



**BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL**

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

Fachgebiet Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit

Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux

**Titel**

Evakuierungsdynamik von heterogenen Fußgängerströmen mit Hilfe von  
Simulationen

Bachelorarbeit

von

Name, Vorname: Dehne, Tobias

Matrikel-Nr.: 1559618

Velbert, 14.01.2020

# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung .....	1
Zusammenfassung .....	2
Abbildungsverzeichnis .....	3
Tabellenverzeichnis .....	4
Einleitung .....	5
1. Modellierung von Fußgägerdynamik.....	6
1.1 Klassifikation des Modells .....	6
1.1.1 Mikroskopische und Makroskopische Modellierung .....	7
1.1.2 Diskrete und stetige Modellierung.....	7
1.1.3 Deterministische und stochastische Modellierung .....	8
1.1.4 Regel, beschleunigungs- und geschwindigkeitsbasierte Modelle .....	8
1.2 Optimal-Velocity Modell 1. Ordnung .....	9
2. Analyse der Fußgägerdynamik mittels Simulationen.....	11
2.1 Erklärung der Simulation.....	11
2.2 Transformation des Modells von stetig zu diskret .....	12
2.3 Anfangsbedingungen .....	12
3. Auswertung der Simulationsergebnisse.....	15
3.1 Auswirkung der Breite .....	15
3.2 Auswirkung der Zeitlücke .....	20
3.3 Auswirkung der Wunschgeschwindigkeit .....	28
3.4 Auswirkung des Dichteniveaus .....	34
4. Interpretation und Anwendung der Simulationsergebnisse.....	41
4.1 Anwendung auf die Mikromobilität .....	42
4.1.1 Modellierung von Mikromobilität.....	42
4.1.2 Interaktion mit Fußgängern .....	43
Literatur-/ Quellenverzeichnis .....	45
Anhang .....	46

# Eidesstattliche Erklärung

Name, Vorname: Dehne, Tobias

## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit (Bachelor/Master-Thesis) selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen 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.

Datum und Ort: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_

## Zusammenfassung

Meine Bachelorarbeit befasst sich mit dem Thema der Evakuierungsdynamik von heterogenen Fußgängerströmen. Speziell habe ich die Auswirkungen der Variation von Parametern auf die Linienbildung und Geschwindigkeit der Fußgänger untersucht. Anhand eines Fußgängermodells, welches sich zur Untersuchung der Evakuierungsdynamik eignet und gut berechenbar ist, habe ich die Parameter, die die Bewegung der Fußgänger beeinflussen, in verschiedenen Simulationen variiert. Die Heterogenität des Systems wurde dabei durch die Breite, Zeitlücke oder Wunschgeschwindigkeit hergestellt. Anschließend wurden diese Daten ausgewertet und analysiert. Des Weiteren wurde untersucht, ob sich diese Simulationen auch auf die Mikromobilität anwenden lassen, speziell auf die Interaktion zwischen E-Scootern und Fußgängern. Durchgeführt wurden die Computersimulationen mit der Software „NetLogo“.

Der erste Teil dieser Bachelorarbeit befasst sich mit der Definition des für die Simulation verwendeten Modells. Dabei war es wichtig, dass die Evakuierungsdynamik der Fußgänger möglichst realitätsnah und gleichzeitig leicht berechenbar ist. Im zweiten Teil der Arbeit wurde die Computersimulation beschrieben, sowie die Rahmenbedingungen dieser dargestellt. Im dritten Teil wurden die Simulationsergebnisse beschrieben und diskutiert. Dabei wurden die Ergebnisse in Liniendiagrammen dargestellt und der Einfluss der unterschiedlichen Parameter auf das Evakuierungssystem mit einander verglichen. Der letzte Teil beinhaltet die Interpretation der Simulationsergebnisse sowie deren Anwendungsmöglichkeiten. Auch die Verwendung zum Zweck der Analyse der Interaktionen zwischen Mikromobilität und Fußgängern wurde diskutiert.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verhalten von Fußgängern - Nomad Model (Campanella, Hoogendorn und Daamen (2014)).....	6
Abbildung 2: Modellierung von Fußgängern mit dem Optimal-Velocity Modell- Collision-free first order pedestrian model (Tordeux, Chraibi, Seyfried).....	10
Abbildung 3: Indikator I für die Variation Breite der Fußgänger von Typ 1 .....	16
Abbildung 4: Geschwindigkeit für die Variation der Breite der Fußgänger von Typ 1 .....	17
Abbildung 5: Indikator I für die Variation der Breite der Fußgänger von Typ 2 .....	18
Abbildung 6: Geschwindigkeit für die Variation der Breite der Fußgänger von Typ 2.....	19
Abbildung 7: Indikator I für die Variation der Zeitlücke der Fußgänger von Typ 1 .....	21
Abbildung 8: Geschwindigkeit für die Variation der Zeitlücke der Fußgänger von Typ 1 .....	22
Abbildung 9: Indikator I für die Variation der Zeitlücke der Fußgänger von Typ 2.....	23
Abbildung 10: Geschwindigkeit für die Variation der Zeitlücke der Fußgänger von Typ 2 .....	24
Abbildung 11: Schaubild zur Zeitlücke aus der Simulation .....	26
Abbildung 12: Schaubild 2 zur Zeitlücke aus der Simulation .....	27
Abbildung 13: Indikator I für die Variation der Wunschgeschwindigkeit der Fußgänger von Typ 1 .....	29
Abbildung 14: Geschwindigkeit für die Variation der Wunschgeschwindigkeit der Fußgänger von Typ 1 .....	30
Abbildung 15: Indikator I für die Variation der Wunschgeschwindigkeit der Fußgänger von Typ 2 .....	31
Abbildung 16: Geschwindigkeit für die Variation der Wunschgeschwindigkeit der Fußgänger von Typ 2 .....	32
Abbildung 17: Indikator I für die Variation der Dichte (1) .....	35
Abbildung 18: Geschwindigkeit für die Variation der Dichte (1) .....	36
Abbildung 19: Indikator I für die Variation der Dichte (2) .....	37
Abbildung 20: Geschwindigkeit für die Variation der Dichte (2) .....	38

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anfangswerte der Fußgängergruppen .....	13
Tabelle 2: Körpermaße des Menschen nach DIN 33402-2.....	13
Tabelle 3: Anwendung des Simulationsergebnisses zur Breite auf die Mikromobilität.....	43

## Einleitung

Verkehrsflussmodelle existieren nicht nur für den motorisierten Straßenverkehr, sondern auch für Fußgänger. Diese bewegen sich jedoch in der Regel nicht entlang eines Fahrstreifens, sondern in beliebiger Richtung, was es schwierig macht, diese Dynamik zu beschreiben. Jeder Fußgänger ist dabei einzigartig und hat individuelle Eigenschaften, die sein Handeln beeinflussen. Daher gibt es viele unterschiedliche Modelle, die das Verhalten von Fußgängern beschreiben.

Genutzt werden Fußgängermodelle vor Allem bei der Planung und Durchführung von öffentlichen Großveranstaltungen. Das Thema Sicherheit auf Events wie Sportveranstaltungen oder Konzerten ist sehr komplex und sollte keinesfalls leichtfertig behandelt werden. So kam es in der Vergangenheit immer wieder zu Katastrophen, wie zum Beispiel zu dem Unglück der Loveparade 2010 in Duisburg, bei dem 21 Menschen starben. Die großen Fußgängerströme zu und von dem Event stellen den Veranstalter immer wieder vor große Probleme. Deshalb wurde die Forschung in diesem Bereich in den letzten Jahren deutlich ausgeweitet. Dadurch sollen solche Großveranstaltungen besser geplant und Evakuierungspläne erstellt werden können.

Ebenfalls können Fußgängermodelle bei der Planung von neuer Infrastruktur verwendet werden. Die Dimensionierung neuer Bahnhöfe oder Einkaufspassagen basiert auf der Analyse von Fußgängerodynamik. Auch im Bereich Brandschutz spielt die Dynamik von Fußgängern eine große Rolle. Zum Erstellen von Evakuierungsplänen oder bei der Konzeptionierung von Fluchtwegen und Notausgängen muss das Evakuierungsverhalten von Personengruppen untersucht werden.

Bei der Evakuierungs dynamik gibt es viele Parameter, die Einfluss auf das System und die Organisation nehmen. Wie stark dieser Einfluss ist, ist je nach Parameter unterschiedlich. Anhand eines gewählten Fußgängermodells soll im Folgenden der Einfluss einiger wichtiger Parameter anhand von Computersimulationen getestet werden und so neue Anwendungsmöglichkeiten liefern. Die Auswirkungen auf die Evakuierungs dynamik werden so anhand von festgelegten Indikatoren untersucht und bewertet.

# 1. Modellierung von Fußgängerodynamik

Bei der Modellierung von Fußgängerodynamik gibt es viele Ansätze basierend auf unterschiedlichen wissenschaftlichen Fachgebieten. Sowohl die Naturwissenschaften als auch Zweige der Psychologie oder der Soziologie beschäftigen sich mit der Dynamik von Fußgängern. Die Modellierung von Fußgängerodynamik kann daher sehr unterschiedlich aussehen.

## 1.1 Klassifikation des Modells

Nach dem Ansatz von Campanella, Hoogendoorn und Damen „The Nomad Model“ ist die Dynamik von Fußgängern in drei verschiedene Verhaltensstufen unterteilt.

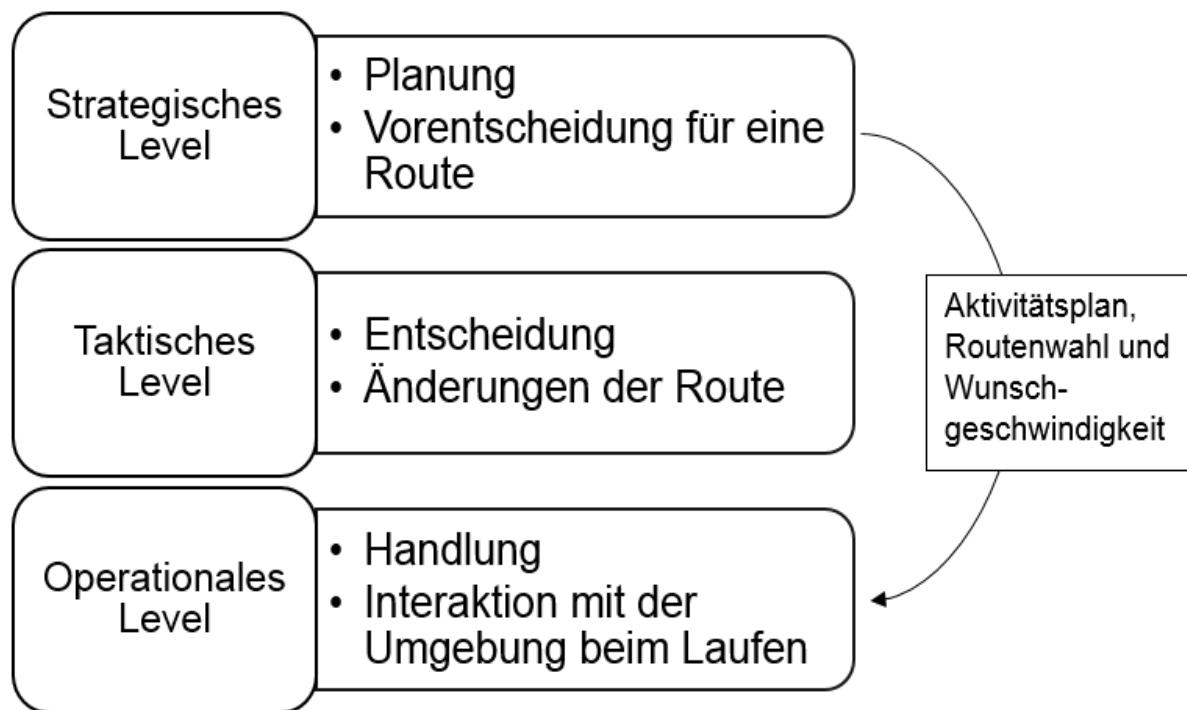


Abbildung 1 Verhalten von Fußgängern - Nomad Model (Campanella, Hoogendoorn und Daamen (2014))

Diese Bereiche unterteilen das Verhalten von Fußgängern in abgegrenzte Ebenen, um die Komplexität der Dynamik aufzuteilen. Das strategische Level beinhaltet die Vorbereitung/ Planung des Weges, der zurückgelegt werden soll. Der Fußgänger überlegt sich seine Route, sowie seine Handlungen, um das Ziel zu erreichen, bevor er losläuft. Die Entscheidung für eine Route trifft der Fußgänger jedoch erst auf dem taktischen Level. Auf dieser Ebene werden Änderungen an dem Plan vorgenommen. Die Gründe für solche Änderungen können sein, dass die favorisierte Route durch andere Fußgänger überlastet ist und die Wahl einer anderen Route eine deutliche

Zeitersparnis zur Folge hat. Auch mögliche Hindernisse spielen bei der Wahl der Route auf dem taktischen Level eine Rolle. Die dritte Ebene des Modells befasst sich mit den Handlungen der Fußgänger während des Laufes. Das beinhaltet die Interaktionen mit anderen Fußgängern und Hindernissen, um Kollisionen zu verhindern und mit der gewünschten Geschwindigkeit zu laufen. Zur Erforschung der Evakuierungsdynamik von großen Fußgängerströmen werden Modelle benötigt, die sich auf dem operativen Level abspielen. Jedoch ist auch das taktische Level in Bezug auf das Verhalten der Menschen von Bedeutung, weil sich die Routen von Personen in großen Menschenmassen ständig verändern. Dabei ist es wichtig, ein Modell zu finden, das für eine Computersimulation so einfach wie möglich gehalten ist und dennoch auf realistische Weise das Verhalten der Fußgänger wiederspiegelt.

### 1.1.1 Mikroskopische und Makroskopische Modellierung

Bei Fußgängermodellen gibt es sowohl mikroskopische als auch makroskopische Ansätze. Diese unterscheiden sich in der Betrachtungsweise der Fußgänger. Die Grundlage von mikroskopischen Modellen ist es, dass jeder Fußgänger für sich allein betrachtet wird. Dabei hat jeder Fußgänger individuelle Eigenschaften, die sein Handeln bestimmen. Bei einem makroskopischen Modell wird die Menschenmasse als Ganzes betrachtet. Die Fußgänger unterscheiden sich in dieser Betrachtungsweise nicht voneinander, sondern das System wird durch die Eigenschaften der Gruppe beschrieben. Um die Evakuierungsdynamik von heterogenen Fußgängerströmen zu beschreiben, kommen nur mikroskopische Modelle in Frage. Bei der Makroskopischen Modellierung kann keine Heterogenität erzeugt werden.

### 1.1.2 Diskrete und stetige Modellierung

Der nächste Schritt der Klassifikation des Modells besteht darin, zu bestimmen, ob ein diskretes oder stetiges Modell benötigt wird. Diese Unterscheidung bezieht sich auch auf die Eigenschaften der Fußgänger. Eigenschaften wie Geschwindigkeit können entweder diskret oder stetig sein. Bei der diskreten Modellierung haben diese Parameter immer einen Wert aus den natürlichen Zahlen. Bei der stetigen Modellierung von Fußgängerdyamik können die Parameter alle reellen Zahlen annehmen. In den Fußgängermodellen sind auch Kombinationen von diskreten und stetigen Parametern möglich. So kann beispielsweise die Geschwindigkeit diskret und der Abstand zwischen zwei Fußgängern als stetig beschrieben werden. Die häufigsten Modelle basieren jedoch entweder auf vollständig diskreten oder vollständig stetigen

Variablen. Um die Realität der Evakuierungsdynamik am besten zu beschreiben, wird ein stetiges Modell benötigt. Da die Messung der Parameter jedoch nach diskreten Zeitschritten erfolgt, ist eine Transformation des Modells von stetig zu diskret notwendig (2.2).

### 1.1.3 Deterministische und stochastische Modellierung

Als nächstes muss entschieden werden, ob die Dynamik der Fußgänger als deterministisch oder stochastisch beschrieben werden soll. In deterministischen Modellen ist die Bewegung der Fußgänger für eine bestimmte Situation festgelegt. In stochastischen Modellen sind die Bewegungen teilweise durch den Zufall bestimmt, sodass die Fußgänger in einer Situation unterschiedlich agieren können. Während deterministische Modelle die Entscheidungen von Fußgängern vollständig vorherbestimmen, können in stochastischen Modellen unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. Die stochastischen Modelle basieren jedoch auf der Unwissenheit der physischen Prozesse, die bei der Entscheidungsfindung von Fußgängern eine Rolle spielen.

Um den Simulationsaufwand nicht zu groß werden zu lassen und wegen der Komplexität des Prozesses der Entscheidungsfindung wurde für die Simulation der Evakuierungsdynamik ein deterministisches Modell gewählt.

### 1.1.4 Regel-, beschleunigungs- und geschwindigkeitsbasierte Modelle

Auch die Bewegung der Fußgänger kann auf verschiedenen Grundlagen basieren. Es gibt Modelle, die durch die Geschwindigkeit, die Beschleunigung oder durch Regeln bestimmt werden. Geschwindigkeits-, und beschleunigungsbasierte Modelle erfordern zur Bestimmung der neuen Position eines Fußgängers die Lösung von Differentialgleichungen. Basiert die Bewegung des Fußgängers auf der Geschwindigkeit, handelt es sich bei dem Modell um eine Differentialgleichung erster Ordnung.

$$\dot{x}(t) = V(x_i(t) - x(t)) * e_i(t)$$

Bei beschleunigungsbasierten Modellen ist hingegen die Lösung einer Differentialgleichung zweiter Ordnung erforderlich.

$$\ddot{x}(t) = A(x_i(t) - x(t), \dot{x}, \dot{\dot{x}}_i) * e_i(t)$$

Eine dritte Möglichkeit, die Bewegung der Fußgänger zu beschreiben, besteht darin, auf regelbasierte Modelle zurückzugreifen. Im Gegensatz zu geschwindigkeits-, oder beschleunigungsbasierten Modellen, beruhen regelbasierte Modelle nicht auf

Differentialgleichungen. Die Dynamik basiert stattdessen auf Entscheidungen, die die Fußgänger treffen, um ihre neue Position oder Geschwindigkeit zu bestimmen. Die Entscheidung berücksichtigt dabei die gewünschte Bewegungsrichtung und die Position anderer Fußgänger und Hindernisse. In regelbasierten Modellen ist die Zeit in den meisten Fällen als diskrete Variable definiert, denn die Entscheidungen werden in diskreten Zeitschritten  $\Delta t$  getroffen. Allerdings ist die Definition eines Modells nicht immer eindeutig. Es sind auch Kombinationen von verschiedenen Ansätzen möglich. Bei der Simulation von Fußgänderdynamik werden beschleunigungsbasierte Modelle eher selten eingesetzt. Das liegt daran, dass die Wechselwirkungen durch Kräfte beschrieben werden. So spielt zum Beispiel auch die Trägheit eine Rolle. Im Vergleich zu Fahrzeugen ist die Trägheit eines Fußgängers jedoch kaum vorhanden. Geschwindigkeitsbasierte Modelle beruhen im Gegensatz dazu auf Kollisionsvermeidung und Geschwindigkeits-Optimierungsprinzipien. Zusätzlich sind diese Modelle für Simulationen leicht berechenbar. Zur Simulation der Evakuierungsdynamik wurde daher ein geschwindigkeitsbasiertes Modell verwendet.

## 1.2 Optimal-Velocity Modell 1. Ordnung

Wie zuvor definiert, handelt es sich bei dem Modell, welches für die Simulation verwendet wurde, um eines, dass sowohl mikroskopisch, stetig, deterministisch, als auch geschwindigkeitsbasiert ist. Daher wurde die Entscheidung für ein Optimal-Velocity Modell 1. Ordnung getroffen. In den einfachsten geschwindigkeitsbasierten Modellen 1. Ordnung ist die Geschwindigkeit eines Fußgängers direkt proportional zum Abstand des vorderen Fußgängers. Ein Optimal-Velocity Modell basiert jedoch auf der Beziehung zwischen der Geschwindigkeit und dem Abstand.

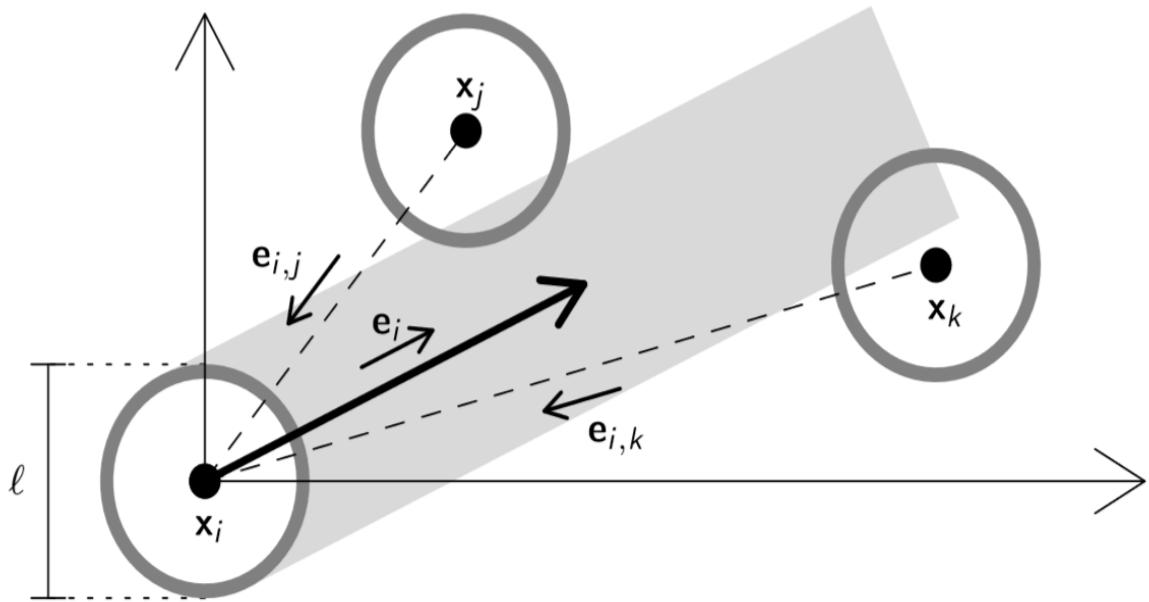


Abbildung 2 Modellierung von Fußgängern mit dem Optimal-Velocity Modell - Collision-free first order pedestrian model (Tordeux, Chraibi, Seyfried)

Diese Modelle wurden zunächst für den Verkehrsfluss entwickelt, eignen sich jedoch auch für die Beschreibung von Fußgängerodynamik. Für die Kollisionsfreiheit gibt es zusätzlich eine Abstoßungsrate, welche auf den Abständen zu den direkten Nachbarn beruht. Die Geschwindigkeit basiert also auf dem Mindestabstand. Auch eine Abstoßungsdistanz wird definiert. Dargestellt werden die Fußgänger in diesem Modell als Scheibe mit einem Durchmesser  $\ell$ . Die weiteren Parameter, die die Bewegung der Fußgänger beeinflussen, sind Breite, Zeitlücke und Wunschgeschwindigkeit.

## 2. Analyse der Fußgägerdynamik mittels Simulationen

Für die Simulation der Evakuierungs dynamik von heterogenen Fußgägerströmen ist die Software NetLogo verwendet worden. Das ist eine Programmiersprache mit Multi-Agenten Simulation, die im Jahr 1999 erschienen ist. Mit NetLogo lassen sich den Agenten unterschiedliche Eigenschaften geben und deren Interaktionen beobachten. Die Idee ist es, zwei Gruppen von Fußgängern einzuführen, die sich in den zu untersuchenden Parametern unterscheiden und deren Wechselwirkungen zu beobachten. Es soll untersucht werden, welchen Einfluss die Parameter auf die Dynamik der Evakuierung haben. Auch die Auswirkung der Dichte auf die Dynamik soll untersucht werden. Das Ziel dieser Simulationen ist es, anhand von bestimmten Indikatoren zu untersuchen, wie stark sich die Evakuierungs dynamik der Fußgänger durch eine Variation der Eigenschaften der Fußgänger verändert und welcher Parameter den größten Einfluss auf das Evakuierungsverhalten der Fußgänger nimmt. Die Indikatoren zur Untersuchung des Einflusses sind die Geschwindigkeit der Fußgänger sowie der Grad der Linienbildung von Fußgängern desselben Typs.

### 2.1 Erklärung der Simulation

Für die Simulation gibt es vier Parameter, deren Einfluss auf die Evakuierungs dynamik von Fußgägerströmen untersucht werden sollen. Diese sind Breite, Wunschgeschwindigkeit, Zeitlücke und Dichte. Dazu werden die Fußgänger in zwei verschiedene Gruppen unterteilt. Diese unterscheiden sich in mindestens einem der Parameter Breite, Wunschgeschwindigkeit oder Zeitlücke. Das Ziel dabei ist, zu beobachten, wie sich die beiden Fußgängergruppen während der Simulation verhalten. Die Fußgänger bewegen sich in diesen Simulationen immer von links nach rechts. Das wird als Kreislauf betrachtet, indem ein Fußgänger, der den rechten Bildrand erreicht hat, auf dem linken Bildrand in derselben Position wiedererscheint. Zunächst ist es jedoch wichtig, festzustellen, ab welchem Zeitpunkt sich das System in einem stationären Zustand befindet, damit die Parameter ausgewertet werden können. Dazu zeigt NetLogo die aktuelle Geschwindigkeit beider Fußgängergruppen an. Das System befindet sich in einem stationären Zustand, wenn die Geschwindigkeit für beide Gruppen konstant ist. Ab diesem Zeitpunkt ist das System stabil und hat sich vollständig organisiert. In verschiedenen Simulationen mit unterschiedlichen Parametern hat sich gezeigt, dass dieser Zeitpunkt variieren kann. In den meisten Fällen ist das System jedoch spätestens nach 50 Sekunden in einem stationären

Zustand. Um sicherzustellen, dass das System wirklich stationär ist, wurde dieser Wert verdoppelt und die Simulationszeit auf 100 Sekunden festgesetzt.

Zusätzlich ist es wichtig, dass kein zufälliges Ergebnis erzielt wird. Dazu wurde jede Simulation dreimal durchgeführt und die Varianz berechnet. Die Ergebnisse bilden den Mittelwert aus diesen drei Simulationen ab.

Die Bewertung der Simulationen erfolgt anhand von 2 Parametern. Der erste Indikator I erfasst den Anteil der Fußgänger, die einem Fußgänger desselben Typs folgen. So kann untersucht werden, ob es zu einer Linienbildung der Fußgänger kommt. Auch die Geschwindigkeiten beider Fußgängergruppen spielen bei der Auswertung eine Rolle. So kann beurteilt werden, inwiefern die Wunschgeschwindigkeit erreicht wurde und ob sich die Fußgänger gegenseitig behindern. Vor dem Beginn einer Simulation werden die festen Parameter der Fußgänger in NetLogo eingetragen. Zusätzlich wird ein Parameter gewählt, dessen Auswirkung auf die Evakuierungsdynamik getestet werden soll. Dieser beginnt bei dem kleinstmöglichen Betrag und erhöht sich jeweils nach drei Simulationen mit einer Simulationszeit von 100 Sekunden um einen festgelegten Zahlenwert. Da diese Parameter jedoch nicht stetig gemessen werden können, sondern nur nach definierten Zeitschritten, ist eine Transformation des Modells von stetig zu diskret notwendig.

## 2.2 Transformation des Modells von stetig zu diskret

Um die Parameter messen zu können, muss das Modell von stetig zu diskret transformiert werden. Dieses Problem kann mit dem Euler Verfahren gelöst werden.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= V(x_i(t) - x(t)) * e_i(t) \\ \dot{x}(t) &\approx \frac{x(t + dt) - x(t)}{dt} \\ \rightarrow x(t + dt) &= x(t) + dtV(x_i(t) - x(t)) * e_i(t)\end{aligned}$$

Aus der stetigen Differentialgleichung für die Geschwindigkeit wird durch dieses numerische Verfahren ein diskretes Modell. So kann das Modell berechenbar gemacht und die Parameter gemessen werden.

## 2.3 Anfangsbedingungen

Für die Heterogenität des Systems wurden zwei Gruppen von Fußgängern als Ausgangspunkt definiert. Diese haben unterschiedliche Werte in

Wunschgeschwindigkeit und Zeitlücke. Für die Dichte wurde als Ausgangsbasis ein Wert von  $D \approx 0,9$  Personen pro Quadratmeter (70 Personen auf  $77\text{m}^2$ ) festgelegt.

*Tabelle 1 Anfangswerte der Fußgängergruppen*

	Typ 1	Typ 2
Breite l	0,4m	0,4m
Zeitlücke t	0,2s	2s
Wunschgeschwindigkeit V0	2m/s	1m/s

Die beiden Fußgängergruppen unterscheiden sich in ihrer Geschwindigkeit. Fußgänger vom Typ 1 haben eine höhere Wunschgeschwindigkeit und geringere Zeitlücke. Diese Fußgänger laufen schneller und halten einen geringeren Abstand zur vorderen Person. So könnten Erwachsene oder Jugendliche dargestellt werden, die es eilig haben. Die Fußgänger vom Typ 2 sind langsamer und halten einen größeren Abstand zum Vordermann. So lassen sich zum Beispiel Kinder oder Senioren darstellen.

Die Breite der Fußgänger basiert auf den Werten der Körpermaße des Menschen der DIN 33402-2. Diese bezieht sich auf in Deutschland lebende Erwachsene zwischen 18 und 65 Jahren. Für Männer und Frauen gelten dort folgende Körpermaße:

*Tabelle 2 Körpermaße des Menschen nach DIN 33402-2*

Körpergröße in cm	5. Perzentil Frauen	95. Perzentil Frauen	5. Perzentil Männer	95. Perzentil Männer
Körpertiefe	24,5	34,5	26,0	38,0
Schulterbreite	39,5	48,5	44,5	52,5

Da Männer und Frauen jedoch nicht gesondert betrachtet werden und die Personen in der Simulation als runde Scheibe betrachtet werden, wurde für beide Fußgängergruppen der Wert  $l=0,4\text{m}$  für die Breite als Ausgangsbasis festgelegt.

Die Werte für die Wunschgeschwindigkeit beziehen sich auf eine Studie von Eberhardt und Himbert, die sich mit der Geschwindigkeit von Fußgängern befasst haben. Die Geschwindigkeit für normales Gehen schwankt dabei je nach Altersklasse und Geschlecht zwischen  $0,9\text{m/s}$  und  $1,9\text{m/s}$ . Für schnelles Gehen wurden Werte zwischen  $1,3\text{m/s}$  und  $2,4\text{m/s}$  erzielt. Um zwischen beiden Fußgängergruppen einen

Kontrast zu haben, wurde für Fußgänger vom Typ 1 der Wert  $V01=2\text{m/s}$  und für Fußgänger vom Typ 2 der Wert  $V02=1\text{m/s}$  als Ausgangsbasis festgelegt. Die Werte für den Parameter „Zeitlücke“ basieren auf der Geschwindigkeit. Gruppe 1 ist schneller und hält daher geringeren Abstand zum vorderen Fußgänger. Gruppe 2 ist langsamer und der Zeitabstand ist demzufolge höher.

Für alle Simulationen ist die Anzahl der Fußgänger in beiden Gruppen gleich verteilt. Auch die Werte für Abstoßungsrate und Abstoßungsdistanz wurden nicht geändert. Die Abstoßungsrate beträgt für beide Gruppen  $A=5$  und die Abstoßungsdistanz hat für beide Gruppen den Wert  $D=0,1\text{m}$ .

### 3. Auswertung der Simulationsergebnisse

Während der Simulationen wurde jeder Parameter in einer definierten Spannweite getestet. Das gilt für die drei Parameter der Fußgänger von Typ 1 und der Fußgänger von Typ 2. Zur Untersuchung des Einflusses der Dichte auf die Evakuierungsdynamik wurden ebenfalls zwei Simulationen durchgeführt. Bei der Betrachtung der Ergebnisse sind große Unterschiede, welche den Einfluss der Parameter auf die Evakuierungsdynamik betreffen, festzustellen. Außerdem lassen sich bei einigen Parametern Unterschiede in den beiden durchgeführten Simulationen zu den Parametern beobachten. Zur Bewertung dieser Ergebnisse werden im Folgenden die mittlere Geschwindigkeit beider Fußgängergruppen sowie der Anteil I der Fußgänger, die einem Fußgänger vom selben Typ folgen, als Diagramm dargestellt.

#### 3.1 Auswirkung der Breite

Zur Untersuchung des Einflusses der Breite auf die Evakuierungsdynamik wurde mit einem Wert von  $I=0,05$  Metern für die Fußgänger der Gruppe 1 begonnen. Während der ersten Simulationsreihe wurde die Breite der Fußgänger von Typ 2 konstant bei  $I=0,4$  Metern belassen. Anschließend wurde die Breite in jeder Simulation um 0,05 Meter erhöht, bis zur finalen Breite von 0,8 Metern. Insgesamt wurden 16 verschiedene Werte für die Breite in jeweils drei Simulationen pro Fußgängergruppe untersucht. So ergibt sich ein Gesamtwert von 96 Simulationen zur Analyse der Auswertung der Breite. Für die Interpretation der Simulationsergebnisse ist jedoch nur ein Teil der Daten relevant, weil die Breite eines Menschen gewisse Grenzen hat.

Es ergibt sich folgendes Ergebnis für die Breite der Fußgänger von Typ 1 für den Indikator I:

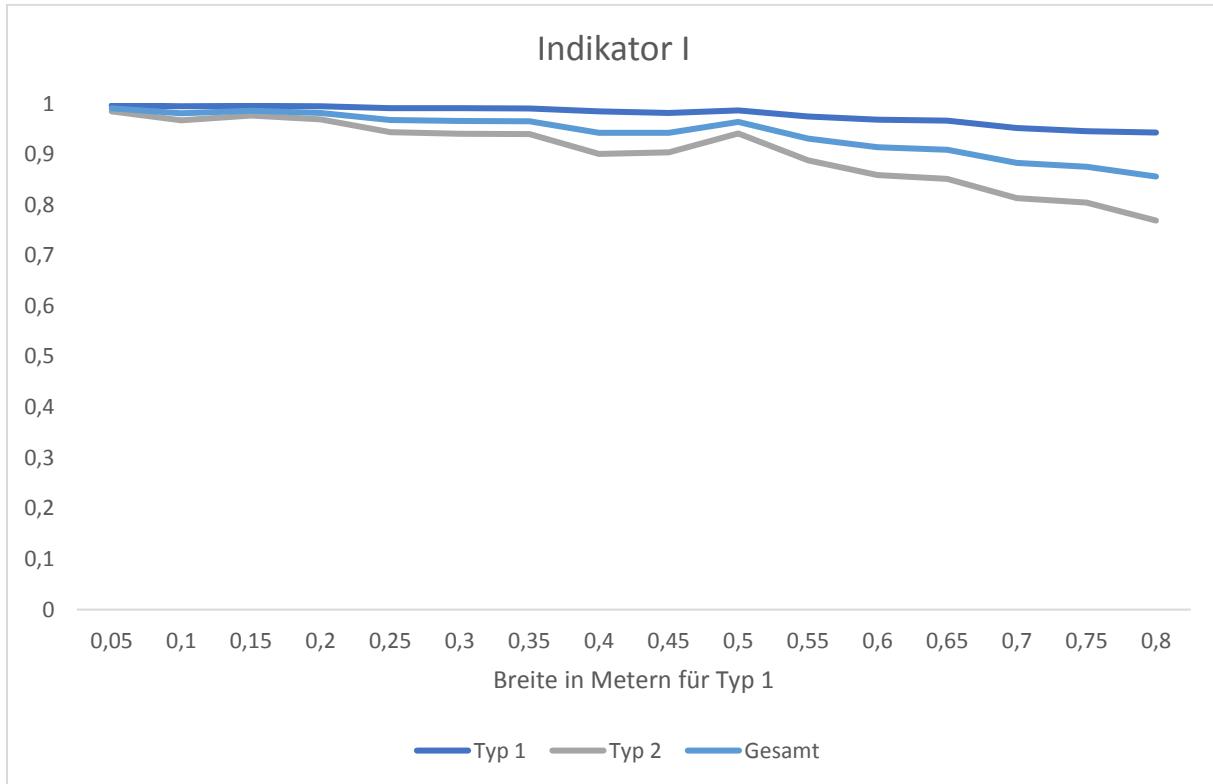


Abbildung 3 Indikator I für die Variation Breite der Fußgänger von Typ 1

Es ist zu erkennen, dass es einen Abwärtstrend für beide Fußgängergruppen gibt. Insgesamt ist der Trend bei Fußgängern von Typ 2 stärker ausgeprägt als bei Typ 1. Bei Fußgängern von Typ 2 ist zusätzlich zu erkennen, dass es zwischen  $l=0,4\text{m}$  und  $l=0,5\text{m}$  noch einen kleinen Anstieg des Indikators gibt, bevor die Kurve wieder fällt. Außerdem steigt die Varianz konstant zusammen mit der Breite an. Zusätzlich gibt es Unterschiede in der Varianz beider Fußgängergruppen. In den Simulationen für die Breite ergibt sich als Mittelwert für die Varianz der Fußgänger von Typ 1 ein Wert von  $6 \cdot 10^{-4}$  und für den Typ 2 einen Wert von  $5 \cdot 10^{-3}$ .

Insgesamt lässt sich feststellen, dass mit steigender Breite der Fußgänger von Typ 1 der Anteil der Fußgänger, die einem Fußgänger vom selben Typen folgen, geringer wird. Es könnte angenommen werden, dass die Kurven einen exponentiellen Verlauf nehmen. Ebenfalls steigt die Varianz der Simulationsergebnisse bei höherer Breite an.

Die mittlere Geschwindigkeit der Fußgänger kann wie folgt dargestellt werden:

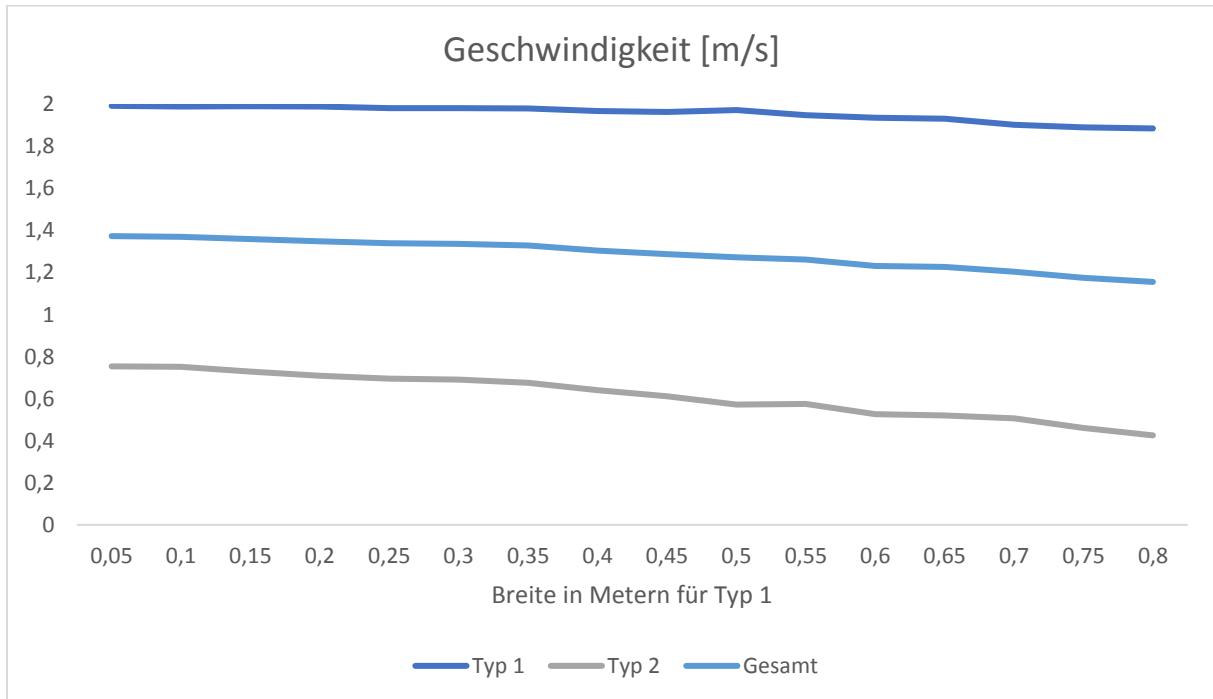


Abbildung 4 Geschwindigkeit für die Variation der Breite der Fußgänger von Typ 1

Auch für die Geschwindigkeit beider Fußgängergruppen ist ein leichter Abwärtstrend zu erkennen. Dieser ist jedoch sehr gering. Fußgänger von Typ 1 können fast für jede Breite ihre Wunschgeschwindigkeit aufrechterhalten. Die Fußgänger von Typ 2 liegen mit Werten zwischen 0,76m/s und 0,42m/s deutlich unter ihrer Wunschgeschwindigkeit. Auch die Varianz für die Geschwindigkeiten nimmt mit zunehmender Breite ebenfalls zu. Jedoch ist der Unterschied von Typ 1 zu Typ 2 nicht so groß wie noch bei dem Indikator I ( $2,6 \cdot 10^{-3}$  zu  $6,2 \cdot 10^{-3}$ ).

Im nächsten Schritt der Simulationen wurde die Breite der Fußgänger von Typ 2 variiert, um die Ergebnisse vergleichen zu können. Für den Indikator I ergibt sich folgendes Ergebnis:

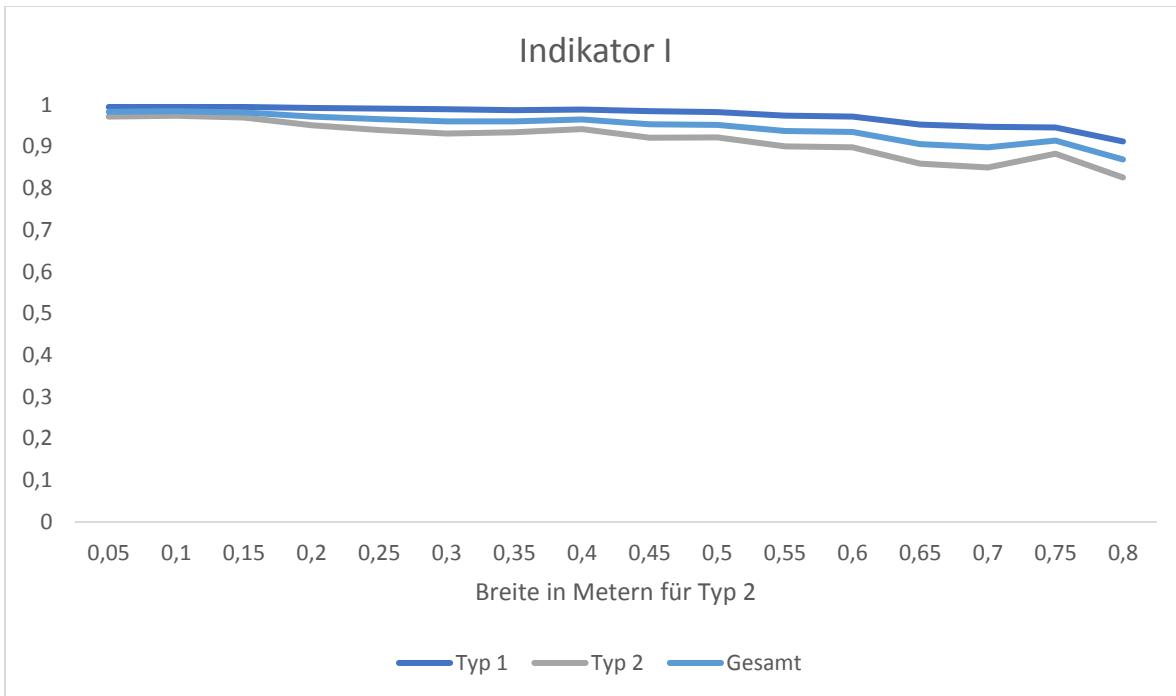


Abbildung 5 Indikator I für die Variation der Breite der Fußgänger von Typ 2

Auch hier ist wieder ein Abwärtstrend des Indikators mit zunehmender Breite der Fußgänger zu erkennen. Im Vergleich zu dem Verlauf des Indikators aus der ersten Parametervariation (Abb. 3) ist dieser Verlauf jedoch nicht so steil. Wie bereits in der ersten Simulationsreihe, verläuft die Kurve der Fußgänger von Typ 2 geringfügig abschüssiger als die der Fußgänger von Typ 1. Die Variation der Breite nimmt also für die langsameren Fußgänger einen etwas stärkeren Einfluss. In Bezug auf die Varianz gibt es ebenfalls Unterschiede zwischen Typ 1 und Typ 2. In beiden Gruppen gibt es erneut einen Anstieg der Varianz mit zunehmender Breite der Fußgänger, allerdings ist die Varianz für die Fußgänger von Typ 1 konstant etwas geringer als die der Fußgänger von Typ 2. Die Mittelwerte der Varianz betragen für Typ 1 = $1,3 \cdot 10^{-3}$  und für Typ 2 = $2,3 \cdot 10^{-3}$ .

Auch in der Geschwindigkeit zeigt sich ein ähnliches Bild, wie in der ersten Simulationsreihe (Abb. 4):

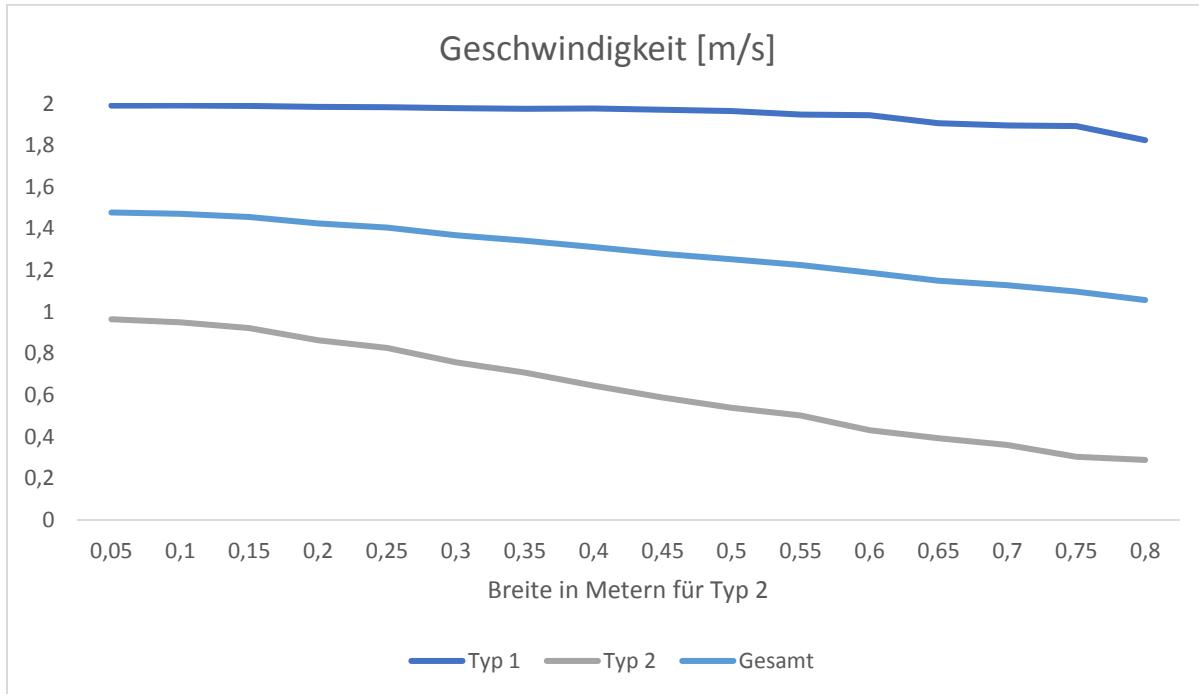


Abbildung 6 Geschwindigkeit für die Variation der Breite der Fußgänger von Typ 2

Wie zuvor zeigt sich auch hier, dass die Geschwindigkeit der Fußgänger beider Gruppen mit zunehmender Breite abnimmt. Der Verlauf der Kurve der Fußgänger von Typ 2 ist jedoch steiler als in der ersten Simulationsreihe (Abb. 4). Mit der kleinstmöglichen Breite haben die Fußgänger von Typ 2 ihre höchste Geschwindigkeit. Durch Erhöhen der Breite fällt diese jedoch stark ab. Die Fußgänger von Typ 1 halten ihre Geschwindigkeit bis zu einer Breite von 0,5 Metern, bis es zu einem geringen Fall der Kurve kommt. Die Fußgänger von Typ 2 sind also von der Variation ihrer eigenen Breite in Bezug auf die Geschwindigkeit stärker betroffen als Fußgänger von Typ 1.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Breite einen eher geringen Einfluss auf die Evakuierungsdynamik der Fußgänger hat. Jedoch nehmen mit zunehmender Breite die für die Evakuierungsdynamik wichtigen Parameter (Indikator I und Geschwindigkeit) einen negativen Verlauf. Je breiter ein Fußgänger in der Simulation gemacht wird, umso geringer wird der Anteil der Fußgänger, die einem Fußgänger desselben Typs folgen, sowie die Geschwindigkeit aller Fußgänger. Das kann natürlich daran liegen, dass mit zunehmender Breite der Platz für die Fußgänger zwangsläufig geringer wird. So gibt es zwischen den Fußgängern einen geringeren Abstand, was nach dem verwendeten Fußgängermodell zu einer geringeren Geschwindigkeit

aufgrund der Abstoßungsrate führt. Um das zu überprüfen, wurde in einem der folgenden Kapitel auch der Einfluss der Dichte auf die Evakuierungsdynamik untersucht. Was weiterhin auffällt ist, dass die Veränderung der Breite größeren Einfluss auf die Dynamik der Fußgänger von Typ 2, also die langsamere Gruppe nimmt. Das gilt sowohl für den Indikator I als auch für die Geschwindigkeit. Die Bewegungen der langsameren Fußgänger werden also mit zunehmender Breite, egal welcher Fußgängergruppe immer stärker eingeschränkt. Besonders ist zu erkennen, dass langsame Fußgänger mit erhöhter Breite einen sehr großen Unterschied zwischen Wunschgeschwindigkeit und realer Geschwindigkeit aufweisen. Das Simulationsergebnis der schnelleren Fußgängergruppe wird durch die Erhöhung der Breite der langsameren Fußgängergruppe kaum verändert. Beide Fußgängergruppen suchen sich zwar den schnellsten Weg, jedoch wird die langsamere Fußgängergruppe dabei von der schnelleren ausgebremst. Das könnte auch in der Praxis als „drängeln“ beschrieben werden. Die erhöhte Breite ist dabei noch ein verstärkender Faktor, weil die langsame Gruppe dadurch nicht mehr in der Lage ist, Lücken zu nutzen. Im anderen Fall schaffen Fußgänger der schnelleren Gruppe mit erhöhter Breite die Lücken selbst. Durch die Abstoßungsrate werden dabei die langsameren Fußgänger zur Seite „geschoben“, bis die Lücke groß genug ist. Diese Lücken werden dann ebenfalls von anderen schnelleren Fußgängern genutzt, weshalb der Indikator I für den Typ 1 trotzdem relativ stabil bleibt. Das erklärt auch, warum die langsamere Fußgängergruppe durch die Erhöhung der Breite der schnelleren Gruppe stärker betroffen ist. Insgesamt ist der Einfluss der Breite für die schnelleren Fußgänger sehr gering, die langsameren sind stärker betroffen. Wie bereits erwähnt, ist eine zu hohe oder zu niedrige Breite für die Fußgänger jedoch nicht realitätsgerecht. Für die Darstellung von Fußgängern ist daher nur eine Spannweite von etwa 30cm bis 50cm relevant. Es stellt sich daher die Frage, ob sich diese Daten auch auf größere Verkehrsteilnehmer übertragen lassen. So wäre es beispielsweise interessant zu sehen, ob so der Einfluss von Mikromobilität und die Interaktion mit Fußgängern dargestellt werden kann. Das wird in Kapitel 4 überprüft und diskutiert.

### 3.2 Auswirkung der Zeitlücke

Der nächste Parameter, dessen Einfluss auf die Evakuierungsdynamik überprüft werden soll, ist die Zeitlücke. Die Ausgangswerte beider Fußgängergruppen unterscheiden sich in Bezug auf die Zeitlücke deutlich. Die Fußgänger von Typ 1

haben eine Zeitlücke  $t=0,2$  Sekunden und Fußgänger von Typ 2 haben eine Zeitlücke von  $t=2$  Sekunden. Wie bereits zuvor wurde in den Simulationen zunächst der Parameter Zeitlücke für Typ 1 und anschließend für Typ 2 variiert. Als Startwert der Simulationsreihe wurde der Wert  $t=0,1$  Sekunden festgelegt und dieser anschließend immer um 0,1 Sekunde erhöht. Der letzte Wert der Simulationsreihe ist eine Zeitlücke von 2 Sekunden. Mit drei Simulationen für jede Zeitlücke beider Fußgängergruppen ergibt sich so eine Anzahl von 120 Simulationen.

Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse ergeben sich für den Indikator I bei der Variation der Zeitlücke der Fußgänger von Typ 1 folgende Ergebnisse:

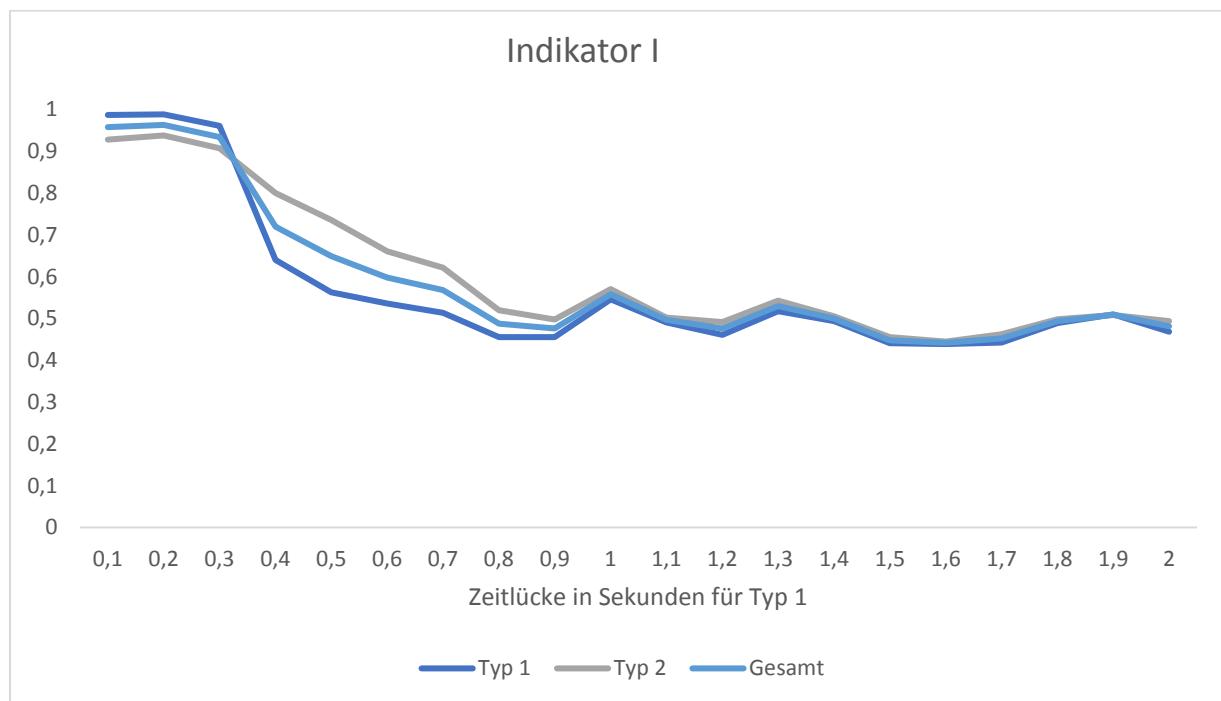


Abbildung 7 Indikator I für die Variation der Zeitlücke der Fußgänger von Typ 1

In dem Graphen zeigen sich verschiedene Phasen für den Verlauf des Indikators I während der Variation der Zeitlücke der Fußgänger von Typ 1.

1. Phase: 0,1-0,3 Sekunden
2. Phase 0,3-0,9 Sekunden
3. Phase 0,9-2 Sekunden

In diesen drei Phasen nimmt der Indikator I einen sehr unterschiedlichen Verlauf. In der ersten Phase zeigt sich, dass beide Kurven einen fast parallelen Verlauf nehmen. Die Kurven des Indikators I verzeichnen beide einen geringen Fall, während der Indikator der Fußgänger von Typ 1 konstant etwas größer ist als der der Fußgänger von Typ 2. In Phase 2 ist zu erkennen, dass sich die Kurven zwischen 0,3 und 0,4

Sekunden kreuzen. Der Fall beider Kurven nimmt deutlich zu, besonders bei Fußgängern von Typ 1. Dort gibt es zwischen 0,3 und 0,4 Sekunden einen Fall des Indikators I von 0,96 zu 0,64. Von diesem Punkt an sinkt der Indikator für beide Fußgängergruppen bis zu einer Zeitlücke von  $t=0,8$  Sekunden. Dabei ist der Indikator I der Fußgänger von Typ 2 konstant größer als der der Fußgänger von Typ 1. Zwischen  $t=0,4$  und  $t=0,6$  sind die Unterschiede im Indikator beider Fußgängertypen besonders hoch (zwischen 1,7 und 1,3). In der dritten Phase sind die Werte für den Indikator I beider Fußgängergruppen fast identisch. Dabei ist der Verlauf nicht eindeutig. Die Kurven schlagen in gleichem Maße nach oben und unten aus, jedoch werden die Schwankungen mit zunehmender Zeitlücke immer geringer und die Kurven pendeln sich ein. Während dieses Verlaufes in Phase 3 gibt es allerdings kaum nennenswerte Unterschiede zwischen Typ 1 und Typ 2. In Bezug auf die Varianz zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Simulationen zu der Breite. Mit zunehmender Zeitlücke nimmt die Varianz beider Fußgängergruppen zu. Zum Ende der Simulationsreihe sind die Werte für die Varianz jedoch besonders hoch (im Bereich von 0,2).

Bei Betrachtung der Geschwindigkeiten ergibt sich folgendes Diagramm:

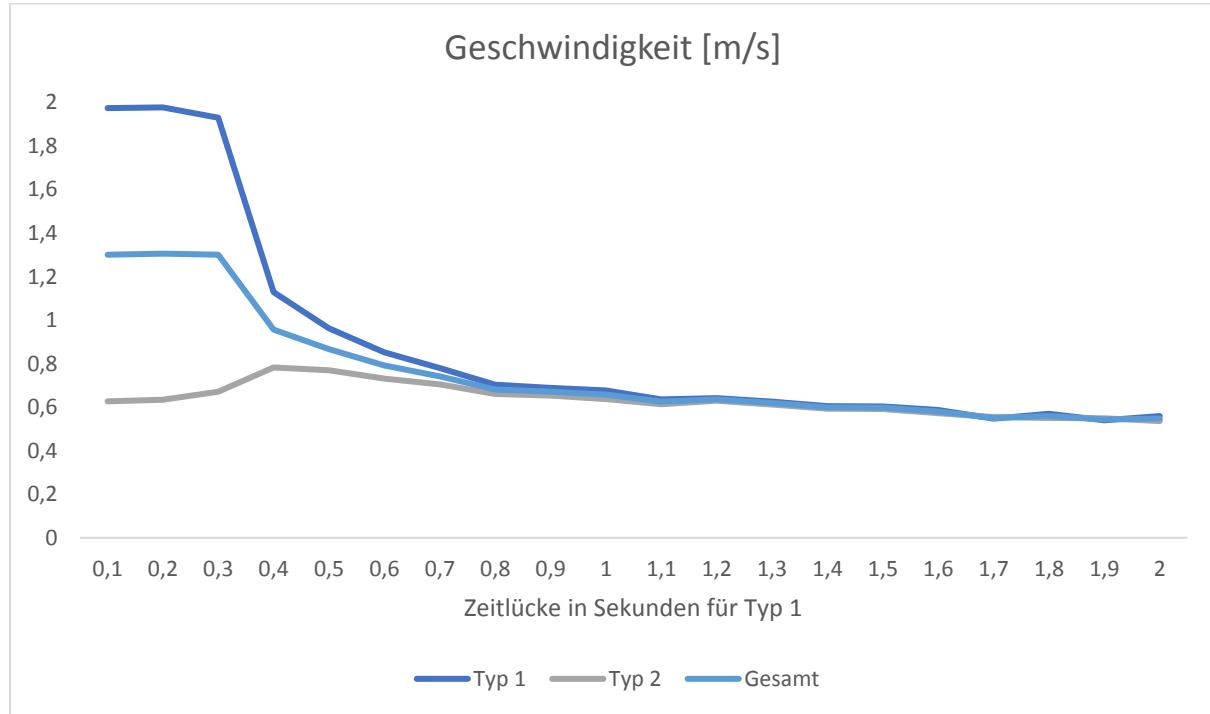


Abbildung 8 Geschwindigkeit für die Variation der Zeitlücke der Fußgänger von Typ 1

Auch bei der Betrachtung der Geschwindigkeit lassen sich drei verschiedene Phasen bestimmen. Diese Phasen spielen sich in einer ähnlichen Zeitspanne ab, wie bereits bei dem Indikator I. Die erste Phase (0,1s-0,3s) beschreibt einen fast linearen Verlauf

der Geschwindigkeit. Es gibt allerdings einen geringen Fall der Geschwindigkeit für die Fußgänger von Typ 1 und einen geringen Anstieg der Geschwindigkeit der Fußgänger von Typ 2. In der Zweiten Phase gleichen sich die Geschwindigkeiten beider Fußgängergruppen langsam an. Für Fußgänger von Typ 1 bedeutet das einen starken Fall der Kurve. Besonders deutlich wird dieser Fall zwischen einer Zeitlücke von 0,3 und 0,4 Sekunden. Die Geschwindigkeit der Fußgänger von Typ 1 sinkt in dieser Spanne von 1,93 auf 1,13 Meter/Sekunde. Die Geschwindigkeit der Fußgänger von Typ 2 erreicht bei einer Zeitlücke von 0,4 Sekunden ihren Hochpunkt und sinkt anschließend nahezu linear mit geringer negativer Steigung. Die dritte Phase beginnt ab einer Zeitlücke von 0,8 Sekunden. In dieser Phase sind die Geschwindigkeiten beider Fußgängergruppen nahezu identisch. Beide Kurven nehmen in dieser Phase einen linearen Verlauf und sinken dabei um einen geringen Faktor. Interessant ist auch die Betrachtung der Varianz der Geschwindigkeit für beide Fußgängergruppen. In diesem Fall ist keine eindeutige Entwicklung zu erkennen. Für beide Fußgängergruppen schwankt die Varianz weitestgehend im Bereich der dritten Dezimalstelle, mit wenigen Ausnahmen.

Im nächsten Schritt folgt die Betrachtung des Indikators I, während der Variation des Parameters Zeitlücke der Fußgänger von Typ 2. Über die Spanne von 0,1-2 Sekunden lassen sich folgende Ergebnisse darstellen:

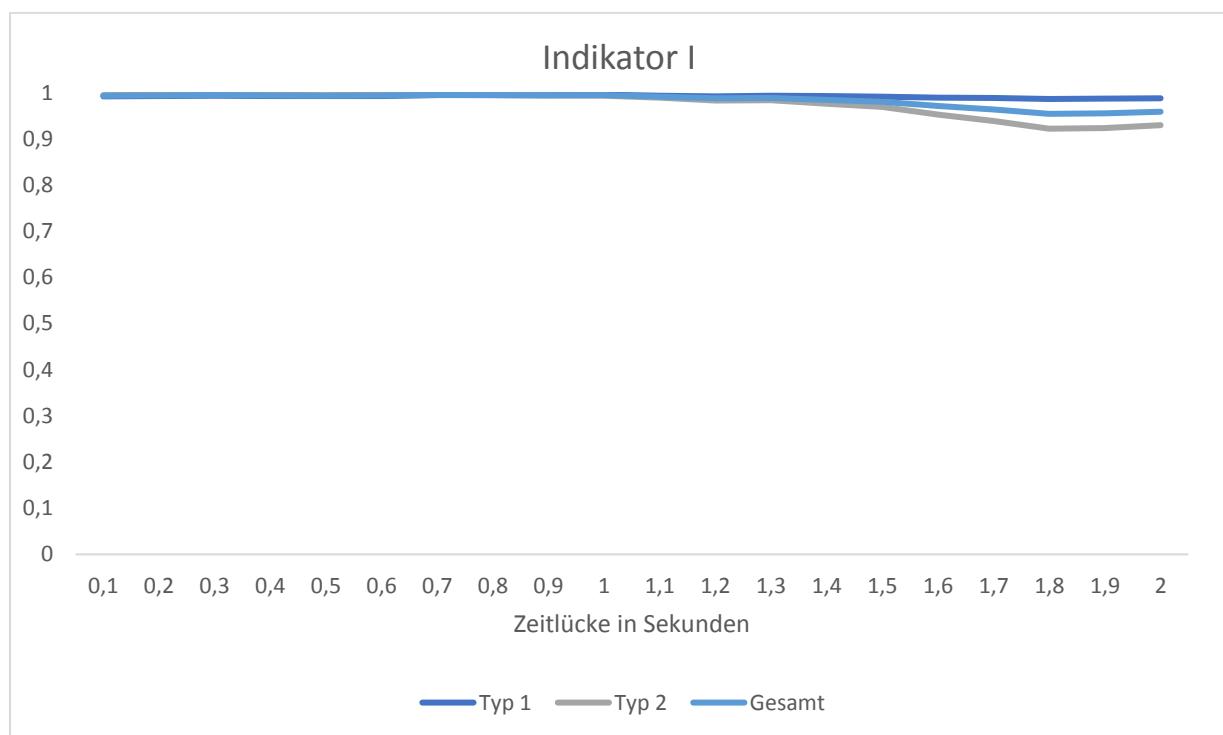


Abbildung 9 Indikator I für die Variation der Zeitlücke der Fußgänger von Typ 2

Im Gegensatz zu dem Verlauf des Indikators I bei der Variation der Zeitlücke der Fußgänger von Typ 1, ist der Verlauf während dieser Simulationsreihe eindeutig. Fußgänger von Typ 1 haben über den ganzen Verlauf der Parametervariation Werte für den Indikator I von über 0,98. Zwischen einer Zeitlücke von 0,1 bis 1,3 Sekunden haben auch Fußgänger von Typ 2 konstant sehr hohe Werte für den Indikator I. Diese liegen zwischen 0,98 und 1. Anschließend nehmen diese geringfügig ab, aber liegen dennoch weiterhin über einem Wert von 0,92. Im Vergleich zur ersten Simulationsreihe ergibt sich hier ein vollkommen anderer Verlauf des Indikators I. In Bezug auf die Varianz zeigt sich für Fußgänger von Typ 2 ein ähnliches Bild wie zuvor, jedoch für deutlich geringere Werte. Auch in diesem Fall beginnt die Varianz mit sehr geringen Werten und steigt mit zunehmender Breite an. Das gilt jedoch nicht für die Fußgänger von Typ 1. Für diese Fußgängergruppe schwankt die Varianz ohne eine Tendenz zwischen der 4. und 6. Dezimalstelle.

Auch in Bezug auf die Geschwindigkeit zeigt sich ein anderes Bild im Vergleich zur ersten Simulationsreihe:

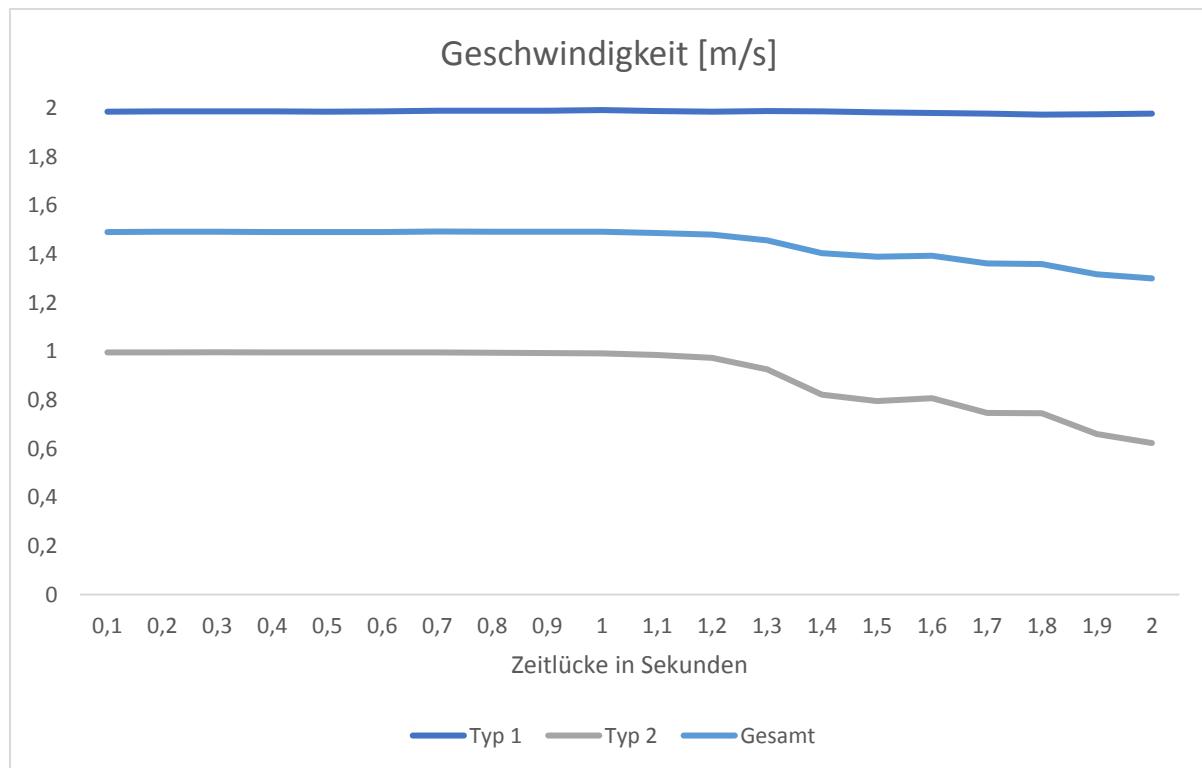


Abbildung 10 Geschwindigkeit für die Variation der Zeitlücke der Fußgänger von Typ 2

Für Fußgänger von Typ 1 bleibt die Geschwindigkeit über den gesamten Verlauf nahezu konstant hoch. Die Wunschgeschwindigkeit von 2m/s wird mit Werten zwischen 1,97-1,99m/s fast erreicht. Bis zu einer Zeitlücke von 1,2 Sekunden liegen

auch die Fußgänger von Typ 2 sehr nah an ihrer Wunschgeschwindigkeit. Ab diesem Zeitpunkt gibt es jedoch einen kleinen Einbruch der Geschwindigkeit. Die Kurve sinkt daraufhin nicht linear ab, sondern dem Fall unterliegen einigen Schwingungen. Auch in Bezug auf die Geschwindigkeit ist die Varianz der Fußgänger von Typ 1 konstant sehr gering ( $2,99 \cdot 10^{-5}$ - $4,10 \cdot 10^{-4}$ ). Die Varianz der Fußgänger von Typ 2 weist bis zu dem Einbruch bei 1,2 Sekunden ebenso konstant geringe Werte auf ( $4,81 \cdot 10^{-6}$ - $1,30 \cdot 10^{-4}$ ). Anschließend steigen die Werte für die Varianz und spielen sich im Bereich der 2. und 3. Dezimalstelle ab.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse beider Simulationsreihen sehr unterschiedlich ausfallen. So nimmt die Variation der Zeitlücke der Fußgänger von Typ 1 einen deutlich größeren Einfluss auf das Simulationsergebnis als die der Fußgänger von Typ 2. Ein perfektes Ergebnis wäre ein Indikator von 1, sowie das Erreichen der Wunschgeschwindigkeit. In der zweiten Simulationsreihe ist dieses Ziel zwischen einer Zeitlücke der Fußgänger von Typ 2 von 0,1 bis 1,2 Sekunden fast erfüllt. Wenn die Werte für Zeitlücke darüber hinaus weiter erhöht werden, hat dies negative Auswirkungen auf die Evakuierungsdynamik der Fußgänger von Typ 2. Daraus lässt sich ableiten, dass der Faktor Zeitlücke nicht mit dem Indikator I und der Geschwindigkeit korreliert, sondern erst ab einer bestimmten Größe Auswirkungen auf das Simulationsergebnis hat. Wie hoch dieser Wert sein kann, ohne Auswirkungen auf die Ergebnisse zu haben, hängt auch mit der Dichte der Fußgänger zusammen. Bei geringerer Fußgängerdichte können größere Zeitlücken kompensiert werden. Das Ergebnis der ersten Simulationsreihe weist speziellere Werte auf. Zu erwarten gewesen wäre ein ähnliches Ergebnis zur zweiten Simulationsreihe, bei dem mit zunehmender Zeitlücke die Indikatoren konstant sinken. Stattdessen lassen sich die Ergebnisse für die Indikatoren in drei Phasen unterteilen. In der ersten Phase ist das System weitestgehend stabil. Diese Parameter ähneln den Werten zum Ende der zweiten Simulationsreihe. Der Indikator I ist zu Beginn für beide Fußgängergruppen relativ hoch. Interessant ist jedoch, dass die Geschwindigkeit der Fußgänger von Typ 2 in der ersten Phase zunimmt. Das könnte darauf zurückgeführt werden, dass die schnelleren Fußgänger von Typ 1 mit zunehmender Zeitlücke die Lücken im System nicht mehr so effektiv nutzen können.

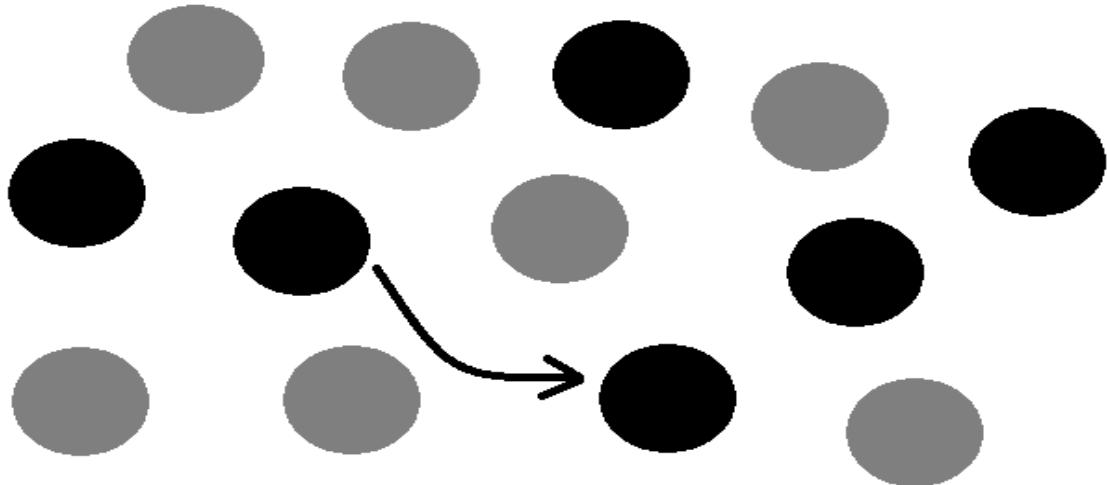


Abbildung 11 Schaubild zur Zeitlücke aus der Simulation

Wie in der Abbildung dargestellt, würde die angezeigte Strecke des Fußgängers von Typ 1 (hier in schwarz dargestellt) für einen Fußgänger von Typ 2 (hier in grau dargestellt) ein Hindernis darstellen und diesen ausbremsen. Wenn die Zeitlücke jedoch zu groß wird, kann die angezeigte Route nicht gewählt werden, was sich zwar positiv auf die Geschwindigkeit des Fußgängers von Typ 2, jedoch schlecht auf den Indikator I der Fußgänger von Typ 1 auswirken würde. Ein solches Szenario würde den Verlauf beider Indikatoren für die erste Phase der ersten Simulationsreihe erklären.

In der zweiten Phase der ersten Simulationsreihe gibt es einen starken Fall der Geschwindigkeit, sowie des Indikators I der Fußgänger von Typ 1. Diese werden sogar in Bezug auf den Indikator I von den Fußgängern von Typ 2 überholt, obwohl Typ 1 weiterhin die höhere Wunschgeschwindigkeit und geringere Zeitlücke hat. Die Ursache für die reduzierte Geschwindigkeit könnte mit der Abhängigkeit von Dichte und Zeitlücke zusammenhängen. Die schnelleren Fußgänger sind demnach kaum noch in der Lage, Lücken zu nutzen, weil diese durch die Dichte für den Wert ihrer Zeitlücke zu klein sind. Doch wie kommt es in dieser Phase zu einer Verschiebung des Indikators zu Gunsten der langsameren Fußgänger? Bei der Betrachtung des graphischen Verlaufs ist zu erkennen, dass die langsameren Fußgänger als eine Art Barriere fungieren.

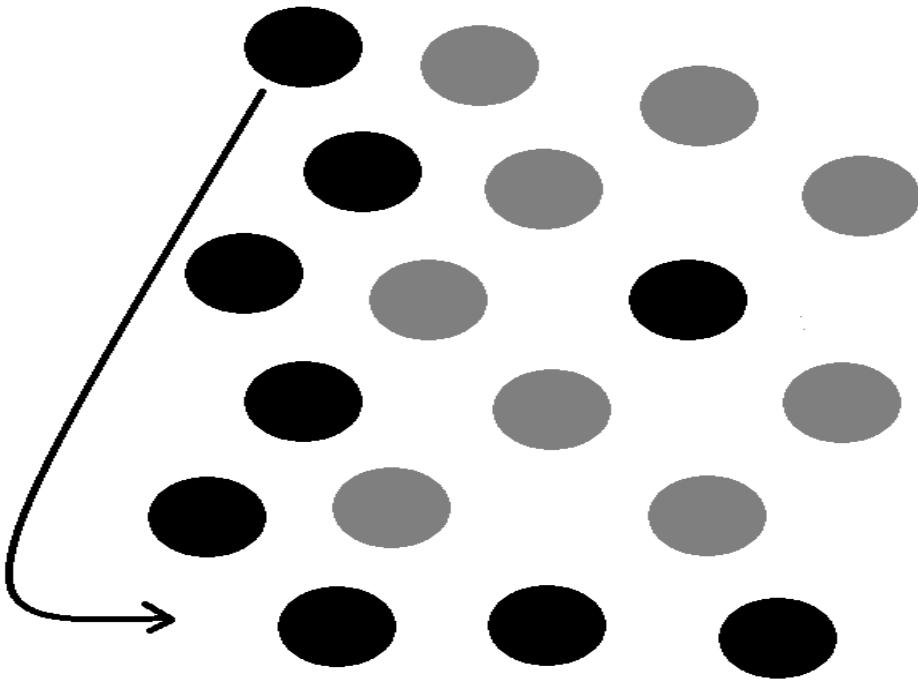


Abbildung 12 Schaubild 2 zur Zeitlücke aus der Simulation

Dadurch, dass die Fußgänger von Typ 1 trotz ihrer höheren Wunschgeschwindigkeit nicht mehr in der Lage sind, Lücken effektiv zu nutzen, sind diese gezwungen, längere Wege zum Überholen zu wählen. Die im Schaubild dargestellte Strecke wäre allerdings ein großer Umweg, weshalb der schnellere Fußgänger stattdessen einem langsameren folgt. So kommt es natürlich zur Reduzierung des Indikators I, sowie der Geschwindigkeit. Der Indikator I der Fußgänger von Typ 2 nimmt jedoch auch ab. Das könnte darauf zurückgeführt werden, dass teilweise schnellere Fußgänger in Formationen aus langsameren Fußgängern „feststecken“. So besteht die Möglichkeit, dass diese der Formation nicht entkommen können und die Fußgänger von Typ 2 so gezwungen werden, dem anderen Typ zu folgen (siehe Ausreißer Abb. 12).

In der dritten Phase gleichen sich sowohl der Indikator I als auch die Geschwindigkeit beider Fußgängertypen an und nehmen einen ähnlichen Verlauf. Das liegt daran, dass eine zu hohe Zeitlücke bei einer bestimmten Dichte vom System nicht mehr kompensiert werden kann. Das System ist bereits nach wenigen Sekunden in einem stationären Zustand, weil es sich nicht mehr selbst organisieren kann. Die Bewegungen beider Fußgänger sind demnach vorherbestimmt, weil durch die zu hohe Zeitlücke keine Alternativrouten gewählt werden können. Die eigentlich schnelleren Fußgänger sind durch ihre hohe Zeitlücke nicht mehr in der Lage zu überholen. So kommt es zu einem Zustand, bei dem alle Fußgänger dieselbe Geschwindigkeit und

denselben Abstand haben. Die Fußgänger haben also keinen Handlungsspielraum aufgrund ihrer Abstoßung. Deshalb pendelt sich auch eine Geschwindigkeit ein. Die Schwankungen für den Indikator sind auf die Anfangssituation der Simulation zurückzuführen. Die Position der Fußgänger ist zu Beginn einer Simulation zufällig. Zum Start der Simulation nehmen diese schnellstmöglich ihre Position ein, sodass die Abstandsbedingungen erfüllt sind. Anschließend ist die Bewegung vorherbestimmt. Welchem Typ die Fußgänger also folgen, basiert auf ihrer Startposition und ist absolut zufällig. Das zeigt sich auch in den hohen Werten für die Varianz von durchschnittlich 0,2. Diese Schwankungen für den Indikator sind also kaum aussagekräftig.

### 3.3 Auswirkung der Wunschgeschwindigkeit

Als nächstes wird die Auswirkung der Wunschgeschwindigkeit auf die Evakuierungsdynamik untersucht. Die Wunschgeschwindigkeit der Fußgänger von Typ 1 hat einen Ausgangswert von  $V_0=2\text{m/s}$  und für Typ 2 von  $V_0=1\text{m/s}$ . In der ersten Simulationsreihe wurde wieder die Wunschgeschwindigkeit für Typ 1 variiert und anschließend die für Typ 2. Als Startwert wurde ein Wert von  $0,1\text{m/s}$  gewählt und dieser jede Runde um  $0,1\text{m/s}$  erhöht. Die höchstmögliche Geschwindigkeit beträgt  $3\text{m/s}$ . Mit erneut drei Simulationen für jeden Wert der Wunschgeschwindigkeit beider Fußgängergruppen ergibt sich eine Gesamtzahl von 180 Simulationen.

Als erstes erfolgt die Darstellung des Indikators I für die Variation der Wunschgeschwindigkeit der Fußgänger von Typ 1:

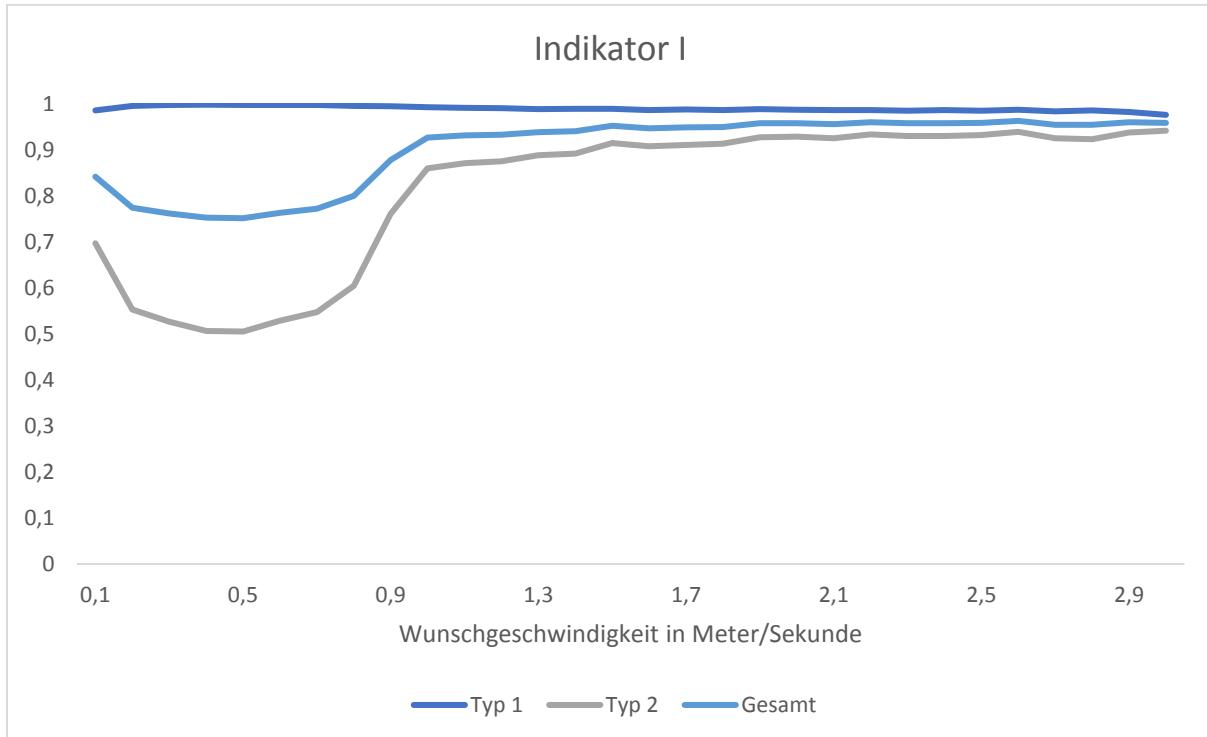


Abbildung 13 Indikator I für die Variation der Wunschgeschwindigkeit der Fußgänger von Typ 1

Es ist zu erkennen, dass die Fußgänger von Typ 1 zu jedem Zeitpunkt konstant einen hohen Wert für den Indikator I aufweisen, auch bei einer geringen Wunschgeschwindigkeit. Für die Fußgänger von Typ 2 nimmt der Indikator jedoch im Bereich von 0,1-1m/s einen parabelförmigen Verlauf, bis er sich dann stabilisiert. Der Indikator I der Fußgänger von Typ 1 ist zudem für jede Wunschgeschwindigkeit höher als der von Typ 2. In Bezug auf die Varianz ergeben sich für die Fußgänger von Typ 1 konstant sehr geringe Werte, während die für Fußgänger von Typ 2 mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit abnehmen.

Die Ergebnisse der ersten Simulationsreihe in Bezug auf die Geschwindigkeit sehen wie folgt aus:

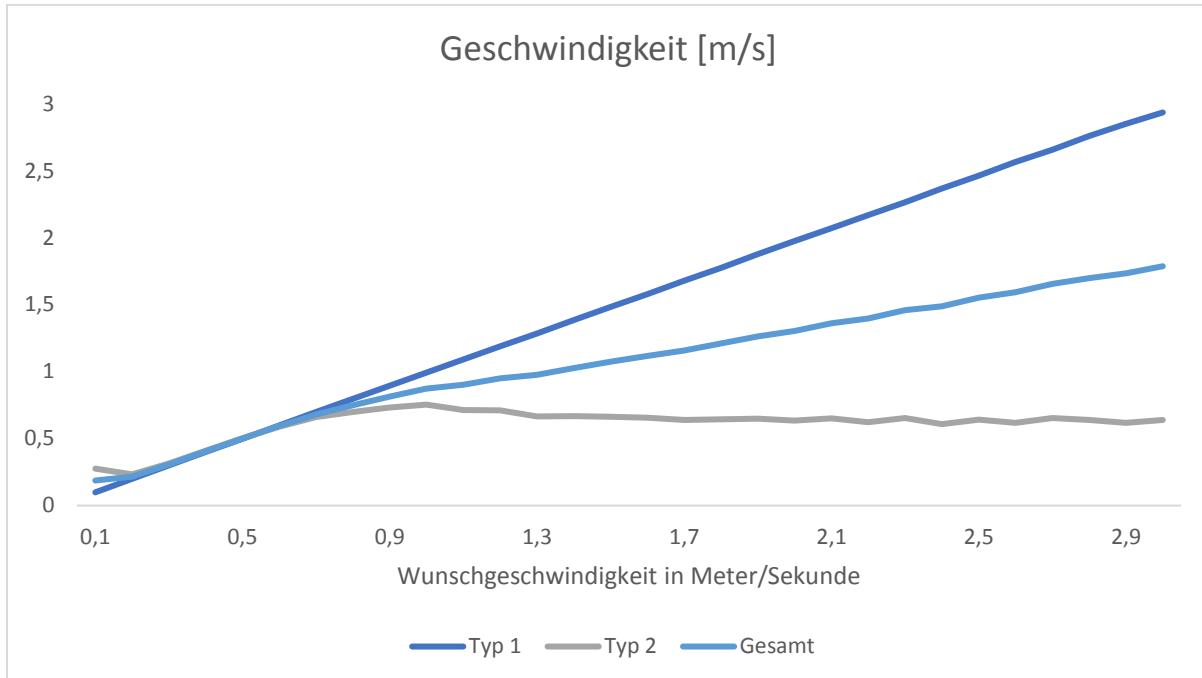


Abbildung 14 Geschwindigkeit für die Variation der Wunschgeschwindigkeit der Fußgänger von Typ 1

Für die Fußgänger von Typ 1 gilt, dass ihre Wunschgeschwindigkeit während der Variation zum größten Teil ihrer realen Geschwindigkeit entspricht. Die festgelegte Wunschgeschwindigkeit wird also auch tatsächlich erreicht. Die Geschwindigkeit der Fußgänger von Typ 2 nimmt jedoch Einfluss auf die Variation. Zu Beginn der Simulationsreihe steigt die Geschwindigkeit beider Fußgängergruppen in gleichem Maße an. Nur in der ersten Simulation mit einer Wunschgeschwindigkeit der Fußgänger von Typ 1 mit  $V_0=0,1\text{m/s}$  gibt es geringe Unterschiede. Ab einer Wunschgeschwindigkeit von etwa  $V_0=0,7\text{m/s}$  nehmen die Kurven jedoch einen unterschiedlichen Verlauf. Während die Kurve für Typ 1 konstant ansteigt, stagniert die Kurve für Typ 2 während der restlichen Simulation. Die Werte für die Geschwindigkeit der Fußgänger von Typ 2 schwanken dabei zwischen  $0,75\text{m/s}$  und  $0,61\text{m/s}$ . Die Wunschgeschwindigkeit von Typ 2 wird also nicht erreicht. Für die Varianz zeigt sich, dass diese für beide Fußgängertypen mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit ansteigt.

In der zweiten Simulationsreihe wurde wie gewohnt die Wunschgeschwindigkeit der Fußgänger von Typ 2 variiert. Die Ergebnisse für den Indikator I lassen sich wie folgt darstellen:

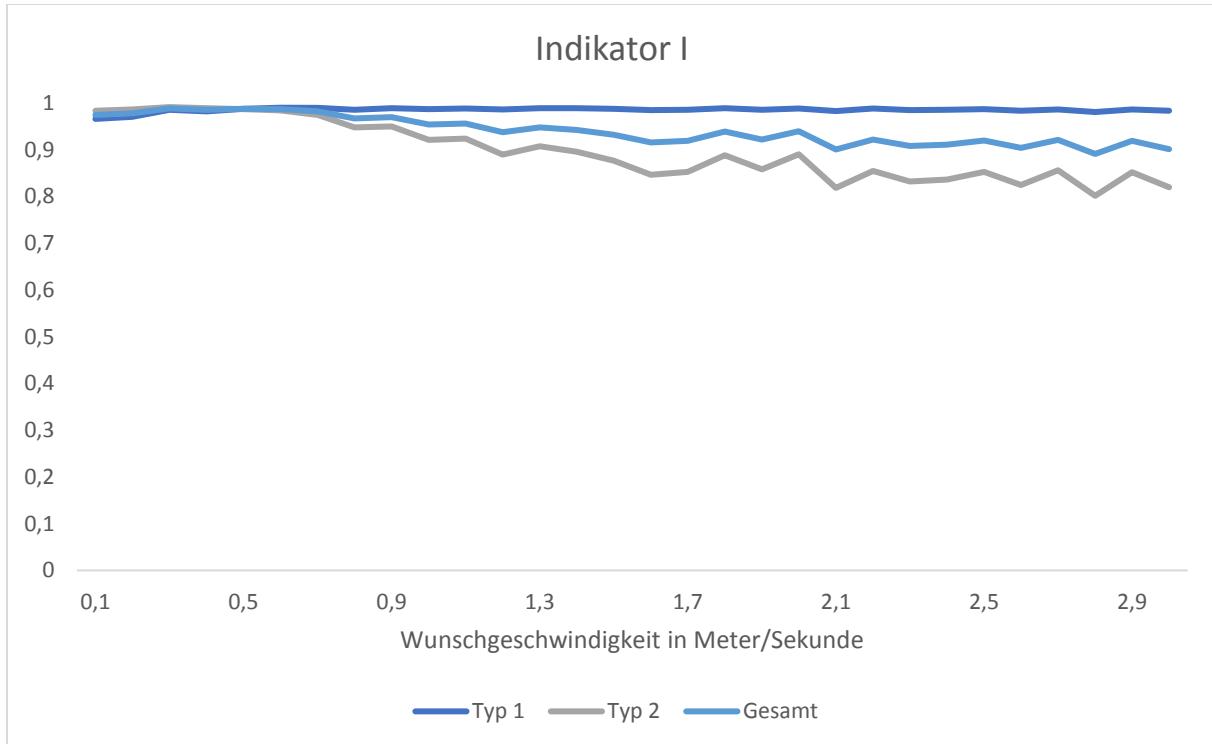


Abbildung 15 Indikator I für die Variation der Wunschgeschwindigkeit der Fußgänger von Typ 2

Auch in dieser Simulationsreihe zeigt sich ein nahezu perfektes Ergebnis für den Indikator I der Fußgänger von Typ 1, mit einer kleinen Ausnahme in den ersten beiden Simulationen. Die Werte für den Indikator I sind bis zu einer Wunschgeschwindigkeit von etwa  $V_0=0,7\text{m/s}$  für die Fußgänger von Typ 2 ebenfalls sehr hoch. Mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit werden die Werte für Typ 2 jedoch immer geringer. Die Kurve sinkt jedoch nicht linear, sondern mit Ausschlägen nach oben und unten. Insgesamt sind die Werte für Typ 2 mit  $>0,8$  jedoch auch zum Ende der Simulationsreihe noch relativ hoch. Für die Fußgänger von Typ 1 sind die Werte für die Varianz während dieser Simulationsreihe konstant sehr gering (mit Ausnahme der ersten Simulation). Für die Fußgänger von Typ 2 zeigt sich allerdings wieder eine Steigung der Varianz mit zunehmender Wunschgeschwindigkeit.

Bei Betrachtung der Geschwindigkeit beider Fußgängergruppen zeigt sich in der zweiten Simulationsreihe folgendes Bild:

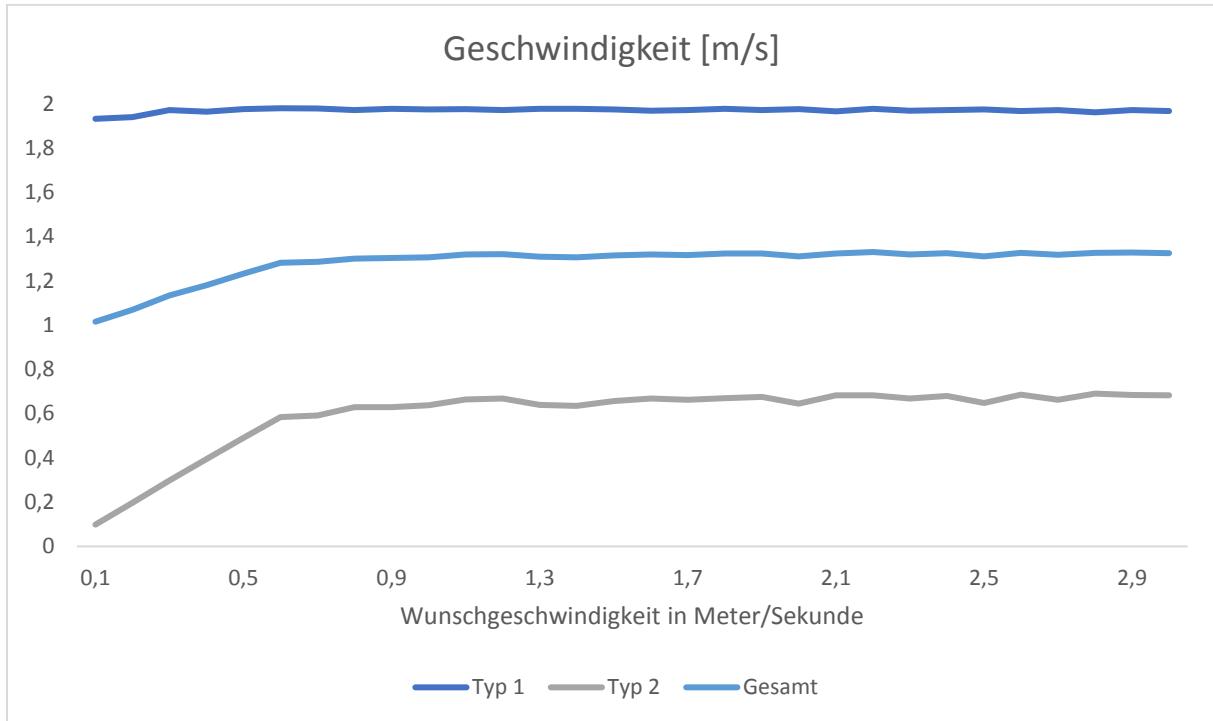


Abbildung 16 Geschwindigkeit für die Variation der Wunschgeschwindigkeit der Fußgänger von Typ 2

Für die Fußgänger von Typ 1 gilt erneut, dass ihre Wunschgeschwindigkeit weitestgehend der realen Geschwindigkeit entspricht. Jedoch gibt es wieder kleine Unterschiede zu Beginn der Simulationsreihe. Für die Fußgänger von Typ 2 ist zwischen der Wunschgeschwindigkeit von  $V_0=0,1\text{m/s}$  und  $V_0=0,6\text{m/s}$  ein linearer Anstieg zu erkennen. In diesem Bereich wird die Wunschgeschwindigkeit für Typ 2 erreicht. Anschließend nimmt die Kurve für Typ 2 einen horizontalen Verlauf an. Trotz der Erhöhung der Wunschgeschwindigkeit, bleibt die reale Geschwindigkeit, mit geringen Schwankungen, gleich.

Auch bei der Parametervariation für die Wunschgeschwindigkeit lässt sich festhalten, dass die Fußgänger von Typ 2 stärker betroffen sind als Fußgänger von Typ 1. Während der gesamten ersten und zweiten Simulationsreihe haben die Fußgänger von Typ 1 für beide Indikatoren konstant hohe Werte erzielt. Das gilt auch für den Bereich, indem die Geschwindigkeit von Typ 1 geringer ist als die von Typ 2. Diese Ergebnisse können nur mit der Zeitlücke zusammenhängen. Dadurch, dass die Zeitlücke für Typ 1 immer noch sehr gering ist ( $t=0,1$ ) können sich die Fußgänger von Typ 1 trotzdem frei bewegen. Durch eine Kombination aus geringer Geschwindigkeit

und Zeitlücke wird automatisch der physische Abstand der Fußgänger von Typ 1 zu anderen Fußgängern kleiner. Aus diesem Grund können sich die Fußgänger von Typ 1 besser im Simulationsraum verteilen und ihre Wunschgeschwindigkeit sowohl bei hohen als auch bei niedrigen Werten erreichen. Bemerkenswert ist hier jedoch, dass die Geschwindigkeit der Fußgänger von Typ 2 zu Beginn der Parametervariation fast identisch zu der von Typ 1 ist. Auch das ist auf die Unterschiede in der Zeitlücke zurückzuführen. Fußgänger von Typ 2 sind in dieser Phase der Simulation die eigentlich schnelleren Fußgänger. Trotzdem können sie die Wunschgeschwindigkeit nicht erreichen, weil durch die geringere Zeitlücke der Fußgänger von Typ 1 kaum Lücken entstehen. Außerdem wären Fußgänger von Typ 2 aufgrund der hohen Zeitlücke nicht in der Lage, diese zu nutzen. Die Fußgänger von Typ 2 sind also nicht in der Lage zu überholen und ihre höhere Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Daher sind diese gezwungen, den Fußgängern von Typ 1 zu folgen, wodurch die Geschwindigkeiten beider Fußgängergruppen direkt korrelieren. Ab einer Wunschgeschwindigkeit von etwa  $V_0=0,7$  für Typ 1 bleibt die Geschwindigkeit für Typ 2 jedoch konstant. Zeitgleich steigt auch der Indikator I wieder. Dadurch dass es wieder verstärkt zur Linienbildung kommt, wird die zu erwartende Geschwindigkeit von etwa 0,63m/s für Typ 2 erreicht. Diese Geschwindigkeit ist auch schon in Simulationen zur Breite und Zeitlücke zu erkennen und stellt aufgrund der festgelegten Ausgangswerte für Zeitlücke, Dichte und Abstoßung die höchstmögliche Geschwindigkeit für Typ 2 dar (Siehe auch Abb. 16). Es stellt sich jedoch noch die Frage nach dem parabelförmigen Verlauf des Indikators für den Typ 2 zu Beginn der ersten Simulationsreihe. Für den Fall der Kurve des Indikators I für Typ 2 im Bereich von  $V_{01}=[0,1\text{m/s};0,4\text{m/s}]$  könnte vermutet werden, dass es bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten der Fußgänger von Typ 1 für die Fußgänger von Typ 2 leichter ist, diese zu überholen, bzw. diesen auszuweichen. Mit steigender Geschwindigkeit wird der Geschwindigkeitsunterschied beider Fußgängergruppen zu gering, sodass die Fußgänger von Typ 2 nicht mehr so einfach überholen können. Durch die höhere Geschwindigkeit der Fußgänger von Typ 1 wird der Weg zum Überholen für die Fußgänger von Typ 2 länger, was den Prozess verkompliziert. Der Anstieg der Indikators I kann damit erklärt werden, dass durch den weiteren Anstieg der Wunschgeschwindigkeit der Fußgänger von Typ 1 die Fußgänger von Typ 2 nicht mehr überholen müssen, sondern von Typ 1 überholt werden. Für die Fußgänger von Typ 1 ist der Überholtvorgang aufgrund ihrer geringeren Zeitlücke

einfacher. Des Weiteren kann so eine flüssigere Bewegung beider Fußgängergruppen erreicht werden und das System kann sich besser selbst organisieren.

Während der zweiten Simulationsreihe sind die Fußgänger von Typ 1 durch die Parametervariation der Fußgänger von Typ 2 fast nicht betroffen. Die Wunschgeschwindigkeit für Typ 1 wird weitestgehend erreicht und der Indikator I ist nahezu auf dem Maximum. Die reale Geschwindigkeit und die Wunschgeschwindigkeit von Typ 2 korrelieren zu Beginn der Simulationsreihe bis die Maximalgeschwindigkeit erreicht wird. Diese Ergebnisse sind vor Beginn der Simulation zu erwarten gewesen. Außergewöhnlich ist jedoch der Rückgang des Indikators I mit Erhöhen der Wunschgeschwindigkeit für Typ 2. Der Fall der Kurve des Indikators I beginnt mit Erreichen der Maximalgeschwindigkeit für Typ 2. Der hohe Wert für den Indikator I zu Beginn der Simulationsreihe basiert darauf, dass sich die Fußgänger von Typ 2 mit geringer Geschwindigkeit und hoher Zeitlücke in Formationen bewegen. Aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit bewegen sich die Fußgänger von Typ 2 daher fast ausschließlich horizontal. Fußgänger von Typ 1 stellen für sie in dem Fall kein Hindernis da, weil diese zu schnell sind, um die Fußgänger von Typ 2 zu beeinträchtigen. Wird die Geschwindigkeit der Fußgänger von Typ 2 jedoch erhöht, werden die Fußgänger von Typ 2 durch die Fußgänger von Typ 1 in ihrer Bewegung beeinträchtigt. Durch den geringeren Geschwindigkeitsunterschied beider Fußgängergruppen, sind die Fußgänger von Typ 2 dazu gezwungen ihre Geschwindigkeit zu verringern, wenn diese überholt werden (siehe Abb. 11). Durch das Drängeln von Typ 1 aufgrund der geringeren Zeitlücke wird der Indikator I von Typ 2 daher reduziert. Hinzu kommt, dass die Fußgänger von Typ 2 auch mit höheren Geschwindigkeiten nicht dazu in der Lage sind, die Lücken von Typ 1 zu nutzen. Die starken Schwankungen der Kurve des Indikators I spiegeln sich auch in den hohen Werten für Varianz wider. Die Ergebnisse zeigen also nur eine Tendenz an. Wie hoch der Indikator I für die Fußgänger von Typ 2 ist, hängt davon ab, wie stark sich die Fußgänger von Typ 1 selbst organisieren. Wenn sich diese weitestgehend horizontal bewegen, wird der Indikator für den Typ 2 höher. Diese Organisation ist jedoch zufällig und so kommt es zu den Schwankungen während des Verlaufs.

### 3.4 Auswirkung des Dichteniveaus

Auch zur Untersuchung der Dichte wurden zwei verschiedene Simulationsreihen durchgeführt. In der ersten Simulationsreihe wurde der Einfluss der Dichte für die

Ausgangswerte beider Fußgängergruppen aus 2.3 getestet. Der Simulationsraum hat eine Größe von  $77\text{m}^2$ . Begonnen wurde mit einer Fußgängeranzahl von  $p=10$ , was einer Dichte von  $D=0,13p/\text{m}^2$  entspricht. Für jede Runde wurde anschließend die Personenzahl um  $p=10$  erhöht, bis zu einem Endwert von  $p=300$ , was einer Dichte von  $D=3,90p/\text{m}^2$  entspricht. Die Anzahl aller Simulationen beträgt somit 180.

Für die erste Simulationsreihe sieht der Indikator I für beide Fußgängergruppen wie folgt aus:

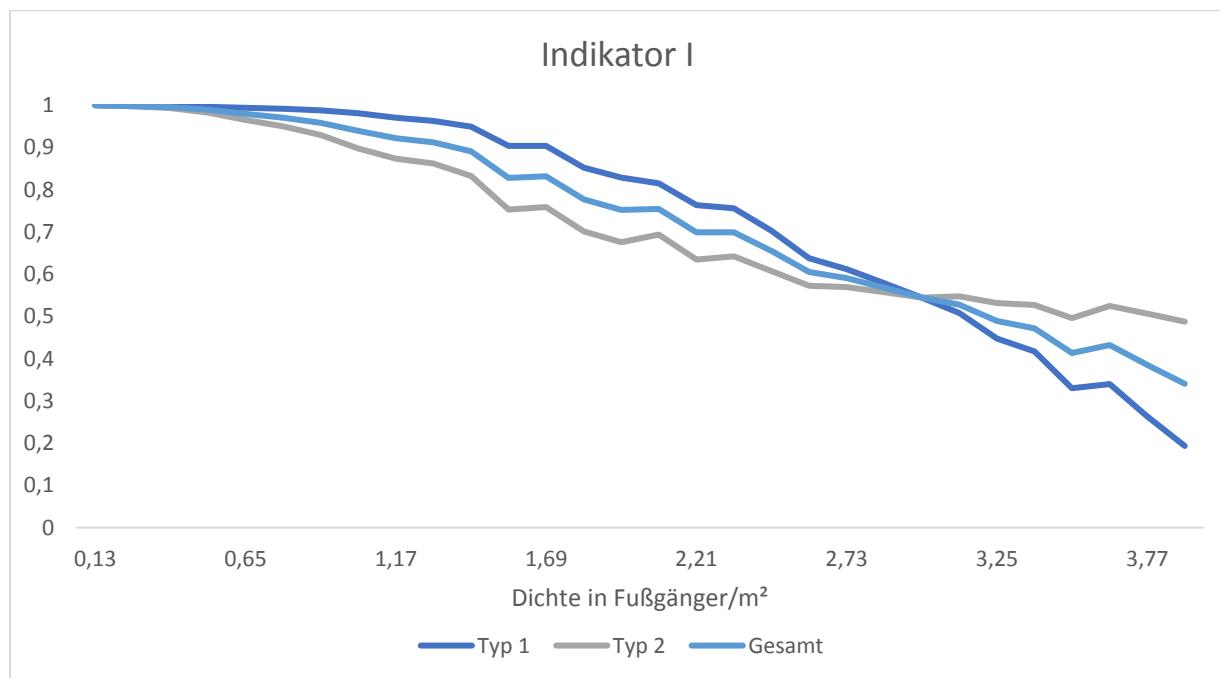


Abbildung 17 Indikator I für die Variation der Dichte (1)

Es ist zu erkennen, dass der Indikator I für beide Fußgängergruppen zu Beginn der Simulationsreihe sehr hoch ist, anschließend aber einen unterschiedlichen Verlauf nimmt. Für die Fußgänger von Typ 1 fällt der Indikator zunächst langsam, der Fall wird jedoch mit zunehmender Breite immer steiler. Für die Fußgänger von Typ 2 ist das Gegenteil der Fall. Der Indikator I fällt zunächst relativ steil und mit zunehmender Breite immer langsamer. Das hat zur Folge, dass sich die beiden Kurven bei einer Dichte von etwa 2,99 Personen pro Quadratmeter (230 Personen auf  $77\text{m}^2$ ) kreuzen. Ab diesem Punkt ist der Indikator I für Typ 2 höher als für Typ 1. Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Kurven keinen linearen Verlauf nehmen, sondern dass es regelmäßig zu Schwankungen kommt. Bei Betrachtung der Varianz zeigt sich erneut, dass die Werte für beide Fußgängergruppen sehr gering starten und mit zunehmender Dichte immer

größer werden. Das erklärt auch die Zunahme der Schwankungen über den Verlauf beider Kurven.

Der Verlauf beider Geschwindigkeiten mit zunehmender Dichte kann wie folgt dargestellt werden:

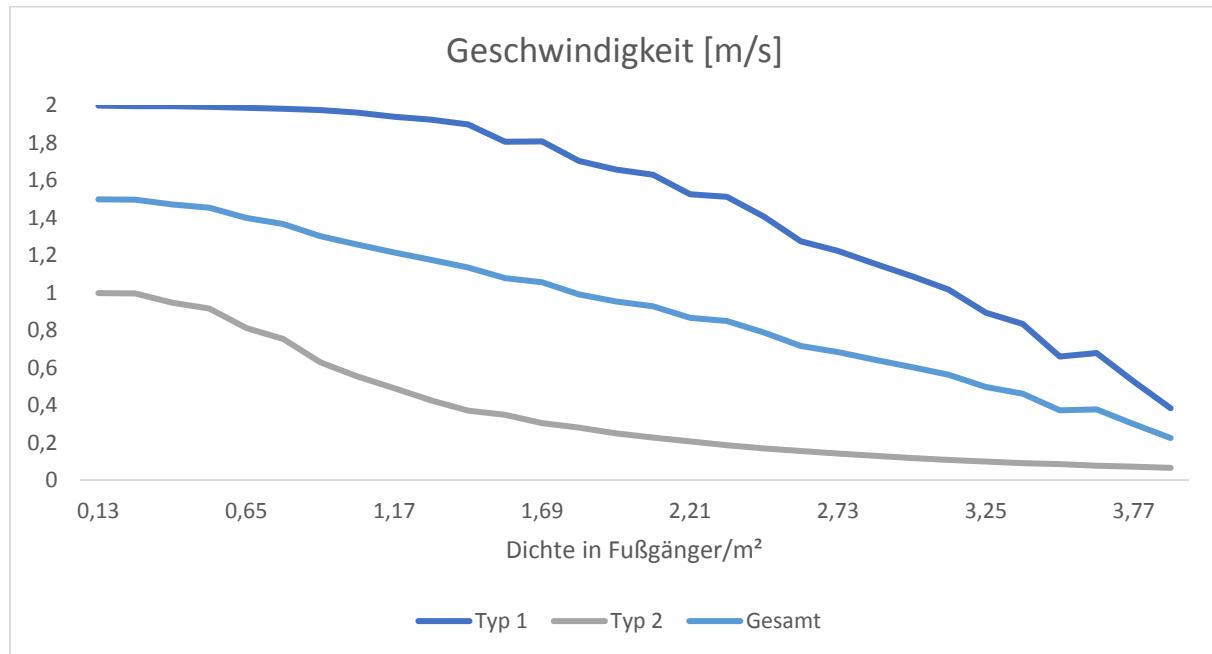


Abbildung 18 Geschwindigkeit für die Variation der Dichte (1)

Der Verlauf beider Kurven ist ähnlich der des Indikators I, jedoch unterscheiden sich diese im Startwert. Die Kurve der Fußgänger von Typ 1 fällt zunächst wieder langsam und mit zunehmender Dichte immer schneller. Bei der Kurve der Fußgänger von Typ 2 ist genau das Gegenteil der Fall. Diese fällt zunächst sehr steil, jedoch wird der Fall der Kurve mit zunehmender Dichte immer geringer. Zum Ende der Simulationswerte haben beide Fußgängertypen sehr geringe Werte für Geschwindigkeit.

Auch für die Dichte wurden insgesamt zwei Simulationen durchgeführt. Bei der Betrachtung der grafischen Darstellung der Simulation ist aufgefallen, dass trotz sehr niedriger Geschwindigkeiten beider Fußgänger die Abstoßung untereinander sehr hoch war. Es kam also verstärkt zu Oszillationen. Des Weiteren ist in früheren Simulationen erkannt worden, dass der Faktor Zeitlücke sehr große Auswirkungen auf das Simulationsergebnis nimmt. Zudem wurde die These aufgestellt, dass die Kombination aus Dichte und Zeitlücke die Evakuierungsdynamik besonders stark beeinflusst. Daher wurde eine zweite Simulationsreihe zur Dichte durchgeführt, um das zu überprüfen. In dieser zweiten Simulationsreihe besteht der einzige Unterschied

zur ersten Simulationsreihe darin, dass die Zeitlücke der Fußgänger von Typ 2 verändert wurde. Es ist zu vermuten, dass die Schwankungen aus der ersten Simulationsreihe auf die hohe Zeitlücke von  $t2=2s$  zurückzuführen sind. Daher wurde für die zweite Simulationsreihe dieser Wert auf  $t2=0,2s$  herabgesetzt. So unterscheiden sich beide Fußgängergruppen lediglich in ihrer Wunschgeschwindigkeit.

Für den Indikator I ergibt sich folgendes Bild bei der Auswertung der Ergebnisse:

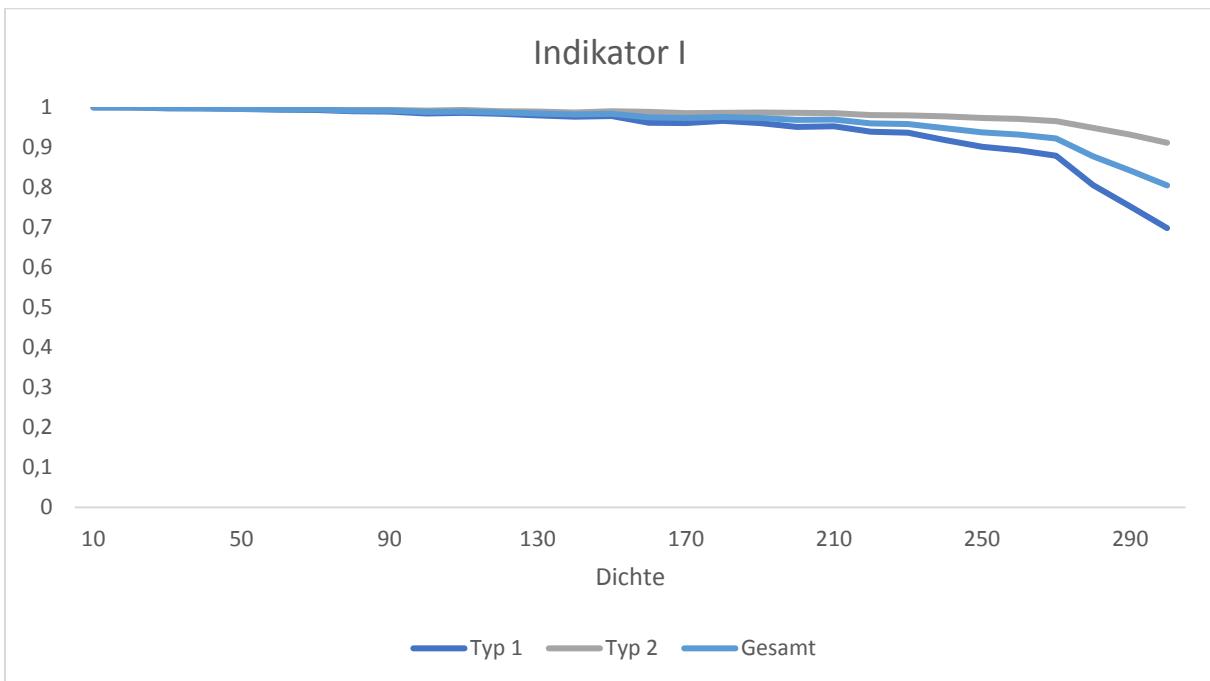


Abbildung 19 Indikator I für die Variation der Dichte (2)

Dieser Verlauf unterscheidet sich deutlich zu dem der ersten Simulationsreihe. Bis zu einer Personenzahl von etwa 210 werden für beide Fußgängergruppen konstant sehr hohe Werte für den Indikator I erzielt. Anschließend fällt die Kurve für den Typ 1 und mit weiter zunehmender Dichte wird dieser Fall steiler. Trotzdem ist der Wert des Indikators I für den Typ 1 auch zum Ende der Simulationsreihe im Vergleich zur ersten deutlich höher. Für die Fußgänger von Typ 2 sind die Werte des Indikators I auch bei höherer Dichte sehr gut. Der Fall der Kurve beginnt erst ab einer Personenzahl von ungefähr  $P=270$  und ist deutlich geringer als der des Typ 2. Des Weiteren sind in dieser Simulationsreihe keine Schwankungen zu erkennen, die beiden Kurven nehmen einen nahezu linearen Verlauf. Die Varianz der Fußgänger von Typ 1 nimmt jedoch mit zunehmender Dichte zu, jedoch sind die Werte geringer als in der ersten

Simulationsreihe. Für die Fußgänger von Typ 2 bleiben die Werte für die Varianz konstant sehr klein.

Der Verlauf der Geschwindigkeiten über die variierende Dichte der zweiten Simulationsreihe sieht wie folgt aus:

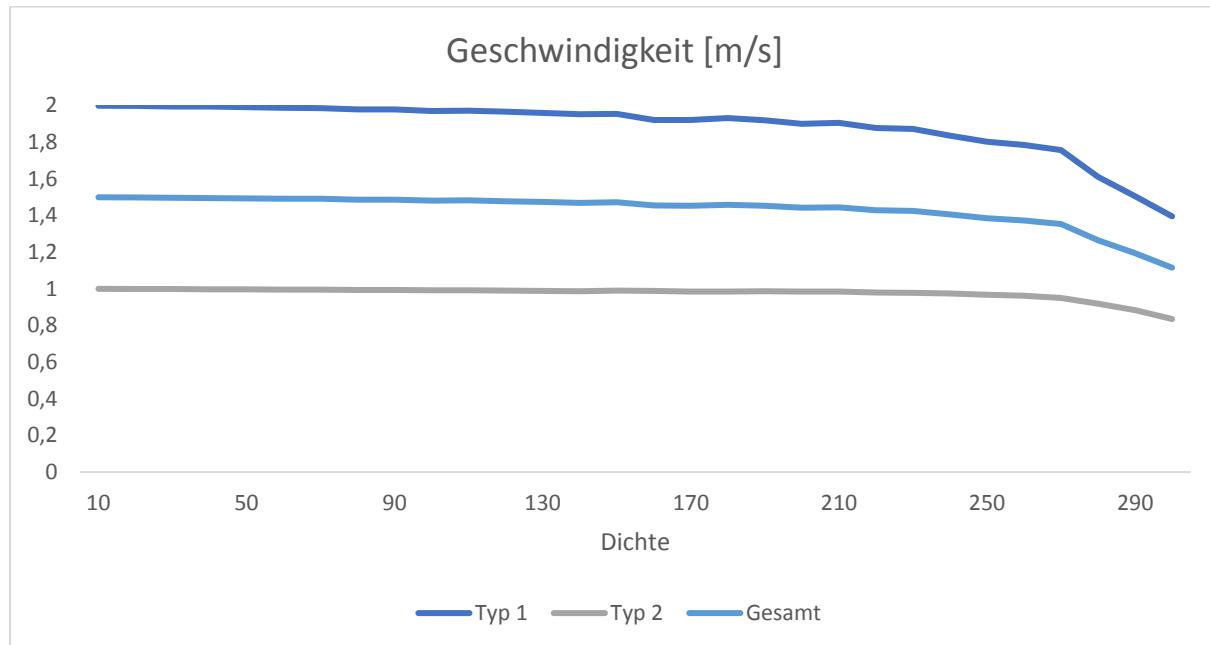


Abbildung 20 Geschwindigkeit für die Variation der Dichte (2)

Auch diese Werte unterscheiden sich deutlich zu denen der ersten Simulationsreihe. Beide Fußgängertypen können sehr lange ihre Wunschgeschwindigkeit aufrechterhalten. Für die Fußgänger von Typ 2 beginnt die Geschwindigkeit erst ab einer sehr hohen Dichte, geringfügig zu sinken. Der Fall der Kurve der Fußgänger von Typ 1 beginnt bereits bei einer Personenzahl von etwa  $P=160$ , jedoch ist dieser sehr gering. Der Fall der Kurve wird jedoch auch erst ab einer sehr hohen Dichte steiler. Für die Varianz gibt es für den Typ 1 erneut einen Anstieg mit zunehmender Dichte, für die Fußgänger von Typ 2 bleiben die Werte jedoch über den gesamten Verlauf sehr gering.

Die Ergebnisse beider Parametervariationen fallen sehr unterschiedlich aus. In der ersten Simulationsreihe nehmen die Werte beider Indikatoren konstant ab, während in der zweiten Simulationsreihe auch für eine sehr hohe Fußgängererdichte hohe Werte erzielt werden. Die hohe Zeitlücke der Fußgänger von Typ 2 hat Einfluss auf beide Fußgängergruppen. In erster Linie liegt der Einfluss der Zeitlücke auf der Geschwindigkeit. Mit zunehmender Dichte wird es schwerer für die Fußgänger von

Typ 2 die gewünschte Zeitlücke einzuhalten. Der Abstand wird durch den Einfluss der Dichte automatisch geringer, wodurch besonders die Fußgänger von Typ 2 ihre Geschwindigkeit reduzieren, um die vorgegebene Zeitlücke einzuhalten. Das nimmt natürlich auch Einfluss auf die Fußgänger von Typ 1. Wenn die Fußgänger von Typ 2 sich sehr langsam vorwärtsbewegen, sind die Fußgänger von Typ 1 gezwungen, dies ebenfalls zu tun, um Kollisionen zu vermeiden. Des Weiteren sind die Fußgänger von Typ 1 nicht mehr in der Lage zu „drängeln“. Fußgänger von Typ 2 können nicht mehr zur Seite „geschoben“ werden, weil die Zeitlücke sonst nicht eingehalten wird. Eine langsame Geschwindigkeit, in Kombination mit hoher Dichte sorgt auch automatisch für niedrige Werte in Bezug auf den Indikator I. Beide Fußgängergruppen sind in ihrer Bewegung stark eingeschränkt und es bieten sich keine Gelegenheiten zu überholen. So bewegen sich beide Fußgängergruppen fast ausschließlich horizontal, ohne die Möglichkeit, alternative Routen zu wählen. Der Grund, warum die Werte des Indikators I des Typ 2 zum Ende der Simulation, die des Typ 1 übertreffen, könnte darauf zurück zu führen sein, dass diese durch ihre Zeitlücke die Geschwindigkeit kontrollieren. Die Fußgänger von Typ 1 müssen sich anpassen. Der Typ 2 nimmt so den Großteil des Simulationsraums ein und die Bewegungen der Fußgänger von Typ 1 sind dadurch vorherbestimmt. Die hohen Schwankungen basieren erneut auf der Startposition. Dadurch, dass die Fußgänger an eine zufällige Position gestellt werden, sind diese durch die hohe Dichte und Zeitlücke dazu gezwungen, in dieser Formation zu bleiben. Das bedeutet, der vorrausgehende Fußgänger ist in der Regel zufällig.

In der zweiten Simulationsreihe wurde die Zeitlücke von Typ 2 herabgesetzt, um zu überprüfen, wie die Auswirkungen von Dichte und Zeitlücke zusammenhängen. Wie zu erkennen ist, sind die Werte für Indikator I und Zeitlücke deutlich höher, im Vergleich zur ersten Simulationsreihe. Die Fußgänger von Typ 2 sind nicht mehr dazu gezwungen, die Geschwindigkeit zu reduzieren, um die Zeitlücke einzuhalten. Das erleichtert die Selbstorganisation und verbessert die Dynamik beider Fußgängergruppen. Die Dichte nimmt erst ab einer sehr hohen Fußgängeranzahl Einfluss auf das System. Das lässt darauf schließen, dass der Faktor Zeitlücke für das schlechte Ergebnis aus der ersten Simulationsreihe verantwortlich ist. Zum Ende der Simulationsreihe werden die Werte für beide Indikatoren jedoch etwas schlechter. Das liegt daran, dass selbst der geringe Wert für die Zeitlücke die hohe Dichte nicht mehr kompensieren kann. Für eine gute Fußgängerdynamik ist demnach ein Zusammenspiel von Dichte und Zeitlücke von Bedeutung. Der Grund, dass der

Indikator der Fußgänger von Typ 1 stärker sinkt, als der von Typ 2, könnte darauf zurückzuführen sein, dass durch die hohe Dichte weniger Lücken entstehen, die die schnellere Fußgängergruppe nutzen kann. Die Geschwindigkeit wird demnach wieder durch Fußgänger von Typ 2 bestimmt und die Fußgänger von Typ 1 sind nur seltener in der Lage, Lücken zu nutzen und ihre Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Sie sind demnach häufiger dazu gezwungen den langsameren Fußgängern zu folgen.

## 4. Interpretation und Anwendung der Simulationsergebnisse

Ein Indikator für eine gute Evakuierungsdynamik ist das Erreichen der Wunschgeschwindigkeit. Das lässt sich am besten umsetzen, wenn sich das System so organisiert, dass die Fußgänger einem Fußgänger vom selben Typ folgen. Die zahlreichen Simulationen dazu fallen für die untersuchten Parameter sehr unterschiedlich aus und zeigen einige überraschende Ergebnisse. Diese sind jedoch nicht alle auf die Dynamik von Fußgängern anwendbar. Wie bereits erwähnt, ist eine Breite von >50cm für Fußgänger unrealistisch. Daher wird im folgenden Kapitel unter anderem untersucht, ob sich die Ergebnisse für den Parameter Breite auf andere Verkehrsteilnehmer, wie zu Beispiel E-Scooter anwenden lassen. Insgesamt kann jedoch festgestellt werden, dass alle untersuchten Parameter (Breite, Zeitlücke, Wunschgeschwindigkeit und Breite) einen unterschiedlichen Einfluss auf das Ergebnis der Evakuierungsdynamik nehmen. Bei der Untersuchung des Parameters Zeitlücke fällt besonders auf, dass dieser Einfluss auf beide Fußgängergruppen nimmt. Die Kurven der Indikatoren beider Fußgängertypen nehmen bei der Variation einen ähnlichen Verlauf. Des Weiteren gibt es Abhängigkeiten, zwischen der Dichte und der Zeitlücke. In den Simulationen konnte festgestellt werden, dass eine höhere Dichte durch eine geringe Zeitlücke kompensiert werden kann. Das gleiche gilt für eine hohe Zeitlücke und geringe Dichte. Für die Wunschgeschwindigkeit gilt, dass diese von der Kombination aus Dichte/Zeitlücke abhängt. Es hat sich gezeigt, dass das Erhöhen der Wunschgeschwindigkeit nur bis zu einem bestimmten Grad Auswirkungen auf das System hat. Darüber hinaus können höhere Wunschgeschwindigkeiten wegen der Dichte/Zeitlücke nicht erreicht werden.

Wie lassen sich diese Ergebnisse anwenden? Der Parameter Breite kann in der Realität nicht verändert werden und ist für Fußgänger bereits vorherbestimmt. Für die Wunschgeschwindigkeit gilt, dass der Großteil der Fußgänger diese selbst wählen kann. Einige sind jedoch körperlich nicht dazu in der Lage, sie zu erhöhen. Die Dichte ist bis zu einem gewissen Grad berechenbar. In Hallen oder Stadien ist die maximale Besucherzahl bekannt. Um eine gute Evakuierungsdynamik zu erreichen muss die Kombination aus Zeitlücke und Dichte stimmen. Die Zeitlücke eines Menschen ist jedoch auch individuell. Notausgänge müssten also so dimensioniert werden, dass selbst eine maximale Zeitlücke eines Menschen durch die Dichte kompensiert werden kann. Auf diese Weise kann auch Panik vermieden werden, wenn die gewählten

Zeitlücken eingehalten werden können. Durch eine gute Kombination aus Dichte und Zeitlücke können auch die Wunschgeschwindigkeiten sowohl von langsamen als auch von schnelleren Fußgängern eingehalten werden, was wichtig für eine stressfreie und sichere Evakuierung ist. In dem Fall würde es daher zu einer Linienbildung der Fußgängergruppen kommen (Indikator I), was das „Drängeln“ der schnelleren Personen einschränkt.

Diese Ergebnisse sind jedoch nicht vollständig repräsentativ für eine reale Evakuierung. In der Realität ist jeder Fußgänger einzigartig. Eine solche Darstellung ist jedoch sehr komplex. Die Ergebnisse der Simulation sollen lediglich eine Tendenz anzeigen, welche Parameter in welcher Weise Einfluss auf das Evakuierungssystem von heterogenen Fußgängergruppen nehmen können.

## 4.1 Anwendung auf die Mikromobilität

Der Einfluss von Mikromobilität auf den Straßenverkehr ist ein sehr aktuelles Thema, zudem es momentan viele Forschungen gibt. Um die Anwendungsmöglichkeiten der Simulationen dieser Arbeit auf die Mikromobilität zu untersuchen, ist es wichtig, zunächst zu überprüfen, wie diese modelliert werden können. Dazu wird sich im Folgenden auf E-Roller beschränkt. Die grundlegenden Unterschiede zu Fußgängern liegen in der Breite und der Geschwindigkeit. Zu Evakuierungen werden E-Scooter jedoch bislang eher nicht eingesetzt. Für größere Events wie Konzerte oder Sportveranstaltungen wäre das auch schwer umzusetzen. Die elektrischen Fahrzeuge müssten sofort greifbar sein. Außerdem bietet die Infrastruktur von Stadien nicht die Möglichkeiten, ausreichend Fahrzeuge für alle Besucher bereitzustellen. Die Überlegungen zur Verwendung der Simulationsergebnisse in Bezug auf die Mikromobilität sind daher nur theoretisch.

### 4.1.1 Modellierung von Mikromobilität

Das Problem der Simulationen ist, dass diese zuvor ausschließlich für die Dynamik von Fußgängern ausgelegt sind. Um die Anwendungsmöglichkeit auf Mikromobilität zu überprüfen, gibt es nur eine Möglichkeit, E-Roller darzustellen. Sie müssen also nach dem Modell als große Fußgänger betrachtet werden. Das ist jedoch kein Problem, da sich E-Roller in der Regel auch wie Fußgänger verhalten. Was jedoch ein Problem darstellt, ist, dass es sich bei dem Fußgängermodell um ein rein geschwindigkeitsbasiertes Modell handelt. Die Trägheit von E-Rollern wird dabei außer Acht gelassen. Ohne die Berücksichtigung der Trägheit würde es in der Realität

zu einer Kollision kommen. Auch ist in der Realität der Geschwindigkeitsunterschied von Fußgängern zu E-Rollern größer. E-Roller können Geschwindigkeiten von bis zu 20km/h ( $\approx$ 5,6m/s) erreichen. Des Weiteren unterscheiden sich Fußgänger zu E-Rollern in ihrer Länge. Die maximale Länge der elektrischen Fahrzeuge kann bis zu 2 Metern betragen. Da diese jedoch auch als Scheibe dargestellt werden, müsst der Wert für die Breite deutlich erhöht werden.

#### 4.1.2 Interaktion mit Fußgängern

Bei der Anwendung der Simulationsergebnisse auf die Mikromobilität muss ein geeignetes Szenario gefunden werden. Der Hauptunterschied beider Verkehrsteilnehmer liegt in der Breite. Die höchstmögliche Breite, welche in den Simulationen verwendet wurde, beträgt  $I=0,8$  Metern. Das ist jedoch für E-Roller noch zu wenig. Da sich E-Roller von Fußgängern jedoch nur in der Länge und nicht in der Breite unterscheiden, könnte dieser Wert verwendet werden. Es kommt daher von den durchgeführten Simulationen nur eine in Frage:

*Tabelle 3 Anwendung des Simulationsergebnisses zur Breite auf die Mikromobilität*

	Breite	Zeitlücke	Wunschgeschwindigkeit	Indikator I	Geschwindigkeit
Typ 1	0,8m	0,2s	2m/s	0,94	1,89m/s
Typ 2	0,4m	2s	1m/s	0,77	0,43m/s

Die Dichte der Simulation beträgt  $D=0,91$  Agenten/m<sup>2</sup>. Das Problem dieser Simulation ist die Differenz der Wunschgeschwindigkeit. Jedoch könnte bei der Nutzung von E-Rollern eine vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit vereinbart werden, beispielsweise bei der Benutzung von Fußgängerwegen. Die Werte der Indikatoren der elektrischen Fahrzeuge (Typ 1) sind relativ hoch. Das gilt jedoch nicht für die Fußgänger (Typ 2). Das würde bedeuten, dass die Fußgänger durch den Einsatz von Mikromobilität in ihrer Dynamik eingeschränkt sind. Jedoch ist wie zuvor erwähnt, die gewählte Breite in Bezug auf die Dichte des Systems sehr hoch. Die Agenten haben dort nur wenig Handlungsspielraum. Eine einzelne Simulation ist außerdem nicht aussagekräftig.

Um die Anwendungsmöglichkeiten von Mikromobilität auf die Evakuierungsdynamik besser zu untersuchen, sollte diese durch ein Modell beschrieben werden, dass die Trägheit von Fahrrädern und E-Scootern berücksichtigt. Des Weiteren müssen die

Parameter an die Mikromobilität angepasst werden. Das gilt sowohl für die Breite als auch für die Zeitlücke und Wunschgeschwindigkeit. Außerdem ist die Darstellung von E-Rollern als Scheibe nicht optimal. Diese sollten eher als Oval betrachtet werden. Die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen eignen sich aus den genannten Gründen nicht zur Anwendung auf die Mikromobilität.

## Literatur-/ Quellenverzeichnis

- M. Chraibi, A. Tordeux, A. Schadschneider, A. Seyfried. *Modelling of Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 2018.
- M. Boltes, J. Zhang, A. Tordeux, A. Schadschneider, A. Seyfried. *Empirical Results of Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 2018.
- A. Fujita, C. Feliciani, D. Yanagisawa, K. Nishinari. Traffic flow in a crowd of pedestrians walking at different speeds. *Physical review E* 99, 062307, 2019
- A. Tordeux, M. Chraibi, A. Seyfried. *Collision-free first order pedestrian model*, 2015
- T. F. Bitzer. *Mikroskopische Modellierung und Simulation des Fußgängerverkehrs*, 2010
- M. Campanella, S. Hoogendoorn, W. Daamen. *The Nomad Model: Theory, Developments and Applications*, 2014
- W. Eberhardt, G. Himbert. *Bewegungs-Geschwindigkeiten Versuchsergebnisse nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer*, 1977
- DIN 33402-2
- M. Treiber. *Verkehrsflussmodellierung von Fußgängern*, 2013
- J. Kupferschmid. *How to model pedestrians and cyclists interactions with out-of-the-box features of Vissim?*, 2016

# Anhang

Simulationsergebnisse:

Für alle nicht aufgeführten Parameter gelten die Ausgangswerte aus 2.3

## Legende:

**S=Simulation**      **I=Breite**      **t= Zeitlücke**      **V0=Wunschgeschwindigkeit**

**P=Personenzahl**      **X=Indikator I**      **Xs=Geschwindigkeit**

**V=Varianz (Indikator)**      **Vs=Varianz (Geschwindigkeit)**

- Indikator I für die Breite (1)

S	I1	X Typ 1	V Typ 1	X Typ 2	V Typ 2	X alle	V alle
1	0,05	0,99679022	4,30E-06	0,9848783	1,60E-04	0,99083426	1,18E-04
2	0,1	0,99503923	1,59E-05	0,96688003	5,64E-04	0,98095963	4,99E-04
3	0,15	0,99585921	4,74E-06	0,97644092	2,57E-04	0,98615006	2,33E-04
4	0,2	0,99483632	1,63E-05	0,9687879	6,30E-04	0,98181211	5,10E-04
5	0,25	0,99149313	2,48E-05	0,94370617	9,25E-04	0,96759965	0,00105896
6	0,3	0,99153076	2,87E-05	0,94058314	0,00104839	0,96605695	0,0012714
7	0,35	0,99040658	3,80E-05	0,94025968	0,00138951	0,96533313	0,00138356
8	0,4	0,98466189	1,27E-04	0,90082875	0,00496995	0,94274532	0,00436231
9	0,45	0,98190986	3,15E-04	0,90363713	0,00784125	0,94277349	0,00565549
10	0,5	0,98701967	9,72E-05	0,9409658	0,00120734	0,96399274	0,00119264
11	0,55	0,97449289	4,06E-04	0,88801807	0,00753808	0,93125548	0,00602674
12	0,6	0,96863007	5,92E-04	0,85887691	0,00543568	0,91375349	0,00607442
13	0,65	0,9664242	0,00167076	0,85150967	0,00753532	0,90896693	0,0082668
14	0,7	0,9518687	0,0021804	0,81366688	0,00760237	0,88276779	0,00983155
15	0,75	0,94562494	0,00189705	0,80462565	0,00827876	0,8751253	0,01032669
16	0,8	0,94305492	0,00324412	0,76908148	0,02571091	0,8560682	0,02199663

- Geschwindigkeit für die Breite (1)

S	I1	Xs Typ1	Vs Typ1	Xs Typ2	Vs Typ 2	Xs alle	Vs alle
1	0,05	1,9935976	1,70E-05	0,75418374	0,01330275	1,37389067	0,39633354
2	0,1	1,99004544	6,35E-05	0,75145089	0,00941845	1,37074816	0,39396396
3	0,15	1,99170344	1,93E-05	0,72880351	0,011898	1,36025347	0,41047835
4	0,2	1,98967265	6,53E-05	0,70903493	0,00425643	1,34935379	0,41818766
5	0,25	1,98298626	9,91E-05	0,69625111	0,00374287	1,33961869	0,42183834
6	0,3	1,98306697	1,15E-04	0,69092364	0,00996791	1,33699531	0,42866847
7	0,35	1,98081441	1,52E-04	0,6763897	0,00894817	1,32860206	0,43609739
8	0,4	1,96931682	5,07E-04	0,64109789	0,00721925	1,30520735	0,45129315
9	0,45	1,96382737	0,00125825	0,61246741	0,00602685	1,28814739	0,46678964
10	0,5	1,97404311	3,89E-04	0,57172769	0,00915063	1,2728854	0,50352824
11	0,55	1,94899649	0,00162271	0,57469084	0,00658021	1,26184366	0,48336187
12	0,6	1,93725823	0,00236906	0,52693133	0,00127953	1,23209478	0,50655571
13	0,65	1,9328484	0,00668303	0,52029996	0,0023725	1,22657418	0,51070476

14	0,7	1,90373812	0,00872165	0,50616561	0,00153695	1,20495187	0,50054383
15	0,75	1,89127126	0,00759133	0,46074509	0,00193187	1,17600818	0,52409654
16	0,8	1,88610983	0,01297646	0,42594904	0,00143298	1,15602944	0,54805934

- Indikator I für die Breite (2)

S	I2	X Typ 2	V Typ 2	X Typ 1	V Typ 1	X alle	V alle
1	0,05	0,97239498	4,66E-04	0,99493633	1,35E-05	0,98366566	3,73E-04
2	0,1	0,97409181	3,53E-04	0,99581531	9,60E-06	0,98495356	3,04E-04
3	0,15	0,96947407	8,51E-04	0,99508069	8,10E-06	0,98227738	5,92E-04
4	0,2	0,95136049	6,24E-04	0,99278097	1,86E-05	0,97207073	7,97E-04
5	0,25	0,94005497	0,00153021	0,99136737	2,84E-05	0,96571117	0,0014681
6	0,3	0,93155258	0,00322013	0,98970716	5,97E-05	0,96062987	0,00256727
7	0,35	0,93425848	0,0011275	0,98761159	9,16E-05	0,96093504	0,00141531
8	0,4	0,94190303	9,76E-04	0,98859715	6,02E-05	0,96525009	0,00106457
9	0,45	0,92139498	0,00441258	0,98526175	1,73E-04	0,95332837	0,00341425
10	0,5	0,9222614	0,00200806	0,98255137	1,25E-04	0,95240639	0,00200727
11	0,55	0,90083761	0,00387801	0,97426798	7,26E-04	0,9375528	0,00365716
12	0,6	0,89831128	0,00256949	0,97243003	8,72E-04	0,93537065	0,00320631
13	0,65	0,85887455	0,00282744	0,95307326	0,00235076	0,9059739	0,00484766
14	0,7	0,84995459	0,0039597	0,94755799	0,00373745	0,89875629	0,00630653
15	0,75	0,88318382	0,00292053	0,94601868	0,00465959	0,91460125	0,00475025
16	0,8	0,825946	0,00545138	0,91246588	0,00781459	0,86920594	0,00868658

- Geschwindigkeit für die Breite (2)

S	I2	Xs Typ2	Vs Typ2	Xs Typ1	Vs Typ 1	Xs alle	Vs alle
1	0,05	0,9644774	1,81E-04	1,99053931	3,70E-05	1,47750836	0,26713351
2	0,1	0,95020264	2,27E-04	1,99167265	3,78E-05	1,47093764	0,27526542
3	0,15	0,92195574	6,68E-04	1,9901684	3,24E-05	1,45606207	0,28975379
4	0,2	0,86413297	0,00122173	1,9855613	7,43E-05	1,42484713	0,31982162
5	0,25	0,8262394	0,00166305	1,98273454	1,14E-04	1,40448697	0,34015968
6	0,3	0,75761907	0,00426834	1,97940524	2,38E-04	1,36851216	0,38084327
7	0,35	0,70878009	0,00637171	1,97522036	3,66E-04	1,34200023	0,4101329
8	0,4	0,64571551	0,00330982	1,9771943	2,41E-04	1,3114549	0,45155217
9	0,45	0,58839934	0,00503245	1,97051063	6,93E-04	1,27945499	0,48744568
10	0,5	0,53924712	0,00373276	1,9651045	5,00E-04	1,25217581	0,51777763
11	0,55	0,50151244	0,00439653	1,94857617	0,00290527	1,22504431	0,53470856
12	0,6	0,43072046	0,00290926	1,94488655	0,00348654	1,18780351	0,58501214
13	0,65	0,39229539	0,00110664	1,9061606	0,00940533	1,149228	0,58660556
14	0,7	0,36008851	9,31E-04	1,89515885	0,01495482	1,12762368	0,60573534
15	0,75	0,30371125	0,0018876	1,89203034	0,01863737	1,09787079	0,65000168
16	0,8	0,28845493	8,35E-04	1,82492526	0,03126714	1,0566901	0,61526754

- Indikator I für die Zeitlücke (1)

S	t1	X Typ 1	V Typ 1	X Typ 2	V Typ 2	X alle	V alle
1	0,1	0,98709358	5,37E-05	0,92835957	0,0025536	0,95772658	0,00218104
2	0,2	0,98853969	5,60E-05	0,93808316	0,00301448	0,96331143	0,0021601
3	0,3	0,96091312	0,00121703	0,90714875	0,00185886	0,93403094	0,00225755
4	0,4	0,63982727	0,03309485	0,80015753	0,00592917	0,7199924	0,02583129
5	0,5	0,56291687	0,0720087	0,73598198	0,02073047	0,64944943	0,05358508

6	0,6	0,53549786	0,10868408	0,66109846	0,05226792	0,59829816	0,08333345
7	0,7	0,51391709	0,158978	0,62195661	0,09837063	0,56793685	0,12984949
8	0,8	0,45535592	0,18788374	0,5197578	0,13929336	0,48755686	0,16229927
9	0,9	0,45577591	0,21020718	0,49723073	0,1511636	0,47650332	0,17869056
10	1	0,54571474	0,20680208	0,57045822	0,15904417	0,55808648	0,18056153
11	1,1	0,49081943	0,21529967	0,50214766	0,17528495	0,49648355	0,19250263
12	1,2	0,46049122	0,20698599	0,49154517	0,1929285	0,47601819	0,19733335
13	1,3	0,51719768	0,21393686	0,54246212	0,1919125	0,5298299	0,20015101
14	1,4	0,49392139	0,22569932	0,5054101	0,19641366	0,49966575	0,2080631
15	1,5	0,44067391	0,20552915	0,45563649	0,19939001	0,4481552	0,19960672
16	1,6	0,43887122	0,2235377	0,44477988	0,19974562	0,44182555	0,20861991
17	1,7	0,44258689	0,22464991	0,46211236	0,20528413	0,45234962	0,21195798
18	1,8	0,48879527	0,21044672	0,49856118	0,19580528	0,49367823	0,20021521
19	1,9	0,50979661	0,21215073	0,50862041	0,19190469	0,50920851	0,19911946
20	2	0,46849296	0,21934481	0,49401702	0,22361701	0,48125499	0,21845478

- Geschwindigkeit für die Zeitlücke (1)

S	t1	Xs Typ1	Vs Typ1	Xs Typ2	Vs Typ 2	Xs alle	Vs alle
1	0,1	1,97418856	2,15E-04	0,62737975	0,00916819	1,30078415	0,46472907
2	0,2	1,97707355	2,24E-04	0,63390099	0,00228174	1,30548727	0,4588701
3	0,3	1,92924066	0,00298062	0,67149414	0,00194903	1,3003674	0,40388846
4	0,4	1,12900715	0,00661953	0,78275504	0,00380113	0,9558811	0,0362035
5	0,5	0,96287809	0,01122195	0,76957018	0,00386802	0,86622414	0,01718834
6	0,6	0,85150263	0,00571143	0,73079957	0,0048364	0,7911511	0,00892793
7	0,7	0,77957917	0,00559196	0,7054821	0,00632406	0,74253063	0,00729529
8	0,8	0,70329026	0,00564412	0,66071126	0,00483799	0,68200076	0,00567206
9	0,9	0,68919011	0,00925037	0,65421839	0,00585353	0,67170425	0,00838581
10	1	0,67724651	0,00588407	0,63751715	0,00474167	0,65738183	0,00569972
11	1,1	0,63621572	0,00248855	0,61396096	0,00235585	0,62508834	0,00251378
12	1,2	0,64110952	0,00328145	0,62988295	0,00360183	0,63549623	0,00350743
13	1,3	0,62548427	0,00219649	0,61313536	0,0021734	0,61930982	0,002204
14	1,4	0,60501532	0,00243354	0,59355029	0,00170457	0,59928281	0,00207507
15	1,5	0,60349285	0,00106772	0,59241601	8,25E-04	0,59795443	9,67E-04
16	1,6	0,58775196	0,00432236	0,57212774	0,00357076	0,57993985	0,00396144
17	1,7	0,54707894	0,00470071	0,5548206	0,0051902	0,55094977	0,00490042
18	1,8	0,56973195	0,00175821	0,5504669	0,00162734	0,56009943	0,00178951
19	1,9	0,54001787	0,00382619	0,54881123	0,00370504	0,54441455	0,00375739
20	2	0,55933844	0,01293746	0,53634254	0,00395426	0,54784049	0,00883798

- Indikator I für die Zeitlücke (2)

S	t2	X Typ 2	V Typ 2	X Typ 1	V Typ 1	X alle	V alle
1	0,1	0,99470606	7,50E-06	0,99198959	1,45E-05	0,99334782	1,29E-05
2	0,2	0,99546974	6,40E-06	0,99269297	1,90E-05	0,99408135	1,47E-05
3	0,3	0,99557906	4,81E-06	0,9930258	1,47E-05	0,99430243	1,15E-05
4	0,4	0,99508527	6,05E-06	0,99277954	2,74E-05	0,9939324	1,78E-05
5	0,5	0,99481977	1,16E-05	0,99224085	2,38E-05	0,99353031	1,98E-05
6	0,6	0,99500911	6,20E-06	0,99271231	8,11E-06	0,99386071	8,39E-06
7	0,7	0,99553102	9,49E-06	0,99435637	1,82E-05	0,99494369	1,40E-05
8	0,8	0,99467075	7,93E-06	0,99446913	1,25E-05	0,99456994	1,01E-05

9	0,9	0,99404454	1,66E-05	0,99441173	7,93E-06	0,99422813	1,22E-05
10	1	0,99313378	3,05E-05	0,99554669	7,49E-06	0,99434024	2,03E-05
11	1,1	0,98892274	6,21E-05	0,99325125	1,51E-05	0,991087	4,35E-05
12	1,2	0,98281441	1,54E-04	0,9921473	1,37E-05	0,98748086	1,07E-04
13	1,3	0,98362608	1,31E-04	0,99332814	1,72E-05	0,98847711	1,00E-04
14	1,4	0,97589468	3,62E-04	0,9925693	1,93E-05	0,98423199	2,59E-04
15	1,5	0,96871625	5,75E-04	0,99119703	3,50E-05	0,97995664	4,30E-04
16	1,6	0,9519995	0,0011454	0,98940652	2,01E-05	0,97070301	9,48E-04
17	1,7	0,93837518	0,00110017	0,98803997	5,37E-05	0,96320757	0,00121325
18	1,8	0,92183816	0,00256184	0,98615738	5,96E-05	0,95399777	0,00237809
19	1,9	0,92351673	0,00277633	0,98679753	7,57E-05	0,95515713	0,002442
20	2	0,92926199	0,00184465	0,98802123	1,03E-04	0,95864161	0,00191382

- Geschwindigkeit für die Zeitlücke (2)

S	t2	Xs Typ2	Vs Typ2	Xs Typ1	Vs Typ 1	Xs alle	Vs alle
1	0,1	0,99470606	7,50E-06	1,98397918	5,80E-05	1,48934262	0,24824484
2	0,2	0,99546974	6,40E-06	1,98539055	7,63E-05	1,49043015	0,2485788
3	0,3	0,99557864	4,81E-06	1,98605103	5,88E-05	1,49081484	0,24884564
4	0,4	0,99508301	6,06E-06	1,98555162	1,10E-04	1,49031732	0,24886881
5	0,5	0,99482321	1,11E-05	1,98446069	9,46E-05	1,48964195	0,24845023
6	0,6	0,99496864	6,39E-06	1,9854189	3,25E-05	1,49019377	0,24882141
7	0,7	0,99526191	1,07E-05	1,98871273	7,27E-05	1,49198732	0,25035338
8	0,8	0,99398145	1,25E-05	1,98893827	4,99E-05	1,49145986	0,25110238
9	0,9	0,99217762	2,03E-05	1,98882346	3,17E-05	1,49050054	0,25195029
10	1	0,99068553	3,23E-05	1,9910892	2,99E-05	1,49088736	0,25385868
11	1,1	0,98510146	5,20E-05	1,98650409	6,04E-05	1,48580278	0,25439581
12	1,2	0,97295868	1,30E-04	1,98427701	5,44E-05	1,47861785	0,25948822
13	1,3	0,92475702	0,00780393	1,98665832	6,88E-05	1,45570767	0,29016524
14	1,4	0,82081079	0,0077031	1,98513947	7,74E-05	1,40297513	0,34787074
15	1,5	0,79539855	0,00743474	1,98238253	1,40E-04	1,38889054	0,36118108
16	1,6	0,80706805	0,0036009	1,97878932	8,02E-05	1,39292869	0,35015276
17	1,7	0,74580107	0,00758295	1,97607993	2,15E-04	1,3609405	0,38772312
18	1,8	0,74523282	0,0108204	1,97231475	2,39E-04	1,35877379	0,38793734
19	1,9	0,65911407	0,00665388	1,97364085	3,02E-04	1,31637746	0,4417012
20	2	0,62259391	0,00399894	1,97604246	4,10E-04	1,29931819	0,46697572

- Indikator I für die Wunschgeschwindigkeit (1)

S	V01	X Typ 1	V Typ 1	X Typ 2	V Typ 2	X alle	V alle
1	0,1	0,98581145	1,22E-04	0,69683942	0,03101439	0,84132543	0,03664575
2	0,2	0,99519552	2,85E-05	0,55300201	0,17557753	0,77409876	0,13675475
3	0,3	0,99745643	1,22E-05	0,52624783	0,21606852	0,76185213	0,16307334
4	0,4	0,99788183	6,16E-06	0,50658624	0,20856585	0,75223404	0,16407428
5	0,5	0,99747213	1,22E-05	0,50507934	0,21044424	0,75127573	0,16605618
6	0,6	0,99764214	7,45E-06	0,52880565	0,1573664	0,7632239	0,13384384
7	0,7	0,99707572	7,76E-06	0,54742803	0,10104569	0,77225188	0,10145321
8	0,8	0,99489333	1,42E-05	0,60413817	0,05208035	0,79951575	0,06455113
9	0,9	0,99449857	1,03E-05	0,76066543	0,01674324	0,877582	0,02255
10	1	0,99246065	1,72E-05	0,85982784	0,00439367	0,92614424	0,00669017
11	1,1	0,99123263	1,97E-05	0,87092043	0,00309406	0,93107653	0,00532394

12	1,2	0,99013393	2,23E-05	0,8751044	0,00256406	0,93261917	0,00466786
13	1,3	0,98844036	6,00E-05	0,88778781	0,00297584	0,93811408	0,00411571
14	1,4	0,98864911	2,44E-05	0,89179361	0,00359923	0,94022136	0,00424537
15	1,5	0,98897539	5,11E-05	0,91473418	0,00216246	0,95185479	0,00253395
16	1,6	0,9860455	9,32E-05	0,90749101	0,00269185	0,94676826	0,00313224
17	1,7	0,98738059	5,10E-05	0,91030918	0,00235849	0,94884488	0,00274176
18	1,8	0,98584108	1,29E-04	0,91344038	0,00103741	0,94964073	0,00192935
19	1,9	0,9882038	6,54E-05	0,92724219	0,00127642	0,957723	0,00161597
20	2	0,98707676	4,73E-05	0,92836395	0,00197081	0,95772036	0,00200949
21	2,1	0,98627856	1,40E-04	0,92531773	0,00127409	0,95579815	0,00167059
22	2,2	0,98620895	1,13E-04	0,93356423	0,00206329	0,95988659	0,00178187
23	2,3	0,98496811	1,52E-04	0,92981051	7,17E-04	0,95738931	0,0012173
24	2,4	0,98589717	1,10E-04	0,92990452	0,00257901	0,95790084	0,00215808
25	2,5	0,98464513	1,67E-04	0,93195581	0,00137178	0,95830047	0,00146426
26	2,6	0,9867091	1,26E-04	0,93879031	0,00157646	0,96274971	0,00148967
27	2,7	0,98366827	1,31E-04	0,92466551	0,00671912	0,95416689	0,00435767
28	2,8	0,98523813	8,07E-05	0,92279939	0,00430663	0,95401876	0,00316366
29	2,9	0,98181768	4,93E-04	0,93751933	0,00243065	0,9596685	0,0019749
30	3	0,97583491	4,71E-04	0,94137278	0,00143414	0,95860385	0,00127676

- Geschwindigkeit für die Wunschgeschwindigkeit (1)

S	V01	Xs Typ1	Vs Typ1	Xs Typ2	Vs Typ 2	Xs alle	Vs alle
1	0,1	0,09858114	1,22E-06	0,27539894	0,00199655	0,18699004	0,00896916
2	0,2	0,1990391	1,14E-06	0,23273999	5,43E-04	0,21588955	5,59E-04
3	0,3	0,29923693	1,10E-06	0,31416419	2,37E-04	0,30670056	1,75E-04
4	0,4	0,39915273	9,85E-07	0,40982271	2,42E-04	0,40448772	1,51E-04
5	0,5	0,49873606	3,06E-06	0,5028247	1,83E-04	0,50078038	9,65E-05
6	0,6	0,59858529	2,68E-06	0,58993134	3,02E-04	0,59425831	1,69E-04
7	0,7	0,69795301	3,80E-06	0,65992823	0,00107322	0,67894062	9,03E-04
8	0,8	0,79591466	9,12E-06	0,69990067	0,00114567	0,74790766	0,00295362
9	0,9	0,89504871	8,37E-06	0,73240697	0,00301701	0,81372784	0,00821956
10	1	0,99246065	1,72E-05	0,75364979	0,00523462	0,87305522	0,01717447
11	1,1	1,09035589	2,39E-05	0,71397363	0,00363999	0,90216476	0,03804761
12	1,2	1,18816072	3,20E-05	0,71036201	0,00263614	0,94926136	0,05924878
13	1,3	1,28497246	1,01E-04	0,66593919	0,00423012	0,97545583	0,09944883
14	1,4	1,38410876	4,78E-05	0,66862093	0,00285466	1,02636484	0,13129196
15	1,5	1,48346309	1,15E-04	0,66314333	0,00198638	1,07330321	0,17171556
16	1,6	1,57767418	2,39E-04	0,65646606	0,00335971	1,11707012	0,2171223
17	1,7	1,67854383	1,47E-04	0,63815404	0,0040858	1,15834894	0,27666846
18	1,8	1,77452012	4,18E-04	0,64389131	0,00278202	1,20920571	0,3259662
19	1,9	1,87758823	2,36E-04	0,64874	0,00374903	1,26316411	0,38495747
20	2	1,9741554	1,89E-04	0,63494637	0,00732646	1,30455089	0,45869004
21	2,1	2,07118503	6,19E-04	0,65211771	0,00182839	1,36165137	0,51197502
22	2,2	2,16968059	5,45E-04	0,6232476	0,00725734	1,3964641	0,6104584
23	2,3	2,2653745	8,06E-04	0,65258625	0,00291803	1,45898038	0,6615921
24	2,4	2,36616686	6,34E-04	0,60706297	0,00613724	1,48661491	0,78827652
25	2,5	2,46162043	0,00104037	0,64163396	0,00629676	1,55162719	0,8437437
26	2,6	2,56551423	8,47E-04	0,61772567	0,00817109	1,59161995	0,96675151
27	2,7	2,65628199	9,23E-04	0,65362979	0,00827176	1,65495589	1,02187671

28	2,8	2,75921253	6,00E-04	0,63815724	0,00907257	1,69868488	1,14589453
29	2,9	2,8500495	0,0032043	0,61846338	0,00809034	1,73425644	1,2687144
30	3	2,93477412	0,00276424	0,63834462	0,00363279	1,78655937	1,34118007

- Indikator I für die Wunschgeschwindigkeit (2)

S	V02	X Typ 2	V Typ 2	X Typ 1	V Typ 1	X alle	V alle
1	0,1	0,98339067	1,33E-04	0,96589614	0,00141947	0,97464341	8,44E-04
2	0,2	0,98625297	1,16E-04	0,97002669	3,27E-04	0,97813983	3,11E-04
3	0,3	0,99111546	3,92E-05	0,98567015	1,62E-04	0,9883928	1,07E-04
4	0,4	0,98901733	4,63E-05	0,98207336	1,33E-04	0,98554535	1,04E-04
5	0,5	0,98666353	1,24E-04	0,98754704	4,74E-05	0,98710529	8,60E-05
6	0,6	0,98389612	1,77E-04	0,98981638	4,27E-05	0,98685625	1,18E-04
7	0,7	0,97410919	3,75E-04	0,98935683	3,73E-05	0,98173301	2,62E-04
8	0,8	0,94767013	0,00124998	0,98550728	6,08E-05	0,96658871	0,00101003
9	0,9	0,95001986	0,00214927	0,98867427	4,20E-05	0,96934706	0,00146407
10	1	0,92071335	0,00366207	0,98672545	1,63E-04	0,9537194	0,00299272
11	1,1	0,92386927	0,00302181	0,98807046	8,24E-05	0,95596986	0,00262318
12	1,2	0,88924617	0,00299854	0,98578454	1,21E-04	0,93751536	0,00423274
13	1,3	0,90746508	0,0032069	0,98848626	4,37E-05	0,94797567	0,00329566
14	1,4	0,89562421	0,0048158	0,98874831	4,25E-05	0,94218626	0,00470349
15	1,5	0,87623945	0,00563307	0,98741644	1,21E-04	0,93182795	0,00604887
16	1,6	0,84637928	0,00822881	0,98439724	1,10E-04	0,91538826	0,0091512
17	1,7	0,85257406	0,0046639	0,98529858	5,75E-05	0,91893632	0,00714912
18	1,8	0,88813888	0,01352433	0,98885874	1,23E-04	0,93849881	0,00945511
19	1,9	0,8580853	0,00402533	0,98546595	7,56E-05	0,92177562	0,00643136
20	2	0,89014765	0,00465043	0,98815218	5,45E-05	0,93914991	0,00484859
21	2,1	0,81843701	0,01427415	0,98294049	1,17E-04	0,90068875	0,01468295
22	2,2	0,85485572	0,0079086	0,98824364	6,38E-05	0,92154968	0,00850805
23	2,3	0,83181494	0,01569973	0,98436527	8,66E-05	0,9080901	0,01381417
24	2,4	0,83613394	0,01549119	0,98539973	1,76E-04	0,91076683	0,01363683
25	2,5	0,85268895	0,01687353	0,98672373	1,18E-04	0,91970634	0,01349596
26	2,6	0,82442333	0,01348882	0,98358245	1,50E-04	0,90400289	0,01319699
27	2,7	0,8560945	0,00828066	0,98592577	1,15E-04	0,92101013	0,00845768
28	2,8	0,80129141	0,01508247	0,98058678	3,06E-04	0,89093909	0,01594527
29	2,9	0,85156524	0,00779568	0,98587855	1,09E-04	0,9187219	0,0084921
30	3	0,81946076	0,01607095	0,98331164	9,20E-05	0,9013862	0,0151897

- Geschwindigkeit für die Wunschgeschwindigkeit (2)

S	V02	Xs Typ2	Vs Typ2	Xs Typ1	Vs Typ 1	Xs alle	Vs alle
1	0,1	0,09833907	1,33E-06	1,93180227	0,00567821	1,01507067	0,85541351
2	0,2	0,1972509	4,64E-06	1,93995438	0,00129855	1,06860264	0,77105211
3	0,3	0,2973107	3,56E-06	1,97133893	6,48E-04	1,13432482	0,7110715
4	0,4	0,3950728	9,44E-06	1,96413602	5,30E-04	1,17960441	0,62472259
5	0,5	0,49015737	3,76E-05	1,97509542	1,90E-04	1,23262639	0,5593637
6	0,6	0,58373983	6,74E-05	1,97962819	1,71E-04	1,28168401	0,49430505
7	0,7	0,59213823	0,00276418	1,97869231	1,49E-04	1,28541527	0,48917032
8	0,8	0,629167	0,00225621	1,97103452	2,42E-04	1,30010076	0,45803398
9	0,9	0,62863958	0,00376809	1,97734796	1,68E-04	1,30299377	0,46352479
10	1	0,63788858	0,00557226	1,97344951	6,51E-04	1,30566904	0,45552243

11	1,1	0,66311473	0,00480151	1,97614091	3,29E-04	1,31962782	0,43982023
12	1,2	0,66809775	0,00311784	1,97157225	4,84E-04	1,319835	0,43279448
13	1,3	0,63930572	0,00479488	1,97697015	1,75E-04	1,30813793	0,45628843
14	1,4	0,63448249	0,00454909	1,97748616	1,70E-04	1,30598433	0,46009418
15	1,5	0,65583803	0,00566419	1,97482735	4,86E-04	1,31533269	0,44426944
16	1,6	0,66798708	0,01050111	1,96879723	4,38E-04	1,31839216	0,43457747
17	1,7	0,66205476	0,00495244	1,97058804	2,30E-04	1,3163214	0,4372245
18	1,8	0,66965431	0,01031695	1,97771747	4,93E-04	1,32368589	0,4394756
19	1,9	0,67546466	0,006064	1,97092719	3,02E-04	1,32319592	0,42912648
20	2	0,64477501	0,00459078	1,97629951	2,18E-04	1,31053726	0,45211935
21	2,1	0,68215972	0,00460586	1,96587379	4,69E-04	1,32401676	0,42075421
22	2,2	0,68326096	0,00675227	1,97648462	2,55E-04	1,32987279	0,42765803
23	2,3	0,66871588	0,00665099	1,96873471	3,46E-04	1,3187253	0,43220912
24	2,4	0,67926586	0,00772289	1,97080211	7,02E-04	1,32503398	0,42725475
25	2,5	0,64727178	0,01101173	1,97344511	4,73E-04	1,31035844	0,45190331
26	2,6	0,68557025	0,0060608	1,96716434	6,00E-04	1,3263673	0,41986372
27	2,7	0,66183758	0,00655701	1,97185915	4,59E-04	1,31684836	0,43873389
28	2,8	0,69031201	0,00377336	1,96116662	0,00122628	1,32573931	0,41220257
29	2,9	0,6842373	0,01145141	1,97175711	4,36E-04	1,3279972	0,42641269
30	3	0,68285769	0,00695946	1,96659304	3,69E-04	1,32472537	0,42162905

- Indikator I für die Dichte (1)

S	P	Density	X Typ 1	V Typ 1	X Typ 2	V Typ 2	X alle	V alle
1	10	0,12987	0,999728	1,64E-07	0,999925	1,65E-08	0,999827	9,36E-08
2	20	0,25974	0,998244	1,57E-06	0,997651	1,03E-05	0,997947	5,74E-06
3	30	0,38961	0,998056	1,74E-06	0,993014	5,87E-05	0,995535	3,60E-05
4	40	0,519481	0,996107	4,04E-06	0,982743	4,98E-04	0,989425	2,95E-04
5	50	0,649351	0,993927	1,19E-05	0,965334	5,69E-04	0,979631	4,99E-04
6	60	0,779221	0,991225	4,96E-05	0,949689	0,001108	0,970457	0,001203
7	70	0,909091	0,987562	6,33E-05	0,929508	0,001912	0,958535	0,001873
8	80	1,038961	0,980929	1,36E-04	0,897271	0,004668	0,9391	0,004162
9	90	1,168831	0,970111	4,61E-04	0,873633	0,003541	0,921872	0,004403
10	100	1,298701	0,962564	0,001881	0,861941	0,005621	0,912252	0,006416
11	110	1,428571	0,949043	0,002349	0,832725	0,006198	0,890884	0,007718
12	120	1,558442	0,903637	0,00763	0,75273	0,012918	0,828184	0,016178
13	130	1,688312	0,904009	0,004954	0,759158	0,006012	0,831583	0,010734
14	140	1,818182	0,851863	0,009054	0,701703	0,014162	0,776783	0,017243
15	150	1,948052	0,828723	0,00699	0,675207	0,012394	0,751965	0,01558
16	160	2,077922	0,814992	0,010235	0,693657	0,017835	0,754324	0,017695
17	170	2,207792	0,763152	0,008712	0,634992	0,018644	0,699072	0,017734
18	180	2,337662	0,756204	0,016973	0,642327	0,020771	0,699266	0,022038
19	190	2,467532	0,702987	0,013243	0,607164	0,022056	0,655076	0,019872
20	200	2,597403	0,637773	0,011758	0,572488	0,020679	0,605131	0,017212
21	210	2,727273	0,612262	0,010407	0,569716	0,023658	0,590989	0,017528
22	220	2,857143	0,578276	0,013289	0,5572	0,028062	0,567738	0,020725
23	230	2,987013	0,544844	0,017727	0,544241	0,031907	0,544542	0,024727
24	240	3,116883	0,5083	0,011304	0,547649	0,032152	0,527974	0,022032
25	250	3,246753	0,447429	0,013723	0,531539	0,032391	0,489484	0,024843
26	260	3,376623	0,417133	0,015575	0,526741	0,033335	0,471937	0,027422

27	270	3,506494	0,330401	0,012681	0,495866	0,031783	0,413134	0,029089
28	280	3,636364	0,340197	0,01239	0,524846	0,041224	0,432521	0,035304
29	290	3,766234	0,263656	0,011042	0,506418	0,039872	0,385037	0,040187
30	300	3,896104	0,193348	0,006125	0,487668	0,040434	0,340508	0,044933

- Geschwindigkeit für die Dichte (1)

S	P	Density	Xs Typ1	Vs Typ1	Xs Typ2	Vs Typ 2	Xs alle	Vs alle
1	10	0,12987	1,999457	6,58E-07	0,998552	8,19E-06	1,499004	0,278286
2	20	0,25974	1,996489	6,28E-06	0,996897	1,19E-05	1,496693	0,262952
3	30	0,38961	1,996112	6,96E-06	0,947091	0,004132	1,471602	0,28683
4	40	0,519481	1,992214	1,62E-05	0,916737	0,005982	1,454475	0,299766
5	50	0,649351	1,987854	4,77E-05	0,812277	0,007284	1,400066	0,356205
6	60	0,779221	1,982444	1,98E-04	0,75339	0,00598	1,367917	0,38719
7	70	0,909091	1,97511	2,54E-04	0,628405	0,008674	1,301757	0,464443
8	80	1,038961	1,961847	5,43E-04	0,553424	0,003192	1,257636	0,504219
9	90	1,168831	1,940214	0,001844	0,490774	8,47E-04	1,215494	0,532668
10	100	1,298701	1,925199	0,007528	0,426308	0,001079	1,175754	0,571744
11	110	1,428571	1,898069	0,009395	0,371678	6,15E-04	1,134873	0,592957
12	120	1,558442	1,807254	0,030514	0,348957	4,65E-04	1,078105	0,551798
13	130	1,688312	1,807969	0,019809	0,304805	5,31E-04	1,056387	0,579474
14	140	1,818182	1,703552	0,036166	0,280378	3,71E-04	0,991965	0,528525
15	150	1,948052	1,657368	0,027957	0,250392	2,70E-04	0,95388	0,512771
16	160	2,077922	1,629975	0,040922	0,226695	3,45E-04	0,928335	0,516706
17	170	2,207792	1,526327	0,034876	0,207204	1,76E-04	0,866766	0,455043
18	180	2,337662	1,512466	0,067889	0,185736	1,60E-04	0,849101	0,47657
19	190	2,467532	1,4059	0,052904	0,168776	1,52E-04	0,787338	0,411368
20	200	2,597403	1,275722	0,04705	0,155695	1,32E-04	0,715708	0,338987
21	210	2,727273	1,224524	0,041627	0,142162	1,16E-04	0,683343	0,317021
22	220	2,857143	1,156158	0,053253	0,129585	9,50E-05	0,642871	0,291853
23	230	2,987013	1,089506	0,070706	0,117838	7,64E-05	0,603672	0,272376
24	240	3,116883	1,016183	0,045146	0,107958	6,84E-05	0,562071	0,229909
25	250	3,246753	0,894117	0,054609	0,099379	8,25E-05	0,496748	0,186254
26	260	3,376623	0,833799	0,061972	0,090894	7,04E-05	0,462347	0,169634
27	270	3,506494	0,660112	0,050322	0,085075	5,12E-05	0,372594	0,108508
28	280	3,636364	0,678503	0,049456	0,077061	6,07E-05	0,377782	0,115945
29	290	3,766234	0,525996	0,042853	0,071107	7,41E-05	0,298552	0,074288
30	300	3,896104	0,38388	0,024203	0,065644	4,91E-05	0,224762	0,037635

- Indikator I für die Dichte (2)

S	P	Density	X Typ 1	V Typ 1	X Typ 2	V Typ 2	X alle	V alle
1	10	0,12987013	0,9993856	1,10E-06	0,99977161	8,64E-08	0,9995786	5,83E-07
2	20	0,25974026	0,99901332	1,13E-06	0,99947205	3,15E-07	0,99924269	7,45E-07
3	30	0,38961039	0,99734107	5,06E-06	0,9982697	2,08E-06	0,99780538	3,68E-06
4	40	0,51948052	0,99683666	3,34E-06	0,99742187	3,79E-06	0,99712926	3,57E-06
5	50	0,64935065	0,99549955	8,46E-06	0,99652038	5,20E-06	0,99600997	7,22E-06
6	60	0,77922078	0,99379927	7,96E-06	0,99517761	5,88E-06	0,99448844	7,60E-06
7	70	0,90909091	0,99314333	1,77E-05	0,99556092	5,45E-06	0,99435213	1,29E-05
8	80	1,03896104	0,98945588	2,88E-05	0,99360054	6,57E-06	0,99152821	2,22E-05
9	90	1,16883117	0,98900751	3,01E-05	0,99321197	9,90E-06	0,99110974	2,45E-05

10	100	1,2987013	0,98454863	9,23E-05	0,99129142	1,72E-05	0,98792002	6,87E-05
11	110	1,42857143	0,98546365	2,06E-04	0,99280274	1,27E-05	0,98913319	1,26E-04
12	120	1,55844156	0,98307631	6,80E-05	0,98994846	1,73E-05	0,98651238	5,60E-05
13	130	1,68831169	0,97944915	8,44E-05	0,98917195	1,33E-05	0,98431055	7,77E-05
14	140	1,81818182	0,97608132	1,73E-04	0,98676375	1,65E-05	0,98142253	1,26E-04
15	150	1,94805195	0,97751597	4,92E-04	0,98958438	1,98E-05	0,98355018	3,00E-04
16	160	2,07792208	0,96065512	0,00120158	0,9878567	2,56E-05	0,97425591	8,72E-04
17	170	2,20779221	0,96045743	0,00105979	0,98535341	2,73E-05	0,97290542	7,36E-04
18	180	2,33766234	0,96586879	0,00177607	0,98557106	1,90E-05	0,97571992	9,99E-04
19	190	2,46753247	0,95999813	0,00112278	0,98668606	2,62E-05	0,97334209	7,56E-04
20	200	2,5974026	0,95025959	0,00178333	0,98580803	2,33E-05	0,96803381	0,00122281
21	210	2,72727273	0,95257914	0,00134216	0,98471047	3,77E-05	0,9686448	9,70E-04
22	220	2,85714286	0,93853851	0,00205721	0,98057806	2,77E-05	0,95955829	0,00149242
23	230	2,98701299	0,93643835	0,00136874	0,97937667	3,32E-05	0,95790751	0,00117279
24	240	3,11688312	0,91780088	0,00251085	0,97719342	3,67E-05	0,94749715	0,00218522
25	250	3,24675325	0,90102503	0,00333718	0,97309544	3,65E-05	0,93706023	0,00298571
26	260	3,37662338	0,89224159	0,00366087	0,97025754	4,93E-05	0,93124957	0,00337721
27	270	3,50649351	0,87866308	0,00387613	0,96525225	5,65E-05	0,92195766	0,0039239
28	280	3,63636364	0,80540789	0,00298257	0,94809553	1,03E-04	0,87675171	0,0066468
29	290	3,76623377	0,75255229	0,0023932	0,93175674	1,73E-04	0,84215451	0,0093465
30	300	3,8961039	0,69778554	0,00278643	0,91101466	2,86E-04	0,8044001	0,01295616

- Wunschgeschwindigkeit für die Dichte (2)

S	P	Density	Xs Typ1	Vs Typ1	Xs Typ2	Vs Typ 2	Xs alle	Vs alle
1	10	0,12987013	1,99877119	4,39E-06	0,99977161	8,64E-08	1,4992714	0,27722434
2	20	0,25974026	1,99802664	4,51E-06	0,99947205	3,15E-07	1,49874935	0,26240003
3	30	0,38961039	1,99468214	2,02E-05	0,99826891	2,08E-06	1,49647553	0,25677978
4	40	0,51948052	1,99367331	1,33E-05	0,99742193	3,79E-06	1,49554762	0,25450002
5	50	0,64935065	1,99099909	3,38E-05	0,99651879	5,20E-06	1,49375894	0,25231347
6	60	0,77922078	1,98759854	3,18E-05	0,99518278	5,90E-06	1,49139066	0,25041582
7	70	0,90909091	1,98628477	7,09E-05	0,99555366	5,45E-06	1,49091922	0,24898115
8	80	1,03896104	1,97891207	1,15E-04	0,99360427	6,49E-06	1,48625817	0,24584135
9	90	1,16883117	1,97799797	1,20E-04	0,99319162	9,89E-06	1,48559479	0,24525041
10	100	1,2987013	1,96911548	3,69E-04	0,99129277	1,72E-05	1,48020412	0,24165068
11	110	1,42857143	1,97092726	8,26E-04	0,99279945	1,26E-05	1,48186336	0,2418114
12	120	1,55844156	1,96613284	2,73E-04	0,98993178	1,75E-05	1,47803231	0,24039393
13	130	1,68831169	1,95888909	3,38E-04	0,98914349	1,32E-05	1,47401629	0,23712276
14	140	1,81818182	1,95216268	6,90E-04	0,98670838	1,65E-05	1,46943553	0,23507006
15	150	1,94805195	1,95500794	0,00196857	0,98951141	2,01E-05	1,47225968	0,23563514
16	160	2,07792208	1,92131317	0,00480663	0,98775292	2,60E-05	1,45453305	0,22194296
17	170	2,20779221	1,92089306	0,00424106	0,98522703	2,74E-05	1,45306004	0,22242051
18	180	2,33766234	1,93177358	0,00710233	0,98548005	1,85E-05	1,45862681	0,22868848
19	190	2,46753247	1,91998753	0,00448844	0,986534	2,59E-05	1,45326076	0,22126049
20	200	2,5974026	1,90049484	0,00714144	0,98560725	2,37E-05	1,44305105	0,21388828
21	210	2,72727273	1,90510834	0,00537036	0,98422543	3,88E-05	1,44466689	0,2158111
22	220	2,85714286	1,87700346	0,0082278	0,97957086	2,95E-05	1,42828716	0,20641041
23	230	2,98701299	1,87288925	0,00548821	0,97808865	3,53E-05	1,42548895	0,20383171
24	240	3,11688312	1,8355662	0,01003772	0,97461892	4,13E-05	1,40509256	0,19121076
25	250	3,24675325	1,80193548	0,01335661	0,96806848	4,38E-05	1,38500198	0,18122418

26	260	3,37662338	1,78449351	0,0146511	0,96158473	6,41E-05	1,37303912	0,17729168
27	270	3,50649351	1,75721239	0,01550204	0,95065484	6,53E-05	1,35393362	0,17141965
28	280	3,63636364	1,61075653	0,01192116	0,91789775	1,09E-04	1,26432714	0,12644016
29	290	3,76623377	1,50511997	0,00957204	0,88412613	1,11E-04	1,19462305	0,10162203
30	300	3,8961039	1,39521377	0,01114926	0,83520324	2,45E-04	1,1152085	0,08445727