BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
Fachgebiet Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit

Master-Thesis

Risikoanalyse der dynamischen Interaktionen zwischen E-Scootern und Fußgängern mittels Multi-Agenten-Simulationen

Name: Orhan Caglan
Matrikelnummer: 1647819

1. Prüfer: Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux
2. Prüfer: M.Sc. Basma Khelfa

Solingen, 24.04.2020

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit (Master-Thesis) selbstständig verfasst und keine andere als die angegebene Quelle und Hilfsmittel benutzt sowie Stellen der Abschlussarbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, in jedem Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Ich bin damit einverstanden, dass die Arbeit durch Dritte eingesehen und unter Wahrung urheberrechtlicher Grundsätze zitiert werden darf.

Ort, TT.MM.JJJJ *Unterschrift*

Kurzfassung

Die Zunahme von Mikromobilitäts-Fahrzeugen in Zentralgebieten von Städten, vor allem in Großstädten ist heutzutage nicht zu übersehen und wird in Zukunft auch immer weiter ansteigen. Mit der Zunahme der Mikromobilität wächst auch die Zunahme von möglichen Unfällen zwischen Nutzern der Mikromobilität und Fußgängern. Um diesen möglichen Unfällen vorzubeugen ist es zunächst wichtig die aus empirischen Daten erhobenen bzw. beobachteten Verhaltensweisen von Menschen in Personenströmen zu kennen. Mit dieser Arbeit wird anhand eines computerbasierten Simulationsmodells das Phänomen der Linienbildung in Personenströmen abgebildet. Dieses Phänomen wird tiefergehend analysiert, um hieraus mögliche Gefahren die zu Unfällen führen können zu erkennen.

Ziel dieser Arbeit ist die Risiko- bzw. Simulationsanalyse der Interaktionen zwischen zwei Gruppen von dynamischen Teilchen (Agenten). Die Teilchen sollen die E-Scooter Fahrer und Fußgänger abbilden. Für die Analyse wurde das agentenbasierte Simulationsprogramm „NetLogo“ mit einem eigens erstellten Modell angewendet. Mit diesem Modell wurden mehrere Simulationen mit unterschiedlichen Eingangs-parametern durchgeführt. Beide Gruppen starten ihre Fortbewegung in einer willkürlichen Verteilung. Über eine vorbestimmte Zeit und unter Variation des Lichten Zeitabstandes zum vorausbefindlichen Agenten werden die Bewegungen und Interaktionen beider Gruppen untereinander beobachtet und die mittleren Geschwindigkeiten bzw. die Gesamtflüsse und Linienbildungen aufgezeichnet.

Die Aufzeichnungen zeigten für den Freifluss Bereich eine bestehende Abhängigkeit der Wartezeit und Differenzen der Zeitlücken. Mit Zunahme der Differenz der Zeitlücken wird die Entstehung von Linien verstärkt und somit werden Interaktionen vermindert. Zudem stiegen die Agentenflüsse, je kleiner die Zeitlücken der Agenten untereinander wurden. Im gestauten Bereich bestand keine Abhängigkeit der Wartezeit, jedoch von der Differenz der Zeitlücken. Mit ansteigender Differenz der Zeitlücken kam es hier zur Entstehung von Linien entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung, wodurch es zu einem stärkeren Abfall des Gesamtflusses kommt und hierdurch Interaktionen begünstigt werden.

Abstract

Nowadays the increase of micro mobility vehicles in central areas in cities, particularly in big cities cannot be overlooked and will continue to rise in the future. The increase of micro mobility concludes in an increase of potential accidents between the users of micro mobility and pedestrians. In order to prevent possible accidents, it is important to acquire knowledge about the behaviors of humans in people flow, which is collected or observed from empirical data. This paper deals with the phenomenon of line formation in people flow and portrays it with the use of a computer-based simulation model. This phenomenon will be analyzed in depth, to identify possible dangers which could lead to accidents.

The aim of this paper is to analyze the risks or rather the simulation of the interactions between two groups of dynamic particles (agents). The dynamic particles stand for E-scooter drivers and pedestrians. The agent based simulation program „NetLogo“ with a specially created model was used for the analysis. Several simulations with different input parameters were accomplished with this model. Both groups start moving in an arbitrary distribution. The movements and interactions of the two groups with one another are observed and the average speeds or the total flows and line formations are recorded over a predetermined time and by varying the clear time interval to the agent in front.

The records showed an existing dependency of the waiting time and differences of the time gaps for the free flow area. With increasing waiting time and difference in time gaps the formation of lines is favored and thus interactions are reduced. In the congested area was no dependence on the waiting time, but on the difference in the time gaps. With an increasing difference in the time gaps, lines emerged opposite to the direction of movement, which leads to a greater drop in the overall flow and thereby encourages interactions.

Résumé

L'augmentation du nombre de véhicules de micro-mobilité dans les zones centrales des villes, en particulier dans les grandes villes, ne peut être ignorée aujourd'hui et continuera à augmenter à l'avenir. Plus la micro-mobilité augmente, plus les accidents possibles entre les utilisateurs des engins de micro-mobilité et les piétons augmentent. Enfin de prévenir ces éventuels accidents, il est tout d'abord important de connaître le comportement des personnes dans les flux de piétons, qui est recueilli ou observé à partir de données empiriques. Dans cette thèse, le phénomène de formation des lignes dans les flux de piétons est illustré au moyen d'un modèle de simulation sur ordinateur. Ce phénomène sera analysé plus en détail afin d'identifier les dangers éventuels qui pourraient conduire à des accidents.

L'objectif de cette thèse est l'analyse de risque et la simulation des interactions entre deux groupes de particules dynamiques (agents). Les particules représentent la version numérique des conducteurs et les piétons des e-scooters. Pour l'analyse, le programme de simulation "NetLogo", basé sur des agents a été utilisé avec un modèle spécialement crée. Avec ce modèle, plusieurs simulations avec différents paramètres d'entrée ont été réalisées. Au départ, les deux groupes commencent leur locomotion selon une répartition arbitraire. Sur une période de temps prédéterminée et avec une variation de la distance lumière-temps à l'agent qui précède, les mouvements et les interactions des deux groupes sont observés entre eux, les vitesses moyennes ou les flux totaux et les formations de lignes sont enregistrés.

Les enregistrements ont montré dans la zone de libre circulation une dépendance existante du temps d'attente et des différences des intervalles de temps. Au fur à mesure que la différence des intervalles de temps augmente, la formation de lignes augmente et donc les interactions sont réduites. En outre, les flux d'agents ont augmenté au fur à mesure que les intervalles de temps entre les agents se réduisaient. Dans la zone encombrée, il n'y avait pas de dépendance du temps d'attente, mais il y avait une dépendance de la différence des intervalles de temps. Quand la différence entre les intervalles de temps augmente, des lignes se forment dans le sens opposé à la direction du mouvement, ce qui entraîne une plus grande diminution du débit total et favorise ainsi les interactions.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung ... II

Abstract ... III

Résumé ... IV

Inhaltsverzeichnis ... V

1 Einführung ... 1

1.1 E-Scooter in Deutschland ... 1

1.2 Fußgängerverkehr und die Bedeutung der Sicherheitswissenschaft ... 3

1.3 Motivation und Aufgabenstellung ... 4

2 Grundlagen der Verkehrsdynamik ... 5

2.1 Kategorisierung von Verkehrsdynamiken ... 5

2.2 Modellierungsansätze ... 6

2.3 Trajektorien ... 8

2.4 Variablen des Verkehrsflusses ... 10

2.4.1 Mikroskopische Variablen ... 10

2.4.2 Makroskopische Variablen ... 11

2.5 Fundamentaldiagramme ... 16

2.6 Verkehrsszenarien von Personenströmen ... 19

2.7 Empirische Verhaltensweisen von Personenströmen ... 21

2.7.1 Linienbildung und Blockaden an Engstellen ... 22

2.7.2 Flussoszillationen an Engstellen ... 23

2.7.3 Kreisverkehre in Kreuzungen ... 24

2.7.4 Gruppen ... 25

3 Verkehrs- und Fußgängermodelle ... 27

3.1 Zelluläre Automaten (0. Ordnung) ... 27

3.2 Kollisionsfreies Optimal Velocity Modell (1. Ordnung) ... 29

3.3 Social-Force-Modell (2. Ordnung) ... 30

4 Mikromobilität ... 32

4.1 Gesetzliche Anforderungen ... 32

4.2 Elektro-Mikrofahrzeuge ... 35

4.3 Auswirkungen auf die Umwelt ... 37

5 Agentenbasierte Numerische Analyse ... 39

5.1 NetLogo ... 39

5.2 Simulationsoberfläche und Parameter ... 40

5.3 Durchführung der Simulationen ... 43

5.3.1 Simulation I ... 45

5.3.2 Simulation II ... 46

6 Ergebnisse und Diskussion ... 47

6.1 Simulation I ... 47

6.1.1 Analyse der Linienbildungen ... 47

6.1.2 Analyse der Agentenflüsse ... 52

6.2 Simulation II ... 57

6.2.1 Analyse der Linienbildungen ... 57

6.2.2 Analyse der Agentenflüsse ... 59

7 Ergebniszusammenfassung und Ausblick ... 62

7.1 Ergebniszusammenfassung ... 62

7.2 Ausblick ... 65

Literaturverzeichnis ... 67

Bildverzeichnis ... 70

Tabellenverzeichnis ... 74

Anhang ... 75

1 Einführung

1.1 E-Scooter in Deutschland

Elektro-Scooter gehören schon seit längerer Zeit in vielen europäischen Großstädten wie Paris und Brüssel zum Straßenbild und sind nun auch in deutschen Städten angekommen. Es sind leichte und kleine Fortbewegungsmittel, die immer häufiger, vor allem in Großstädten anzutreffen sind. Über den Zeitraum von zwei Monaten (Ende Juli bis Ende September 2019) hat sich die Anzahl von E-Scootern der drei größten Verleiher (Lime, Voi und Tier) in Deutschland von knapp 13.000 auf über 31.000 mehr als verdoppelt (Consultants, 2019). Die kleinen Transportmittel die meistens mit einem Elektromotor angetrieben werden sind deutlich kompakter und wendiger als Autos mit Verbrennungsmotoren.

Bild 1: E-Scooter der Marke Lime.

Laut der *„Verordnung über die Teilnahme von Elektrokleinstfahrzeugen am Straßenverkehr (Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung – eKFV)“* mit dem Inkrafttreten am 15. Juni 2019 ist die Nutzung von Elektro-Scootern in Deutschland offiziell zugelassen und wird mit diesem Gesetzestext in den öffentlichen Straßenverkehr integriert, jedoch nicht uneingeschränkt (s. Kapitel 4).

Während in Deutschland die kleinen Elektro-Mikrofahrzeuge einen Hype auslösen, werden in Spanien die Regeln, aufgrund von Unfällen teilweise auch mit Todesfolge, schon verschärft. In Madrid beispielsweise sind E-Scooter nur noch in Tempo-30-Zonen und auf Fahrradwegen erlaubt. Die kleinen Fahrzeuge werden oft und gerne als die Hoffnungsträger für eine grünere Mobilität angepriesen und als umweltfreundliche Fortbewegungsmittel der Zukunft bezeichnet. Diese Bezeichnung ist jedoch im Vergleich zu anderen Fortbewegungsmitteln laut einer aktueller Forschungsarbeit (Hollingsworths, August 2019) nicht gerechtfertigt (vgl. Abschnitt 4.3 Auswirkungen auf die Umwelt).

Die Beweglichkeit der Elektro-Mikrofahrzeuge ist in etwa vergleichbar mit der eines Fußgängers, wobei beide eine verschiedene Trägheit besitzen. Aufgrund ihrer kompakten Bauweisen sind E-Scooter sehr platzsparende Transportmittel und hervorragend für Kurzstrecken geeignet und sie könnten durchaus eine Lösung zur Entlastung des Auto-Verkehrs und zur Minderung des Lärmpegels in Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen bieten.

1.2 Fußgängerverkehr und die Bedeutung der Sicherheitswissenschaft

Die Analyse und Untersuchung von Fußgängern und Fußgängerströmen ist sehr komplex und in ihrer Forschung in höchstem Maße interdisziplinär, denn verschiedenste Fachrichtungen tragen Erkenntnisse zu dieser Forschung bei:

- **Biologie:** Untersucht die Gehbewegung des Stütz- und Bewegungsapparats des Menschen.
- **Soziologie:** Untersucht das soziale Verhalten der Menschen untereinander bzw. die Gruppendynamik. Behandlung der Fußgänger als Entitäten, die zu einer Gruppe (Familie, Freunde,…) gehören.
- **Psychologie:** Untersucht die Entscheidungen des Menschen und die Wahrnehmungen von Informationen in komplexen Umgebungen zur Erreichung des Zieles.
- **Physik:** Entwicklungen von mathematisch-physikalischen Bewegungsmodellen, mit denen das Verhalten von Fußgängerströmen modelliert und mittels Computersimulationen visualisiert werden können.
- **Informatik:** Untersucht die Bewegungsmodelle durch die Visualisierung anhand von Simulationsprogrammen.
- **Sicherheitsingenieurwesen:** Führt alle Erkenntnisse der Forschungsarbeiten aus den Fachrichtungen zusammen und untersucht diese anhand von Laborexperimenten und Computersimulationen, um daraus Maßnahmen, Vorschläge und Methoden zur Minimierung von gefahrbringenden Zuständen zu entwickeln.

Das Gebiet der Sicherheitswissenschaft benötigt also das Wissen und die Erkenntnisse aus den oben genannten Fachgebieten, um anhand dieser Erkenntnisse Sicherheitsmaßnahmen und möglichst allgemeingültige Methoden zur Reduzierung von möglichen Risiken zu entwickeln. Die daraus resultierenden Erkenntnisse können dann unter anderem in Infrastruktur Projekten bzw. im Städtebau bspw. zur Planung und Dimensionierung von Fußgängerzonen in dicht besiedelten Städten genutzt werden.

1.3 Motivation und Aufgabenstellung

Das Thema dieser Arbeit ist die Risiko- bzw. computerbasierte Simulationsanalyse der Interaktionen von dynamischen Teilchen, welche die Bewegungen und Interaktionen von E-Scooter Fahrern und Fußgängern abbilden sollen. Hierfür wird die agentenbasierte Simulationssoftware „*NetLogo*“ mit einem eigens erstellten mikroskopischen Modell verwendet. Bei den mikroskopischen Modellen wird vorwiegend versucht eine realitätsnahe Abbildung der lokalen Interaktionen bzw. der lokalen Verhaltensweisen zwischen den Personen abzubilden. Die Ergebnisse und Beobachtungen der Simulationen können dann dazu verwendet werden, um bestimmte Regeln wie, Geschwindigkeitsbegrenzungen für E-Scooter Fahrer bis Fahrverbotszonen zu entwickeln. Zudem können Sie eine Hilfe für die Planung und den Betrieb von Infrastrukturen sein.

Um das Simulationsmodell tiefgehend analysieren zu können, ist es wichtig die empirisch bekannten Verhaltensmuster (siehe Kap. 2 unter 2.7) von Personenströmen zu kennen. Diese Verhaltensmuster werden anhand des Simulationsmodells mit ausgewählten Szenarien tiefgehend analysiert. Der Fokus liegt hierbei ausschließlich auf den selbstorganisierten und kollektiv entstehenden Linienbildungen von Personenströmen. Es sollen dazu zyklische Simulationen für unterschiedliche Zeitabstände (siehe Kap. 2 unter 2.4.1 Bild 6) und Wartezeiten durchgeführt werden. Diese werden dann auf Linienbildung sowohl visuell als auch anhand des Faktors der Linienbildung und mittleren Geschwindigkeiten bzw. Gesamtfluss analysiert werden. Dabei sollen die tatsächlichen Abhängigkeiten der Differenzen der Zeitlücken der Agenten untereinander und der Einfluss der Wartezeiten auf die Linienbildungen durch Variation dieser Variablen, festgestellt werden.

2 Grundlagen der Verkehrsdynamik

Für die Modellierung bzw. Entwicklung von Verkehrsflussmodellen ist es nötig alle wichtigen Faktoren bzw. Variablen heranzuziehen, um die Verkehrsdynamik von Personen mit Hilfe von Mathematischen Modellen annähernd beschreiben und computerbasiert simulieren zu können.

Das Interesse an der Modellierung der Verkehrsdynamik besteht seitdem es wiederholend zu Staus auf den Straßen kam. Wenn man das Verhalten eines Fahrzeugs oder eines Fußgängers vorhersagen kann, ist es möglich mit Theorien des Verkehrsflusses bei einem anfänglichen Datensatz und anschließendem anpassen des Durchflusses den Gesamtdurchsatz in bestimmten Abschnitten zu maximieren. In Regionen mit hoher (Personen-) Verkehrsdichte wäre dies besonders interessant (Pushkin Kachroo, 2008). Die Entwicklung von dynamischen Evakuierungssystemen mittels Computer-Simulationen folgt aus der eindimensionalen Verkehrsflusstheorie (Mahmassani, 1991) (Hughes, 2002) (Helbing, A fluid-dynamic model for the movement of pedestrians, 1992) und ähnelt in vielerlei Hinsicht dem Verkehrsflussproblem des Fahrzeugs (May, 1990).

2.1 Kategorisierung von Verkehrsdynamiken

Häufig werden zur Kategorisierung von Verkehrsdynamiken drei verschiedene Verhaltensebenen verwendet. Auf der **strategischen Ebene** entscheiden die Agenten welche Aktivitäten zur Zielerreichung sie ausführen möchten und in welcher Reihenfolge und zu welchem Zeitpunkt sie stattfinden sollen. Die taktische Ebene bringt dann die erzeugten und ungeordneten Aktivitäten in eine Reihenfolge (Hoogendoorn, 2001) (Serge P Hoogendoorn, 2004). Diese Ebene kann nicht simuliert werden, es dient zur Wahl des Szenarios und dessen Parameter.

Die nächste Ebene ist die **taktische Ebene**, in dieser werden die kurzfristigen Entscheidungen der Fußgänger, z.B. die Routenwahl zur Zielerreichung getroffen. Dabei wird die Routenwahl von externen (Hindernisse oder Stau) und internen Faktoren (Motivation, Zeitdruck, physischer Zustand) bestimmt (Serge P Hoogendoorn, 2004).

Anhand der taktischen Ebene lässt sich die **operationale Ebene** ableiten. Hier wird das tatsächliche Gehverhalten, die Art der Bewegung des Agenten beschrieben. Zudem spielt die Vermeidung von Kollisionen (Art der Ausweichung bzw. Interaktionen) hier eine Rolle. In Bild 2 ist die Übersicht der drei Verhaltensebenen nach Hoogendoorn (Hoogendoorn SP, 2002) zu sehen.

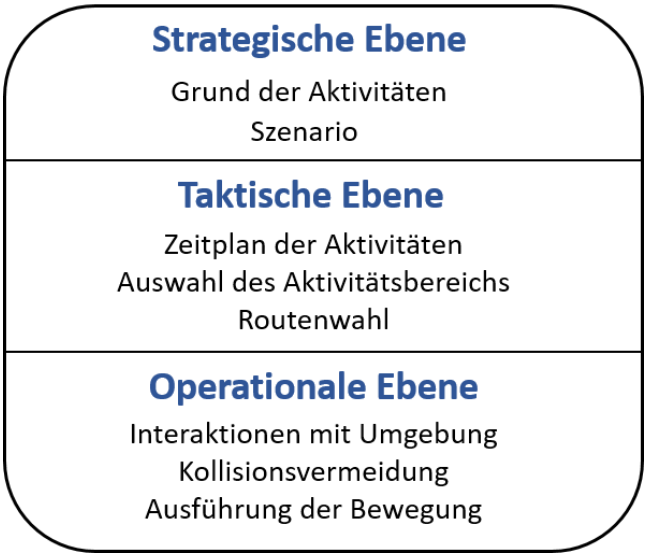


Bild 2: Die verschiedenen Ebenen von Fußgängerverhalten. *(Hoogendoorn SP, 2002)*

2.2 Modellierungsansätze

Mit einem mathematischen Modell eines bestimmten Systems, wie z.B. die Verkehrsdynamik in einem betrachteten Abschnitt oder Personenströme in einem Raum wird versucht, die wichtigsten Freiheitsgrade zu erfassen und diese in einem berechenbaren Gleichungssystem zu nutzen. Hieraus können dann charakteristische Größen wie Fluss, Geschwindigkeit und Dichte vorhergesagt werden. Bei der Nutzung des Computers zur

Visualisierung der Verkehrsdynamik anhand von Multi-Agenten-Simulationen kann dann das entwickelte Modell zur Untersuchung des Systems genutzt werden. Mathematische Modelle unterscheiden sich auch in ihrer Dimensionsbetrachtung. Spricht man von **eindimensionalen** Verkehr, so ist die Bewegung der Agenten nur in x-Richtung gemeint. Bei einem **zweidimensionalen** Verkehr bewegen sich die Agenten in x-Richtung mit zusätzlicher Ausbreitung in y-Richtung, d.h. die Agenten können sich überholen während ihrer Fortbewegung.

Die Modelle der realen Geschehnisse im Verkehr können nach verschiedenen Modellierungsansätzen entwickelt werden. Zur Visualisierung von Verkehrsdynamiken in Simulationsprogrammen können makroskopische, mesoskopische und mikroskopische Modelle herangezogen werden.

Bei **makroskopischen Modellen** werden die Ströme von Fußgängern oder Fahrzeugen als ein Gesamtes Objekt gesehen und nicht das Verhalten der einzelnen Fußgänger bzw. Fahrer betrachtet. Informationen über das gesamte Szenario, wie z.B. die Anzahl der Fußgänger, durchschnittliche Dichte etc. sind erforderlich und werden als Parameter für die Computer-Simulation verwendet. Die kollektive Bewegung der Fußgänger ist bei diesen Modellen von Interesse. Makroskopische Modelle lassen sich in die Analyse der Kapazität, in strömungsbasierte Modelle und Netzwerkflussmodelle unterscheiden.

Bei **mikroskopischen Modellen** werden die Fußgänger bzw. Fahrer mit ihrer Charakteristik als ein eigenes Objekt betrachtet (explizite oder implizite Differenzierung). Es wird für jedes Objekt jeweils ein individueller Weg berechnet, welcher abhängig von dessen Ziel und Interaktionen mit anderen Objekten ist. Die verwendeten Parameter wie, Wunschgeschwindigkeit, Gewicht, Alter, Körpergröße, zu erreichendes Ziel, Reaktionszeit etc. werden modellspezifisch und individuell für jede Person (Objekt) gewählt. Bild 3 zeigt eine Übersicht über die Klassifikation der Modelle zur Fußgängersimulation.

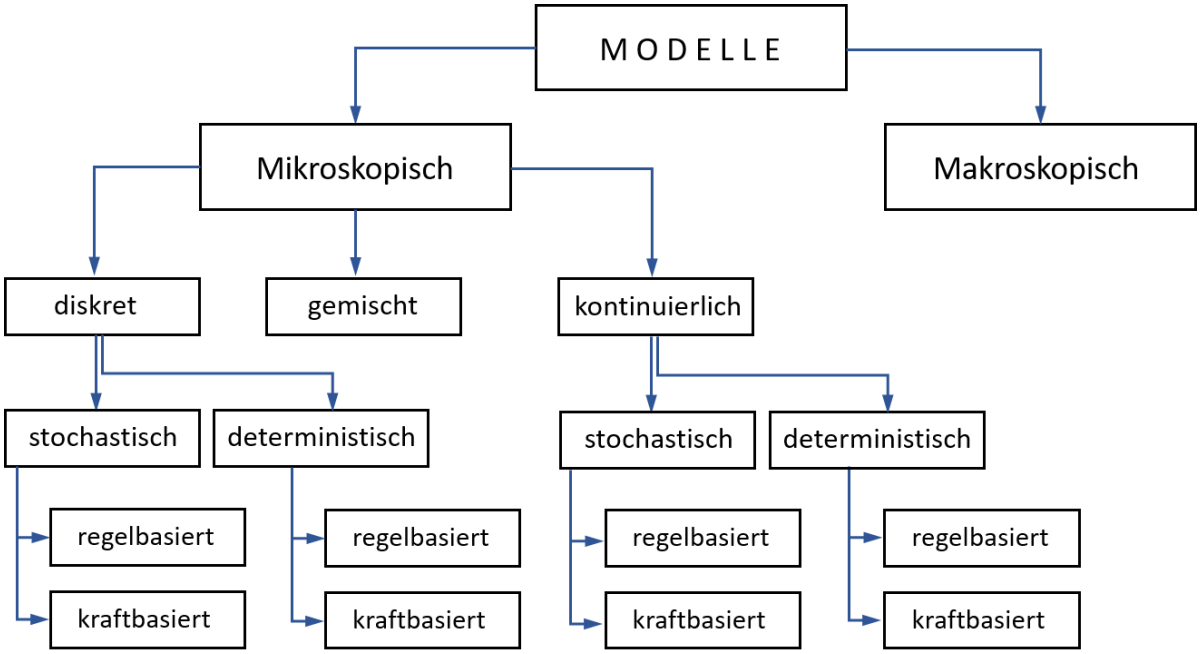


Bild 3: Klassifikation der Modelle. Beschreibung: Makroskopisch vs. Makroskopisch / Dynamik: stochastisch vs. Deterministisch / Variablen: kontinuierlich vs. Diskret, (gemischt) / Wechselwirkung (Interaktion): regelbasiert (Diskrete Dynamik/Modell) vs. Kraftbasiert (stetige Differentialgleichungssysteme). *Quelle:* Modelling of Pedestrian and Evacuation Dynamics (Eigene Darstellung)

Bei **mesoskopischen Modellen** handelt es sich um die Verbindung von makroskopischen und mikroskopischen Modellen. Es kann beispielsweise ein eingegrenztes Betrachtungsgebiet (Stadtgebiet) mit dem mikroskopischen Ansatz und die umliegenden Verkehrsgeschehnisse (Zu- und Abfluss von Fußgängern und E-Scooter Fahrern in das eingegrenzte Betrachtungsgebiet) mit dem makroskopischen Ansatz modelliert werden (Dallmeyer, 2014).

2.3 Trajektorien

Trajektorien sind Zeitreihen der Agentenpositionen und stellen den Verlauf bzw. Weg der zurückgelegten Strecke eines Agenten dar. Anhand von Trajektorien können alle makroskopischen Variablen des Verkehrs berechnet werden. In Bild 4 sind drei verschiedene Trajektorien-Aufzeichnungen von Verkehrsdynamiken zu sehen.

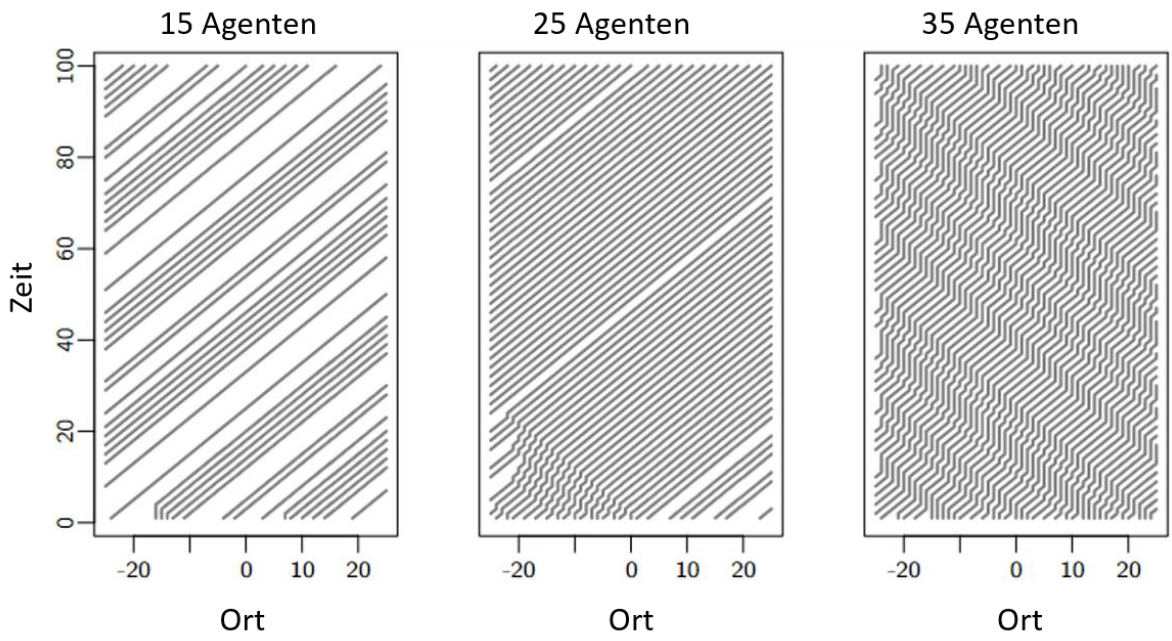


Bild 4: Trajektorien von drei verschiedenen eindimensionalen Verkehrsdynamiken, mit dem Unterschied in der Anzahl der Agenten. *Links:* Experiment mit 15 Agenten. Trajektorien verlaufen geradlinig, d.h. die Bewegung aller Agenten ist gleichförmig geradlinig. *Mitte:* Experiment mit 25 Agenten. Die unteren Trajektorien verlaufen nicht geradlinig. Es sind kurze vertikale Verläufe in den Trajektorien zu erkennen, d.h. die Agenten kamen hier kurzeitig zum Stillstand. *Rechts:* Experiment mit 35 Agenten. In jeder einzelnen Trajektorie sind immer wieder kurze vertikale Verläufe zu erkennen, wodurch ein klar erkennbares Stufen-Muster zum Vorschein kommt. Dies wird auch Stop-and-Go-Verkehr oder Stau genannt.

In Bild 4 sind die Trajektorien von einem eindimensionalen Verkehr zu sehen, d.h. die Fußgänger (Agenten) bewegen sich alle hintereinander in dieselbe Richtung ohne sich gegenseitig zu überholen (eindimensionaler Verkehrsfluss). Bei der Aufzeichnung von Trajektorien eines zweidimensionalen Verkehrs, d.h. während der Bewegung findet eine Ausbreitung über die Breite des Weges statt (Überholvorgänge), dann würden sich die Trajektorien überkreuzen (s. Abschnitt 2.6 Verkehrsszenarien von Personenströmen).

2.4 Variablen des Verkehrsflusses

2.4.1 Mikroskopische Variablen

Geschwindigkeit und Beschleunigung

In Bild 5 ist die Draufsicht von einem Agenten (schwarzer Punkt) bzw. die Trajektorie (Laufbahn, graue Kurve) mit den Positionen $x_1(t_1)$, $x_2(t_2)$, … und dem diskreten Zeitschritt (∂t) zu sehen. Fußgänger (Agenten) werden näherungsweise als Ellipsen mit der Breite und Tiefe des Körpers als Hauptachse betrachtet.

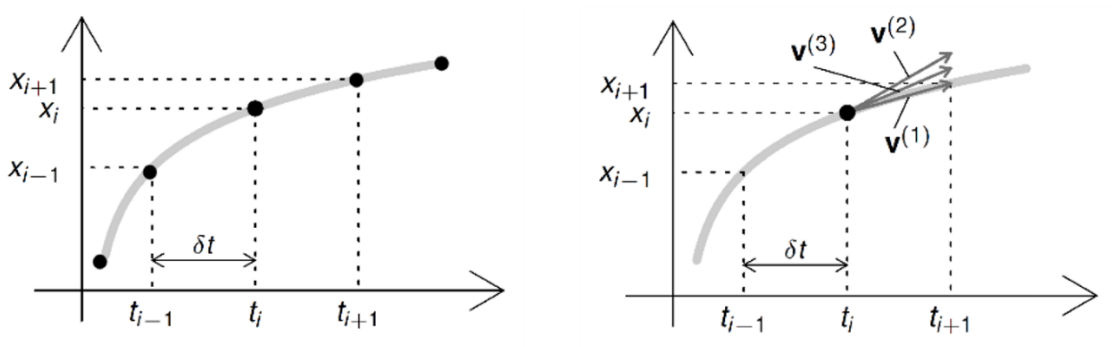


Bild 5: Laufweg eines Fußgängers. Ordinate x(t) = Position des Fußgängers zum Zeitpunkt t. Abszisse t = Zeit und mit diskreten Zeitschritten von ∂t.

Mikroskopische Mittlere Geschwindigkeit:

Implizit: $$v_i^{(1)} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\delta t} \quad (1)$$

Explizit: $$v_i^{(2)} = \frac{x_{i-1} - x_i}{\delta t} \quad (2)$$

Mittlere Geschwindigkeit: $$v_i^{(3)} = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2\delta t} \quad (3)$$

Mikroskopische Mittlere Beschleunigung:

$$a_i^{(1)} = \frac{v_{i+1} - v_i}{\delta t} = \frac{x_{i+1} - 2x_i - x_{i-1}}{\delta t^2} \tag{4}$$

Abstand

In Bild 6 ist die eindimensionale Darstellung von mehreren Agenten als blaue Kreise zur Verdeutlichung der folgenden Abstands- und Differenzvariablen, abgebildet:

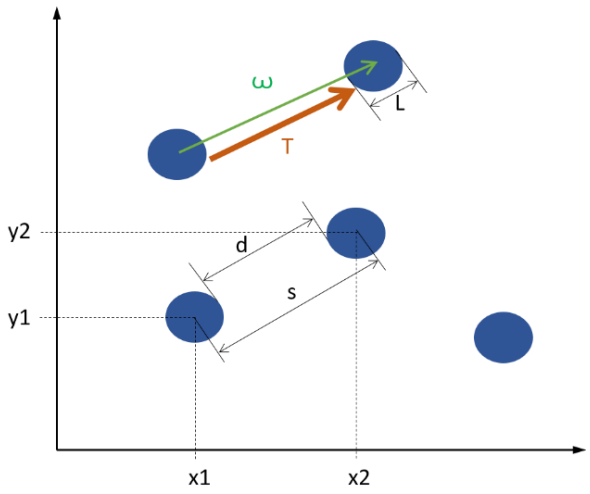


Bild 6: Eindimensionale schematische Darstellung von Fußgängern und E-Scooter Fahrern (Agenten).

Räumlicher Abstand:

$$s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \tag{5}$$

Lichter Abstand:

$$d = s - L \tag{6}$$

Zeitlicher Abstand:

$$\omega = \frac{s}{v} \tag{7}$$

Lichter Zeitabstand:

$$T = \frac{d}{v} \tag{8}$$

2.4.2 Makroskopische Variablen

Dichte

Die Dichte (ρ) ist ein Maß für die Befüllung in einem betrachteten Bereich (bezogen auf Messfläche oder Messlinie). Sie ist durch die Anzahl von Fußgängern (N) bezogen auf eine Fläche (A) in [m²] oder Linie in [m] gegeben (s. Bild 7).

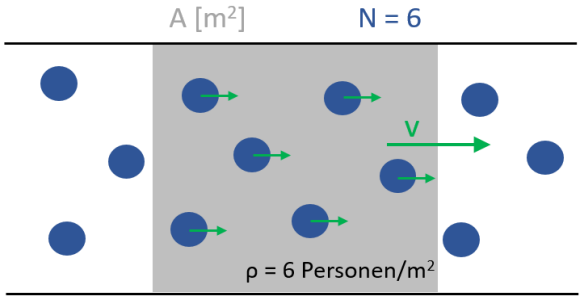


Bild 7: Definition der Dichte (ρ) bezogen auf den Messbereich (A), mit Anzahl (N) und der durchschnittlichen Geschwindigkeit (v).

$$\rho = \frac{N}{A} \tag{9}$$

An Engstellen kommt es in der Regel zu größeren Fluktuationen der Dichten, da hier die Messstelle im Verhältnis zur Anzahl der Personen (N) sehr klein ist. Siehe Bild 8 zur Verdeutlichung hoher Fluktuationen von Personendichten an Engstellen.

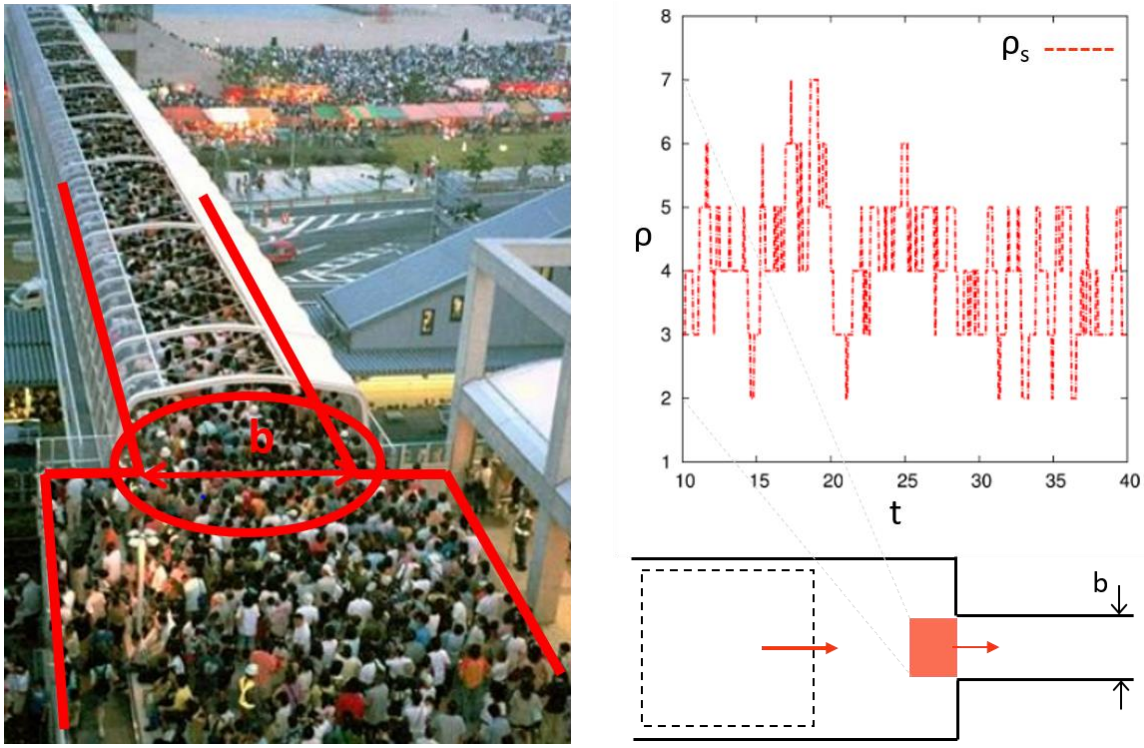


Bild 8: *Links:* Kobe - Akashi Japan (2001). Brücke zwischen Strand und Bahnhof. Kurz vor dem Betreten der Brücke bildet sie eine Engstelle für Fußgängerströme, wodurch es aufgrund zu hoher Dichten zu Unfällen kam. *Rechts:* Diagramm ρ(t) mit einem charakteristischen Verlauf für Fußgängerströme an Bereichen von Engstellen mit ρ_{min} = 2 / m² bis ρ_{max} = 7 / m².

Voronoi-Dichte:

In Anlehnung an die Arbeit von Jun Zhang (Jun, 2012) kann die Dichte eines Personenstromes auch mit Hilfe eines Voronoi-Diagrammes berechnet werden. Jeder Punkt im Raum wird zu einer Voronoi-Zelle (A_i) zugewiesen, die einem bestimmten Fußgänger (i) zugeordnet ist. Bei der Definition der Dichte anhand von Bild 7 und Formel (9) handelt es sich um einen diskreten Schätzwert, während die Voronoi-Dichte stetig über das Voronoi-Diagramm bestimmt wird, wodurch es hier zu schwächeren Fluktuationen in der Dichte kommt.

Man stelle sich die Draufsicht eines Personenstromes vor und betrachtet nun eine Person aus dieser. Verbindet man diese Person zu allen anderen Personen in seiner unmittelbaren Nähe und legt durch den Mittelpunkt der Verbindungslinien senkrechte Linien an, so erhält man die Voronoi-Zelle (A_i). Jeder Punkt in A_i ist näher zur Person i, als zu jeder anderen Person im betrachteten Bereich des Personenstromes. In Bild 9 ist die schematische Darstellung von konstruierten Voronoi-Zellen zu sehen.

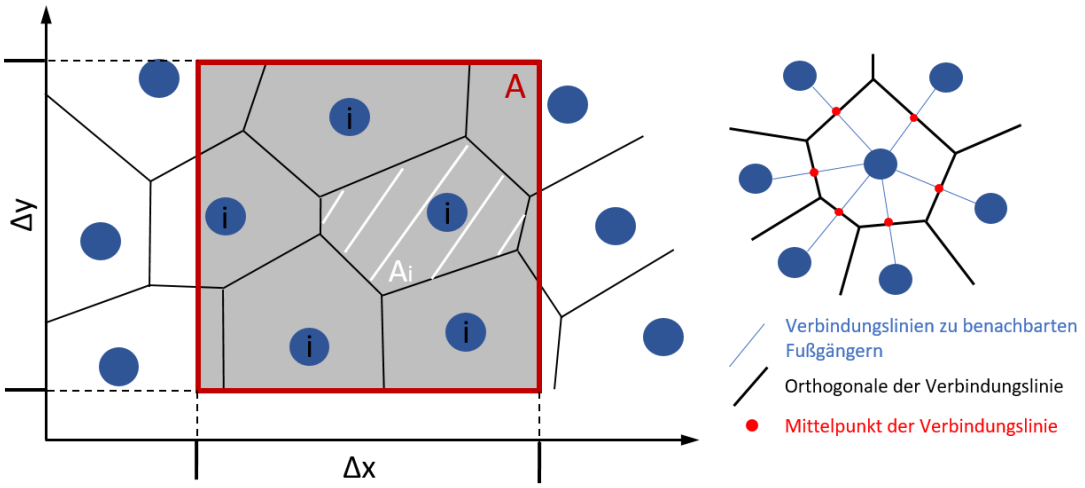


Bild 9: *Links:* Personenstrom mit Messbereich (A), Personen (i) und Voronoi-Zelle (A_i). *Rechts:* Konstruktion einer Voronoi-Zelle zur Bestimmung der Dichte. Man verbindet zunächst einen Agenten (i) mit seinen nächsten Nachbarn und legt durch den Mittelpunkt (rote Punkte) der Verbindungslinien (blaue Linien) orthogonale Linien (schwarze Linien). Die Fläche die dadurch entsteht ist die Voronoi-Zelle A_i.

Die Voronoi-Dichte für eine Zelle (A_i) und somit für eine Person (i) kann aus der Formel (9) wie folgt berechnet werden (Jun, 2012):

$$\rho_{v,i} = \frac{1}{A_i} \tag{10}$$

Bildet man den Kehrwert der Dichte nach Fruin (Fruin, 1971), so erhält man einen Kennwert, welcher als Modul (A_M) oder maximal mögliche Dichte bezeichnet wird und mit diesem der durchschnittlich zur Verfügung stehende Platz (Platzbedarf) der Fußgänger ermittelt werden kann:

$$A_M = \frac{1}{\rho} \tag{11}$$

Die Voronoi-Dichte für einen Messbereich mit mehreren Personen (i) und somit mehreren Voronoi-Zellen (A_i) ist definiert als (Jun, 2012):

$$\rho_v = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{N} \iint \rho_{v,i} \; dx \, dy \tag{12}$$

Wird nun der Messbereich (A) betrachtet, in dem die Geschwindigkeit des gesamten Personenstromes ermittelt werden soll, so können die Geschwindigkeiten jeder Person (i) im Messbereich gemittelt werden. Je nach Berechnungsmethode der Dichte ergeben sich andere Formeln zur Berechnung der mittleren Geschwindigkeit in einem bestimmten Messbereich. Mit dem Ansatz der Voronoi-Dichte werden alle Zellen der Personen (A_i) die sich im Messbereich befinden betrachtet und die Geschwindigkeiten der Personen mit Hilfe eines Doppelintegrales gemittelt (Jun, 2012):

$$v = \frac{\iint v_{\Delta x,i} \, dx \, dy}{\Delta x * \Delta y} \tag{13}$$

Fluss und Geschwindigkeit

Der Fluss (J) ist ein Maß für den Durchsatz von Personen (ΔN), die eine Messlinie (s. Bild 10, rote gestrichelte Linie) pro Zeit- und Längeneinheit durchlaufen. Der spezifische Fluss (J_s) gibt den Fluss einer Messlinie pro Meter lichter Breite (b) und pro Sekunde an.

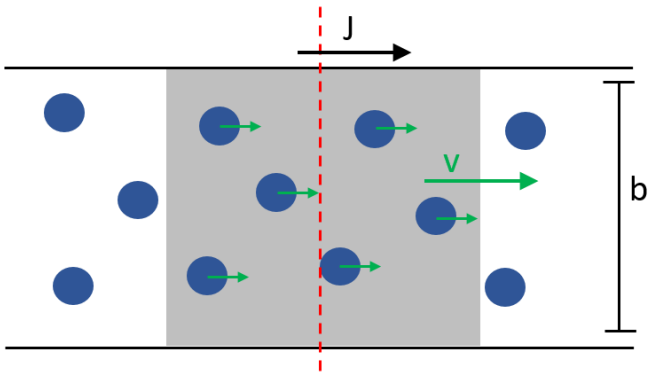


Bild 10: Schematische Darstellung von Agenten (Personen) zur Definition von Fluss (J) und spezifischer Fluss (J_s).

Flussgleichung:

$$J = \rho * v * b \qquad (14)$$

Fluss:

$$J = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{1}{\omega} \qquad (15)$$

Spezifischer Fluss:

$$J_s = \frac{J}{b} = \rho * v \qquad (16)$$

Mittlere Geschwindigkeit:

$$v = \frac{\sum v_i}{\Delta N} \qquad (17)$$

Je größer die Dichte, desto kleiner wird die Geschwindigkeit und somit der Fluss des Personenstromes.

Ist der Fluss bekannt, kann durch umstellen der Formel (15) bestimmt werden, wie viele Personen ΔN in einem Zeitraum Δt einen bestimmten Bereich passieren können.

$$\Delta N = J * \Delta t \qquad (18)$$

Durch weiteres umstellen nach Δt kann die benötigte Zeit von ΔN Personen für das Überschreiten einer bestimmten Stelle ermittelt werden.

$$\Delta t = \frac{\Delta N}{J} \qquad (19)$$

Die Wunschgeschwindigkeit (auch freie Gehgeschwindigkeit) einer Person im Verkehr ist die Geschwindigkeit, die der Fußgänger ohne Interaktionen mit seiner Umgebung erzielen möchte. Dabei spielen mehrere beeinflussende Faktoren eine Rolle (Blitzer, 2010):

- **Personenmerkmale:**
  Geschlecht, Alter, Größe, Gewicht, Gesundheitszustand, Motivation, (psychologischer Faktor), Zweck
- **Wegmerkmale:**
  Zweck, Vertrautheit, Länge des Weges
- **Infrastruktur:**
  Wegtyp, Beschaffenheit (Untergrund), Längsneigung
- **Umgebung:**
  Attraktivität, Witterung, soziale Sicherheit

Laut der Dissertationsarbeit von Blitzer (Blitzer, 2010) liegt der Mittelwert der Wunschgeschwindigkeit von Fußgängern bei 1,34 m/s, bei einer Standardabweichung von 0,08 m/s. Dieser Wert wurde anhand von empirisch ermittelten mittleren Wunschgeschwindigkeiten (Europa, Asien, Nordamerika, Australien) ermittelt (vgl. (Blitzer, 2010), Seite 33, Tab. 2-1).

2.5 Fundamentaldiagramme

Für die Analyse von wichtigen Kenngrößen und Bemessung von Verkehrs- und Personendynamiken eignen sich Fundamentaldiagramme (FD). Bei der Anwendung auf den Fußverkehr und Darstellung dieser können in den Fundamentaldiagrammen die folgenden Größen betrachtet und abgebildet werden:

- $J(\rho)$ → Fluss in Abhängigkeit der Dichte
- $J_s(\rho)$ → Spezifischer Fluss in Abhängigkeit der Dichte
- $v(\rho)$ → Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Dichte

- $v(J_s)$ → Geschwindigkeit in Abhängigkeit des spezifischen Flusses
- $J(v)$ → Fluss in Abhängigkeit der Geschwindigkeit
- $v_F = f(s)$ → Freie Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Abstandes

Die Größen $v(\rho)$, $v(J_s)$ und $J(v)$ ergeben sich aus der Flussgleichung (Formel 14) und dem spezifischen Fluss (Formel 16). Somit lassen sich verschiedene Darstellungen des FD´s mit Hilfe der Flussgleichung ineinander überführen. Bei der Abbildung der Beziehung und Abhängigkeit zwischen der Freien Geschwindigkeit (v_F) und dem Abstand (s) der Agenten im Personenstrom spricht man von einem Mikroskopischen FD.

Fundamentaldiagramme beschreiben die Transporteigenschaften von dynamischen Verkehrssystemen, daher können FD´s zur Richtigkeit mathematischer Modelle herangezogen und auch zur Kalibrierung und Validierung verwendet werden (Chraibi, 2012).

In Bild 11 ist der schematische Verlauf eines Fundamentaldiagrammes $J_s(\rho)$ und $v(\rho)$ nach Weidmann (Weidmann, 1993) abgebildet. Die Grüne Gerade stellt dabei den Freifluss Bereich dar. In diesem Bereich der Dichte ($\rho_C \approx 1{,}5$ Personen/m^2) haben die Agenten eine freie Gehbewegung bis zum maximalen Fluss (J_{max}). Ab diesem Bereich (Beginn der roten Geraden) erhöht sich die Agentendichte und der Personenfluss beginnt zu sinken. In diesem Bereich der Personendichten (2 – 6 Personen/m^2) ist die freie Gehbewegung durch den geringen Platzbedarf eingeschränkt und es besteht Gefahr zur Staubildung bis zu einem Stillstand $v(\rho_0) = 0$ der Agenten. Der Bereich des Übergangs vom Freifluss in den gestauten Bereich wird als Kapazität $C = J_{max}$ bezeichnet und kann als Kennzahl der Sicherheit, zur Dimensionierung (z.B. Breite von Verkehrs-Zonen), Abschätzung von möglichen Gefahren oder zur Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur dienen.

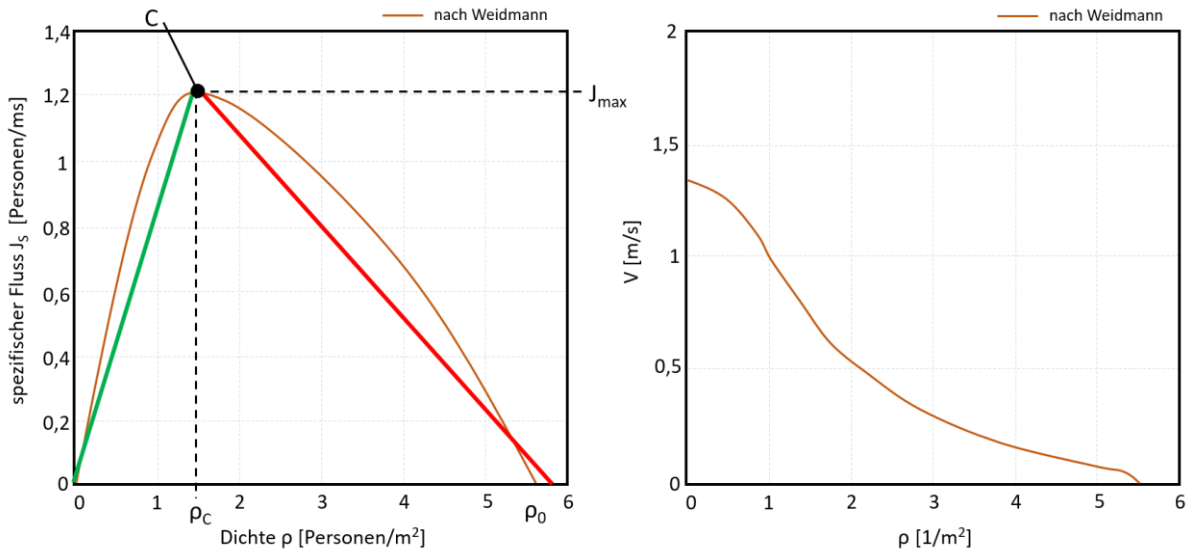


Bild 11: FD nach Weidmann *(Weidmann, 1993)*. Grüne Gerade (Freifluss Bereich). Rote Gerade (gestauter Bereich). *Rechts:* Gehgeschwindigkeit (v) in Abhängigkeit der Personendichten (ρ).

Geht man von einem Idealfall aus und beschränkt sich auf die grüne Gerade, so lässt sich aus der Steigung mit $\Delta J_S(\rho)$ / $\Delta\rho$ die Freie Geschwindigkeit $v_{Frei}(\rho < \rho_C)$ des Freifluss Bereiches ermitteln:

$$v_{Frei}(\rho < \rho_c) = \frac{1}{T} * \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0}\right) \tag{20}$$

Die Dichte (ρ_C) in dem Bereich, in dem der spezifische Fluss am größten ist, berechnet sich mit folgender Formel:

$$\rho_C = \frac{\rho_0}{1 + \rho_0 * v_{Frei} * T} \tag{21}$$

Der Bereich des Extrempunktes $C = J(\rho_C) = J_{max}$ der Kurve gibt den maximalen Fluss (J_{max}) und die Kapazität C des betrachteten Verkehrsabschnittes an.

$$C = \frac{v_{Frei}}{v_{Frei} * T + L} \tag{22}$$

In der nachfolgenden Abbildung (Bild 12) ist ein FD nach Fruin (Fruin, 1971) zu sehen. In diesem sind alle wichtigen Größen in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Flächen pro Agent (A) und Voronoi-Dichte (ρ_V) zu sehen.

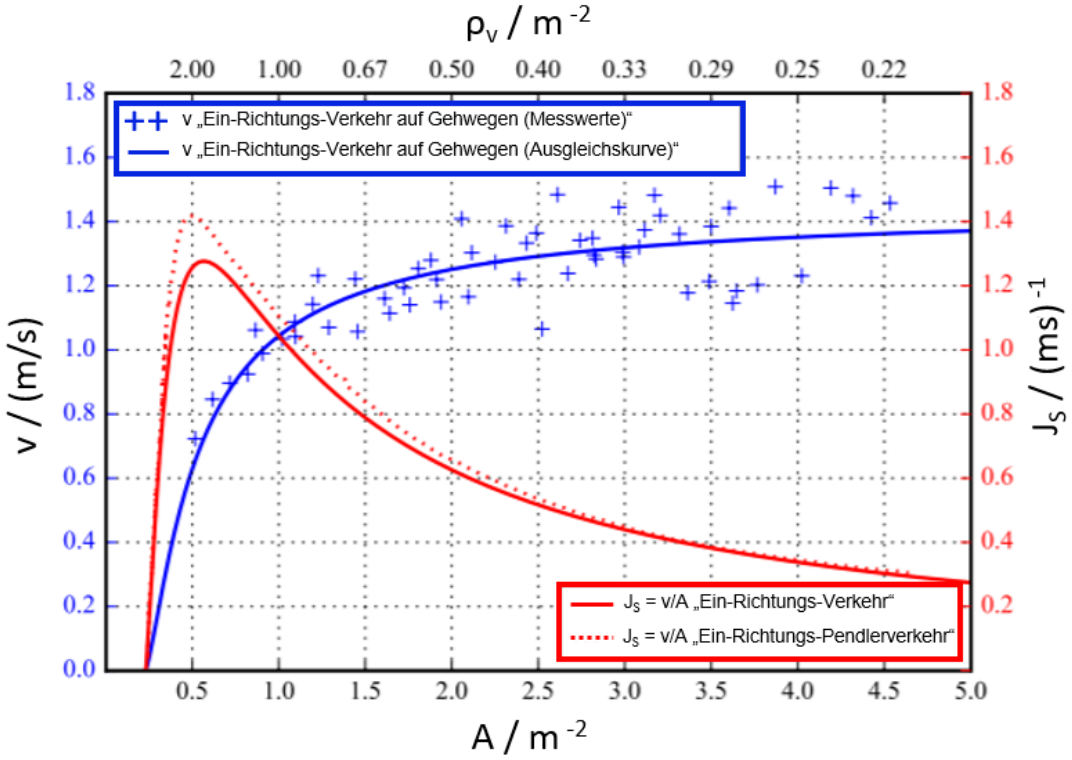


Bild 12: Fundamentaldiagramm nach Fruin *(Fruin, 1971)*. Auf den Ordinaten sind die Geschwindigkeiten (links) und spezifischen Flüsse (rechts) und auf den Abszissen die zur Verfügung stehende Fläche pro Agent (unten) und Voronoi-Dichte (oben). Quelle: *(Holl, 2016)*

2.6 Verkehrsszenarien von Personenströmen

Je nach Infrastruktur Design existieren unterschiedliche Arten von Fußgängerverkehren. Legt man den Fokus auf Gebiete mit hohen Menschenmengen, wie es z.B. in den Innenstädten von Großstädten vorkommt, so wird man auf die von Stefan Holl (Holl, 2016) vorgestellten Verkehrsszenarien antreffen. Daher können die vorgestellten Arten von Fußverkehren zur Analyse der dynamischen Interaktionen zwischen E-Scooter Fahrern und Fußgängern herangezogen werden. Dabei werden Unidirektionale, Bidirektionale und Multidirektionale Fußverkehre unterschieden. In

den nachfolgenden Bildern (Bild 13, Bild 14 und Bild 15) werden die Fußgänger Verkehrsszenarien schematisch dargestellt und in Form von Ort-Zeit-Diagrammen (Trajektorien) veranschaulicht (Holl, 2016).

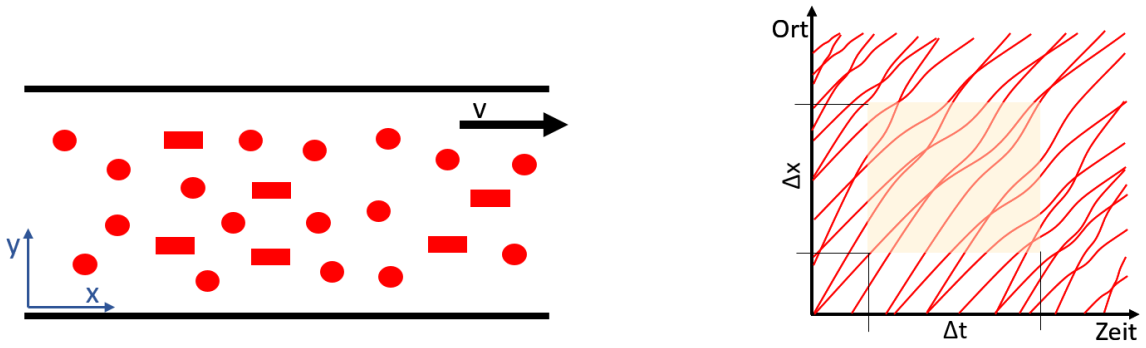


Bild 13: Unidirektionales Verkehrsszenario von E-Scooter Fahrern (rechteckige Figur) und Fußgängern (kreisförmige Figur). *Links:* Zweidimensionaler Verkehr des Personenstromes innerhalb einer gegebenen Breite. Alle Agenten (E-Scooter Fahrer und Fußgänger) bewegen sich in x-Richtung. *Rechts:* Trajektorien-Aufzeichnungen der unidirektionalen Bewegung des Personenstromes. Die Schnittpunkte der Trajektorien entstehen durch unterschiedliche Geschwindigkeiten der Agenten (Überholvorgänge). *In Anlehnung an (Holl, 2016)*

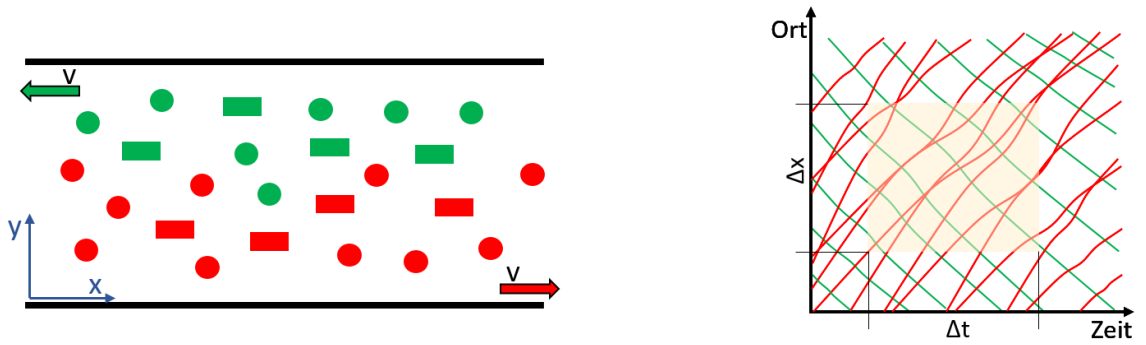


Bild 14: Bidirektionales Verkehrsszenario von Personenströmen. *Links:* Zweidimensionaler Verkehr von Personenströmen mit Bewegungsrichtung in negative und positive x-Richtung und Ausbreitung innerhalb einer gegebenen Breite (y-Richtung). *Rechts:* Die roten Trajektorien sind die Ort-Zeit-Verläufe der roten Agenten mit Überkreuzungen der Trajektorien, welche die Überholvorgänge darstellen. Die grünen Trajektorien sind die Ort-Zeit-Verläufe der grünen Agenten. Die Kreuzungspunkte der grünen mit den roten Trajektorien stellen Passiervorgänge der entgegenkommenden Agenten dar. *In Anlehnung an (Holl, 2016)*

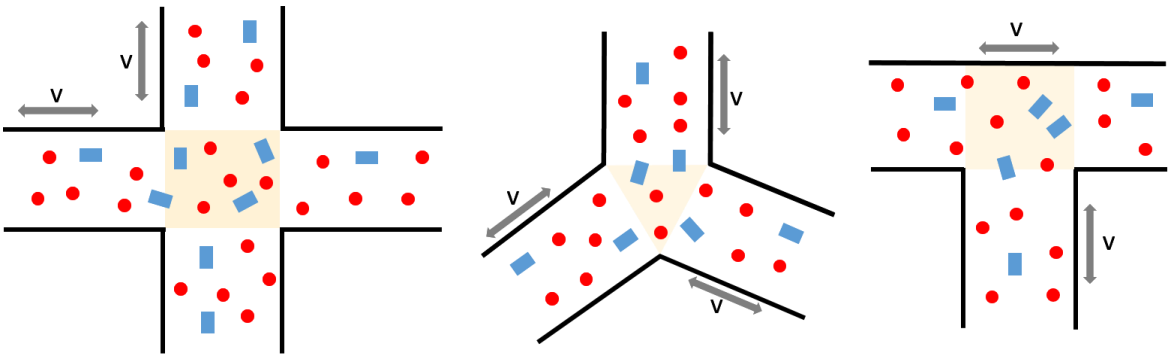


Bild 15: Multidirektionale Verkehrsszenarien von Personenströmen bei verschiedenen Arten von Kreuzungen: Vier-Wege-Kreuzung (links), Drei-Wege-Kreuzung (Mitte) und T-Kreuzung (rechts). E-Scooter Fahrer (Blau) und Fußgänger (Rot). Von Multidirektionalem Verkehr spricht man dann, wenn mehr als zwei Flussrichtungen existieren. Die Doppelpfeile symbolisieren die möglichen Geh- und Fahrtrichtungen der Agenten.

2.7 Empirische Verhaltensweisen von Personenströmen

Menschliches Verhalten ist sehr komplex und daher schwer mit Mathematisch-Physikalischen Modellen das exakte Verhalten zu beschreiben, da viele Verhaltensweisen situationsabhängig sind.

Jede Person in einem Personenstrom, ob er sich auf einem E-Scooter bewegt oder als Fußgänger unterwegs ist, verhält sich anders mit verschiedenen Zielen, Wahrnehmungen, physischen und psychologischen Eigenschaften und Bewegungen die nicht immer nach Plan ablaufen. Auf dem Weg zum Ziel werden die Personen durch Hindernisse wie Verengungen oder durch die Interaktion mit anderen Personen in ihrer Wunschbewegung eingeschränkt. Die Reaktion einer Person auf Hindernisse ist abhängig von seiner Geschwindigkeit und dem Abstand den er zu den Hindernissen hat. Auf der anderen Seite existieren zwischen E-Scooter Fahrern und Fußgängern Potenziale zu Konflikten, aufgrund der unterschiedlichen Wahrnehmungen und Handlungen. In der dynamischen Interaktion zwischen E-Scooter Fahrern und Fußgängern existieren aktuell keine empirischen Forschungsarbeiten. Deshalb wird davon ausgegangen, dass E-Scooter Fahrer sich wie die Fußgänger verhalten, aufgrund der

Vermischung mit Fußgängerströmen. Betrachtet man Fußgängerströme, so lassen sich empirisch beobachtete Verhaltensweisen bzw. Bewegungsmuster erkennen, die man als kollektive oder selbstorganisierte Phänomene bezeichnet (Helbing, Traffic and related self-driven many-particle systems, 2001) (D. Helbing I. J., 2002) (A. Schadschneider, 2009). Es existieren zahlreiche Forschungsarbeiten an Personenströmen bezüglich der Verhaltensweisen der Probanden, jedoch weisen die Ergebnisse starke Schwankungen auf, was von dem jeweiligen Szenario bzw. der Situation abhängig ist. Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass es mit dem derzeitigen Stand der Wissenschaft aufgrund der Situationsabhängigkeit schwierig ist allgemeingültige Standards für Verhaltensweisen von Menschen mittels Mathematisch-Physikalischen Modellen zu definieren.

2.7.1 Linienbildung und Blockaden an Engstellen

Personenströme bilden bei bidirektionalem Verkehr (s. Abschnitt 2.6) **Linien in gleicher Laufrichtung** (s. Bild 16). Die Reihenfolge und Anzahl der selbstorganisierten Linien des bidirektionalen Fußgängerverkehrs variiert dynamisch und ist u.a. abhängig von der Breite und Länge des Weges. Linienbildungen führen zur Verringerung der Interaktionen untereinander und können den Fluss somit erhöhen und gefahrbringende Situationen reduzieren.

Trifft ein Personenstrom auf eine Engstelle, so kann das Phänomen der bogenförmigen **Blockaden** und hohe **Fluktuationen** (vgl. Bild 8) der Personendichten beobachtet werden. Der Fluss wird inhomogen und es kann hierdurch zu einem Stau kommen. Es können sich stabile Verkeilungen um die Engstelle herum bilden, weil sich die Personen gegenseitig daran hindern die Engstelle zu passieren. Mit der Auflösung dieser Bögen kommt es zur schubweisen Fortführung der Personen mit der Entstehung hoher Kräfte und somit kann es durch die erhöhte Interaktion bzw. Gedränge der Personen untereinander zu Gefahrensituationen wie bspw. Verstopfung der Engstelle und Panik bzw. Gedränge kommen (s. Bild 16).

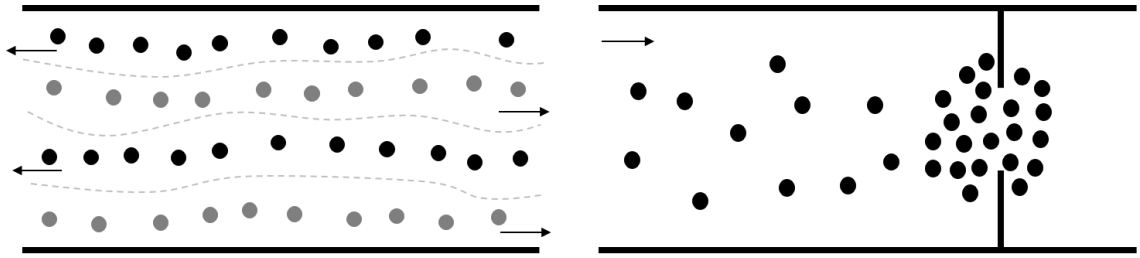


Bild 16: *Links:* Linienbildung eines Bidirektionalen Personenstromes entlang eines Korridors. *Rechts:* Bogenbildung an Engstellen. Die Pfeile in der Skizze zeigen die Bewegungsrichtungen.

2.7.2 Flussoszillationen an Engstellen

Treffen zwei entgegenkommende Personenströme in enger werdenden Stellen aufeinander, so kommt es zu einem oszillierenden Wechsel der Flussrichtung (vgl. Bild 17). Bei Verkehren unterhalb der Kapazität ist die Ursache meistens von soziokultureller Natur. Bei Verkehren oberhalb der Kapazität der Engstelle ist die Bewegung nicht mehr vom freien Willen der Fußgänger abhängig, sondern von dem Willen der Fortbewegung der Gruppe abhängig. Bei Oszillationen oberhalb der Kapazität kann es vorkommen, dass die Flussrichtung für eine längere Zeit nur in eine Richtung verläuft. Wenn es jedoch einer Person gelingt die Engstelle in die entgegengesetzte Richtung der dominierenden Flussrichtung zu passieren, dann kann es dazu führen das andere hinter ihm befindliche Personen ihm folgen und somit kann die Flussrichtung umschlagen. Zudem kann ein Wechsel der Flussrichtung auch durch Fluktuationen Zustandekommen. (Blitzer, 2010)

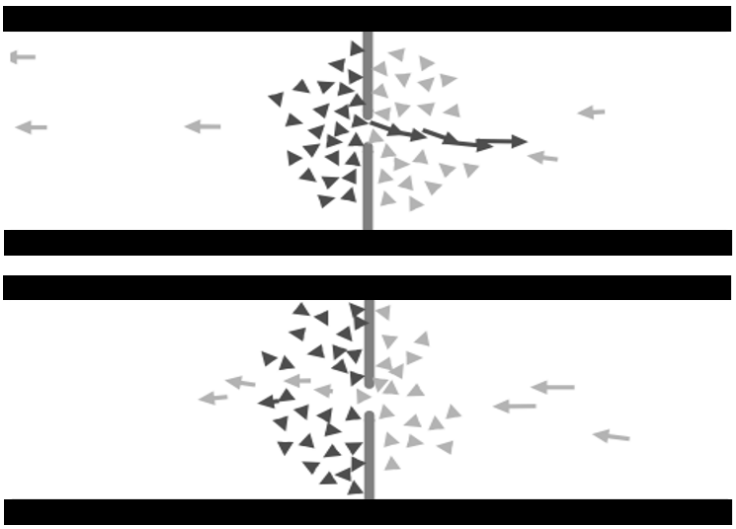


Bild 17: Flussoszillationen an einer Engstelle mit Gegenverkehr.

2.7.3 Kreisverkehre in Kreuzungen

An Fußgängerkreuzungen können sich spontan Kreisverkehre entwickeln, welche sehr kurzlebig und instabil sind. Die Drehrichtung des Kreisverkehrs wechselt sich dabei ab. Es kommt zudem zu einer Abwechslung von Phasen eines vorübergehenden Kreisverkehrs mit Phasen in denen die Kreuzung in vertikaler und horizontaler Richtung überquert wird. Hierdurch kommt es zu effizienteren Bewegungen und zu einem homogeneren Fluss der Fußgängerströme, da die Interaktionen geringer werden und somit ein reibungsloser Fluss möglich wird. Die Kurzlebigkeit dieses Phänomens kann durch Platzieren eines Hindernisses, z.B. einer Säule verhindert werden und trägt somit zu einer Erhöhung der Effizienz des Fußgängerflusses bei (D. Helbing P. M., 2001). In Bild 18 ist das Phänomen des kurzlebigen Fußgängerkreisverkehrs in Kreuzungen dargestellt.

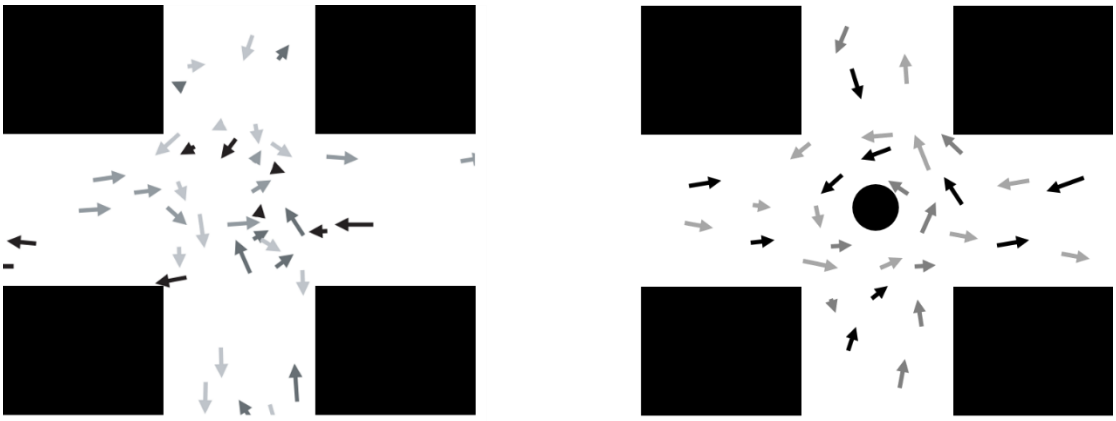


Bild 18: *Links:* Selbstorganisierter kurzlebiger Kreisverkehr von Fußgängerströmen in Kreuzungen. *Quelle: (D. Helbing I. J., 2002). Rechts:* Eigene Darstellung eines möglichen Kreisverkehrs mit einem Hindernis (Säule) im Zentrum der Kreuzung zur möglichen Stabilisierung des Kreisverkehrs, um die Interaktionen zwischen den Personen zu verringern und somit die Effizienz des Fußgängerflusses zu steigern und mögliche gefahrbringenden Situationen wie Gedränge und Staus zu minimieren.

2.7.4 Gruppen

In Personenströmen existieren auch immer Gruppen, die sich gemeinsam fortbewegen, z.B. Familie, Freundschaftsgruppe, Seniorengruppe, Touristen, etc. Die Anzahl an Personen in den jeweiligen Gruppen bzw. Klein-Gruppen in Personenströmen können über den Betrachtungsbereich variieren, z.B. Gruppen bestehend aus zwei (Dyade), drei, vier, fünf oder mehr Personen. Dies lässt sich auch auf die Nutzung von E-Scootern übertragen. Auch hier kann es dazu kommen, dass sich zwei, drei, vier oder mehrere Personen gemeinsam als Gruppe bewegen.

Gruppen besitzen meist auch dieselben charakteristischen Merkmale, die über einen längeren Zeitraum dasselbe Ziel verfolgen (Wiesbaden, 2018). Die Personen in den Gruppen können sich auch z.B. durch die Kommunikation miteinander während der Bewegung Hindern achtsam zu sein und auch dadurch zur Verlangsamung der Bewegung kommen. Durch die Verlangsamung kann es wiederum zur Verringerung des Personenflusses in der gesamten Zone kommen, wodurch gefahrbringende Situationen wie Staus, Gedränge und erhöhte Interaktionen entstehen können.

Die Laufgeschwindigkeit der Gruppe ist abhängig von der Größe der Gruppe. Je größer die Gruppe ist, desto geringer wird die Laufgeschwindigkeit. In der nachfolgenden Tabelle sind die mittleren Laufgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Gruppengröße von Fußgängern aufgelistet. (Hubert Klüpfel, 2005)

Tabelle 1: Laufgeschwindigkeit von Fußgängern in Abhängigkeit der Gruppengröße. *Quelle: (Hubert Klüpfel, 2005)*

Gruppengröße	Anzahl	Mittelwert [m/s]
1	95	1,38
2	149	1,28
3	59	1,24
4	17	1,24
5	10	1,22
6	2	1,10

In der folgenden Abbildung (Bild 19) ist die Gruppenbewegung in einem Personenstrom entlang einer geradlinigen Strecke schematisch dargestellt.

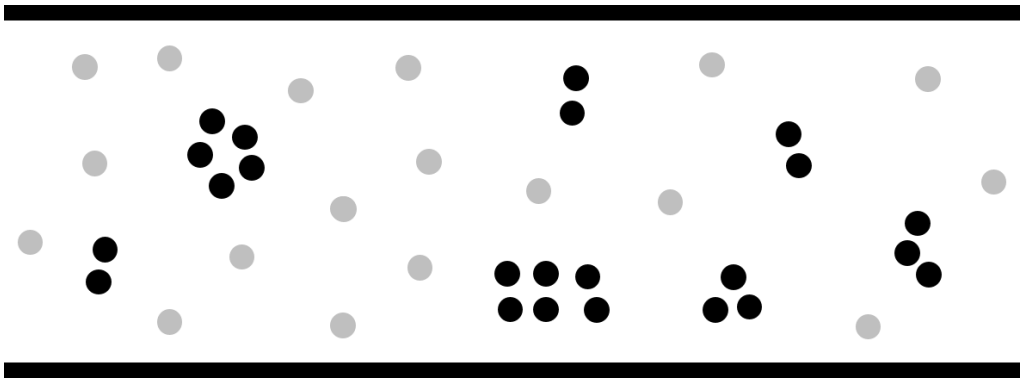


Bild 19: Schematische Darstellung eines möglichen Personenstrom-Szenarios mit Gruppen (schwarze Kreise).

3 Verkehrs- und Fußgängermodelle

Bei der Herangehensweise zur Simulation von Fußverkehren werden Fußgänger, auch Agenten genannt, als dynamische Teilchen behandelt, um die Entstehung kollektiver Phänomene wie Stop-and-Go-Wellen, Linienbildungen oder Verstopfungen und intermittierende Personenflüsse in Engstellen zu untersuchen. In der Verkehrstechnik konzentrieren sich die Modelle auf Bewegungseigenschaften wie Fluss, Dichte, Geschwindigkeit oder Routenwahl (Mohcine Chraibi, 2018). Jeder Fußgänger kann ein anderes Ziel haben und somit sind alle Richtungen möglich und dementsprechend handelt es sich bei Personenströmen um zweidimensionale Bewegungen. Neben den komplizierten Stütz- und Bewegungsapparaten sind Fußgänger mit vielen Wahrnehmungen, Empfindungen, unterschiedlichen kognitiven Fähigkeiten ausgestattet.

Die hohe Komplexität der Bewegungen von Fußgängern in Kombination mit den unterschiedlichen Bereichen verdeutlicht, warum viele unterschiedliche Modellierungsansätze für Fußgängerdynamiken entwickelt werden und ist der Grund für die Vielzahl von Modellvarianten (Mohcine Chraibi, 2018). Nachfolgend werden einige oft verwendete Modelle kurz beschrieben, u. a. das Kollisionsfreie Optimal Velocity Modell, welches zur Simulationsanalyse in NetLogo implementiert wurde.

3.1 Zelluläre Automaten (0. Ordnung)

Zelluläre Automaten sind regelbasierte dynamische Modelle, bei denen alle Größen diskretisiert vorliegen. Die Basis für Simulationen von Personendynamiken sind zweidimensionale reguläre Gitter mit dreieckigen, quadratischen oder hexagonalen Zellen (Carsten Burstedde, 2001). Die „Zellen“ entsprechen dem Ort und können nur die Zustände „0“ für „kein Agent bzw. kein Hindernis“ und „1“ für „Agent auf Zelle bzw. Hindernis auf Zelle“ annehmen. Die Agenten können sich also nur über die Zellen bewegen. In jedem diskreten Zeitschritt wird die Belegung der Zellen anhand bestimmter Regeln neu bestimmt.

Trianguläre Zellen werden jedoch für Fußgängersimulationen selten verwendet. Die Bestandteile eines zellulären Automaten sind folgende:

- **Reguläre Gitterstruktur:** Aus dreieckigen, quadratischen oder hexagonalen Zellen
- **Zustände:** Zelle „Frei“ oder „belegt“ (statisch oder dynamisch)
- **Randbedingungen:** starre / feste, offene, periodische
- **Nachbarschaften:** „Moore“ oder „von Neumann“ Nachbarschaften (am häufigsten verwendete)
- **Übergangsregeln:** Paralleler und Sequentieller (Ordered, Random Shuffled) Update (Rogsch, 2014)

Zelluläre Automaten finden überwiegend bei mikroskopischen Modellen ihre Anwendung, jedoch lassen sich hiermit auch Modelle des makroskopischen Ansatzes beschreiben (Kesting, 2010). In Bild ***20*** sind die drei am häufigsten verwendeten Nachbarschaften bei der Anwendung von zellulären Automaten für Fußgängersimulationen gezeigt.

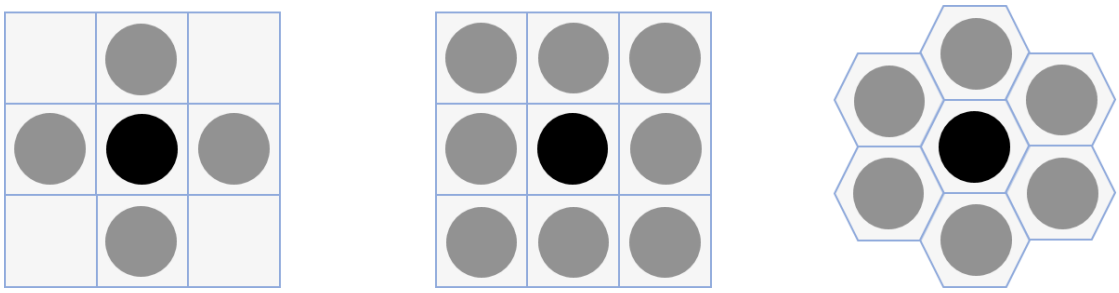


Bild 20: *Links:* von Neumann Nachbarschaften. *Mitte:* Moore Nachbarschaften. *Rechts:* Nachbarschaften im Gitter mit hexagonalen Zellen.

3.2 Kollisionsfreies Optimal Velocity Modell (1. Ordnung)

Das Simulationsmodell, welches in dieser Arbeit zur Analyse verwendet wurde, wurde mit dem Ansatz des Kollisionsfreien Optimal Velocity Modells (COVM) erstellt. Optimal Velocity Modelle wurden ursprünglich für eindimensionale und motorisierte Verkehrsflüsse angewendet (M. Bando, 1995). Für die Modellierung von Fußgängerverkehren ist eine zweidimensionale Modellerweiterung notwendig (A. Nakayama, 2005). Optimal Velocity Modelle nutzen die Beziehung zwischen der Geschwindigkeit und dem Abstand, d.h. zur Ermittlung der optimalen Geschwindigkeit ist der Abstand zum vorausbefindlichen Agenten maßgebend. Die Geschwindigkeit im kollisionsfreien und geschwindigkeitsbasierten Modell wird ohne Trägheit oder einer implizit implementierten Reaktionszeit sofort an die Umgebung angepasst. Die Geschwindigkeitsfunktion in zwei Dimensionen lautet:

$$\vec{v}_i = V(\vec{x}_i(t), \vec{x}_j(t), \vec{v}_j(t), \dots) \times \vec{e}_i(\vec{x}_i(t), \vec{x}_j(t), \vec{v}_j(t) \dots)$$

mit V der Geschwindigkeitsfunktion und e der Richtung (Einheitsvektor). Für das *„Steuermodell mit synthetischer Sicht“* von Ondrej u. a. (Jan Ondrej, 2010) basierend auf „Zeit-bis-zum-Aufprall“ mit dem Nachbarn ist die Geschwindigkeit V eine Funktion der Zeit.

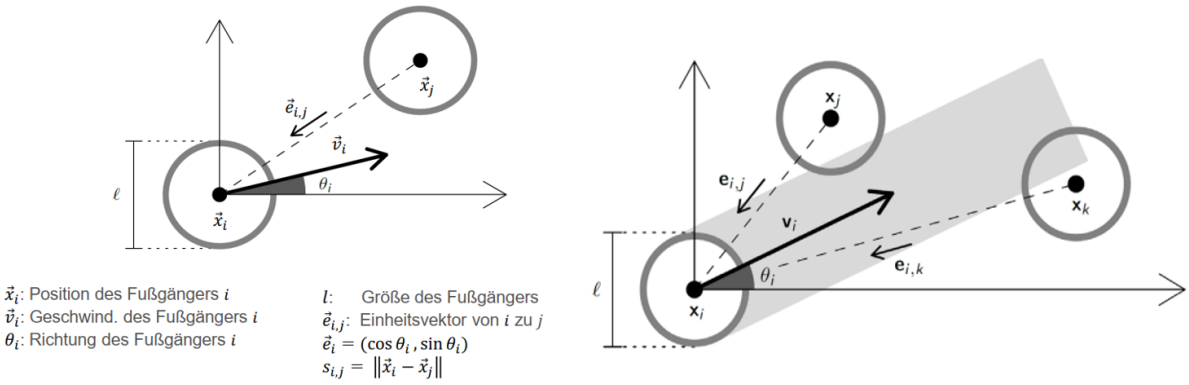


Bild 21: *Links:* Notation. *Rechts:* Fußgänger vor dem Fußgänger i (im grauen Bereich). Minimale Distanz nach vorne und Geschwindigkeit. *Quelle: (Mohcine Chraibi, 2018)*

Die Fußgänger vorne (Bild 21 rechte Abbildung) sind gegeben durch (Mohcine Chraibi, 2018):

$$J_i = \left\{ j, \vec{e}_i \cdot \vec{e}_{i,j} \leq 0 \; and \; \left| \vec{e}_i^{\perp} \cdot \vec{e}_{i,j} \right| \leq {}^{l}/_{s_{i,j}} \right\}$$

Mit einer minimalen Distanz (Mohcine Chraibi, 2018):

$$s_i = \min_{j \in J_i} s_{i,j}$$

Das Fundamentaldiagramm liefert dann die passende Geschwindigkeit mit $V = F(s_i)$ oder $V = 0$ ist das Modell für alle Richtungen kollisionsfrei.

3.3 Social-Force-Modell (2. Ordnung)

Bei dem kontinuierlichen Social-Force-Modell (dt.: Soziale-Kräfte-Modell) (Molnar, 1995) wird angenommen, dass auf die Fußgänger abstoßende und anziehende Kräfte wirken, wodurch sie mit anderen Agenten wechselwirken. Durch die Summe dieser Kräfte wird die Bewegungsrichtung bestimmt. Die Bewegung des Agenten wird also nur durch externe Faktoren bestimmt und nicht durch die freie Entscheidung (Taras I. Lakoba, 2005). In Bild 22 ist die Grundgleichung des Social-Force-Models abgebildet.

$$m_i \frac{d\ddot{\vec{x}}_i}{dt} = \vec{F}_i(t) = \vec{F}_i^{drv} + \sum_{j \neq i} \vec{F}_{ij}^{rep} + \sum_{w} \vec{F}_{iw}^{rep} + \vec{F}_i^{andere}$$

Treibende Kraft

Abstoßende Kräfte zwischen Agent i und Agent j

Abstoßende Kräfte zwischen Agent i und Wand w

Andere Einflüsse: Gruppenmitglieder, Reibung, Zufall, Ereignisse,...

Bild 22: Grundgleichung des Social-Force-Modells.

Die Problematik dieses Modells ist die Trägheit der Teilchen (Agenten) und die Überlagerung der Kräfte (Superposition). Die Trägheit führt zu Oszillationen und Durchdringungen der Agenten. Die Überlagerung der eingeprägten Kräfte kann dazu führen, dass die Agenten sich nicht in die gewünschten Richtungen bewegen, z.B. nicht zielgerichtete Bewegung oder Lösen von der Gruppe (Familie, Freunde,…). Es müssen daher viele zusätzliche Regeln und Formulierungen von zusätzlichen Kräften einbezogen werden um die erwünschten Bewegungen erzielen zu können.

Dieses Modell implementiert die Bewegung von Fußgängern nur auf der operativen Ebene, wodurch es gegenüber Beschleunigungsbasierten Modelle wie von Hirai und Tarui (Hirai K, 1975) einfacher zu modellieren ist. In Chen u. a. (Yu Fan Chen, 2017) ist eine verständliche Bewertung der Entwicklung des Social-Force-Models über die Jahre gegeben. Darin zeigen die Autoren die verschiedenen Modifikationen und Erweiterungen des generischen Modells. Das Modell eignet sich zur Beschreibung der Linienbildung in bidirektionalem Verkehr, Oszillationen an Engstellen und des Herdenverhaltens (vgl. Abschnitt 2.7). Diese Phänomene von Personenströmen resultieren aus dem Wechselspiel von treibenden und abstoßenden Kräften.

4 Mikromobilität

4.1 Gesetzliche Anforderungen

In diesem Abschnitt werden anhand der Elektrokleinsfahrzeuge-Verordnung (eKFV) die Anforderungen an E-Scooter behandelt. Dabei werden die gegebenen Informationen im Gesetzestext (eKFV) herangezogen und kurz und verständlich zusammengefasst dargelegt. Für eine genauere Auseinandersetzung und tieferes Verständnis wird ausdrücklich auf die vollständige Verordnung verwiesen. Mit dem Inkrafttreten vom 15. Juli 2019 der „Verordnung über die Teilnahme von Elektrokleinstfahrzeugen am Straßenverkehr“ kam die offizielle Zulassung der Benutzung von u. a. E-Scootern im öffentlichen Straßenverkehr. Es werden nur die Anforderungen an Elektrokleinstfahrzeugen mit einer Lenk- oder Haltestange ohne Sitz (z.B. E-Scooter) in Stichpunkten herausgearbeitet.

- Elektrokleinstfahrzeuge sind elektrisch angetriebene Kraftfahrzeuge mit einer **Mindestgeschwindigkeit** von 6 km/h und einer zulässigen **Höchstgeschwindigkeit** von 20 km/h (§ 1 Absatz 1 eKFV).
- Sie müssen eine Lenk- oder Haltestange von mindestens **700 mm** aufweisen (§ 1 Absatz 1 Satz 2 eKFV).
- Eine Nenndauerleistung von nicht mehr als **500 Watt** (§ 1 Absatz 1 Satz 3 eKFV).
- Eine Gesamtbreite von **700 mm**, eine Gesamthöhe von **1400 mm** und eine Gesamtlänge von **2000 mm** darf nicht überschritten werden (§ 1 Absatz 1 Satz 4 eKFV).
- Die maximale Fahrzeugmasse darf ohne Fahrer nicht mehr als **55 kg** betragen (§ 1 Absatz 1 Satz 5 eKFV).
- Eine gültige **Versicherungsplakette** für Elektrokleinstfahrzeuge nach § 29a der Fahrzeug-Zulassungsverordnung ist Voraussetzung für die Inbetriebnahme (§ 2 Absatz 1 Satz 2 eKFV).
- Zum Führen sind Personen berechtigt, die das **14. Lebensjahr** vollendet haben (§ 3 eKFV).

- Ein Elektrokleinstfahrzeug muss mit **zwei voneinander unabhängigen Bremsen** ausgerüstet sein (§ 4 Absatz 1 eKFV).
- Ein Verzögerungswert von **3,5 m/s²** muss erreicht werden (§ 4 Absatz 1 Satz 3 eKFV).
- Bei **Ausfall** der jeweils anderen Bremse ist eine Mindestverzögerung von **44 %** der Bremswirkung von 3,5 m/s² zu erreichen (§ 4 Absatz 1 Satz 3 eKFV).
- Ein Elektrokleinstfahrzeug muss mit **lichttechnischen Einrichtungen** ausgerüstet sein, die den Anforderungen der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung entsprechen (§ 5 Absatz 1 eKFV).
- Elektrokleinstfahrzeuge müssen mindestens mit einer **helltönenden Glocke**, die den Anforderung der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung entspricht, ausgerüstet sein (§ 6 eKFV).
- Elektrokleinstfahrzeuge müssen den Maßnahmen zum Schutz vor **Manipulation** gemäß **DIN EN 15194:2018-11** entsprechen (§ 7 Satz 3 eKFV).
- Ein wirksamer Schutz gegen das direkte Berühren aller **Spannungsführenden** Bauteile muss gegeben sein (§ 7 Satz 4 eKFV).
- Eine Sicherung gegen **unbeabsichtigtes Verstellen** aller Bedien- und Bauteile müssen vorhanden sein (§ 7 Satz 5 eKFV).
- Die **Ausrüstung** im Betriebszustand muss so beschaffen sein, dass sie **sicher** sind, ihr verkehrsüblicher Betrieb niemanden schädigt oder mehr als unver-meidbar gefährdet, behindert oder belästigt und der Fahrer insbesondere bei Unfällen vor Verletzungen möglichst geschützt ist sowie das Ausmaß und die Folgen von Verletzungen möglichst gering bleiben (§ 7 Satz 6 eKFV).
- Das Bedienelement zur Steuerung der Motorleistung muss sich **innerhalb einer Sekunde selbstständig** in Nullstellung zurückstellen, wenn der Fahrer es loslässt. Der Fahrzeugantrieb muss sich **innerhalb einer Sekunde automatisch deaktivieren**, wenn sich der Fahrer nicht auf dem Fahrzeug befindet. Ein System zur **Zustandserkennung,** das erkennt, ob sich der Fahrer auf dem Fahrzeug befindet ist notwendig (§ 7 Satz 7 eKFV).
- Vorhandene **Standflächen** müssen aufgrund ihrer rutschhemmenden Oberfläche ausreichend Halt bieten (§ 7 Satz 9 eKFV).

- Die **Personenbeförderung** sowie der **Anhängerbetrieb** sind für Elektrokleinstfahrzeuge nicht gestattet (§ 8 eKFV).
- Wer ein Elektrokleinstfahrzeug im **Straßenverkehr** führt, unterliegt den Vorschriften der Straßenverkehrs-Ordnung (§ 9 eKFV).
- **Innerhalb geschlossener Ortschaften** dürfen nur baulich angelegte Radwege, darunter auch gemeinsame Geh- und Radwege und die dem Radverkehr zugeteilte Verkehrsfläche getrennter Rad- und Gehwege, sowie Radfahrstreifen und Fahrradstraßen befahren werden. Wenn solche nicht vorhanden sind, darf auf Fahrbahnen oder in verkehrsberuhigten Bereichen gefahren werden (§ 10 Absatz 1 eKFV).
- **Außerhalb geschlossener Ortschaften** dürfen nur baulich angelegte Radwege, darunter auch gemeinsame Geh- und Radwege und die dem Radverkehr zugeteilte Verkehrsfläche getrennter Rad- und Gehwege, sowie Radfahrstreifen, Fahrradstraßen und Seitenstreifen befahren werden. Wenn solche nicht vorhanden sind, darf auf Fahrbahnen gefahren werden (§ 10 Absatz 2 eKFV).
- Wer ein Elektrokleinstfahrzeug führt, muss **einzeln hintereinander fahren**, darf sich nicht an fahrende Fahrzeuge anhängen und nicht freihändig fahren (§ 10 Absatz 3 eKFV).

Bild 23: Verkehrszeichen für E-Scooter. An Orten mit diesem Zeichen dürfen E-Scooter auch in Fußgängerzonen fahren.

- Dem Gebot, auf **Fahrbahnen mit mehreren Fahrstreifen** möglichst weit rechts zu fahren ist Folge zu leisten (§ 11 Absatz 2 eKFV).

- Die **Richtungsänderung** ist durch ein Handzeichen anzukündigen, sodass andere Verkehrsteilnehmer ihr Verhalten daran ausrichten können (§ 11 Absatz 3 eKFV).
- Auf den **Radverkehr** muss **Rücksicht** genommen werden und falls nötig, eine Anpassung auf den Radverkehr erfolgen. Auf gemeinsamen Geh- und Radwegen haben **Fußgänger Vorrang** und dürfen weder behindert noch gefährdet werden. Falls notwendig, muss die Geschwindigkeit an den Fußgängerverkehr angepasst werden (§ 11 Absatz 4 eKFV).
- Ist ein **Verbot** für den Radverkehr angeordnet, so gilt dies auch für Elektrokleinstfahrzeuge (§ 12 Absatz 3 eKFV).
- Elektrokleinstfahrzeuge unterfallen der **Lichtzeichenregelung** der Straßenverkehrs-Ordnung. Dabei kommt das Sinnbild „Radverkehr“ zur Anwendung (§ 13 eKFV).

4.2 Elektro-Mikrofahrzeuge

In diesem Abschnitt wird auf die derzeit am Markt verfügbaren Arten der Elektro-Mikromobilität eingegangen. Ihre Merkmale und technischen Daten werden tabellarisch auf der folgenden Seite aufgelistet. In letzter Zeit ist eine Vielzahl an verschiedenen Mikrofahrzeugen auf den Markt gekommen mit einer enormen Anzahl an angebotenen Marken und Modellen. In dieser Arbeit kann jedoch nicht auf alle verfügbaren Mikro-Mobilitätsmöglichkeiten eingegangen werden, weswegen der Fokus auf den bekanntesten und am häufigsten verkauften Elektro-Mikrofahrzeugen liegt.

Tabelle 2: Verschiedene Elektro-Mikrofahrzeuge. *Quellen:* E-Scooter *(mytier.app, 2020)*, Hoverboard *(bluewheel.de, 2020)*, Monowheel *(www.inmotion-imscv.de, 2020)*, Segway *(de-de.segway.com, 2020)*, Pedelec (E-Bike) *(amazon.de, 2020)*, Elektro-Skateboard *(elektrische-boards.de, 2020)*

	E-Scooter	Hoverboard	Monowheel	Segway	Pedelec (E-Bike)	Elektro-Skateboard
Marke	myTier	Bluewheel	InMotion	Ninebot	Telefunken	Cool&Fun
Höchstgeschwindigkeit	20 km/h	15 km/h	30 km/h	20 km/h	25 km/h	28 - 32 km/h
Reichweite	bis zu 40 km	bis zu 15 km	bis zu 40 km	bis zu 30 km	bis zu 100 km	bis zu 28 km
Traglast	bis 120 kg	bis 100 kg	bis 120 kg	bis 110 kg	bis 150 kg	bis 120 kg
Motorleistung	700 Watt	2 x 350 Watt	800 Watt	2 x 1750 Watt	250 Watt	500 - 800 Watt
Maße (mm)	1210 x 500 x 1170	490 x 255 x 265	538 x 462 x 148	390 x 586 x 1230	1850 x 650 x 1150	970 x 240 x 138
Ladedauer	ca. 2,6 h	2 - 3 h	ca. 4,5 h	3 - 4 h	4 - 5 h	3 - 4 h
Gewicht	23 kg	9,2 kg	13,8 kg	23,5 kg	26,5 kg	8 kg
Fahrzeugtyp	Lenk- & Haltestange (ohne Sitz)	selbstbalancierend (ohne Sitz)	selbstbalancierend (ohne Sitz)	selbstbalancierend mit Lenk- & Haltestange (ohne Sitz)	Lenk- & Haltestange (mit Sitz)	selbstbalancierend (ohne Sitz)
Radanzahl	2	2	1	2	2	4
Radgröße	9,5 Zoll	6,5 Zoll	16 Zoll	14 Zoll	28 Zoll	3,5 Zoll
Anzahl Passagiere	1	1	1	1	1	1

4.3 Auswirkungen auf die Umwelt

Die Frage lautet: Sind E-Scooter tatsächlich so umweltfreundlich, wie einige Politiker dies als „CO_2-neutrale Alternative zum Auto“ preisgeben? Es ist ähnlich wie mit den Erneuerbaren Energien, die einen sind der Meinung, dass es der Klimabilanz und zur CO_2-Reduzierung beiträgt und andere Experten wiederum behaupten genau das Gegenteil. Interessant ist es, dass beide Seiten ihre Behauptungen durch Forschungsarbeiten belegen können. Es ist ein Kampf beider Seiten und es scheint auch so zu bleiben.

Auf die Frage „Sind E-Scooter tatsächlich umweltfreundlich?“ wurde eine interessante Forschungsarbeit gefunden, bei dem die Antwort der Frage lautet: Ja, laut der aktuellen Forschungsarbeit von Hollingsworths (Hollingsworths, August 2019) sind E-Scooter in der „Summe“ keine Lösung für unser Klimaproblem.

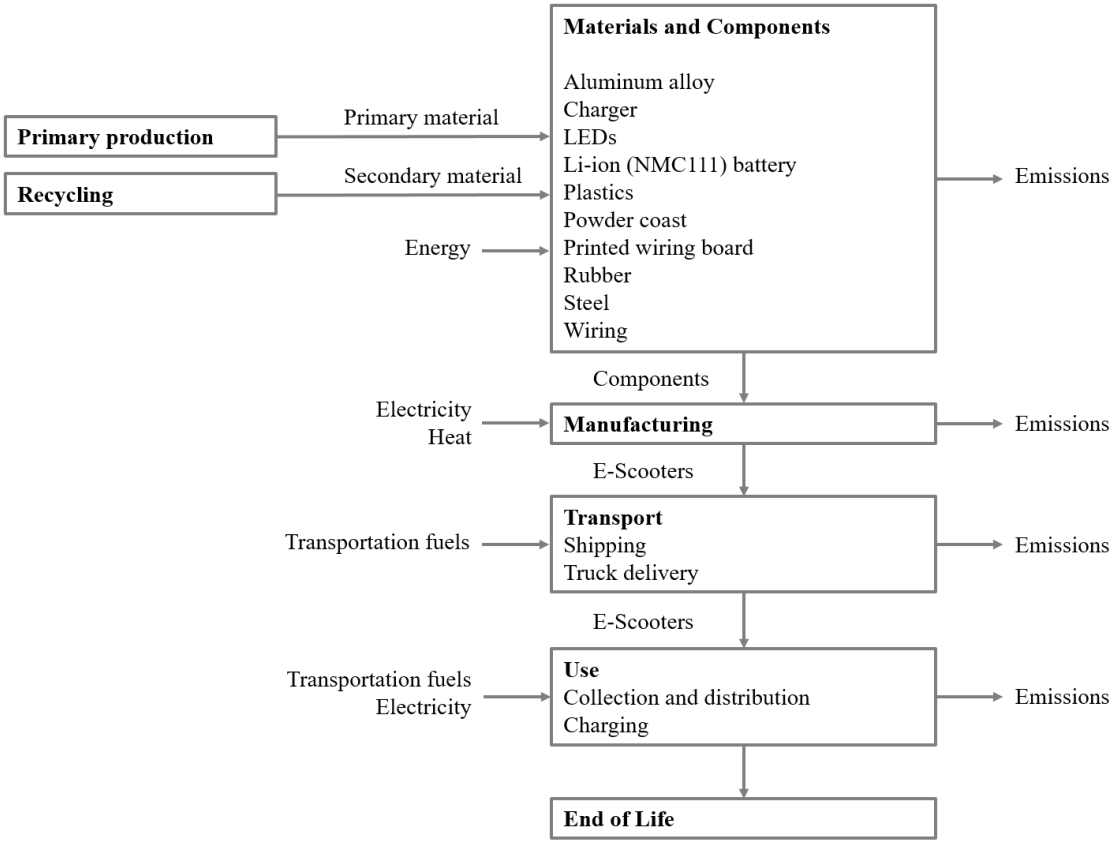


Bild 24: Systemgrenzen-Diagramm für die Ökobilanz von Elektro-Scootern. *Quelle:* Environmental Research Letters *(Hollingsworths, August 2019)*

In der Studie von Joseph Hollingsworths (Hollingsworths, August 2019) wird genau auf diese Fragestellung eingegangen. Hollingsworths zeigt in seiner Studie anhand eines Systemgrenzen-Diagramms wann und wodurch Emissionen freigesetzt werden. Hollingworths betrachtet den gesamten Lebenszyklus eines E-Scooters, von der Materialbeschaffung bis zum Lebensende (s. Bild 24).

Es wurden in dieser Studie Monte-Carlo-Analysen mit angenommenen Verteilungen durchgeführt, um die Variabilität und Unsicherheiten der verwendeten Parameter zu untersuchen. Anhand dieser Analyse wurde dann die Gesamtverteilung der Auswirkungen auf den Lebenszyklus bestimmt. Den größten Faktor stellen die Materialien dar, jedoch wird in der Studie berichtet, dass der Betrieb der Sharing-Flotten, durch das Einsammeln und den Transport der E-Scooter zum Aufladen den größten CO_2-Ausstoß verursacht, wodurch sie demnach u.a. als umweltunfreundlich gelten. Die Studie hatte auch den Zweck, Verbraucher sehen zu lassen, welche Fahrzeuge wirklich umweltfreundlich sind. Siehe (Hollingsworths, August 2019) für den genauen Ablauf der Studie und seiner Ergebnisse.

5 Agentenbasierte Numerische Analyse

In diesem Kapitel werden die Simulationen und Ergebnisse vorgestellt. Zunächst findet eine kurze Einführung in das agentenbasierte Simulationsprogramm „NetLogo“ statt. Mit diesem Programm wurde die Analyse der Interaktionen zwischen zwei Gruppen von dynamischen Teilchen unter Variation der Parameter durchgeführt. Im Anschluss wird die Simulationsoberfläche und die Parameter des Simulationsmodells vorgestellt. Abschließend werden die durchgeführten Simulationen aufgezeigt und die Ergebnisse in Kapitel 6 dargestellt und diskutiert.

5.1 NetLogo

NetLogo ist eine Implementierungs- und Simulationsplattform für Multi-Agenten-Systeme. Mit der Programmierumgebung NetLogo können komplexe und soziale dynamische Systeme anhand der Multiagententechnologie modelliert und visualisiert werden. Es ist ein leicht zu beherrschendes Programm, welches seit 1999 an der Northwestern University in USA entwickelt wird. Der größte Vorteil von NetLogo ist die einfache Handhabung und Eingewöhnungszeit im Vergleich zu anderen agenten-basierten Programmierumgebungen.

Die Logosprache ist prozedural aufgebaut und verwendet sog. *turtles* (Agenten). Die Turtles die sich auf der Zeichenebene (Bildschirm) befinden, lassen sich anhand der vorprogrammierten Stammfunktionen (auch räumliche 2D-Stammfunktionen) oder durch das Erstellen von Befehlen des Programmierers steuern. Ein weiterer Vorteil von NetLogo ist, das unendlich viele *turtles* gleichzeitig Befehle ausführen können. Den zweidimensionalen Raum für die befehlsorientierte Bewegung der *turtles* bilden die *patches* (quadratische Rasterzellen). Es ist für Forschungsarbeiten mit raumbe-zogenen Fragestellungen aufgrund seiner Leistungsstärke ein geeignetes Werkzeug und ist ohne Einschränkungen kostenlos erhältlich.

5.2 Simulationsoberfläche und Parameter

In

Bild ***25*** ist die Bedienoberfläche des eigens erstellten Simulationsmodells nach dem mathematisch-physikalischen kollisionsfreien velocity Modell (vgl. Kap 3.2) zu sehen. Nachfolgend werden alle Elemente der Bedienoberfläche einzeln aufgezeigt und kurz erläutert.

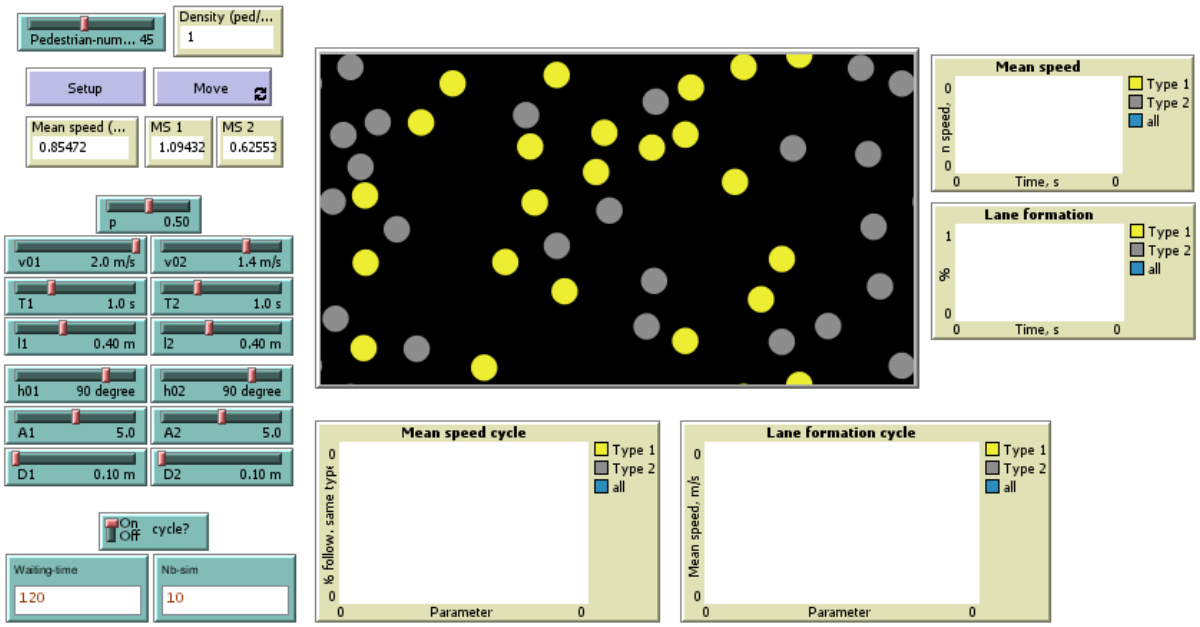
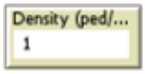
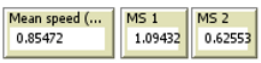


Bild 25: Simulationsoberfläche zur Analyse der Interaktionen zwischen dynamischen Teilchen („E-Scooter Fahrer“ und „Fußgänger“) in NetLogo. Ausgangssituation der Simulation für die Analyse des Übergangs von der willkürlichen Verteilung zur Linienbildung (Phasenübergang).

Anzahl der Teilchen (Agenten) mit der die Simulation durchgeführt werden soll.



Dichte der Agenten [Agenten/m²]

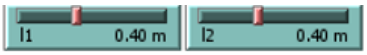


Mean Speed = Mittlere Geschwindigkeit von Typ1(E-Scooter) und Typ2 (Fußgänger). MS 1 = Mittlere Geschwindigkeit Typ1. MS 2 = Mittlere Geschwindigkeit Typ2.

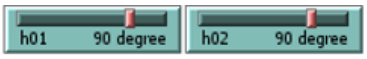
Anteile der Agenten von Typ1 und Typ2. 0,50 = 50% Typ1 und 50% Typ2. Im System werden sich Agenten zu gleichen Anteilen befinden.

v_0 → Wunschgeschwindigkeiten der Agenten (v_{01} Typ1 und v_{02} = Typ2).

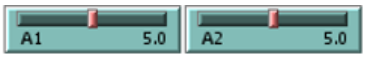
T → Lichter Zeitabstand der Agenten (T_1 = Typ1 und T_2 = Typ2).



l → Länge bzw. Durchmesser der Agenten.



h_0 → Bewegungsrichtung der Agenten (h_{01} = Typ1 und h_{02} = Typ2). 90° = Horizontale Bewegung (positive x-Richtung).



A → Zur Regelung der Bewegungsrichtung

D → Zur Regelung der Bewegungsrichtung

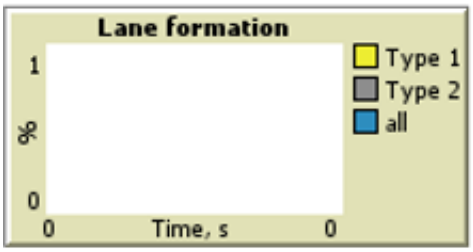
Zyklische Simulationen. Bei Cycle = Off läuft die Simulation unendlich lange ohne anzuhalten. Bei Cycle = On läuft die Simulation so lange bis die vom Benutzer festgelegte Wartezeit (Nb-sim) erreicht ist.

Wartezeit bzw. Dauer der Simulation (Zyklen) in Sekunden.

Anzahl Simulation (Zyklen). Bsp.: Wartezeit = 120 s und Anzahl = 10 → Es wird 10 mal 120 s simuliert, wenn cycle = On.

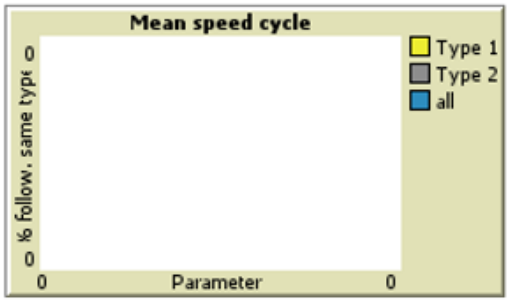
Aufzeichnungen während der Simulation:

Aufzeichnung der mittleren Geschwindigkeiten von Typ1 und Typ2 und Mittelwert aus beiden. **Ordinate:** Geschwindigkeit [m/s], **Abszisse:** Zeit [s].

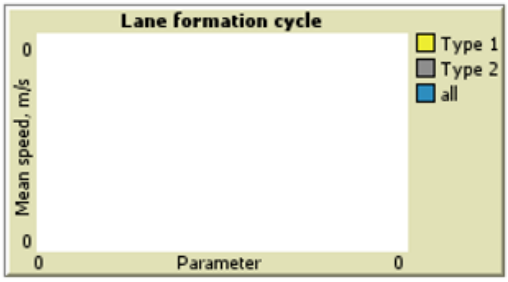


Aufzeichnung der Linienbildung von Typ1 und Typ2 und Mittelwert aus beiden.
Ordinate: $0 \leq \Psi \leq 1$ Je näher der Wert an 1 liegt, desto stärker (stabiler) sind die Linienbildungen.
Abszisse: Zeit [s].

Aufzeichnungen nach den Simulationen, d.h. nach Ablauf der Wartezeit. Bsp.: Anzahl Simulationen = 10, Dauer = 120 s → Es wird 10 mal 120 s simuliert und nach 120 s immer aufgezeichnet. Die folgenden Diagramme sind somit nur für die Cycle Simulationen vorgesehen:

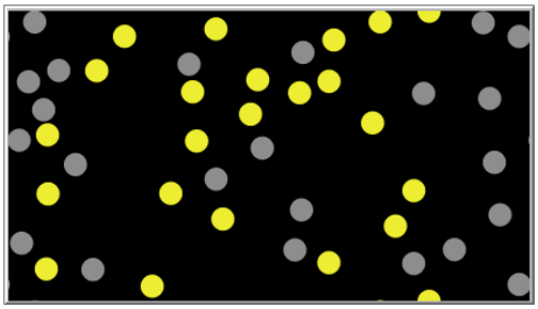


Aufzeichnungen der mittleren Geschwindigkeiten von Typ1 und Typ2 und Mittelwert aus beiden.

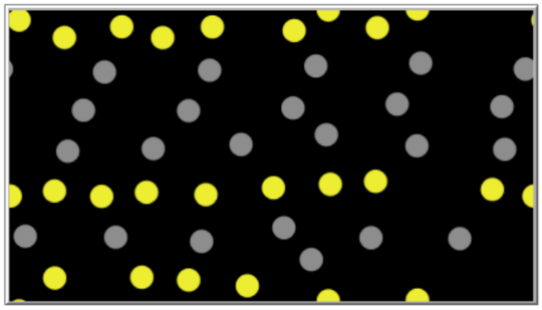


Aufzeichnungen der Linienbildungen. Der Faktor der Linienbildung (Ψ) kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je weiter sich der Faktor der 1 nähert, desto stärker ist die Linienbildung. Wobei für $\Psi \leq 0{,}6$ keine Linien beobachtet werden können.

Graphische Ausgabefenster:



Gelbe Agenten (Typ1) = schnelleren Agenten (E-Scooter Fahrer). Grauen Agenten (Typ2) = langsamere Agenten (Fußgänger). Dieses Bild entspricht einem Faktor $\Psi < 0{,}6$ (Unordnung) für die Aufzeichnung der Linienbildungen.



Hier sind eindeutige Linienbildungen von Typ1 und Typ2 zu erkennen. Dieses Bild entspricht einem Faktor $\Psi > 0{,}8$ (Es haben sich Linien ausgebildet) für die Aufzeichnung der Linienbildungen.

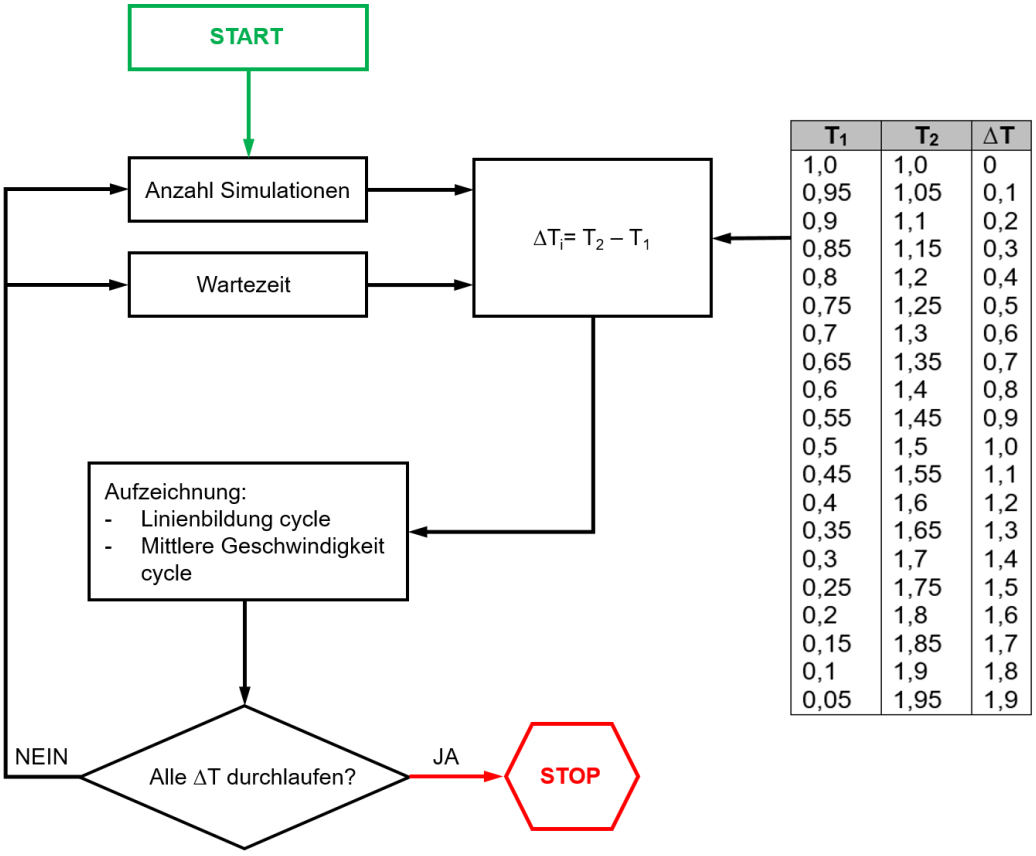
Der Bereich $0{,}6 \leq \Psi \leq 0{,}8$ kann als Phasenübergang bezeichnet werden, d.h. die Agenten wechseln vom Zustand der Unordnung in den Zustand der Ordnung (Linienbildung).

5.3 Durchführung der Simulationen

Im Folgenden werden die Szenarien der Simulationen gezeigt, welche zur Analyse der Linienbildungen und Agentenflüsse tiefergehend analysiert wurden. Dabei wurden zyklische Simulationen mit unterschiedlichen Wartezeiten (Waiting-Time) durchgeführt, jeweils für die Variationen des Zeitabstandes bzw. Differenzen der Zeitlücken ($\Delta T_i = T_2 - T_1$). Alle übrigen Parameter wurden konstant gehalten.

Die Simulationen wurden ausschließlich unter „Cycle = On“ durchgeführt, d.h. es wurde immer bis zum Erreichen einer festgelegten Zeit (Waiting-Time) simuliert. Nach Erreichen dieser Zeit begann die Simulation wieder erneut bis zum erneuten Erreichen dieser Zeit. Dies wurde solange ausgeführt bis die festgelegte Anzahl (Nb-sim) erreicht

wurde. Nach dem Erreichen der Anzahl begann der Zyklus wieder von vorne, mit derselben Wartezeit und Anzahl an Simulationen, jedoch für ein anderes ΔT. Nach jedem Zyklus wurde T_1 um 0,05 s reduziert und T_2 um 0,05 s erhöht, somit wurde der Parameter ΔT nach jedem Zyklus um 0,1 s automatisiert erhöht. In der nachfolgenden Abbildung (Bild ***26***) wird der Ablauf einer Simulation unter „Cycle = On“ anhand eines Flussdiagrammes anschaulich dargestellt.



T_1	T_2	ΔT
1,0	1,0	0
0,95	1,05	0,1
0,9	1,1	0,2
0,85	1,15	0,3
0,8	1,2	0,4
0,75	1,25	0,5
0,7	1,3	0,6
0,65	1,35	0,7
0,6	1,4	0,8
0,55	1,45	0,9
0,5	1,5	1,0
0,45	1,55	1,1
0,4	1,6	1,2
0,35	1,65	1,3
0,3	1,7	1,4
0,25	1,75	1,5
0,2	1,8	1,6
0,15	1,85	1,7
0,1	1,9	1,8
0,05	1,95	1,9

Bild 26: Schematische Darstellung des Ablaufs der Simulationen in NetLogo.

Zusätzlich wurden die Simulationen unter verschiedenen Anzahlen der Agenten („Pedestrian-number“ Typ1 und Typ2 zu gleichen Anteilen) durchgeführt. In den folgenden Tabellen (Tabelle 3 bis 8) sind die festgelegten Parameter für die in Kapitel 6 gezeigten Simulationsergebnisse dargestellt. Die Durchmesser (l1 und l2) der Agenten (Typ1 und Typ2) wurde mit 0,4 m festgelegt und $h_0 = 90°$, A = 5, D = 0,1. Diese Parameter wurden für alle Simulationen konstant gehalten. Die Simulationen werden entlang eines Korridors mit einer Länge von 11 m und einer Breite von 7 m durchgeführt.

5.3.1 Simulation I

In den nachfolgenden Tabellen sind die festgelegten Parameter für Simulation I aufgezeigt. Hier wurden Simulationen für verschiedene Wartezeiten, unterschiedliche Agentendichten und verschiedene Wunschgeschwindigkeiten ($v_{01} \neq v_{02}$) durchgeführt. Der Wert für v_{01} wurde höher angenommen, da in der Regel E-Scooter Fahrer sich mit höheren Geschwindigkeiten als Fußgänger fortbewegen und auch höhere Geschwindigkeit anstreben. Nach jedem fünften Zyklus wurde ΔT um 0,1 s automatisiert erhöht, bis zum Ende der Simulation bei $T_1 = 0$ s und $T_2 = 2{,}0$ s. Die Agentendichten von 1,0 bis 1,3 Agenten/m² entsprechen dem Freifluss Bereich nach Weidmann. Zudem wurde auch für den gestauten Bereich bei einer Dichte von 2,0 Agenten/m² und für die Wartezeiten von 210 s und 420 s die Linienbildungen analysiert (vgl. Bild 11).

Tabelle 3: Festgelegte Parameter der Simulation I mit 45 Agenten (ρ = 1,0 Agenten/ m²).

Wartezeit [s]	Anzahl Zyklen	Anzahl Agenten	v_{01} [m/s]	v_{02} [m/s]	Beginn T_1 [s]	Beginn T_2 [s]	Dauer Simulation [s]
60	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	6.000
120	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	12.000
210	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	21.000
300	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	30.000
420	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	42.000
840	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	84.000

Tabelle 4: Festgelegte Parameter der Simulation I mit 50 Agenten (ρ = 1,1 Agenten/ m²).

Wartezeit [s]	Anzahl Zyklen	Anzahl Agenten	v_{01} [m/s]	v_{02} [m/s]	Beginn T_1 [s]	Beginn T_2 [s]	Dauer Simulation [s]
60	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	6.000
120	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	12.000
210	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	21.000
300	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	30.000
420	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	42.000
840	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	84.000

Tabelle 5: Festgelegte Parameter der Simulation I mit 60 Agenten (ρ = 1,3 Agenten/ m²).

Wartezeit [s]	Anzahl Zyklen	Anzahl Agenten	v_{01} [m/s]	v_{02} [m/s]	Beginn T_1 [s]	Beginn T_2 [s]	Dauer Simulation [s]
60	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	6.000
120	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	12.000
210	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	21.000
300	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	30.000
420	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	42.000
840	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	84.000

Tabelle 6: Festgelegte Parameter der Simulation I mit 90 Agenten (ρ = 2,0 Agenten/ m2).

Wartezeit [s]	Anzahl Zyklen	Anzahl Agenten	v_{01} [m/s]	v_{02} [m/s]	Beginn T_1 [s]	Beginn T_2 [s]	Dauer Simulation [s]
210	5	90	1,8	1,4	1,0	1,0	21.000
420	5	90	1,8	1,4	1,0	1,0	42.000

5.3.2 Simulation II

In den nachfolgenden Tabellen sind die festgelegten Parameter für die Simulation II aufgezeigt. Hier wurden Simulationen nur für 45 Agenten ($\rho = 1{,}0$ Agenten/m²) und für erhöhte Zeitlücken-Differenzen durchgeführt. Die Simulation startet bei $T_1 = 1{,}0$ s und $T_2 = 3{,}0$ s und endet bei $T_1 = 0$ s und $T_2 = 4$ s mit Schrittweiten von 0,1 s. Die Simulation wurde nochmals mit $v_{01} = 2{,}0$ m/s und $v_{02} = 2{,}0$ m/s durchgeführt (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 7: Festgelegte Parameter der Simulation II mit 45 Agenten (ρ = 1,0 Agenten/ m²).

Wartezeit [s]	Anzahl Zyklen	Anzahl Agenten	v_{01} [m/s]	v_{02} [m/s]	Beginn T_1 [s]	Beginn T_2 [s]	Dauer Simulation [s]
60	5	45	1,8	1,4	1,0	3,0	6.000
210	5	45	1,8	1,4	1,0	3,0	21.000
420	5	45	1,8	1,4	1,0	3,0	42.000

Tabelle 8: Festgelegte Parameter der Simulation II mit 45 Agenten (ρ = 1,0 Agenten/ m²).

Wartezeit [s]	Anzahl Zyklen	Anzahl Agenten	v_{01} [m/s]	v_{02} [m/s]	Beginn T_1 [s]	Beginn T_2 [s]	Dauer Simulation [s]
60	5	45	2,0	2,0	1,0	3,0	6.000
210	5	45	2,0	2,0	1,0	3,0	21.000
420	5	45	2,0	2,0	1,0	3,0	42.000

6 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der zuvor vorgestellten Simulationen für verschiedene Wartezeiten und Agentendichten in Form von Kurvendiagrammen dargestellt (vgl. Abschnitt 5.3).

6.1 Simulation I

6.1.1 Analyse der Linienbildungen

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Linienbildungen für Typ1 + Typ2 (Mittelwert aus Typ1 und Typ2) bei 45 Agenten (Bild 27), 50 Agenten (Bild 28) und 60 Agenten (Bild 29) dargestellt. Die Diagramme für die jeweiligen Verläufe von Typ1 und Typ2 befinden sich im Anhang (Anhang 1 bis Anhang 3).

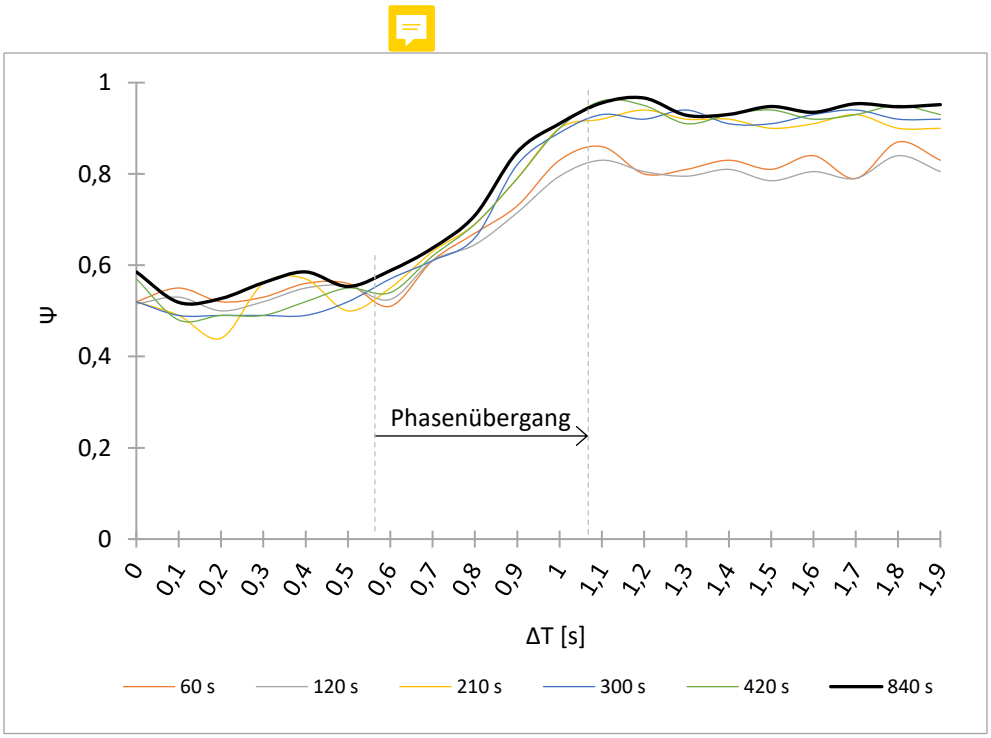


Bild 27: Ergebnisse der Mittelwerte der Linienbildungen bei 45 Agenten. Linienbildungen von unterschiedlichen Wartezeiten für **Typ1 + Typ2** bei einer Personendichte von **1,0** Agenten/m². Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 1 s.

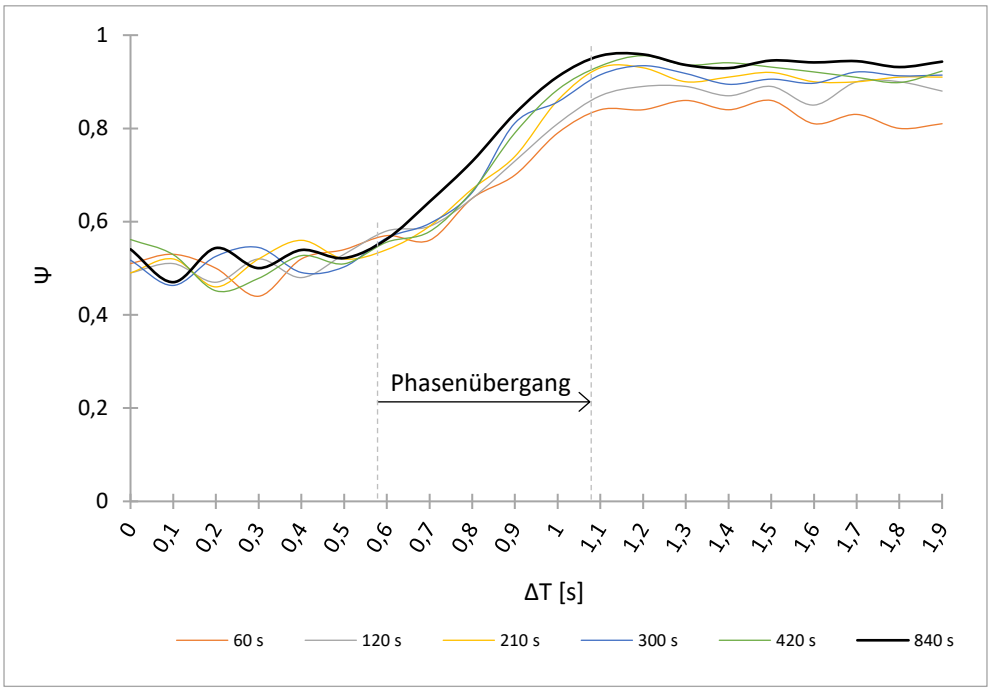


Bild 28: Ergebnisse der Mittelwerte der Linienbildungen bei 50 Agenten. Linienbildungen von unterschiedlichen Wartezeiten für **Typ1 + Typ2** bei einer Personendichte von **1,1 Agenten/m²**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 1 s.

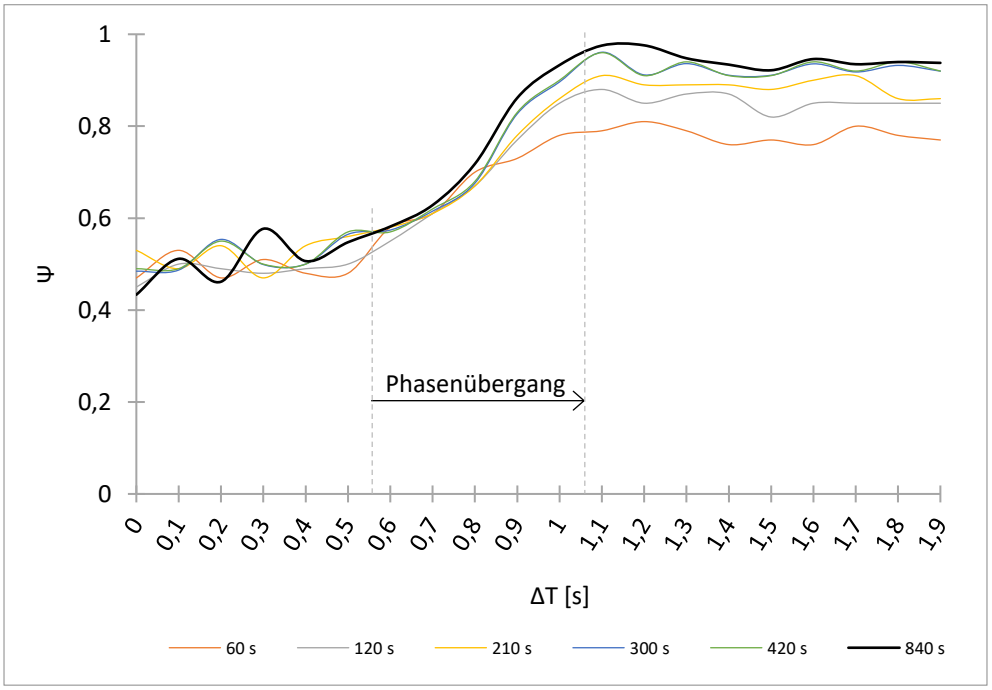


Bild 29: Ergebnisse der Mittelwerte der Linienbildungen bei 60 Agenten. Linienbildungen von unterschiedlichen Wartezeiten für **Typ1 + Typ2** bei einer Personendichte von **1,3 Agenten/m²**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 1 s.

Die Diagramme der Linienbildungen für jede Simulation, d.h. für jede Wartezeit zeigen im Freifluss Bereich (Bild 27, Bild 28 und Bild 29) denselben charakteristischen

Verlauf der Entwicklung von Linien unter den Agenten. Der Beginn der Linienbildungen liegt hier bei einer Differenz der Wunschzeitlücke $\Delta T = 0{,}5$ s. Ab diesem Bereich beginnt die Ausbildung der Linien und es sind in allen Graphen kontinuierliche Anstiege für alle Wartezeiten bis zu einem Maximum, welche sich im Bereich $\Psi = 0{,}8$ bis 1,0 bewegen, zu sehen.

Je höher die Wartezeiten sind, desto höher wird der „Faktor der Linienbildung Ψ“, d.h. die Linienbildung wird mit erhöhen der Wartezeit besser. Demnach sind die Linienbildungen für Wartezeiten ab 210 s nahezu perfekt ausgebildet ($0{,}9 \leq \Psi \leq 1{,}0$). Für Wartezeiten unter 210 s ($0{,}75 \leq \Psi < 0{,}9$) sind ebenfalls eindeutige Linienbildungen zu erkennen, jedoch mit geringfügiger Entmischung bzw. Unordnung. Es war zu erwarten, dass bei geringeren Wartezeiten schlechtere Linienbildungen Zustandekommen werden, da die Agenten weniger Zeit (Wartezeit) zur Verfügung haben, um in den Zustand der Ordnung (Linienbildung) zu kommen.

Der Beginn und das Ende der Phasenübergänge sind bei allen Wartezeiten gleich. Der stabile Zustand der Ordnung (Linien) wird bei einer Differenz der Zeitlücke $\Delta T \geq 1{,}0$ s erreicht. Für diese Werte bzw. für $T_1 \leq 0{,}5$ s und $T_2 \geq 1{,}5$ s stellen sich stabile Linien ein. In der folgenden Abbildung (Bild 30) ist der stabile Zustand der Linienbildung zu sehen.

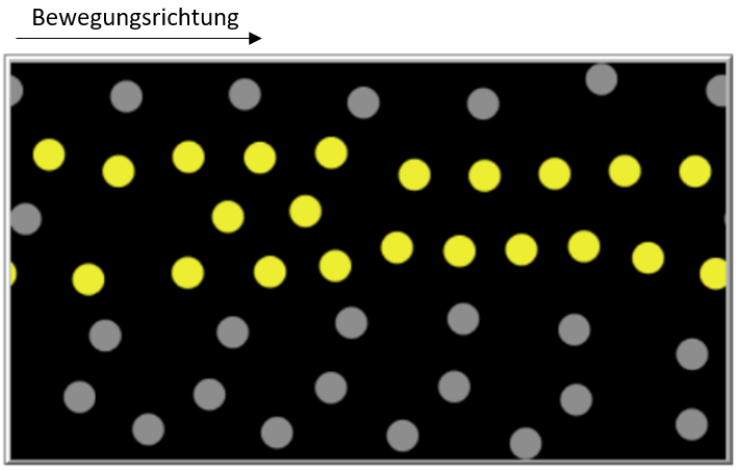


Bild 30: Das Phänomen der Linienbildung für $\Psi > 0{,}9$. Beginn bei $T_1 = 0{,}75$ s und $T_2 = 1{,}25$ s ($\Delta T = 0{,}5$ s). Stabil ab $T_1 \leq 0{,}5$ s und $T_2 \geq 1{,}5$ s ($\Delta T = 1{,}0$ s). Typ1 (Gelb) und Typ2 (Grau).

Es sind auch eindeutige Abweichungen auf der Ordinate erkennbar, mit erhöhter Wartezeit steigt die Ordnung (Linienbildung) der Agenten. Des Weiteren steigt die Ordnung mit Erhöhung der Differenz der Zeitlücken (ΔT). Demzufolge ist die Linienbildung abhängig von der Wartezeit und des Zeitabstandes zwischen den Agenten. Dies ist anhand des Verlaufs bei einer Wartezeit von 840 s im Vergleich zu den Verläufen mit geringeren Wartezeiten gut zu erkennen. Der Faktor Ψ steigt mit steigender Wartezeit.

In Bild 31 sind die Verläufe der Linienbildungen bei 90 Agenten ($\rho = 2{,}0$ Agenten/m²) für die Wartezeiten von 210 s und 420 s zu sehen (vgl. Tabelle 6).

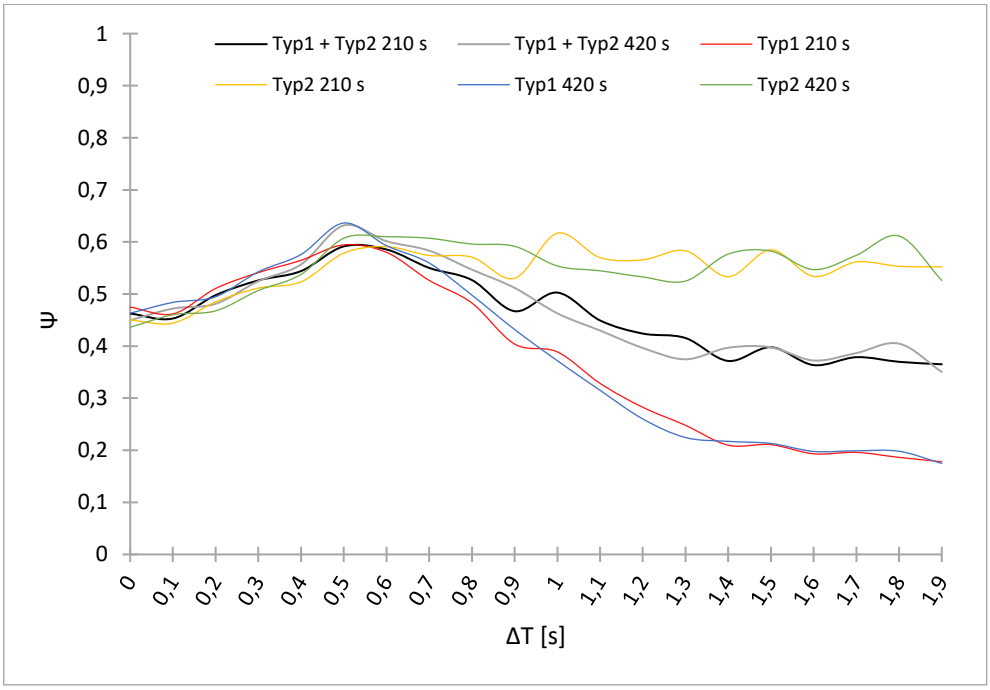


Bild 31: Ergebnisse der Linienbildungen bei 90 Agenten. Linienbildungen der Wartezeiten 210 s und 420 s bei einer Agentendichte von **2,0 Agenten/m²**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 1 s.

Eine Agentendichte von $\rho = 2{,}0$ Agenten/m² entspricht dem gestauten Bereich nach Weidmann (vgl. Bild 11). Die Agenten sind aufgrund der erhöhten Dichte in ihrer Wunschbewegung, als auch im Erreichen der Wunschgeschwindigkeit eingeschränkt. Hier kommt es zu keiner Linienbildung wie zuvor beschrieben, sondern zu einer anderen Art der Ordnung zwischen den Agenten. Die Linienbildungen der beiden Simulationen für die Wartezeiten von 210 s und 420 s haben nahezu die gleichen

Verläufe. Die Kurven steigen zunächst bis zu einer Differenz der Zeitlücke von $\Delta T = 0{,}5$ s an und Erreichen ihr Maximum bei $\Psi \approx 0{,}6$. Ab $\Delta T = 0{,}5$ s beginnen die Verläufe für Typ1 (Agenten mit höherer Wunschgeschwindigkeit) auf ein Minimum ($\Psi \approx 0{,}2$) wieder zu sinken, während die Verläufe von Typ2 konstant um den Wert $\Psi \approx 0{,}5$ verbleiben.

Die Typ1 Agenten beginnen für $\Delta T \geq 0{,}5$ s Linien in senkrechter Richtung auszubilden, wodurch die Linienbildung in die waagerechte Richtung (Bewegungsrichtung) nicht mehr möglich wird. Das Phänomen der waagerechten Linienbildung ist in Bild 32 gezeigt. Bei einer Zeitlücken-Differenz von $\Delta T = 0{,}5$ s besitzt Typ1 den Zeitlückenwert $T_1 = 0{,}75$ s und Typ2 $T_2 = 1{,}25$ s. Für $T_1 \leq 0{,}75$ s und $T_2 \geq 1{,}25$ s beginnt die Ausbildung der senkrechten Linienbildung und verstärkt sich bis $\Delta T \approx 1{,}4$ s ($T_1 = 0{,}3$ s und $T_2 = 1{,}7$ s) und erreicht hier einen stabilen Zustand der Ordnung ($\Psi =$ konstant).

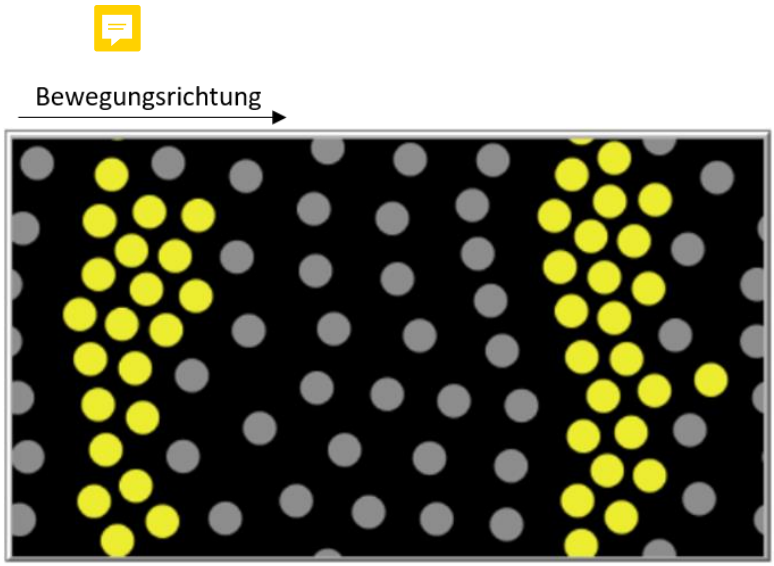


Bild 32: Das Phänomen der senkrechten Linienbildung im gestauten Bereich. Beginn bei $T_1 = 0{,}75$ s und $T_2 = 1{,}25$ s ($\Delta T = 0{,}5$ s). Stabil ab $T_1 \leq 0{,}3$ s und $T_2 \geq 1{,}7$ s ($\Delta T \geq 1{,}4$ s). Typ1 (Gelb) und Typ2 (Grau).

6.1.2 Analyse der Agentenflüsse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Geschwindigkeiten bei 45 Agenten (Bild 33) und 60 Agenten (Bild 34) dargestellt. Die Darstellungen der Geschwindigkeiten bei 50 Agenten befinden sich im Anhang (Anhang 2).

Anfangs besitzen beide Typen (Typ1 und Typ2) bis $\Delta T = 0{,}5$ s die gleichen mittleren Geschwindigkeiten. Bis zu dieser Zeitdifferenz herrscht im System eine Unordnung ($\Psi \approx 0{,}5$). Die mittleren Geschwindigkeiten für beide Typen betragen hier ca. 1,3 m/s, wobei die mittlere Geschwindigkeit des Typ2 geringfügig bis auf 1,25 m/s absinkt, während Typ1 nicht an Gschwindigkeit verliert. Beide erreichen aufgrund ihrer Interaktionen nicht ihre Wunschgeschwindigkeiten.

Ab einer Zeitlücken-Differenz von $\Delta T = 0{,}5$ s beginnt der Phasenübergang (Zustand der Unordnung beginnt in den Zustand der Ordnung zu wechseln) der Agenten. Die Agenten des Typ1 verzeichnen einen stark ansteigenden Kurvenverlauf. Die mittleren Geschwindigkeiten betragen am Ende des Phasenübergangs ca. $v_{01} = 1{,}8$ m/s, somit erreichen die Typ1 Agenten ihre Wunschgeschwindigkeit von 1,8 m/s. Dieser Wert wird ab $\Delta T = 1{,}0$ s (Beginn des stabilen Zustands) bis $\Delta T = 1{,}9$ s konstant beibehalten. Die mittleren Geschwindigkeiten des Typ2 verzeichnen jedoch einen starken Abfall auf ca. $v_{02} = 0{,}8$ m/s. Je kleiner also die Zeitlücken (T_i) unter den Agenten werden, desto höher werden die mittleren Geschwindigkeiten und somit der Fluss der Agenten.

Im Freifluss Bereich (Bild 33 und Bild 34) zeigt sich im Bereich des Phasenübergangs ($0{,}5\ s \leq \Delta T \leq 1{,}0\ s$) ein Anstieg des Gesamtflusses (Typ1 + Typ2) bis zur stabilen Linienbildung ($\Delta T = 1{,}0$ s). Der Gesamtfluss nimmt also mit der Entstehung von Linien zu. Während der stabilen Phase ($\Delta T \geq 1{,}0$ s) beginnt der Gesamtfluss bzw. Mittelwert der mittleren Geschwindigkeiten (Typ1 + Typ2) um ca. 0,1 m/s zu sinken (vgl. Bild 33 und Bild 34 Diagramme unten). Dies resultiert aufgrund des starken Abfalls von Typ2 Agenten, da ihre Zeitabstände (T_i) gegenüber den Typ1 Agenten höher sind. Zudem sind die Agenten mit geringeren Zeitabständen (Typ1) die dominierenden im System, so dass die Typ2 Agenten in ihrer Wunschgeschwindigkeit eingeschränkt werden.

Aufgrunddessen verringern sich die mittleren Geschwindigkeiten der Typ2 Agenten und erreichen nicht ihre Wunschgeschwindigkeiten. Bei einer Dichte von $\rho = 1{,}0$ Agenten/m^2 hat die Entstehung der stabilen Linien keinen starken Einfluss auf den Gesamtfluss, da der Gesamtfluss während des stabilen Zustands wieder den selben Wert wie im Zustand der Unordnung annimmt (vgl. Bild 33 unten). Der Gesamtfluss besitzt bei einer Dichte von 1,0 Agenten/m^2 nur für $1{,}0\ \mathrm{s} \leq \Delta T \leq 1{,}2\ \mathrm{s}$ einen Anstieg.

Die Geschwindigkeitsverteilungen der Simulation mit $\rho = 1{,}3$ Agenten/m^2 besitzen nahezu die gleichen Verläufe, jedoch ist die Auswirkung der stabilen Ordnung (Linienbildugn) auf den Gesamtfluss stärker. Der Gesamtfluss besitzt auch hier den stärksten Anstieg für $1{,}0\ \mathrm{s} \leq \Delta T \leq 1{,}2\ \mathrm{s}$. Trotz weiteren Abfalls während des stabilen Zustands sinkt der Gesamtfluss nicht wieder auf den Wert im Zustand der Unordnung und ist höher. Für alle Agentendichten (1,0 Agenten/m^2 $\leq \rho \leq$ 1,3 Agenten/m^2) wird der Maximale Gesamtfluss für $\Delta T \geq 1{,}0\ \mathrm{s}$ erreicht.

Die mittleren Geschwindigkeiten bis zum Beginn des Phasenübergangs ($\Delta T = 0{,}5\ \mathrm{s}$) sind geringer, aufgrund höherer Agentendichte und betragen ca. 1,0 m/s. Die Typ1 Agenten erreichen auch hier im Bereich der stabilen Ordnung (Linienbildung) ihre Wunschgeschwindigkeiten von $v_{01} \approx 1{,}8$ m/s. Die Typ2 Agenten fallen auf einen geringeren Wert von ca. $v_{02} \approx 0{,}6$ m/s.

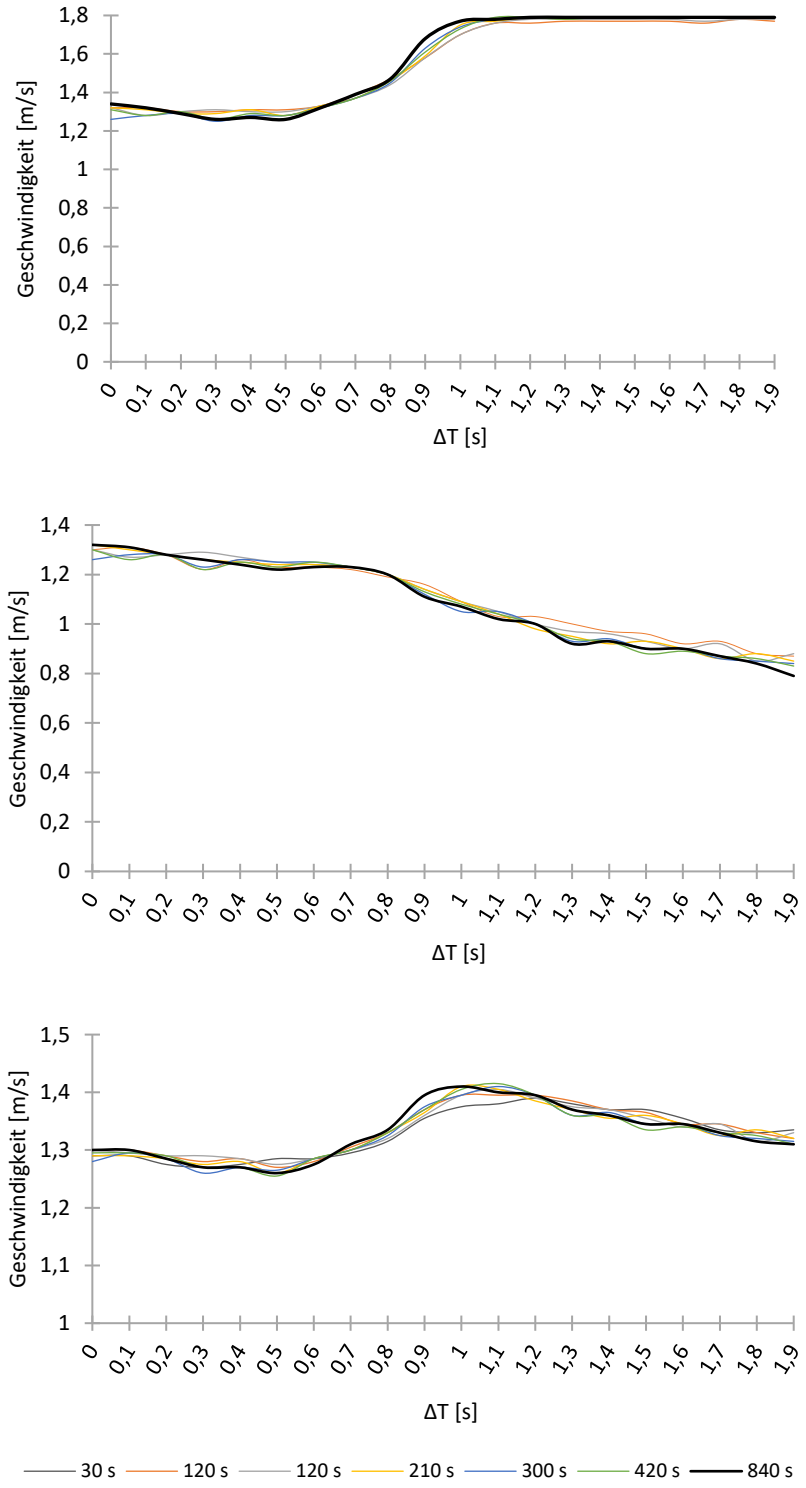


Bild 33: Ergebnisse der mittleren Geschwindigkeiten bei 45 Agenten für Typ1 (oben), Typ2 (Mitte) und **Typ1 + Typ2** (unten). Mittlere Geschwindigkeiten von unterschiedlichen Wartezeiten bei einer Agentendichte von **1,0 Agenten/m²**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 1 s.

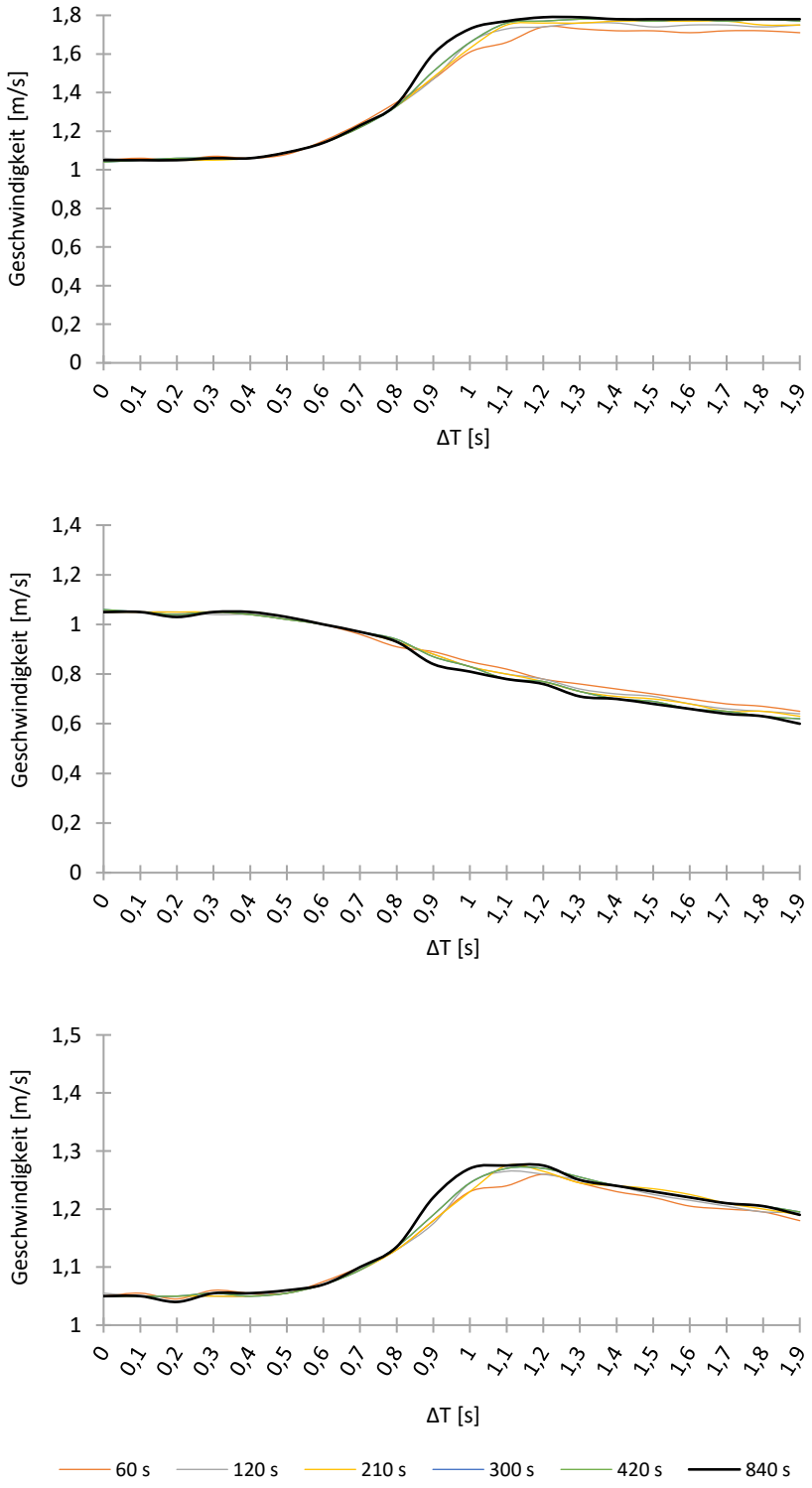


Bild 34: Ergebnisse der mittleren Geschwindigkeiten bei 60 Agenten für **Typ1** (oben), **Typ2** (Mitte) und **Typ1 + Typ2** (unten). Mittlere Geschwindigkeiten von unterschiedlichen Wartezeiten bei einer Agentendichte von **1,3 Agenten/m²**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 1 s.

Die Graphiken zuvor (Bild 33 und Bild 34) sind die Verläufe für den Freifluss Bereich. Der Freifluss Bereich nach Weidmann bezieht sich für eine Personendichte bis ca. 1,5 Personen/m². In der nachfolgenden Abbildung (Bild 35) sind die Ergebnisse für den gestauten Bereich bei einer Agentendichte von 2,0 Agenten/m². (vgl. Bild 11 Fundamentaldiagramm nach Weidmann).

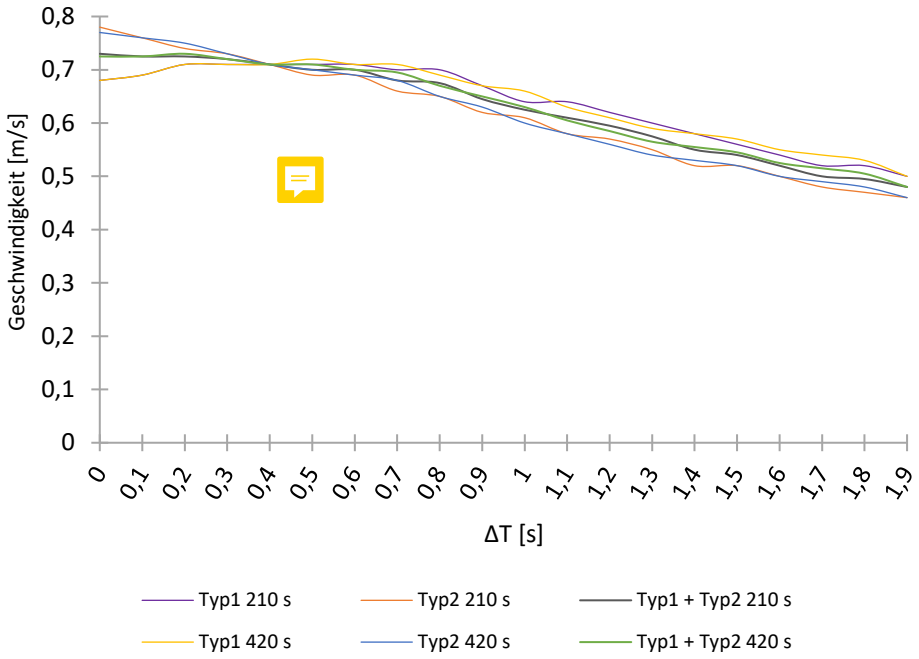


Bild 35: Ergebnisse der mittleren Geschwindigkeiten bei 90 Agenten. Mittlere Geschwindigkeiten bei Wartezeiten von 210 s und 420 s mit einer Agentendichte von **2,0 Agenten/m²**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 1 s.

Die Geschwindigkeitsverläufe von Typ1 und Typ2 sind ähnlich und sinken mit Anstieg der Differenz der Zeitlücken. Es ist kein Unterschied durch Variation der Wartezeiten (210 s und 420 s) festzustellen. Bei $\Delta T = 0{,}4$ s schneiden sich die Verläufe von Typ1 und Typ2, d.h. die mittleren Geschwindigkeiten beider Typen ist bei einer Dichte von 2,0 Agenten/m² und $\Delta T = 0{,}4$ s ($T_1 = 0{,}8$ s und $T_2 = 1{,}2$ s) gleich und liegen bei $v_{01} = v_{02} \approx 0{,}70$ m/s. Die Kurven der Mittelwerte der mittleren Geschwindigkeiten von Typ1 + Typ2 haben bis $\Delta T = 0{,}5$ s (Beginn der senkrechten Linienbildung, siehe Bild 31 und Bild 32) einen nahezu konstanten Wert. Ab einer Zeitlücken-Differenz von $\Delta T = 0{,}5$ s beginnen die mittleren Geschwindigkeiten stärker zu sinken bis ca. 0,5 m/s. Der Abfall

des Gesamtflusses resultiert aus der Blockade durch die Bildung von senkrechten Linien aufgrund der hohen Agentendichte.

Im gestauten Bereich besteht kein Einfluss von der Zeitlücke T_i der Agenten untereinander auf die mittleren Geschwindigkeiten der Agenten. Ob die Zeitlücke sinkt oder steigt, die Geschwindigkeit sinkt kontinuierlich und somit der Gesamtfluss. Der Gesamtfluss beginnt mit der Entstehung der senkrechten Linien noch stärker sinken.

6.2 Simulation II

6.2.1 Analyse der Linienbildungen

Im Folgenden sind die Aufzeichnungen der Linienbildungen für Typ1 + Typ2 (Mittelwert aus Typ1 und Typ2) der Simulation II mit $\rho = 1{,}0$ Agenten/m² in Kurvendiagrammen für den Freifluss Bereich dargestellt (vgl. Tabelle 7 und Tabelle 8). Die Diagramme für Typ1 und Typ2 befinden sich im Anhang (Anhang 4 und Anhang 5).

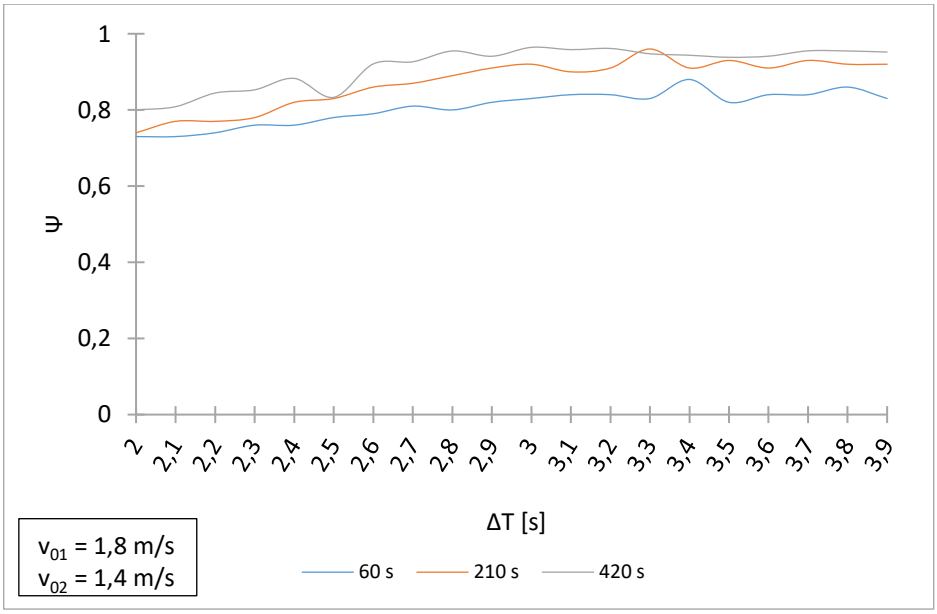


Bild 36: Ergebnisse der Mittelwerte der Linienbildungen bei 45 Agenten. Linienbildungen von unterschiedlichen Wartezeiten und Wunschgeschwindigkeiten für **Typ1 + Typ2** bei einer Agentendichte von **1,0 Agenten/m²**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 3 s.

Vergleicht man zunächst Bild 36 mit v_{01} = 1,8 m/s und v_{02} = 1,4 m/s (Freie Gehgeschwindigkeit eines Fußgängers) und Bild 37 mit $v_{01} = v_{02}$ = 2,0 m/s, stellt man keinen Unterschied in den Verläufen der Linienbildungen fest.

In Simulation II wurden die Differenzen der Wunschzeitlücken gegenüber der Simulation I fortgeführt. Die Simulationen starteten mit T_1 = 1 s und T_2 = 3 s und somit bei Zeitlücken-Differenzen von ΔT = 2,0 s bis ΔT = 3,9 s in 0,1 s schritten. Die Diagramme zeigen ein Bild, welches aufgrund der Ergebnisse der Simulation I zu erwarten waren. Die Kurven verlaufen vom Beginn bis zum Ende nahezu konstant. Man erkennt ebenfalls auch hier den Anstieg der Ordnung (Linienbildung), je höher die Wartezeit wird.

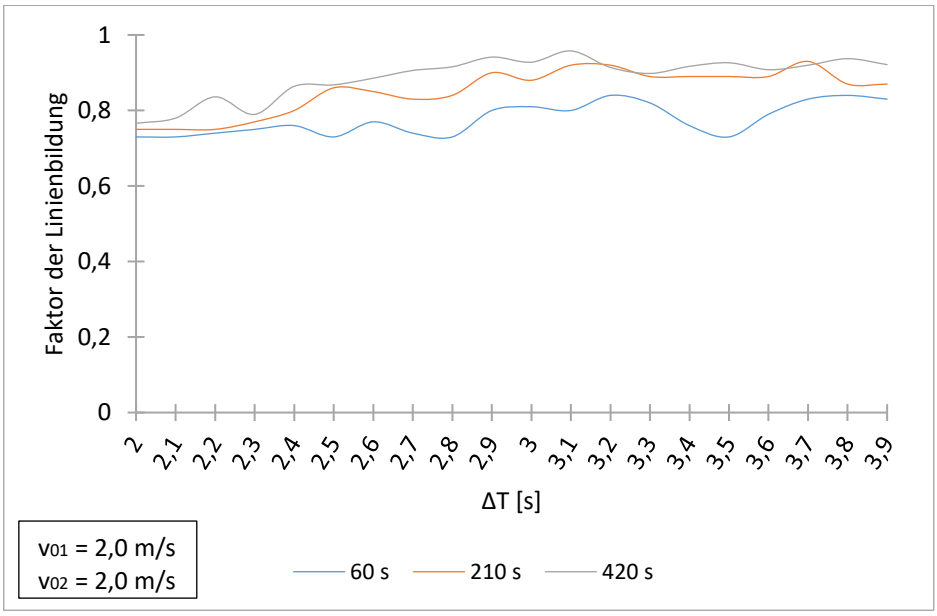


Bild 37: Ergebnisse der Mittelwerte der Linienbildungen bei 45 Agenten. Linienbildungen von unterschiedlichen Wartezeiten und gleichen Wunschgeschwindigkeiten für **Typ1 + Typ2** bei einer Agentendichte von **1,0 Agenten/m²**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 3 s.

Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass die Entwicklung der stabilen Linienbildung abhängig von den Wartezeiten und der Zeitabstände zwischen den Agenten ist. Ab einer Differenz von ΔT = 0,5 s beginnen die Agenten Linien zu bilden, dabei bilden die Agenten des Typ1 und Typ2 jeweils eigene Linien. Bei einer Differenz von ΔT = 1,0 s werden stabile Zustände der Linien erreicht, d.h. es findet keine kurzweilige Unordnung mehr statt (s. Simulation I). Der stabile Zustand Ordnung bleibt bis zu einer Zeitlücken-Differenz von ΔT = 3,9 s erhalten.

6.2.2 Analyse der Agentenflüsse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Geschwindigkeiten bei 45 Agenten zu sehen (vgl. Tabelle 7 und Tabelle 8). Die Agenten versuchen während der Fortbewegung ihre Wunschgeschwindigkeiten (Maximalgeschwindigkeit) zu erreichen. Dabei wurde für Typ1 $v_{01} = 1{,}8$ m/s und für Typ2 $v_{02} = 1{,}4$ m/s (Freie Gehgeschwindigkeit eines Fußgängers) festgelegt (Tabelle 7). Für Typ1 wurde die Wunschgeschwindigkeit höher gesetzt, da die Typ1 Agenten E-Scooter Fahrer darstellen sollen und diese höhere Geschwindigkeiten anstreben als Fußgänger. Die Simulation wurde mit $v_{01} = v_{02} = 2{,}0$ m/s wiederholt, um mögliche Auswirkungen auf die Linienbildungen durch die Variation der Wunschgeschwindigkeiten zu erhalten (Tabelle 8). Es zeigten sich keine Auswirkungen auf die Linienbildungen durch die Variation der Wunschgeschwindigkeiten (vgl. Bild 36 mit Bild 37).

Bei höheren Differenzen der Zeitlücken zeigen sich stabilere Verläufe vom Beginn ($\Delta T = 2{,}0$) bis zum Ende ($\Delta T = 3{,}9$ s) im Gegensatz zu den Verläufen in Simulation I (vgl. Bild 27, Bild 28, Bild 29 und Bild 36, Bild 37). Daraus folgt, dass höhere Differenzen der Zeitlücken ($\Delta T \geq 1{,}0$ s) die Entstehung von Linien in Personenströmen begünstigen, wodurch es aufgrund des Wechsels der Unordnung in den Zustand der Ordnung (Linienbildung) zu weniger Interaktionen zwischen den Personen kommen kann. Die höhere Stabilität zeigt sich auch in den Verläufen der mittleren Geschwindigkeiten.

Die Verläufe von Typ1 + Typ2 (s. Bild 38 unten) sind anfangs bei ca. 0,8 m/s und steigen linear bis auf ca. 1,2 m/s bei $\Delta T = 3{,}0$ s ($T_1 = 0{,}5$ s und $T_2 = 3{,}5$ s) und verlaufen konstant bis $\Delta T = 3{,}9$ s weiter. Der stabile Zustand, d.h. bei dem die Geschwindigkeiten bzw. der Gesamtfluss konstant bleibt, beginnt bei $\Delta T = 3{,}0$ s. In Simulation I sank der Gesamtfluss trotz des stabilen Zustands der Linienbildung bei $\Delta T = 1{,}0$ s geringfügig weiter. Die Stabilität des Systems ist in Simulation II besser als in Simulation I, aufgrund des stabilen Zustands (Linienbildung) über alle ΔT (vgl. Bild 36 und Bild 37). Zudem zeigt sich auch hier, dass der Zustand der Ordnung bzw. die Linienbildungen und der Gesamtfluss bei höheren Differenzen der Zeitlücken zunehmen.

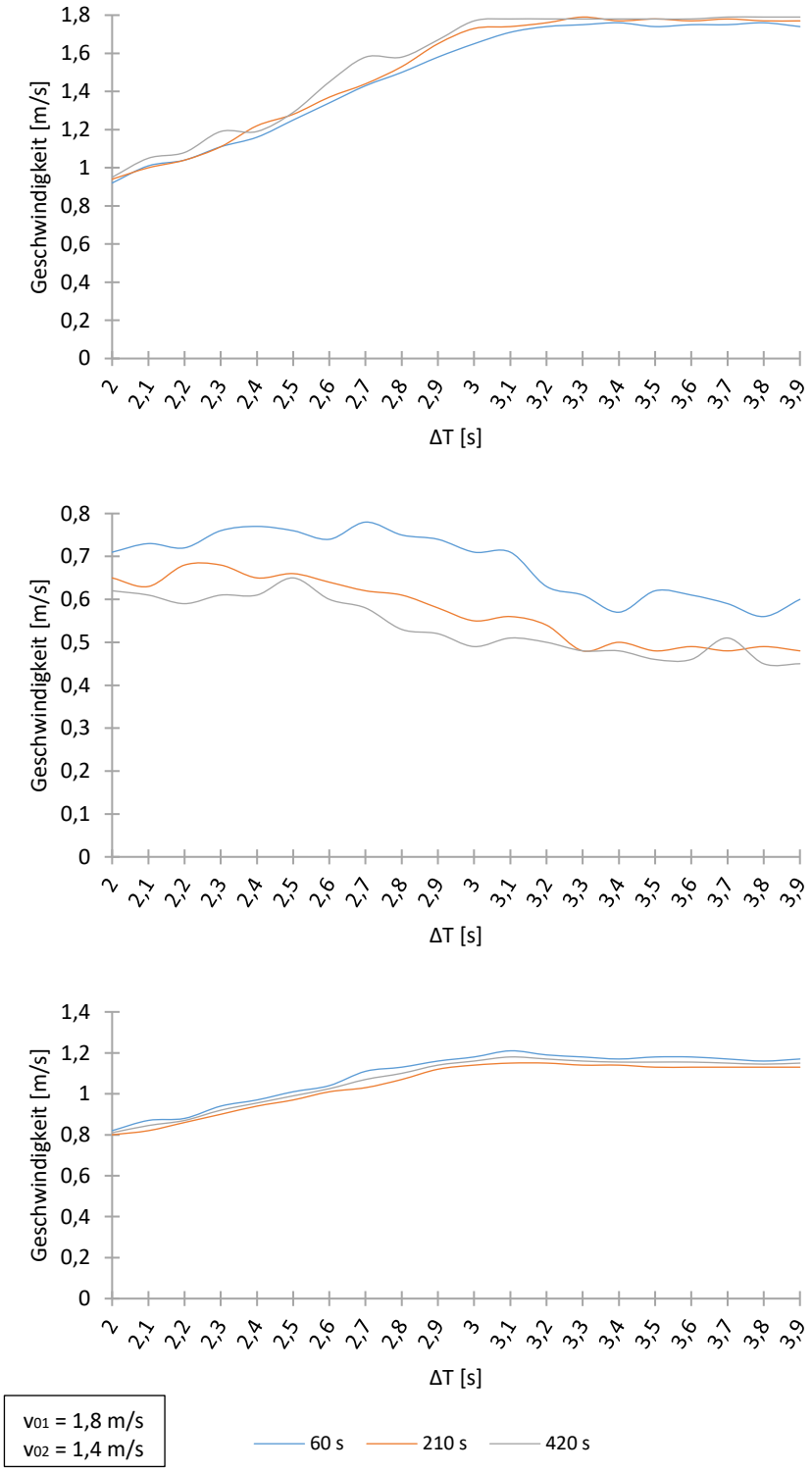


Bild 38: Ergebnisse der mittleren Geschwindigkeiten bei 45 Agenten für **Typ1** (oben), **Typ2** (Mitte) und **Typ1 + Typ2** (unten) von unterschiedlichen Wartezeiten und Wunschgeschwindigkeiten bei einer Agentendichte von **1,0 Agenten/m²**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 3 s

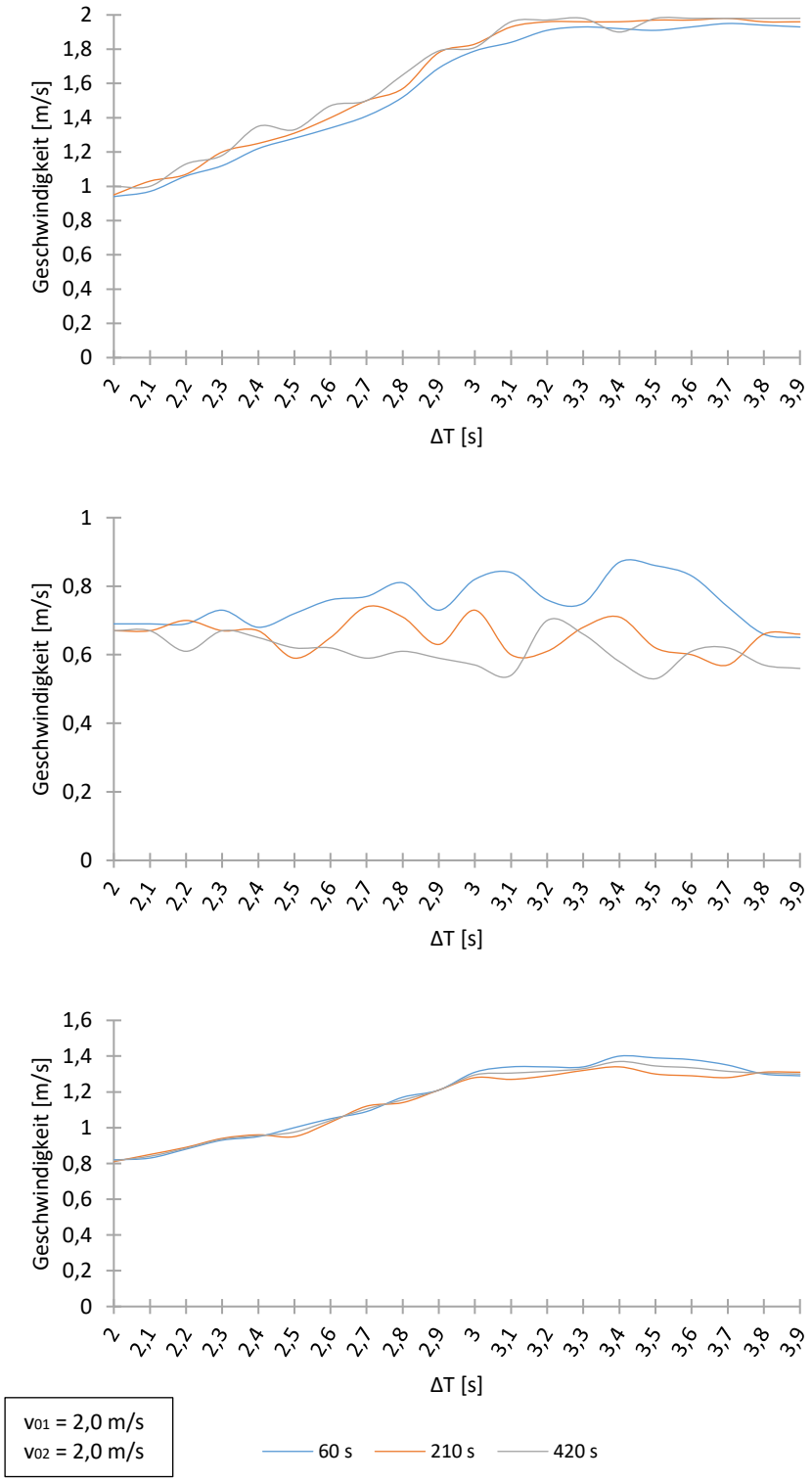


Bild 39: Ergebnisse der mittleren Geschwindigkeiten bei 45 Agenten für **Typ1** (oben), **Typ2** (mitte) und **Typ1 + Typ2** (unten) von unterschiedlichen Wartezeiten und gleichen Wunschgeschwindigkeiten bei einer Agentendichte von **1,0 Agenten/m²**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 3 s

7 Ergebniszusammenfassung und Ausblick

7.1 Ergebniszusammenfassung

In dieser Arbeit wurden mittels einer Agentenbasierten Simulationssoftware die Interaktionen zwischen zwei Personenströmen mit unterschiedlichen Wunsch-zeitlücken und Wunsch- bzw. Maximalgeschwindigkeiten untersucht. Dabei lag der Fokus auf der Entstehung der Linienbildungen und mittleren Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Differenzen der Wunschzeitlücken (ΔT). Die Simulationen wurden alle entlang eines Korridors (11 x 7 m) durchgeführt. Folgende Szenarien wurden gewählt:

Simulation I

Tabelle 9: Simulation I

Einstufung n. Weidmann	Dichte [Agenten/m²]	Beginn T_1 [s]	Beginn T_2 [s]	v_{01} [m/s]	v_{02} [m/s]
Freifluss	1,0	1,0	1,0	1,8	1,4
Freifluss	1,1	1,0	1,0	1,8	1,4
Freifluss	1,3	1,0	1,0	1,8	1,4
Gestaut	2,0	1,0	1,0	1,8	1,4

Für Wartezeiten (Freifluss Bereich): 60 s, 120 s, 210 s, 300 s, 420 s und 840 s
Für Wartezeiten (gestauten Bereich): 210 s und 420 s

Freifluss-Bereich:

- Für $0{,}5\ s < T_1 \leq 0{,}75\ s$ und $1{,}25\ s \leq T_2 < 1{,}5\ s$ $(0{,}5\ s \leq \Delta T < 1{,}0\ s)$ → Ψ steigt
  - Phasenübergang
  - Zustand der Unordnung wechselt in den Zustand der Ordnung (Linien).
- Für $T_1 \leq 0{,}5\ s$ und $T_2 \geq 1{,}5\ s$ $(\Delta T \geq 1{,}0\ s)$ → Ψ = konstant
  - Es hat sich ein stabiler Zustand der Ordnung (Linien) eingestellt.

- Für Wartezeiten ≥ 210 s → $0{,}9 \leq \Psi \leq 1$
  Für Wartezeiten < 210 s → $0{,}75 \leq \Psi < 0{,}9$

  - Je größer die Wartezeit, desto stabiler der Zustand der Ordnung.

- Für $T1 \leq 0{,}75$ s und $T2 \geq 1{,}25$ s ($\Delta T \geq 0{,}5$ s) → J_{ges} steigt

  - Der Gesamtfluss (J_{ges}) steigt mit der Entstehung von Linien.

➔ Die Entstehung der Ordnung durch Linienbildungen in Bewegungsrichtung ist u.a. abhängig von der Wartezeit und den Zeitlücken der Agenten.

Gestauter Bereich:

- Es entstehen keine Linien entlang der Bewegungsrichtung aller Agenten.

- Für $T_1 \leq 0{,}75$ s und $T_2 \geq 1{,}25$ s ($\Delta T \geq 0{,}5$ s) → Ψ sinkt

  - Visuell: Entstehung von Linien entgegengesetzt der Bewegungsrichtung aller Agenten.

- Für $T_1 \leq 0{,}3$ s und $T_2 \geq 1{,}7$ s ($\Delta T \geq 1{,}4$ s) → Ψ = konstant

  - Es hat sich ein stabiler Zustand der Ordnung (senkrechte Linienbildung) eingestellt. Der stabile Zustand im gestauten Bereich ist die Bildung von senkrechten Linien, hierdurch wird eine Ordnung unter den Agenten geschaffen.

- Für $T_1 \leq 0{,}75$ s und $T_2 \geq 1{,}25$ s ($\Delta T \geq 0{,}5$ s) → J_{ges} sinkt

  - Die Entstehung von senkrechten Linien bewirkt ein verstärktes sinken des Gesamtflusses (J_{ges})

- Für alle Wartezeiten nahezu gleiche Verläufe

➔ Die Entstehung der Ordnung durch Linienbildungen entgegengesetzt der Bewegungsrichtung (senkrechte Linienbildung) ist nicht abhängig von den Wartezeiten, sondern u.a. abhängig von den Zeitlücken der Agenten.

Simulation II

Tabelle 10: Simulation II

Einstufung n. Weidmann	Dichte [Agenten/m²]	Beginn T_1 [s]	Beginn T_2 [s]	v_{01} [m/s]	v_{02} [m/s]
Freifluss	1,0	1,0	3,0	1,8	1,4
Freifluss	1,0	1,0	3,0	2,0	2,0

Für Wartezeiten: 60 s, 210 s und 420 s

Freifluss Bereich:

- $0{,}75 \leq \Psi \leq 0{,}95$ für alle ΔT → Ψ = konstant
    - Es existieren keine Phasenübergänge. Das System ist durchgehend über alle ΔT (2,0 s bis 3,9 s) in einem guten bis stabilen Zustand.
- Mit Erhöhung der Wartezeit, erhöht sich auch Ψ und somit die Ordnung (Linienbildung) des Gesamtflusses.
- Für $T_1 \geq 0{,}5$ s und $T_2 < 3{,}5$ s $(2{,}0 \leq \Delta T < 3{,}0$ s) → J_{ges} steigt
    - Der Gesamtfluss (J_{ges}) steigt konstant.
    - Ein konstanter Anstieg des Gesamtflusses kann als stabil bezeichnet werden, da ein konstanter Anstieg des Flusses als reibungsloser bzw. freier Verkehr angenommen werden kann.
- Für $T_1 \leq 0{,}5$ s und $T_2 \geq 3{,}5$ s $(\Delta T \geq 3{,}0$ s) → J_{ges} = konstant
    - Der Gesamtfluss $J_{ges} = J_{max}$ bleibt bis $\Delta T = 3{,}9$ s konstant

➔ Das System ist durch das Erhöhen der Wunschzeitlücke von 1,0 s auf 3,0 s für T_2 insgesamt stabiler, wodurch sich die Interaktionen der Agenten reduzieren (Ψ über alle ΔT nahezu konstant).

➔ Geringe Zeitlücken (T_i) der Agenten untereinander bewirkt Anstieg des Flusses und mit größer werdenden Zeitlücken (T_i) sinkt der Fluss.

- ➔ Mit Erhöhung der Differenz der Zeitlücken (ΔT) wächst der Zustand der Ordnung (Linienbildung) und der Gesamtfluss.
- ➔ Im Freifluss Bereich ist die Stabilität der Linienbildung (Ψ) u.a. abhängig von den Wartezeiten und Zeitlücken der Agenten zueinander.
- ➔ Für alle Wartezeiten haben sich Linien entwickelt. Für Wartezeiten ≥ 210 s war der Zustand der Ordnung (Linien) stabiler bzw. ausgeprägter.
- ➔ Je größer die Wartezeit wird, desto stärker die Linienbildungen.
- ➔ Die Stabilität des Gesamtflusses ist in Simulation II besser als in Simulation I, aufgrund des fehlenden Phasenübergangs.
- ➔ Linienbildungen erhöhen den Gesamtfluss und verringern Interaktionen.
- ➔ Für $\Delta T \geq 0{,}5$ s beginnt die langsame Entstehung von Linien und wächst bis zu einem stabilen Zustand $\Delta T \geq 1{,}0$ s. Ab einer Differenz der Zeitlücke von 1,0 s befindet sich das System in einem stabilen Zustand mit $\Psi > 0{,}75$.

7.2 Ausblick

Die Dynamik von Personenströmen ist komplex und vor allem situationsabhängig, wodurch es schwierig ist allgemeingültige Aussagen bezogen auf eine mögliche Entwicklung einer Gefahr zu treffen. Im Laufe der Arbeit wurden anhand einer agentenbasierten Simulationssoftware „NetLogo“ die Abhängigkeit von der Wartezeit und der Differenzen der Zeitlücken zur Entstehung von Linien geprüft. Mit dieser Software war es möglich die bekannten Linienbildungen aus empirisch erhobenen Daten abzubilden und die Abhängigkeiten des Zustandekommens zu ermitteln. Zudem betrachtet die Arbeit die Interaktionen zwischen Nutzern von E-Scootern (Mikromobilität) und Fußgängern. Jedoch wurden keine empirischen Daten zu Verhaltensweisen von Personen auf E-Scootern in Personenströmen gefunden. Das Wissen aus empirisch erhobenen Daten ist für die Modellierung und anschließenden Analyse wichtig und erhöht die Aussagekraft für mögliche Risiken. Laborexperimente bzw. Realversuche

oder Beobachtungen durch bspw. Kamerasysteme in Gebieten mit hohen Personendichten von Fußgängern und E-Scooter Fahrern würden die nötigen Daten zur Entwicklung von Maßnahmen zur Reduzierung von gefahrbringenden Situationen liefern. Das Bewegungsmodell, welches zur Analyse in dieser Arbeit verwendet wurde, wurde für Fußgänger entwickelt. Die Bewegungsabläufe eines Fußgängers entsprechen jedoch nicht den Bewegungsabläufen eines E-Scooter Fahrers. Sie unterscheiden sich in ihrer Trägheit und in ihren Reaktionszeiten. Aufgrund der Unterschiede in der Bewegung von motorisiertem Verkehr (Mikromobilität) und Fußgängerverkehr sollte auch ein Modell zur Visualisierung von Nutzern der Mikromobilität entwickelt werden. Zudem sollten weitere Szenarien wie z.B. in Kapitel 2 Abschnitt „2.6 Verkehrsszenarien von Personenströmen“ vorgestellt, durchgeführt werden.

Ausgehend von den Ergebnissen der Simulationen ist u.a. eine Handlungsempfehlung eigene Zonen für Nutzer der Mikromobilität zu schaffen, aufgrund ihrer Höchstgeschwindigkeiten von bis zu 20 km/h empfehlenswert. Zudem wäre es ratsam in erlaubten Fußgängerzonen Geschwindigkeitsbeschränkungen für Nutzer der Mikromobilität einzuführen. Nutzer der E-Scooter sind oft Teenager. Teenager besitzen keinen Führerschein und besitzen daher keine nachweislichen Kenntnisse der Verkehrsregeln. Daher wäre es angebracht die Erlaubnis nur Menschen zu erteilen, die nachweislich über Kenntnisse der Verkehrsregeln verfügen. Auch Touristen sind häufig Nutzer von E-Scootern. Unter Berücksichtigung des Tourismus könnte eine weitere Maßnahme, um möglichen Unfällen vorzubeugen, die Verpflichtung des Besitzes eines Führerscheins für Touristen sein oder ein Verbot der Nutzung ohne einen Touristenführer.

Literaturverzeichnis

A. Nakayama, Y. S. (2005). *Instability of pedestrian flow in two-dimensional optimal velocity model.* Berlin: Springer. doi:http://doi-org-443.webvpn.fjmu.edu.cn/10.1007/978-3-540-47064-9_29

A. Schadschneider, W. K. (2009). *Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications. In Encyclopedia of Complexity and System Science.* Springer.

amazon.de. (2020). (Telefunken) Abgerufen am Februar 2020 von https://www.amazon.de/Telefunken-Bike-Elektrofahrrad-Shimano-Nabenschaltung/dp/B01N0VJ3EC/ref=sr_1_5?adgrpid=70838828043&dchild=1&gclid=Cj0KCQjw3qzzBRDnARIsAECmryoyIWGOUzDrv7oqcOFkPek5TKa2qsXehEuo54E79SLD-JGK3sSU03waAiqREALw_wcB&hvadid=353054429454&hvdev=

Blitzer, T. F. (2010). *Mikroskopische Modellierung und Simulation.* Stuttgart: Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart. Von http://dx.doi.org/10.18419/opus-343 abgerufen

bluewheel.de. (2020). (Bluewheel) Abgerufen am Februar 2020 von https://www.bluewheel.de/hoverboard-hx310s-simpleblack-l#Control

Carsten Burstedde, K. K. (2001). *Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular.* Köln: Physica A.

Chraibi, M. (2012). *Validated force-based modeling of pedestrian.* Bergische Universität Wuppertal.

Consultants, c. M. (Oktober 2019). *https://civity.de/de/*. Abgerufen am Februar 2020 von http://scooters.civity.de/

D. Helbing, I. J. (2002). *Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. In Pedestrian and Evacuation Dynamics.* Springer.

D. Helbing, P. M. (2001). *Self-organizing pedestrian movement.* doi:10.1068/b2697

Dallmeyer, J. (2014). *Verkehrsimulationsmodelle, In: Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt.* Wiesbaden: Springer Vieweg. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-658-05207-2_3

de-de.segway.com. (2020). Abgerufen am Februar 2020 von http://de-de.segway.com/products/ninebot-by-segway-e

elektrische-boards.de. (2020). (Cool&Fun) Abgerufen am Februar 2020 von https://elektrische-boards.de/produkt/coolfun-elektro-skateboard-lg-batterie-mit-fernbedienung-electric-motor-skateboard-800w-4-raeder-schwarzes-panther-design/

Fruin, J. J. (1971). *Pedestrian planning and design.* New York: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners.

Helbing, D. (1992). A fluid-dynamic model for the movement of pedestrians. (Complex Systems 6), S. 391 - 415.

Helbing, D. (2001). *Traffic and related self-driven many-particle systems.* Rev. Mod. Phys. 73:1067.

Hirai K, T. K. (1975). *A simulation of the behavior of a crowd in panic. In: Proceedings of the 1975 international conference on cybernetics and society.* San Francisco.

Holl, S. (2016). *Methoden für die Bemessung der Leistungsfähigkeit.* Forschungszentrum Jülich GmbH. Jülich: IAS Series Band/Volume 32.

Hollingsworths, J. (August 2019). *Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters.* North Carolina State University. Von https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab2da8 abgerufen

Hoogendoorn SP, B. P. (2002). *Micro-scopic pedestrian wayfinding and dynamics modelling.* In: Pedestrian and evacuation dynamics.

Hoogendoorn, S. P. (2001). *Normative Pedestrian Flow Behavior, Theory and Applications.* Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geoscience, Transportation and Traffic Engineering section.

Hubert Klüpfel, T. M. (2005). Modelle für die Berechnung von Personenströmen und Evakuierungssimulationen. In *VdS Fachtagung Evakuierung und Räumung von Gebäuden.* VdS.

Hughes, R. L. (2002). A continuum theory for the flow of pedestrians. (Transportation Researjch Part B 36), S. 507 - 535.

Jan Ondrej, J. P.-H. (2010). *A synthetic-vision based steering approach for crowd simulation.* ACM Transactions on Graphics (TOG). doi:https://doi.org/10.1145/1778765.1778860

Jun, Z. (2012). *Pedestrian fundamental diagrams: Comparative analysis of experiments in different geometries* (Dissertation Ausg.). Bergische Universität Wuppertal.

Kesting, M. T. (2010). *Verkehrsdynamik und -simulation.: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik.* Technische Universität Dresden: Springer.

M. Bando, K. H. (1995). *Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation.* (P. R. 51, Hrsg.) American Physical Society. doi:https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.1035

Mahmassani, S. A. (1991). Simulation of crowd behavior and movement: Fundamental relations and applications. (Transportation Research Record 1320), S. 260 - 268.

May, A. D. (1990). *Traffic flow fundamentals.* Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.

Mohcine Chraibi, A. T. (2018). *Modelling of Pedestrian andEvacuation Dynamics.* Institute for Advanced Simulation. Forschungszentrum Jülich GmbH: Springer Science+Business Media LLC. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_705-1

Molnar, D. H. (1995). *Social force model for pedestrian dynamics.* Institute of Theoretical Physics. University of Stuttgart: American Physical Society. doi:https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.4282

mytier.app. (2020). (myTier) Abgerufen am Februar 2020 von https://mytier.app/products/de-scooter

Pushkin Kachroo, S. J.-n. (2008). *Pedestrian Dynamics.* Springer.

Rogsch, C. (2014). *Simulationsmethoden für Brandschutz und Evakuierung - Grundlagen, Anwendung, Erweiterung.* Abgerufen am 22.. Januar 2020 von http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20140514-112006-6

Serge P Hoogendoorn, P. H. (2004). *Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models.* Transportation Reasearch Part B: Methodological.

Taras I. Lakoba, D. J. (2005). *Modifications of the Helbing-Molnár-Farkas-Vicsek Social Force Model for Pedestrian Evolution.*

Weidmann, U. (1993). *Transporttechnik der Fussgänger - Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (Literaturauswertung).* Zürich: Schriftenreihe des IVT Nr. 90.

Wiesbaden, S. F. (Hrsg.). (2018). *wirtschaftslexikon.gabler.de*. Abgerufen am März 2020 von https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/gruppe-35688/version-259165

www.inmotion-imscv.de. (2020). (InMotion) Abgerufen am Februar 2020 von https://www.inmotion-imscv.de/inmotion-v8/

Yu Fan Chen, M. E. (2017). *Socially aware motion planning with deep reinforcement learning.* Vancouver, British Columbia, Canada.

Bildverzeichnis

Bild 1: E-Scooter der Marke Lime. 1

Bild 2: Die verschiedenen Ebenen von Fußgängerverhalten. (Hoogendoorn SP, 2002) 6

Bild 3: Klassifikation der Modelle. Beschreibung: Makroskopisch vs. Makroskopisch / Dynamik: stochastisch vs. Deterministisch / Variablen: kontinuierlich vs. Diskret, (gemischt) / Wechselwirkung (Interaktion): regelbasiert (Diskrete Dynamik/Modell) vs. Kraftbasiert (stetige Differentialgleichungssysteme). Quelle: Modelling of Pedestrian and Evacuation Dynamics (Eigene Darstellung) 8

Bild 4: Trajektorien von drei verschiedenen eindimensionalen Verkehrsdynamiken, mit dem Unterschied in der Anzahl der Agenten. *Links:* Experiment mit 15 Agenten. Trajektorien verlaufen geradlinig, d.h. die Bewegung aller Agenten ist gleichförmig geradlinig. *Mitte:* Experiment mit 25 Agenten. Die unteren Trajektorien verlaufen nicht geradlinig. Es sind kurze vertikale Verläufe in den Trajektorien zu erkennen, d.h. die Agenten kamen hier kurzeitig zum Stillstand. *Rechts:* Experiment mit 35 Agenten. In jeder einzelnen Trajektorie sind immer wieder kurze vertikale Verläufe zu erkennen, wodurch ein klar erkennbares Stufen-Muster zum Vorschein kommt. Dies wird auch Stop-and-Go-Verkehr oder Stau genannt. 9

Bild 5: Laufweg eines Fußgängers. Ordinate x(t) = Position des Fußgängers zum Zeitpunkt t. Abszisse t = Zeit und mit diskreten Zeitschritten von ∂t. 10

Bild 6: Eindimensionale schematische Darstellung von Fußgängern und E-Scooter Fahrern (Agenten). 11

Bild 7: Definition der Dichte (ρ) bezogen auf den Mess-bereich (A), mit Anzahl (N) und der durchschnittlichen Geschwindigkeit (v). 12

Bild 8: Links: Kobe - Akashi Japan (2001). Brücke zwischen Strand und Bahnhof. Kurz vor dem Betreten der Brücke bildet sie eine Engstelle für Fußgängerströme, wodurch es aufgrund zu hoher Dichten zu Unfällen kam. Rechts: Diagramm ρ(t) mit einem charakteristischen Verlauf für Fußgängerströme an Bereichen von Engstellen mit $\rho_{min} = 2 / m^2$ bis $\rho_{max} = 7 / m^2$. 12

Bild 9: Links: Personenstrom mit Messbereich (A), Personen (i) und Voronoi-Zelle (A_i). Rechts: Konstruktion einer Voronoi-Zelle zur Bestimmung der Dichte. Man verbindet zunächst einen Agenten (i) mit seinen nächsten Nachbarn und legt durch den Mittelpunkt (rote Punkte) der Verbindungslinien (blaue Linien) orthogonale Linien (schwarze Linien). Die Fläche die dadurch entsteht ist die Voronoi-Zelle A_i. 13

Bild 10: Schematische Darstellung von Agenten (Personen) zur Definition von Fluss (J) und spezifischer Fluss (J_s). 15

Bild 11: FD nach Weidmann (Weidmann, 1993). Grüne Gerade (Freifluss Bereich). Rote Gerade (gestauter Bereich). Rechts: Gehgeschwindigkeit (v) in Abhängigkeit der Personendichten (ρ). ... 18
Bild 12: Fundamentaldiagramm nach Fruin (Fruin, 1971). Auf den Ordinaten sind die Geschwindigkeiten (links) und spezifischen Flüsse (rechts) und auf den Abszissen die zur Verfügung stehende Fläche pro Agent (unten) und Voronoi-Dichte (oben). Quelle: (Holl, 2016) .. 19
Bild 13: Unidirektionales Verkehrsszenario von E-Scooter Fahrern (rechteckige Figur) und Fußgängern (kreisförmige Figur). Links: Zweidimensionaler Verkehr des Personenstromes innerhalb einer gegebenen Breite. Alle Agenten (E-Scooter Fahrer und Fußgänger) bewegen sich in x-Richtung. Rechts: Trajektorien-Aufzeichnungen der unidirektionalen Bewegung des Personenstromes. Die Schnittpunkte der Trajektorien entstehen durch unterschiedliche Geschwindigkeiten der Agenten (Überholvorgänge). In Anlehnung an (Holl, 2016) 20
Bild 14: Bidirektionales Verkehrsszenario von Personenströmen. Links: Zweidimensionaler Verkehr von Personenströmen mit Bewegungsrichtung in negative und positive x-Richtung und Ausbreitung innerhalb einer gegebenen Breite (y-Richtung). Rechts: Die roten Trajektorien sind die Ort-Zeit-Verläufe der roten Agenten mit Überkreuzungen der Trajektorien, welche die Überholvorgänge darstellen. Die grünen Trajektorien sind die Ort-Zeit-Verläufe der grünen Agenten. Die Kreuzungspunkte der grünen mit den roten Trajektorien stellen Passiervorgänge der entgegenkommenden Agenten dar. In Anlehnung an (Holl, 2016) 20
Bild 15: Multidirektionale Verkehrsszenarien von Personenströmen bei verschiedenen Arten von Kreuzungen: Vier-Wege-Kreuzung (links), Drei-Wege-Kreuzung (Mitte) und T-Kreuzung (rechts). E-Scooter Fahrer (Blau) und Fußgänger (Rot). Von Multidirektionalem Verkehr spricht man dann, wenn mehr als zwei Flussrichtungen existieren. Die Doppelpfeile symbolisieren die möglichen Geh- und Fahrtrichtungen der Agenten. 21
Bild 16: Links: Linienbildung eines Bidirektionalen Personenstromes entlang eines Korridors. Rechts: Bogenbildung an Engstellen. Die Pfeile in der Skizze zeigen die Bewegungsrichtungen. ... 23
Bild 17: Flussoszillationen an einer Engstelle mit Gegenverkehr. 24
Bild 18: Links: Selbstorganisierter kurzlebiger Kreisverkehr von Fußgängerströmen in Kreuzungen. Quelle: (D. Helbing I. J., 2002). Rechts: Eigene Darstellung eines möglichen Kreisverkehrs mit einem Hindernis (Säule) im Zentrum der Kreuzung zur möglichen Stabilisierung des Kreisverkehrs, um die Interaktionen zwischen den Personen zu verringern und somit die Effizienz des Fußgängerflusses zu steigern und mögliche gefahrbringenden Situationen wie Gedränge und Staus zu minimieren. 25
Bild 19: Schematische Darstellung eines möglichen Personenstrom-Szenarios mit Gruppen (schwarze Kreise). 26

Bild 20: Links: von Neumann Nachbarschaften. Mitte: Moore Nachbarschaften. Rechts: Nachbarschaften 28
Bild 21: Links: Notation. Rechts: Fußgänger vor dem Fußgänger i (im grauen Bereich). Minimale Distanz nach vorne und Geschwindigkeit. Quelle: (Mohcine Chraibi, 2018)..... 29
Bild 22: Grundgleichung des Social-Force-Modells..... 30
Bild 23: Verkehrszeichen für E-Scooter. An Orten mit diesem 34
Bild 24: Systemgrenzen-Diagramm für die Ökobilanz von Elektro-Scootern. Quelle: Environmental Research Letters (Hollingsworths, August 2019) 37
Bild 25: Simulationsoberfläche zur Analyse der Interaktionen zwischen dynamischen Teilchen („E-Scooter Fahrer“ und „Fußgänger“) in NetLogo. Ausgangssituation der Simulation für die Analyse des Übergangs von der willkürlichen Verteilung zur Linienbildung (Phasenübergang). 40
Bild 26: Schematische Darstellung des Ablaufs der Simulationen in NetLogo. 44
Bild 27: Ergebnisse der Mittelwerte der Linienbildungen bei 45 Agenten. Linienbildungen von unterschiedlichen Wartezeiten für **Typ1 + Typ2** bei einer Personendichte von **1,0** Agenten/m^2. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 1 s..... 47
Bild 28: Ergebnisse der Mittelwerte der Linienbildungen bei 50 Agenten. Linienbildungen von unterschiedlichen Wartezeiten für **Typ1 + Typ2** bei einer Personendichte von **1,1 Agenten/m^2**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 1 s..... 48
Bild 29: Ergebnisse der Mittelwerte der Linienbildungen bei 60 Agenten. Linienbildungen von unterschiedlichen Wartezeiten für **Typ1 + Typ2** bei einer Personendichte von **1,3 Agenten/m^2**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 1 s..... 48
Bild 30: Das Phänomen der Linienbildung für $\Psi > 0{,}9$. Beginn bei T_1 = 0,75 s und T_2 = 1,25 s (ΔT = 0,5 s)..... 49
Bild 31: Ergebnisse der Linienbildungen bei 90 Agenten. Linienbildungen der Wartezeiten 210 s 50
Bild 32: Das Phänomen der senkrechten Linienbildung im gestauten Bereich. Beginn bei T_1 = 0,75 s und 51
Bild 33: Ergebnisse der mittleren Geschwindigkeiten bei 45 Agenten für Typ1 (oben), Typ2 (Mitte) und **Typ1 + Typ2** (unten). Mittlere Geschwindigkeiten von unterschiedlichen Wartezeiten bei einer Agentendichte von **1,0 Agenten/m^2**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 1 s..... 54
Bild 34: Ergebnisse der mittleren Geschwindigkeiten bei 60 Agenten für **Typ1** (oben), **Typ2** (Mitte) und **Typ1 + Typ2** (unten). Mittlere Geschwindigkeiten von unterschiedlichen Wartezeiten bei einer Agentendichte von **1,3 Agenten/m^2**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 1 s..... 55
Bild 35: Ergebnisse der mittleren Geschwindigkeiten bei 90 Agenten. Mittlere Geschwindigkeiten bei Wartezeiten..... 56

Bild 36: Ergebnisse der Mittelwerte der Linienbildungen bei 45 Agenten. Linienbildungen von unterschiedlichen Warte-zeiten und Wunschgeschwindigkeiten für **Typ1 + Typ2** bei einer Agentendichte von **1,0 Agenten/m²**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 3 s. 57

Bild 37: Ergebnisse der Mittelwerte der Linienbildungen bei 45 Agenten. Linienbildungen von unterschiedlichen Warte-zeiten und gleichen Wunschgeschwindigkeiten für **Typ1 + Typ2** bei einer Agentendichte von **1,0 Agenten/m²**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 3 s. 58

Bild 38: Ergebnisse der mittleren Geschwindigkeiten bei 45 Agenten für **Typ1** (oben), **Typ2** (Mitte) und **Typ1 + Typ2** (unten) von unterschiedlichen Wartezeiten und Wunschgeschwindigkeiten bei einer Agentendichte von **1,0 Agenten/m²**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 3 s..... 60

Bild 39: Ergebnisse der mittleren Geschwindigkeiten bei 45 Agenten für **Typ1** (oben), **Typ2** (mitte) und **Typ1 + Typ2** (unten) von unterschiedlichen Wartezeiten und gleichen Wunschgeschwindigkeiten bei einer Agentendichte von **1,0 Agenten/m²**. Beginn bei T_1 = 1 s und T_2 = 3 s 61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Laufgeschwindigkeit von Fußgängern in Abhängigkeit 26

Tabelle 2: Verschiedene Elektro-Mikrofahrzeuge. Quellen: E-Scooter (mytier.app, 2020), Hoverboard (bluewheel.de, 2020), Monowheel (www.inmotion-imscv.de, 2020), Segway (de-de.segway.com, 2020), Pedelec (E-Bike) (amazon.de, 2020), Elektro-Skateboard (elektrische-boards.de, 2020) 36

Tabelle 3: Festgelegte Parameter der Simulation I mit 45 Agenten (ρ = 1,0 Agenten/ m^2)..... 45

Tabelle 4: Festgelegte Parameter der Simulation I mit 50 Agenten (ρ = 1,1 Agenten/ m^2)..... 45

Tabelle 5: Festgelegte Parameter der Simulation I mit 60 Agenten (ρ = 1,3 Agenten/ m^2)..... 46

Tabelle 6: Festgelegte Parameter der Simulation I mit 90 Agenten (ρ = 2,0 Agenten/ m2). 46

Tabelle 7: Festgelegte Parameter der Simulation II mit 45 Agenten (ρ = 1,0 Agenten/ m^2). 46

Tabelle 8: Festgelegte Parameter der Simulation II mit 45 Agenten (ρ = 1,0 Agenten/ m^2). 46

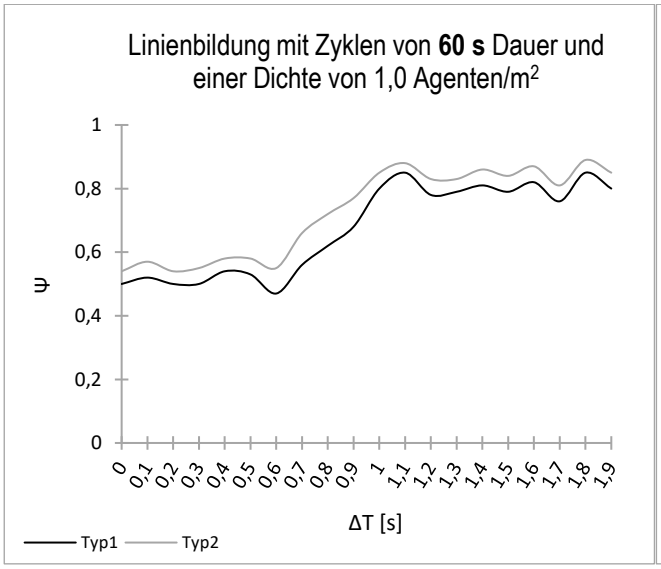
Tabelle 9: Simulation I 62

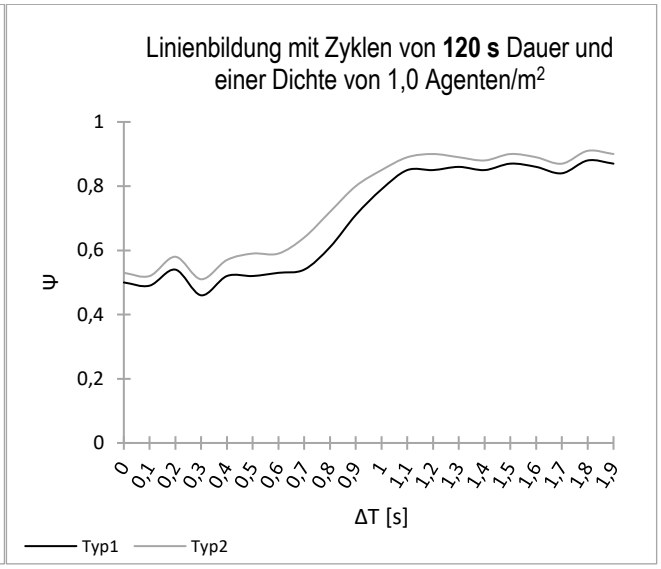
Tabelle 10: Simulation II 64

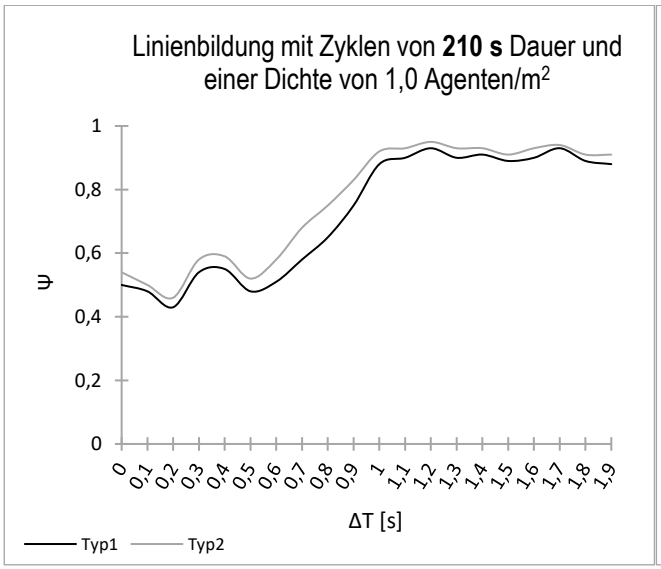
Anhang

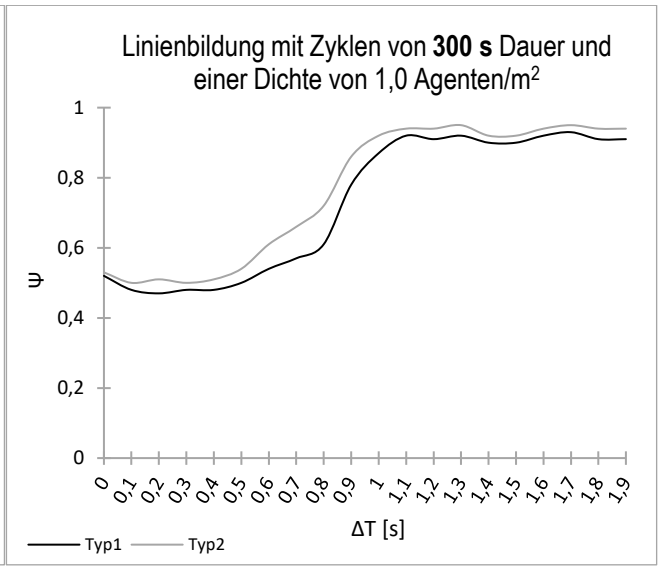
Anhang A1: Simulation I ($\rho = 1{,}0$ Agenten/m²) Freifluss Bereich

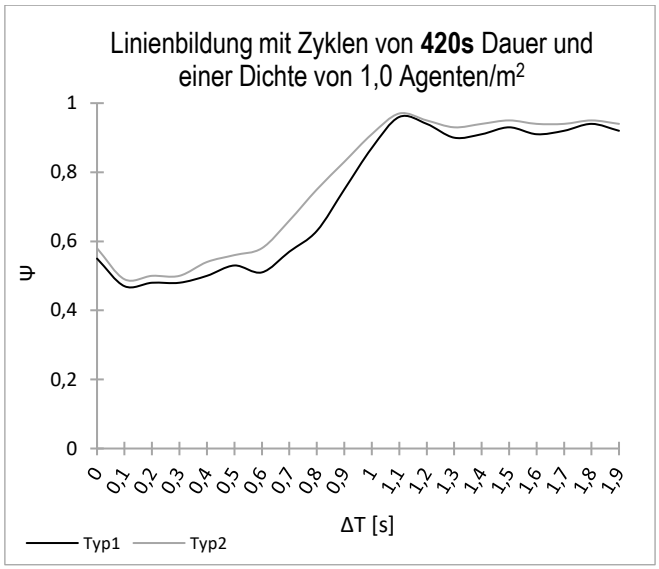
Wartezeit [s]	Anzahl Zyklen	Anzahl Agenten	v_{01} [m/s]	v_{02} [m/s]	Beginn T1 [s]	Beginn T2 [s]	Dauer Simulation [s]
60	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	6.000
120	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	12.000
210	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	21.000
300	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	30.000
420	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	42.000
840	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	84.000

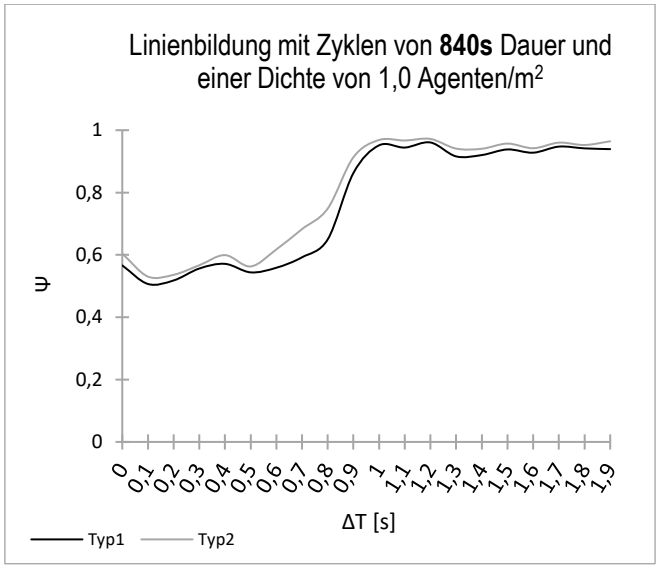






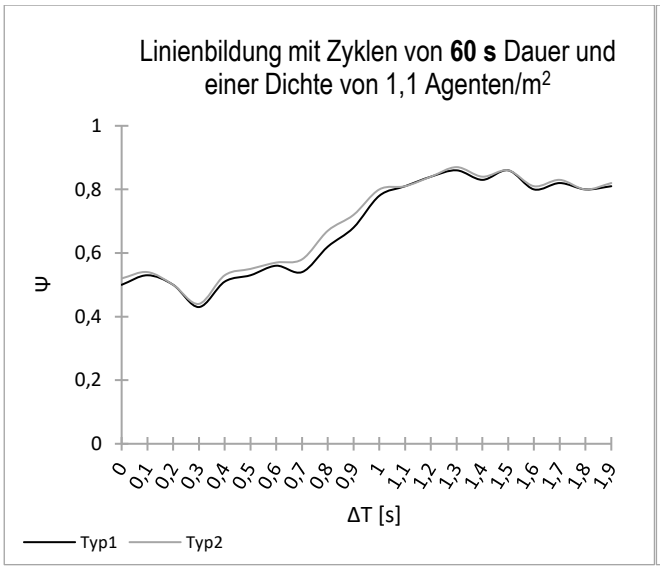


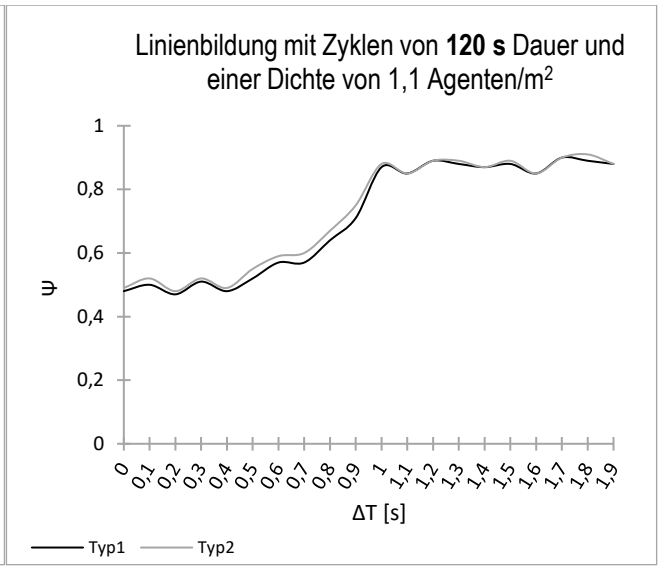

Linienbildung mit Zyklen von **420s** Dauer und einer Dichte von 1,0 Agenten/m²
Ψ
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5 1,6 1,7 1,8 1,9
ΔT [s]
Typ1
Typ2

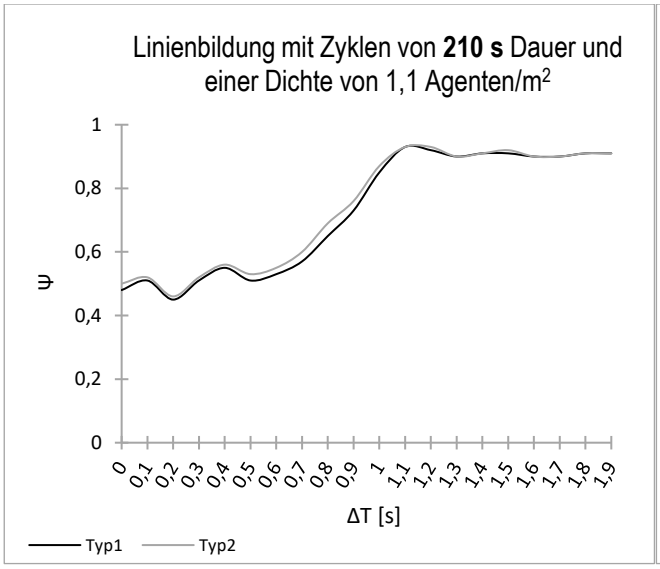

Linienbildung mit Zyklen von **840s** Dauer und einer Dichte von 1,0 Agenten/m²
Ψ
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5 1,6 1,7 1,8 1,9
ΔT [s]
Typ1
Typ2

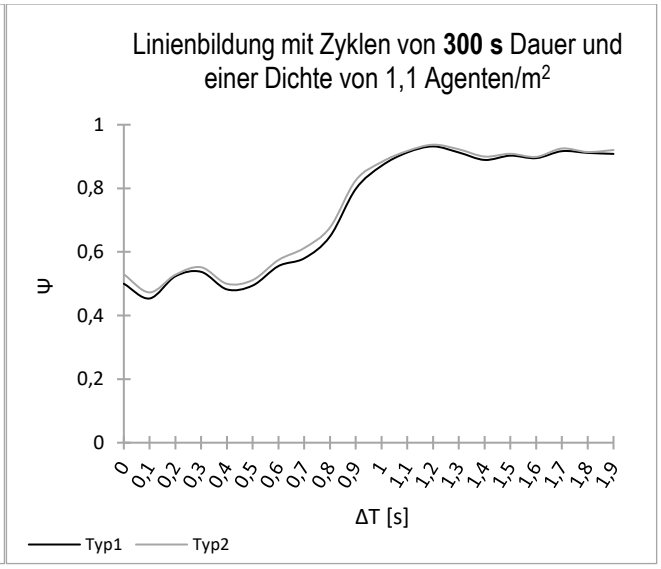
Anhang A2: Simulation I ($\rho = 1{,}1$ Agenten/m²) Freifluss Bereich

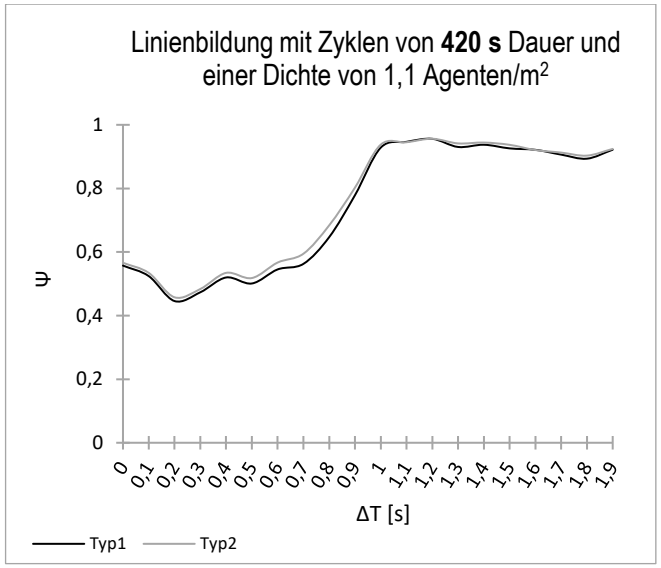
Wartezeit [s]	Anzahl Zyklen	Anzahl Agenten	v_{01} [m/s]	v_{02} [m/s]	Beginn T1 [s]	Beginn T2 [s]	Dauer Simulation [s]
60	5	50	1,8	1,4	1,0	1,0	6.000
120	5	50	1,8	1,4	1,0	1,0	12.000
210	5	50	1,8	1,4	1,0	1,0	21.000
300	5	50	1,8	1,4	1,0	1,0	30.000
420	5	50	1,8	1,4	1,0	1,0	42.000
840	5	50	1,8	1,4	1,0	1,0	84.000

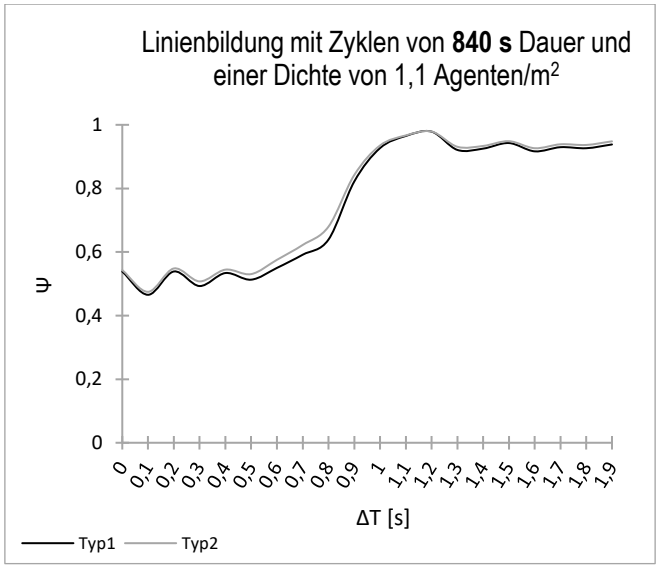


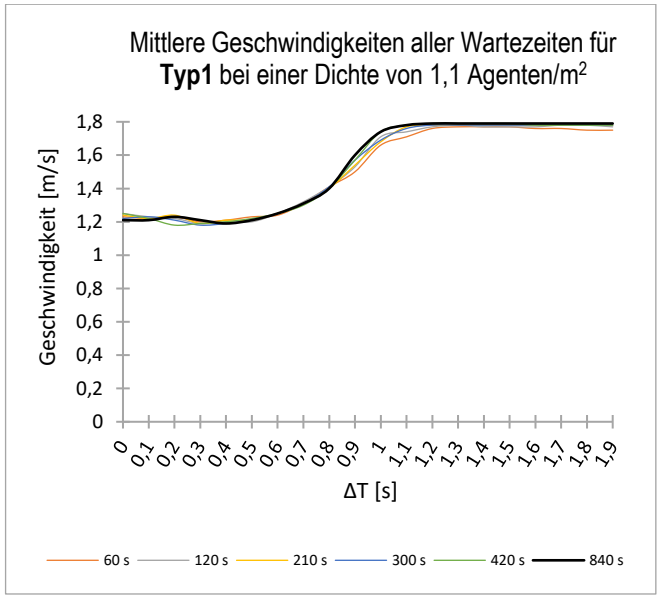


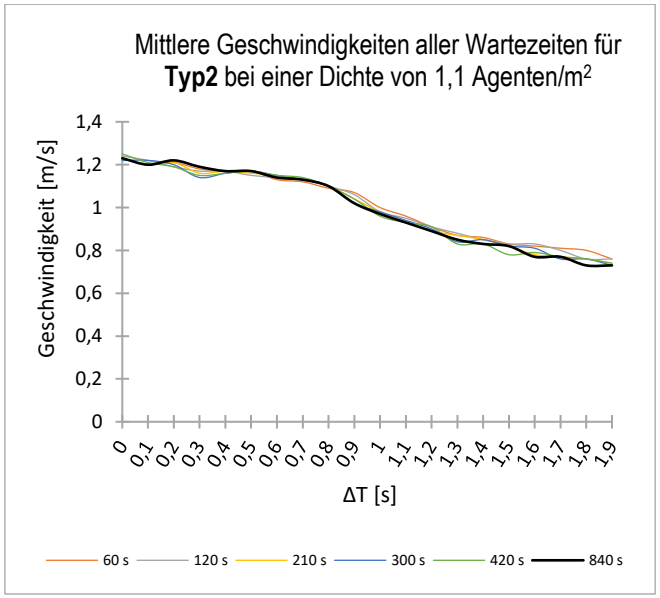


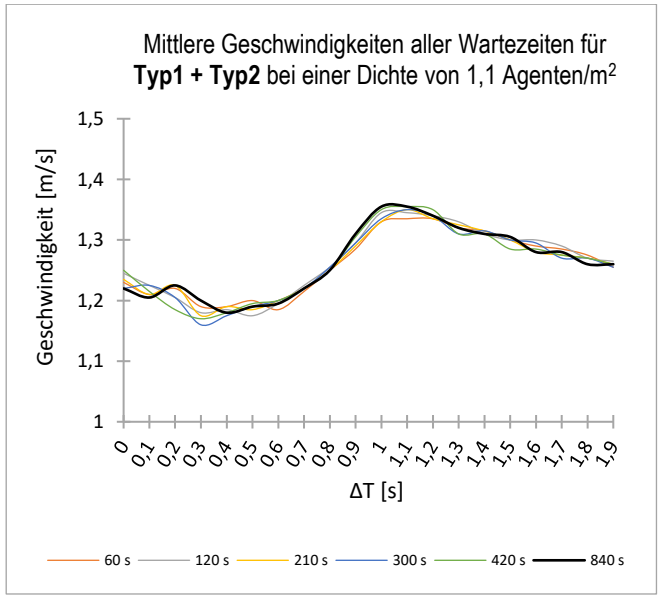



Linienbildung mit Zyklen von **420 s** Dauer und einer Dichte von 1,1 Agenten/m²
Ψ
ΔT [s]
Typ1
Typ2


Linienbildung mit Zyklen von **840 s** Dauer und einer Dichte von 1,1 Agenten/m²
Ψ
ΔT [s]
Typ1
Typ2

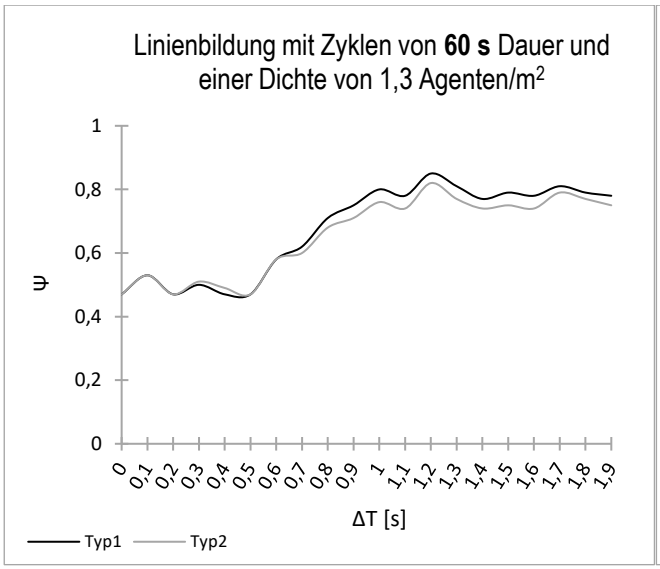

Mittlere Geschwindigkeiten aller Wartezeiten für **Typ1** bei einer Dichte von 1,1 Agenten/m²
Geschwindigkeit [m/s]
ΔT [s]
60 s
120 s
210 s
300 s
420 s
840 s

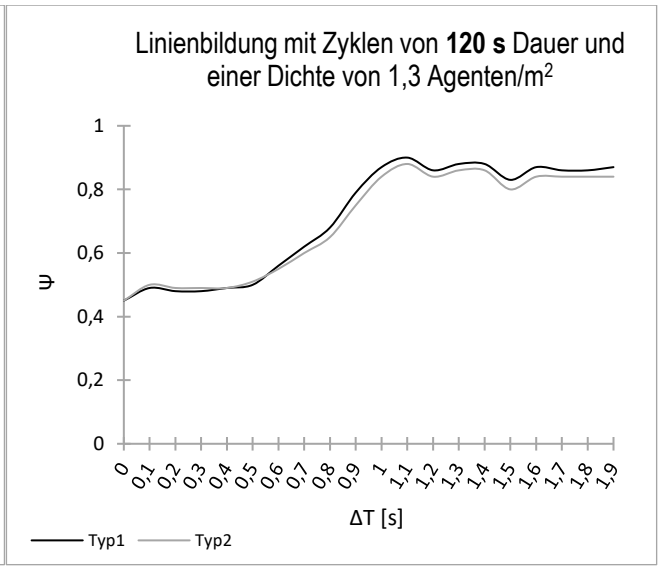

Mittlere Geschwindigkeiten aller Wartezeiten für **Typ2** bei einer Dichte von 1,1 Agenten/m²
Geschwindigkeit [m/s]
ΔT [s]
60 s
120 s
210 s
300 s
420 s
840 s

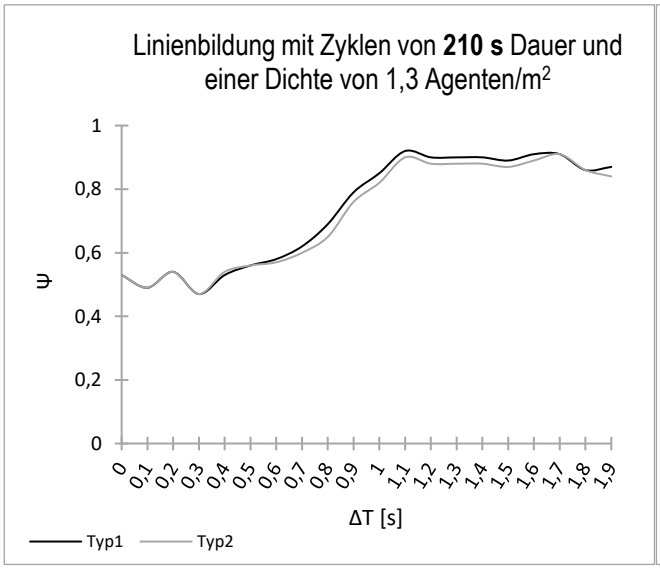

Mittlere Geschwindigkeiten aller Wartezeiten für **Typ1 + Typ2** bei einer Dichte von 1,1 Agenten/m²
Geschwindigkeit [m/s]
ΔT [s]
60 s
120 s
210 s
300 s
420 s
840 s

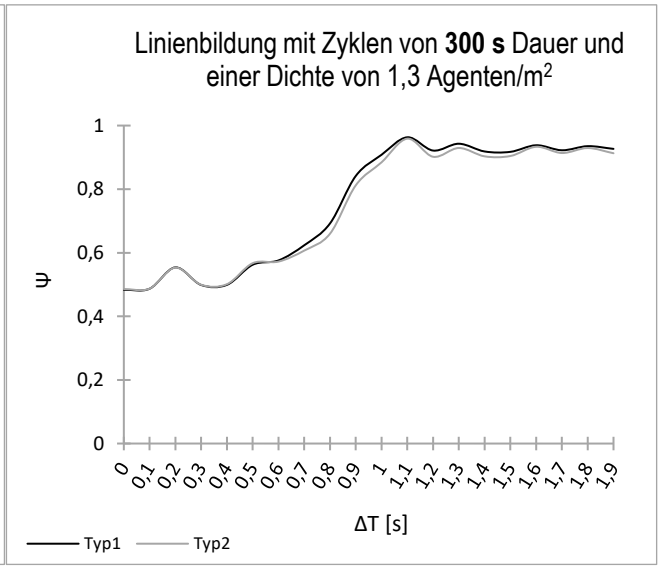
Anhang 3: Simulation I ($\rho = 1{,}3$ Agenten/m²) Freifluss Bereich

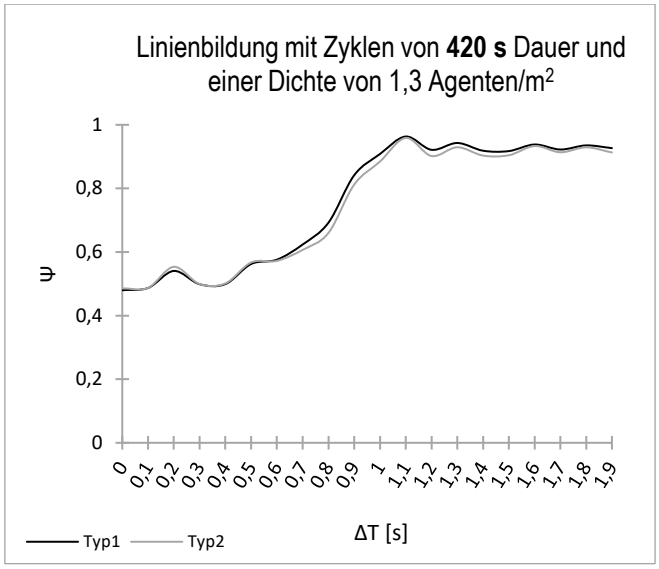
Wartezeit [s]	Anzahl Zyklen	Anzahl Agenten	v_{01} [m/s]	v_{02} [m/s]	Beginn T1 [s]	Beginn T2 [s]	Dauer Simulation [s]
60	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	6.000
120	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	12.000
210	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	21.000
300	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	30.000
420	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	42.000
840	5	60	1,8	1,4	1,0	1,0	84.000

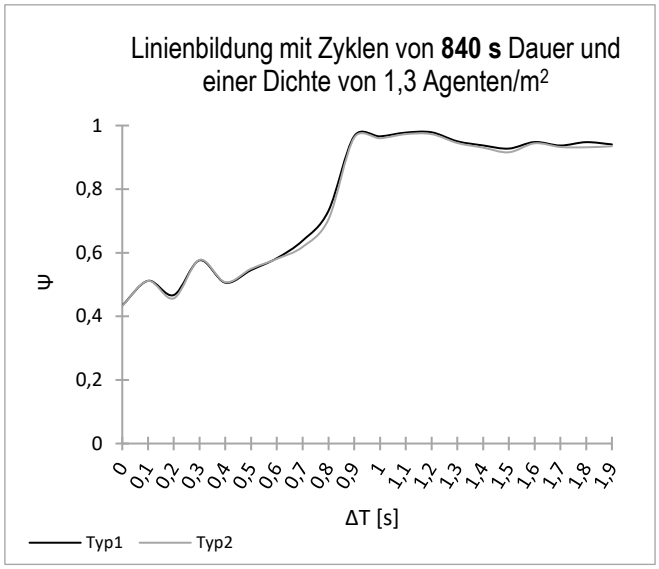






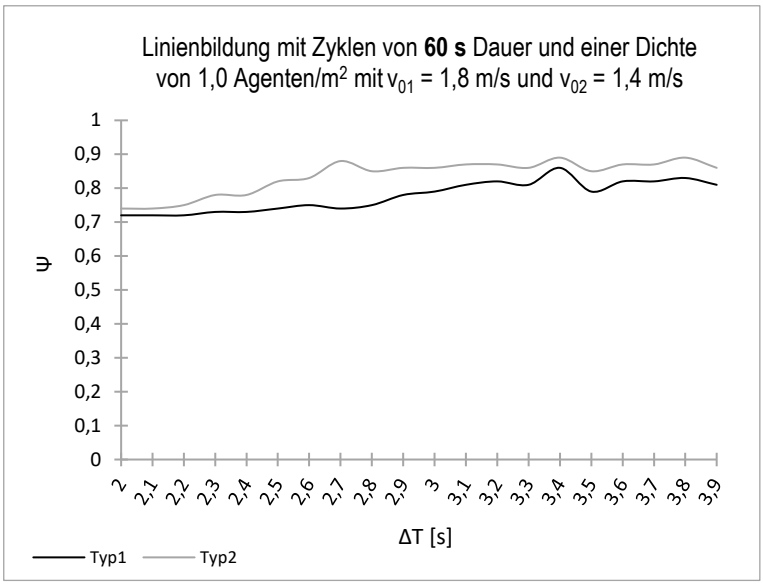


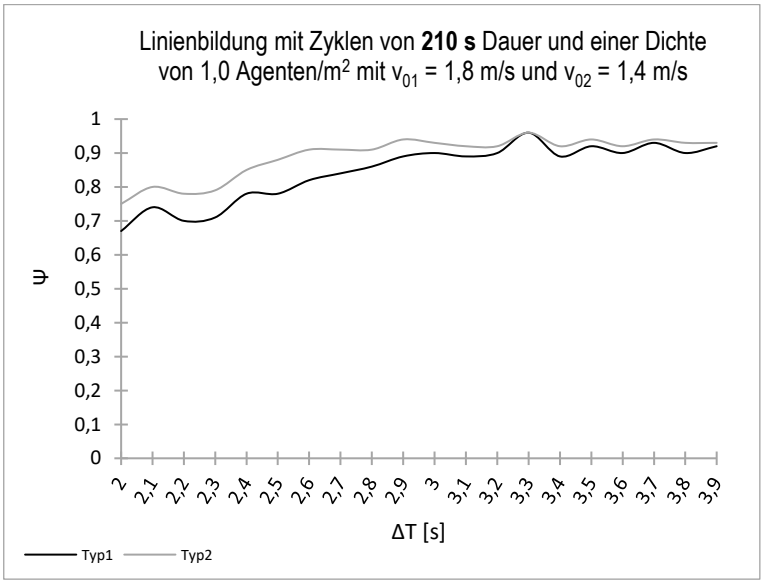

Linienbildung mit Zyklen von **420 s** Dauer und einer Dichte von 1,3 Agenten/m²
Ψ
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5 1,6 1,7 1,8 1,9
ΔT [s]
Typ1
Typ2

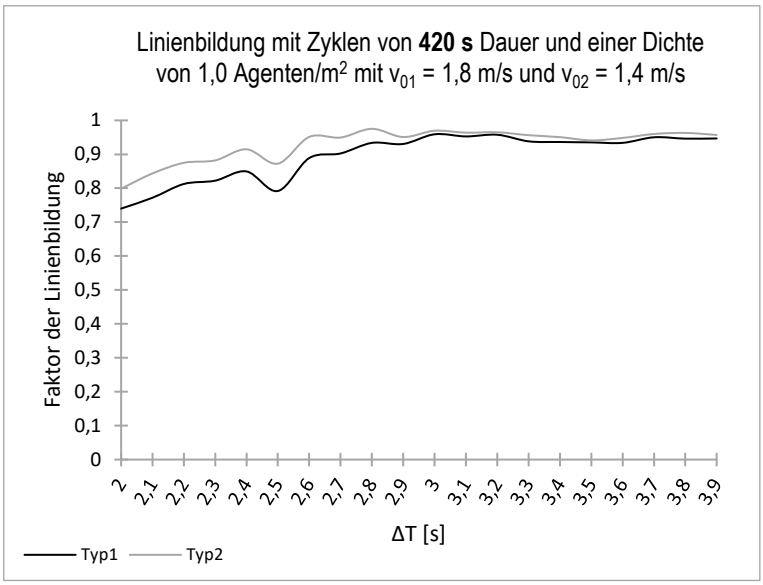

Linienbildung mit Zyklen von **840 s** Dauer und einer Dichte von 1,3 Agenten/m²
Ψ
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5 1,6 1,7 1,8 1,9
ΔT [s]
Typ1
Typ2

Anhang 4: Simulation II ($\rho = 1{,}0$ Agenten/m^2)

Wartezeit [s]	Anzahl Zyklen	Anzahl Agenten	v_{01} [m/s]	v_{02} [m/s]	Beginn T1 [s]	Beginn T2 [s]	Dauer Simulation [s]
60	5	45	1,8	1,4	1,0	3,0	6.000
210	5	45	1,8	1,4	1,0	3,0	21.000
420	5	45	1,8	1,4	1,0	3,0	42.000

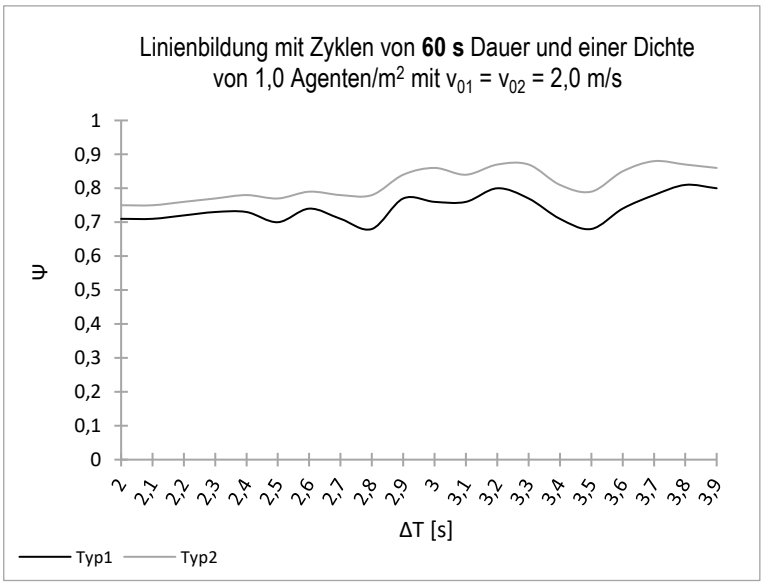


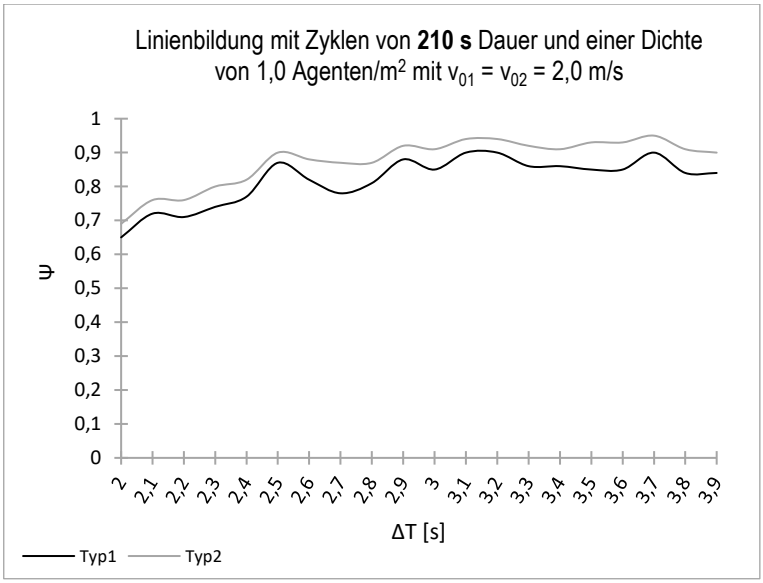


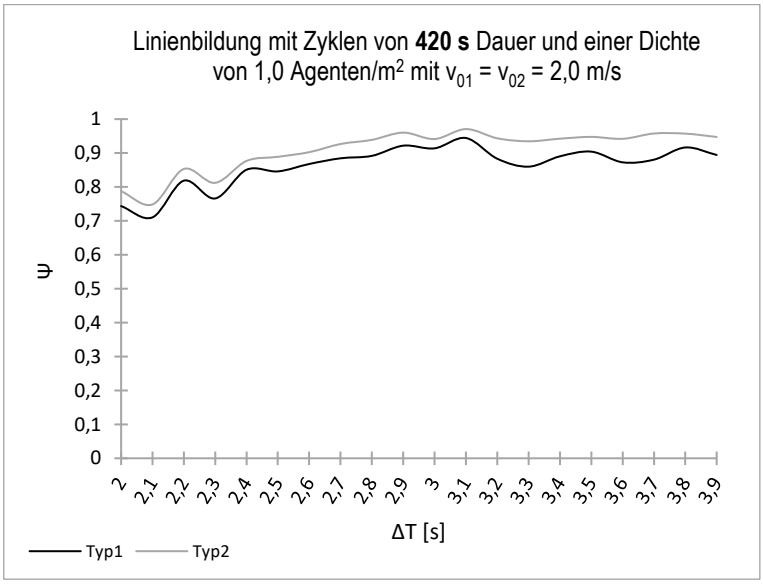


<u>Anhang 5:</u> Simulation II ($\rho = 1{,}0$ Agenten/m²)

Wartezeit [s]	Anzahl Zyklen	Anzahl Agenten	v_{01} [m/s]	v_{02} [m/s]	Beginn T_1 [s]	Beginn T_2 [s]	Dauer Simulation [s]
60	5	45	2,0	2,0	1,0	3,0	6.000
210	5	45	2,0	2,0	1,0	3,0	21.000
420	5	45	2,0	2,0	1,0	3,0	42.000




Linienbildung mit Zyklen von **210 s** Dauer und einer Dichte von 1,0 Agenten/m² mit v_{01} = v_{02} = 2,0 m/s
Ψ
1
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
2 2,1 2,2 2,3 2,4 2,5 2,6 2,7 2,8 2,9 3 3,1 3,2 3,3 3,4 3,5 3,6 3,7 3,8 3,9
ΔT [s]
Typ1
Typ2


Linienbildung mit Zyklen von **420 s** Dauer und einer Dichte von 1,0 Agenten/m² mit v_{01} = v_{02} = 2,0 m/s
Ψ
1
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
2 2,1 2,2 2,3 2,4 2,5 2,6 2,7 2,8 2,9 3 3,1 3,2 3,3 3,4 3,5 3,6 3,7 3,8 3,9
ΔT [s]
Typ1
Typ2