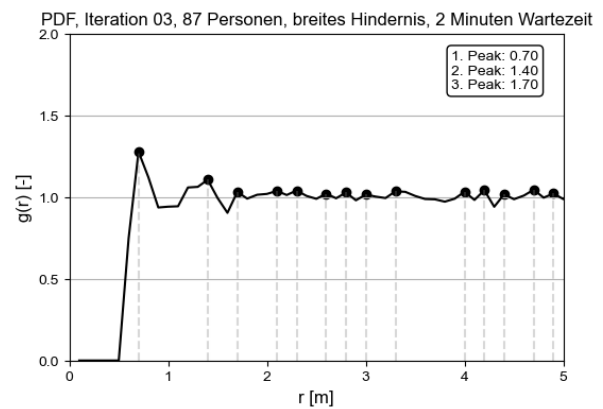
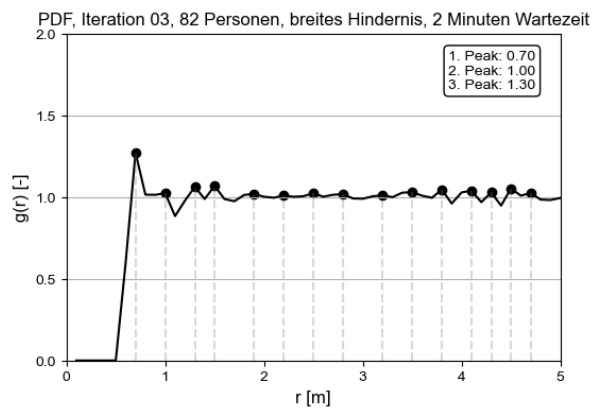
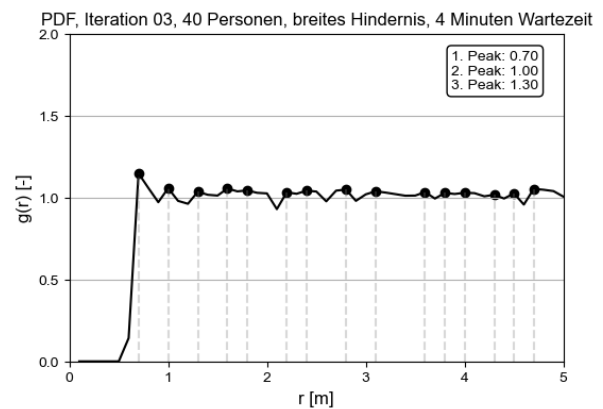
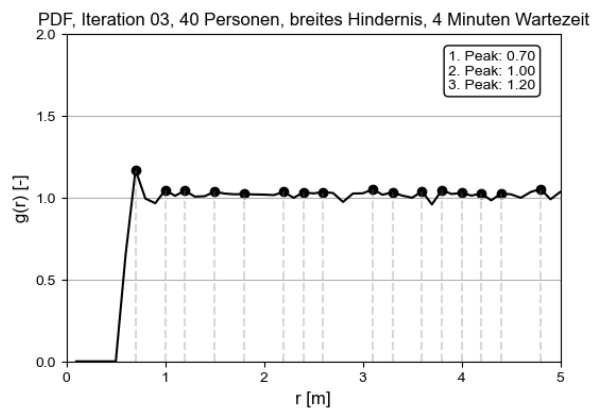
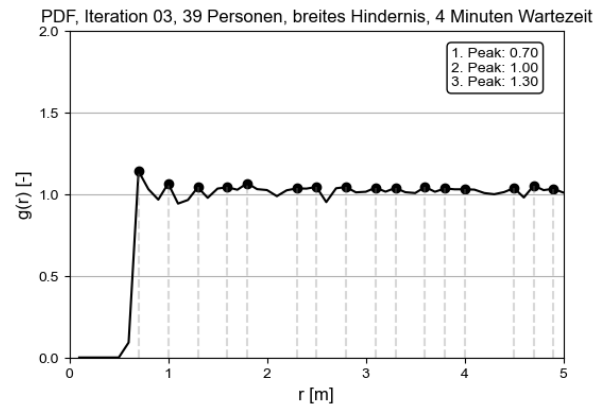
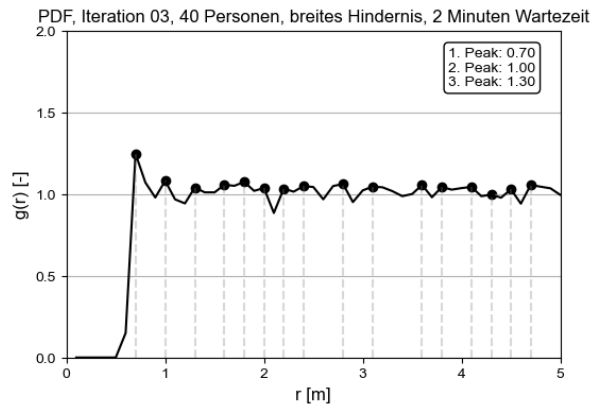


PDF, Iteration 03, 43 Personen, breites Hindernis, 2 Minuten Wartezeit



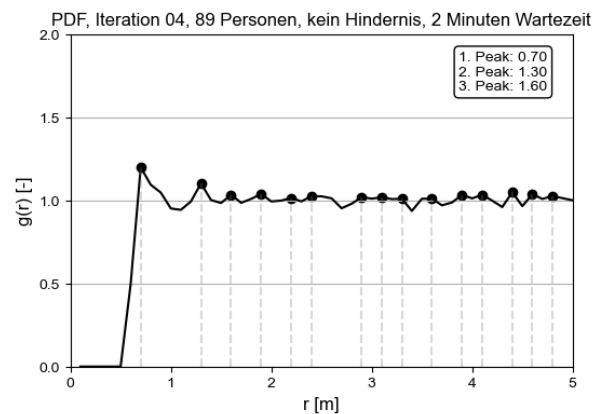
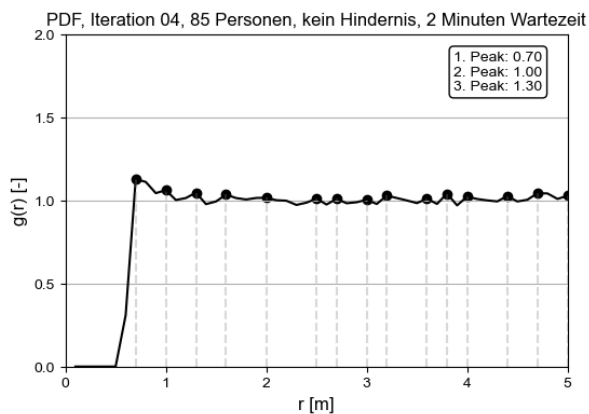
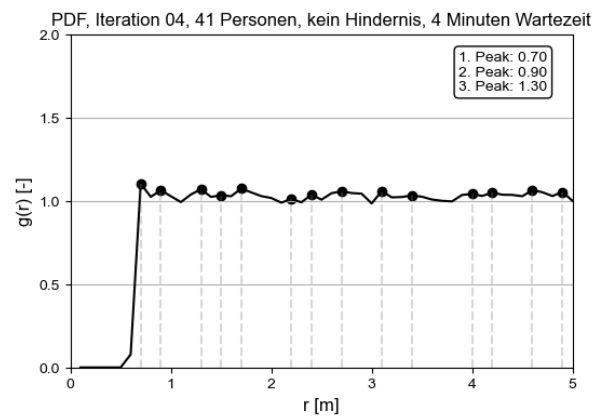
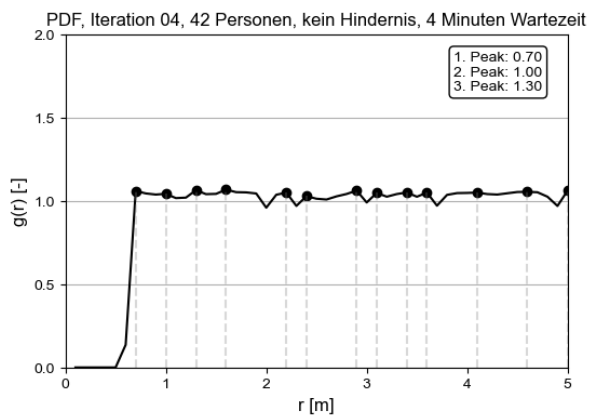
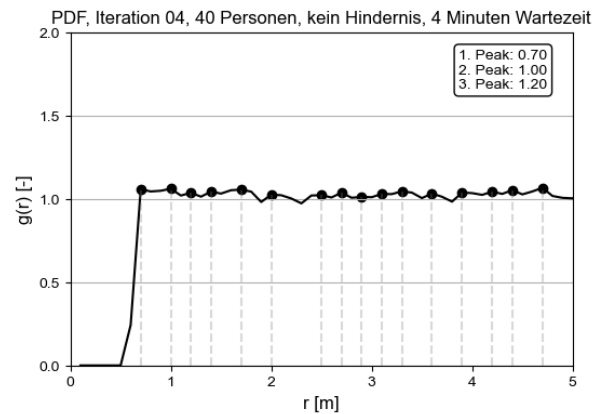
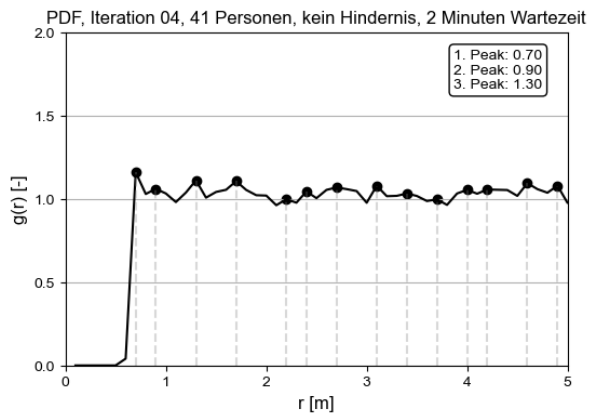
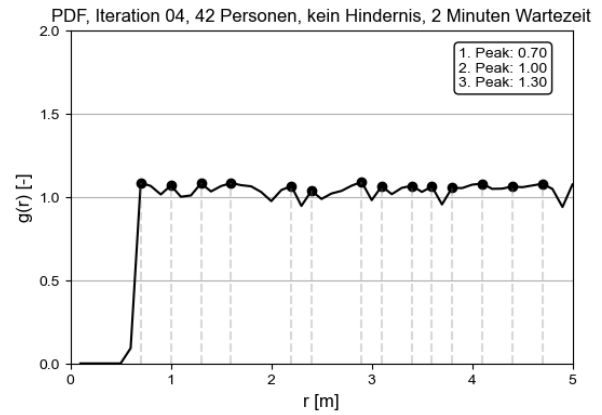
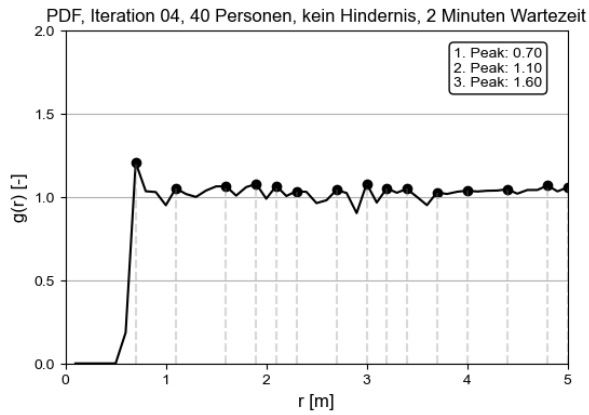
PDF, Iteration 03, 40 Personen, breites Hindernis, 2 Minuten Wartezeit

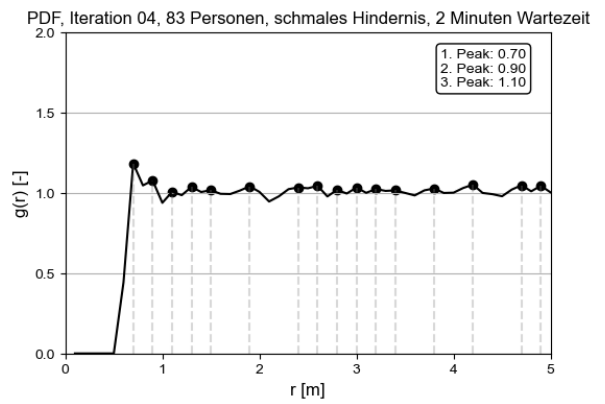
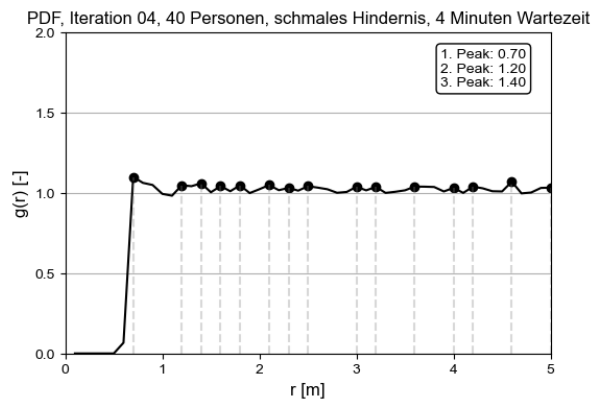
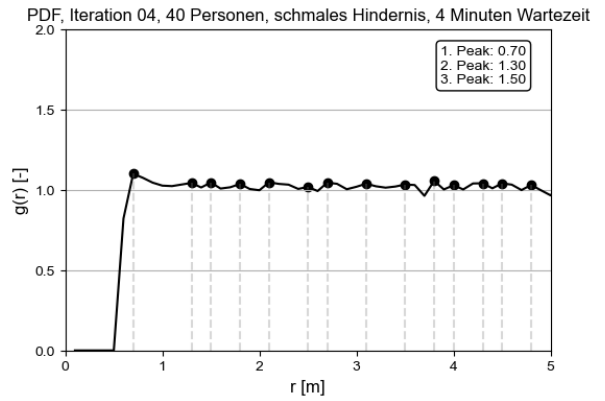
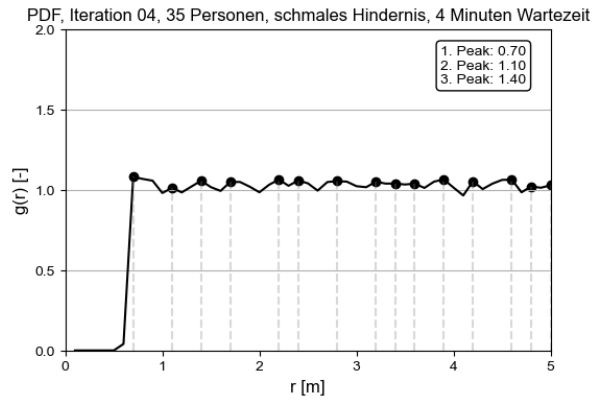
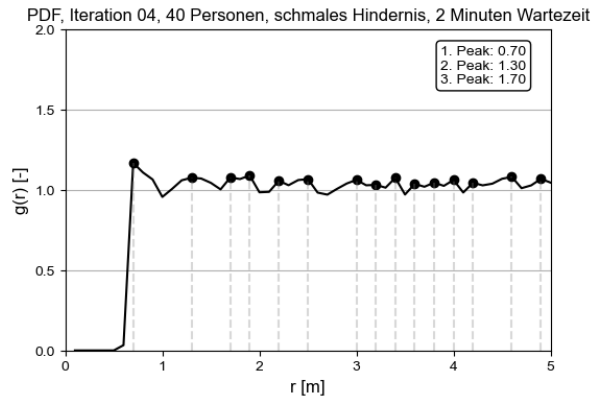
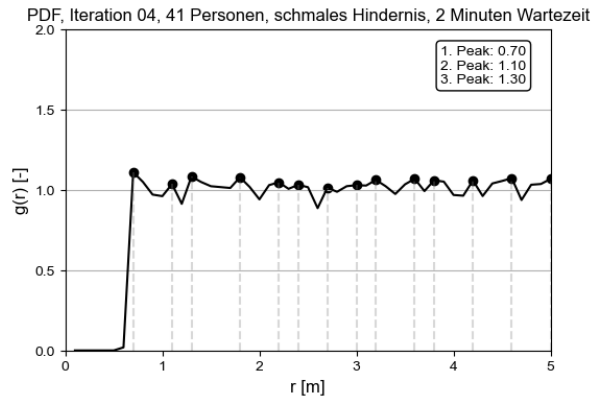
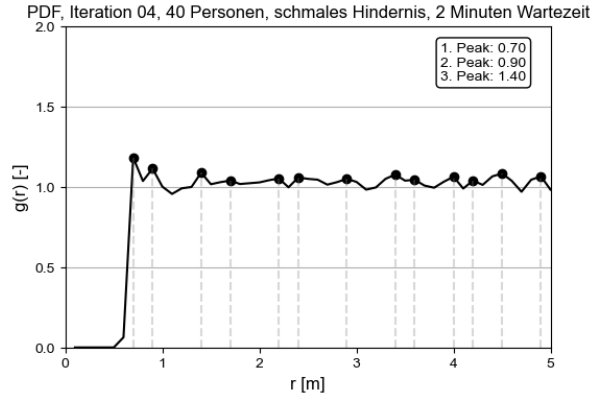
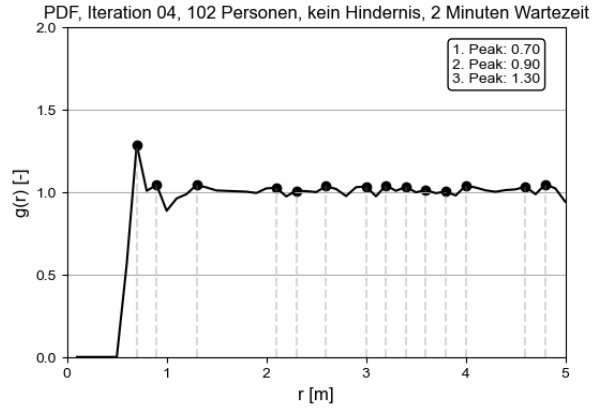


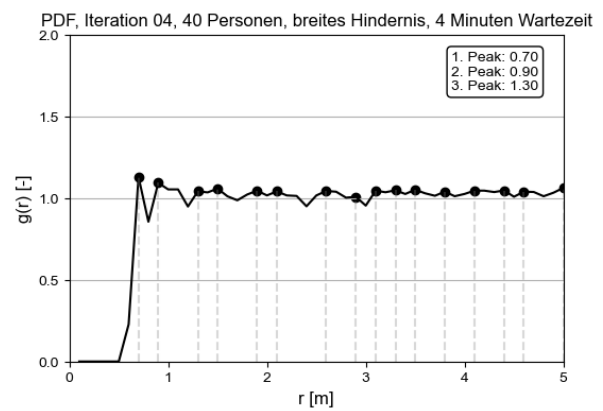
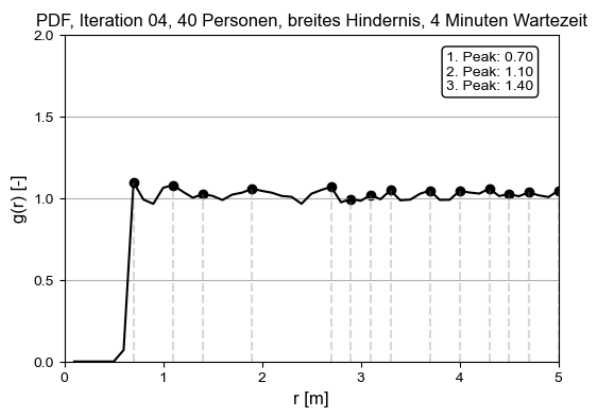
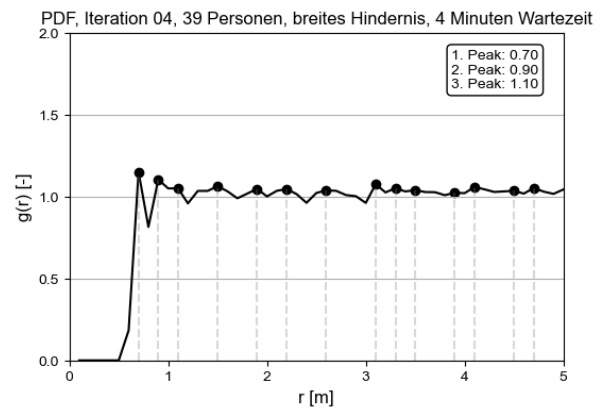
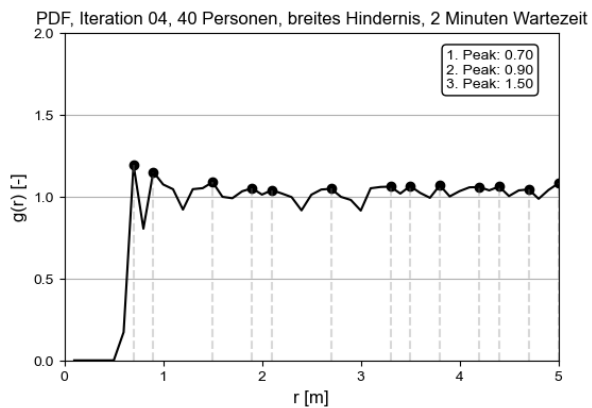
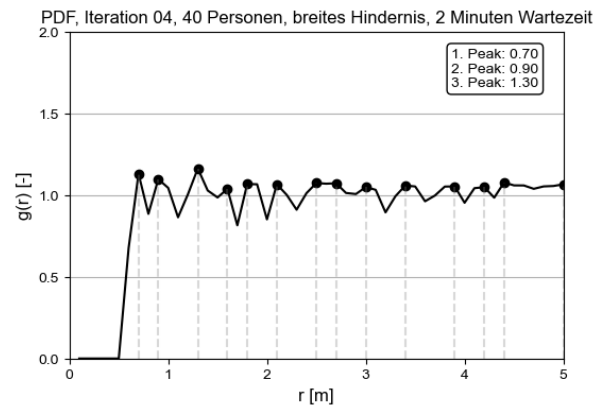
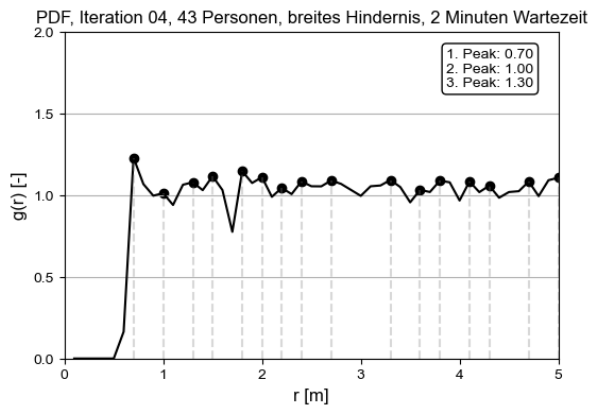
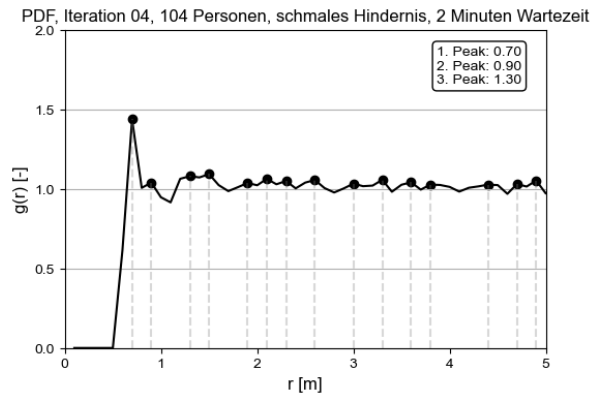
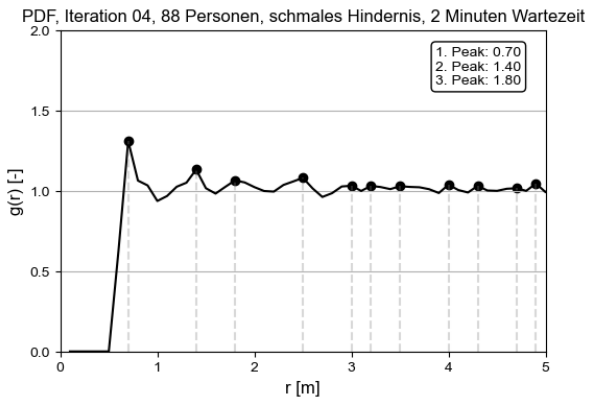


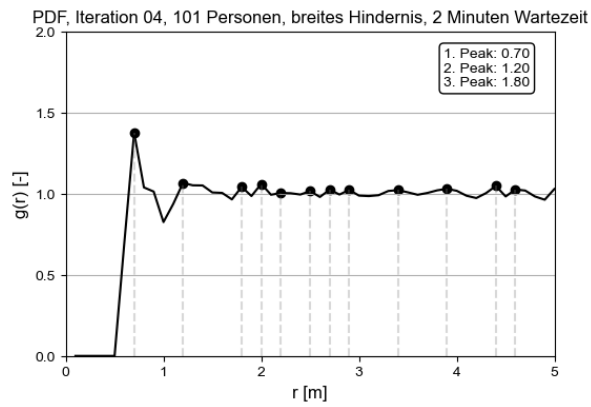
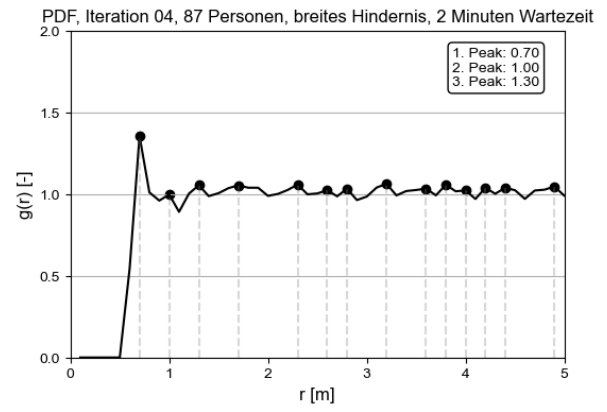
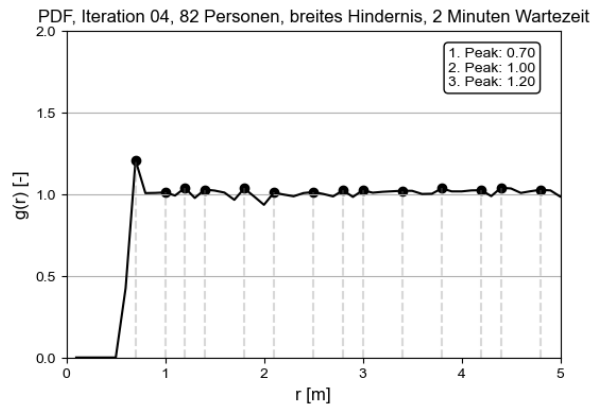
Anhang B.4 Iteration 04

Nachfolgend sind die Ergebnisse der PDF für die vierte Iteration visualisiert.









Anhang B.5 Zusammenfassung

Im Folgenden ist eine Zusammenfassung über die Maxima der PDF für die Experimente und Simulationen der verschiedenen Iterationen gegeben.

Kein Hindernis			PDF - Peaks [m]											
Wartezeit [-]	Bezeichnung [-]	Personenzahl [-]	Experimente			I02			I03			I04		
2	1B050	40	0.70	1.00	1.50	0.70	1.20	1.70	0.70	1.20	1.70	0.70	1.20	1.70
2	2B050	42	0.50	0.90	1.10	0.80	1.40	1.70	0.70	1.10	1.70	0.70	1.10	1.70
2	3B050	41	0.60	1.00	1.30	0.70	1.00	1.20	0.70	1.20	1.40	0.70	1.20	1.40
4	1B060	40	0.80	1.10	1.30	0.70	0.90	1.10	0.70	0.90	1.10	0.70	1.00	1.20
4	2B060	42	0.60	0.80	1.20	0.70	1.10	1.50	0.70	0.90	1.10	0.70	1.00	1.30
4	3B060	41	0.90	1.10	1.50	0.70	0.90	1.10	0.70	1.10	1.40	0.70	0.90	1.30
2	1B070	58	0.80	1.20	1.50	0.70	1.10	1.40	0.70	0.90	1.10	0.70	1.00	1.30
2	2B070	59	0.90	1.20	1.80	0.70	0.90	1.20	0.70	0.90	1.40	0.70	1.30	1.60
2	3B070	102	1.00	1.60	1.90	0.70	0.90	1.30	0.70	1.00	1.20	0.70	0.90	1.30
Schmales Hindernis			PDF - Peaks [m]											
Wartezeit [-]	Bezeichnung [-]	Personenzahl [-]	Experimente			I02			I03			I04		
2	1B080	40	1.00	1.30	1.60	0.70	1.10	1.30	0.70	1.00	1.20	0.70	0.90	1.40
2	2B080	41	0.60	0.80	1.10	0.70	1.40	1.70	0.70	1.30	1.50	0.70	1.10	1.30
2	3B080	40	0.60	0.80	1.10	0.70	1.00	1.20	0.70	0.90	1.10	0.70	1.30	1.70
4	1B090	35	0.90	1.20	1.40	0.70	1.00	1.20	0.70	1.20	1.80	0.70	1.10	1.40
4	2B090	40	0.80	1.00	1.20	0.70	0.90	1.50	0.70	0.90	1.10	0.70	1.30	1.50
4	3B090	40	0.70	1.20	1.50	0.70	1.20	1.70	0.70	0.90	1.20	0.70	1.20	1.40
2	1B100	83	1.00	1.40	1.70	0.70	1.30	1.80	0.70	0.90	1.10	0.70	1.90	1.10
2	2B100	88	0.60	1.10	1.40	0.70	1.10	1.40	0.70	1.30	1.80	0.70	1.40	1.80
2	3B100	104	0.80	1.10	1.60	0.70	1.30	1.60	0.70	1.20	1.80	0.70	0.90	1.30
Breites Hindernis			PDF - Peaks [m]											
Wartezeit [-]	Bezeichnung [-]	Personenzahl [-]	Experimente			I02			I03			I04		
2	1B080	40	1.00	1.30	1.90	0.70	0.90	1.40	0.70	0.90	1.10	0.70	1.00	1.30
2	2B080	41	0.70	0.90	1.10	0.70	1.00	1.30	0.70	1.00	1.30	0.70	0.90	1.30
2	3B080	40	0.50	0.90	1.20	0.70	1.20	1.40	0.70	1.00	1.30	0.70	0.90	1.50
4	1B090	35	0.80	1.10	1.50	0.70	0.90	1.30	0.70	1.00	1.30	0.70	0.90	1.10
4	2B090	40	0.70	0.90	1.40	0.70	1.10	1.30	0.70	1.00	1.20	0.70	1.10	1.40
4	3B090	40	0.80	1.00	1.20	0.70	0.90	1.20	0.70	1.00	1.30	0.70	0.90	1.30
2	1B100	83	0.70	1.00	1.30	0.70	0.90	1.10	0.70	1.00	1.30	0.70	1.00	1.20
2	2B100	88	0.70	1.00	1.40	0.70	0.90	1.40	0.70	1.40	1.70	0.70	1.00	1.30
2	3B100	104	0.80	1.10	1.50	0.70	1.30	1.70	0.70	1.30	1.50	0.70	1.20	1.80