

<b>Analyse senden an:</b>	email@rimea.de
<b>Betreff:</b>	Analyse

<b>Absender:</b>	
Name:	Angelika Kneidl
Unternehmen:	accu:rate GmbH
Adresse:	Rosental 5
Land, PLZ, Ort:	Deutschland, 80331 München
URL:	www.accu-rate.de
E - Mail:	info@accu-rate.de
Datum:	02.03.2016

<b>Softwaredaten</b>	
Programmname:	crowd:it
Hersteller:	
Version:	

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Überprüfung der Komponenten</b>	<b>5</b>
2.1	Test 1 – Beibehalten der vorgegebenen Geschwindigkeit in einem Gang . . . . .	5
2.1.1	Testvorschrift . . . . .	5
2.1.2	Modell . . . . .	5
2.1.3	Dokumentation . . . . .	5
2.2	Test 2 – Beibehalten der vorgegebenen Geschwindigkeit treppauf .	7
2.2.1	Testvorschrift . . . . .	7
2.2.2	Modell . . . . .	7
2.2.3	Dokumentation . . . . .	8
2.3	Test 3 – Beibehalten der vorgegebenen Geschwindigkeit treppab .	11
2.3.1	Testvorschrift . . . . .	11
2.3.2	Modell . . . . .	11
2.3.3	Dokumentation . . . . .	11
2.4	Test 4 – Messung des Fundamentaldiagramms . . . . .	13
2.4.1	Testvorschrift . . . . .	13
2.4.2	Modell . . . . .	13
2.4.3	Dokumentation . . . . .	14
2.5	Test 5 – Reaktionszeiten . . . . .	17
2.5.1	Testvorschrift . . . . .	17
2.5.2	Modell . . . . .	17
2.5.3	Dokumentation . . . . .	18
2.6	Test 6 – Bewegung um eine Ecke . . . . .	19
2.6.1	Testvorschrift . . . . .	19
2.6.2	Modell . . . . .	19
2.6.3	Dokumentation . . . . .	20
2.7	Test 7 – Zuordnung der demographischen Parameter . . . . .	21
2.7.1	Testvorschrift . . . . .	21
2.7.2	Modell . . . . .	21
2.7.3	Dokumentation . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Funktionale Verifizierung</b>	<b>24</b>
3.1	Test 8 – Parameteranalyse . . . . .	24
3.1.1	Testvorschrift . . . . .	24
3.1.2	Modell . . . . .	24
3.1.3	Dokumentation . . . . .	24

<b>4</b>	<b>Qualitative Verifizierung</b>	<b>27</b>
4.1	Test 9 – Eine Menschenmenge verlässt einen großen öffentlichen Raum . . . . .	27
4.1.1	Testvorschrift . . . . .	27
4.1.2	Modell . . . . .	27
4.1.3	Dokumentation . . . . .	27
4.2	Test 10 – Zuweisung von Rettungswegen . . . . .	29
4.2.1	Testvorschrift . . . . .	29
4.2.2	Modell . . . . .	29
4.2.3	Dokumentation . . . . .	29
4.3	Test 11 – Wahl des Rettungsweges . . . . .	31
4.3.1	Testvorschrift . . . . .	31
4.3.2	Modell . . . . .	31
4.3.3	Dokumentation . . . . .	32
4.4	Test 12 – Auswirkung von Engstellen . . . . .	33
4.4.1	Testvorschrift . . . . .	33
4.4.2	Modell . . . . .	33
4.4.3	Dokumentation . . . . .	34
4.5	Test 13 – Stau vor einer Treppe . . . . .	35
4.5.1	Testvorschrift . . . . .	35
4.5.2	Modell . . . . .	35
4.5.3	Dokumentation . . . . .	36
4.6	Test 14 – Routenwahl . . . . .	38
4.6.1	Testvorschrift . . . . .	38
4.6.2	Modell . . . . .	38
4.6.3	Dokumentation . . . . .	38
4.7	Test 15 – Bewegung einer großen Menge Fußgänger um eine Ecke . . . . .	41
4.7.1	Testvorschrift . . . . .	41
4.7.2	Modell . . . . .	41
4.7.3	Dokumentation . . . . .	42

# **1 Einleitung**

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Analyse durch das im Kopf aufgeführte Unternehmen mit dem im Kopf vermerkten Simulationsprogramm, zusammengefasst. Die durchgeführten Testfälle sind in der durch das RiMEA-Projekt entwickelten *Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen* [1] erläutert.

## 2 Überprüfung der Komponenten

### 2.1 Test 1 – Beibehalten der vorgegebenen Geschwindigkeit in einem Gang

#### 2.1.1 Testvorschrift

Nachzuweisen ist, dass eine Person mit einer definierten Gehgeschwindigkeit einen Gang in einer entsprechenden Dauer durchquert [1].

Parameter	Wert
Ganglänge [m]	40
Gangbreite [m]	2
Anzahl der Durchläufe	100
Gehgeschwindigkeit [km/h]	4.5 – 5.1
Reisezeit [s]	26 – 34

Tabelle 1: Testvorgaben [1]

#### 2.1.2 Modell

Der Gang sowie die Gehgeschwindigkeit wurden nach den Vorgaben (siehe Tabelle 1) modelliert. Es wurde pro Simulationslauf eine Person generiert, um keine Seiteneffekte bezüglich Abbremsverhalten und Dichte zu erhalten.

#### 2.1.3 Dokumentation

Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, erreicht die Person in jedem der 100 Simulationsläufe fast die vorgegebene Geschwindigkeit und überschreitet diese insbesondere kein einziges Mal. In Abbildung 2 ist außerdem zu sehen, dass die Reisezeit dabei im vorgegebenen Rahmen bleibt.

Der Test verifiziert, dass Personen mit vorgegebenen Geschwindigkeiten im Simulator auch mit passenden Geschwindigkeiten simuliert werden können.

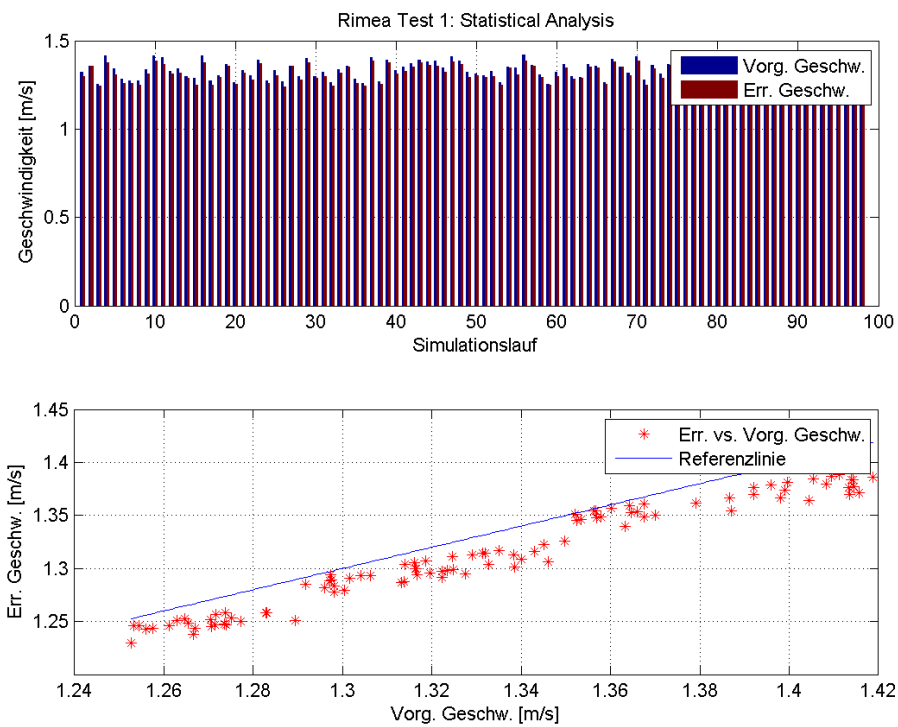


Abbildung 1: Vergleich zwischen vorgegebener und erreichter Geschwindigkeit des Fußgängers

	min	max	mean
predetermined Travel Time [s]	26	34	
Travel Time [s]	29.21	33.06	31.21

Abbildung 2: Reisezeit

## 2.2 Test 2 – Beibehalten der vorgegebenen Geschwindigkeit treppauf

### 2.2.1 Testvorschrift

Nachzuweisen ist, dass eine Person mit einer definierten Gehgeschwindigkeit eine Treppe in einer entsprechenden Dauer hinauf geht. [1]

Parameter	Wert
Treppenlänge (gemessen entlang der Schräge) [m]	10
Treppenbreite [m]	2
Anzahl der Durchläufe	100
Gehgeschwindigkeit [km/h]	4.5 – 5.1

Tabelle 2: Testvorgaben [1]

### 2.2.2 Modell

Treppen werden in crowd:it nach [2] modelliert. Daher wurden unterschiedliche Tests durchgeführt; zum einen mit einem Abbremsfaktor, zum anderen unter Verwendung des Treppenmodells.

Parameter	Wert
Abbremsfaktor	0.7

Tabelle 3: Werte für Modelldurchführung mit Abbremsfaktor

Parameter	Wert
Treppentiefe [m]	0.27
Stufenanzahl	32

Tabelle 4: Werte für Modelldurchführung mit Treppenmodell

### 2.2.3 Dokumentation

Zunächst betrachten wir das Modell mit Abbremsfaktor.

Abbildung 3 zeigt die Werte der minimalen, maximalen und mittleren zugewiesenen Gehgeschwindigkeit mit korrespondierenden Geschwindigkeiten in der Simulation. Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, wird die Person in jedem der 100 Simulationsläufe fast auf die passende Geschwindigkeit, die bei  $0.7 \times$  Gehgeschwindigkeit in der Ebene liegt, abgebremst.

	min	max	mean
Free flow velocity [m/s]	1.25	1.42	1.32
Slowed down velocity [m/s]	0.84	0.96	0.89
Factor	0.67	0.68	0.67
Travel time [s]	11.02	12.67	12.01

Abbildung 3: Vergleich von Geschwindigkeit in der Ebene mit Abbremsfaktor

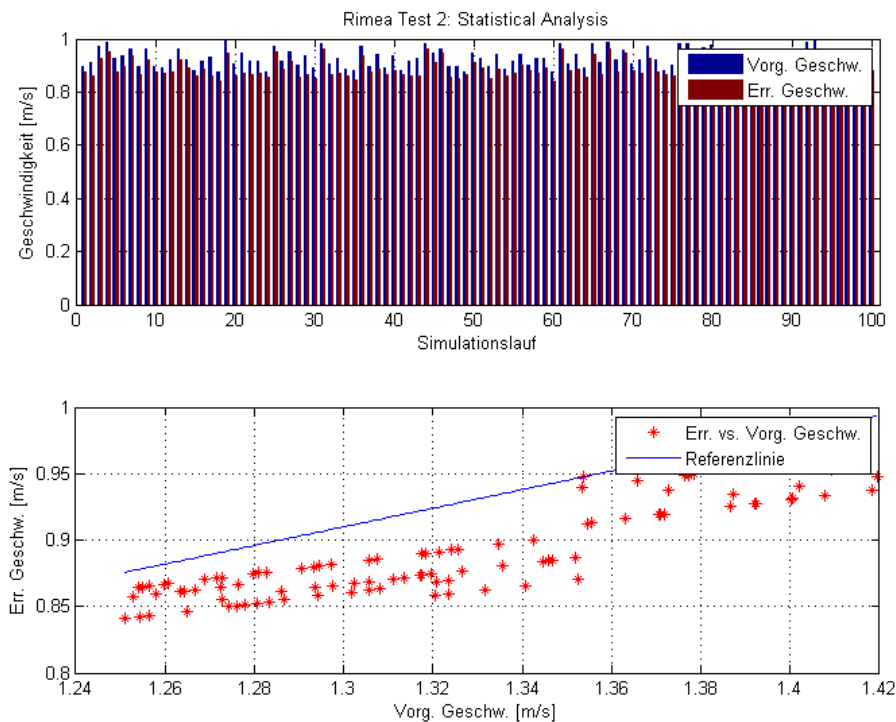


Abbildung 4: Vergleich von Geschwindigkeit in der Ebene mit Abbremsfaktor



Auch das implementierte Treppenmodell liefert Abbremsverhalten auf den Treppen. In dem Treppenmodell werden schnellere Personen stärker abgebremst als langsamere Personen. Mit einer Stufentiefe von 27 cm werden die Personen auf ca. 0.4 bis 0.6 m/s abgebremst siehe Abbildung 5.

Der Test verifiziert, dass Personen in crowd:it entsprechend der vorgegebenen Abbremsfaktoren abgebildet werden können.

	min	max	mean
Free flow velocity [m/s]	1.25	1.41	1.33
Slowed down velocity [m/s]	0.47	0.5	0.48
Factor	0.38	0.35	0.36
Travel Time [s]	21.49	22.59	21.97

Abbildung 5: Geschwindigkeit und Reisezeit mit Treppenmodell

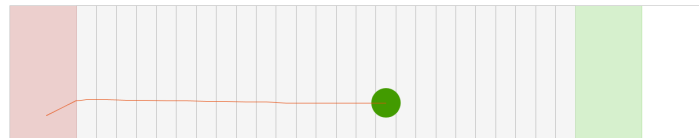


Abbildung 6: Szenario mit Treppe

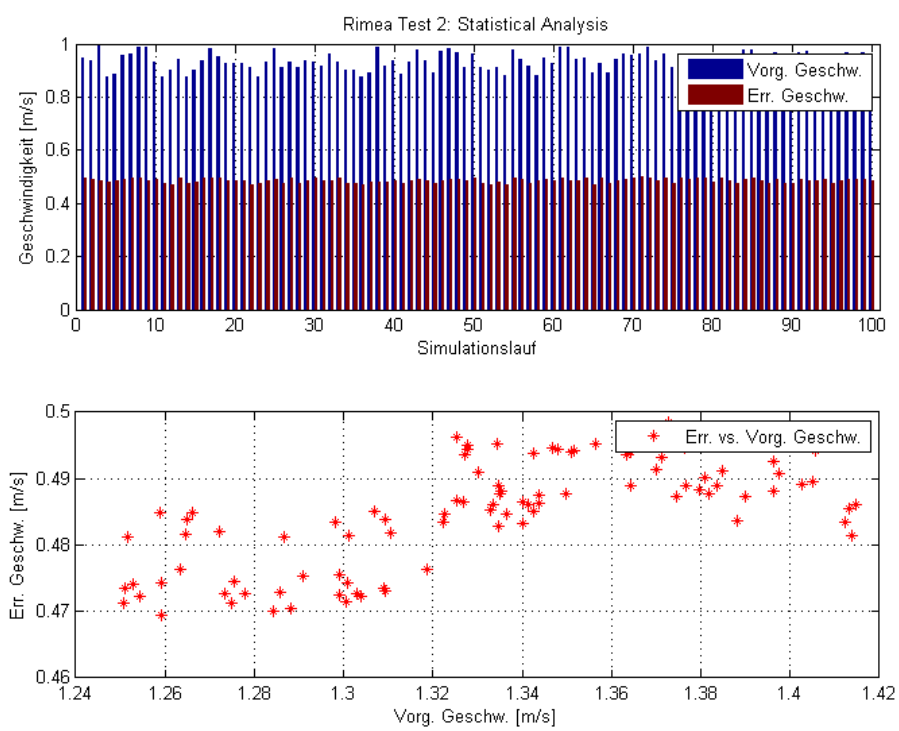


Abbildung 7: Vergleich von Geschwindigkeit in der Ebene und unter Verwendung des Treppenmodells

## 2.3 Test 3 – Beibehalten der vorgegebenen Geschwindigkeit treppab

### 2.3.1 Testvorschrift

Nachzuweisen ist, dass eine Person mit einer definierten Gehgeschwindigkeit eine Treppe in einer entsprechenden Dauer hinab geht [1].

Parameter	Wert
Treppenlänge (gemessen entlang der Schräge) [m]	10
Treppenbreite [m]	2
Anzahl der Durchläufe	100
Gehgeschwindigkeit [km/h]	4.5 – 5.1

Tabelle 5: Testvorgaben [1]

### 2.3.2 Modell

Wie bei Test 2 beschrieben, werden in crowd:it Treppen nach dem Modell aus [2] modelliert. Um zu demonstrieren, dass Personen auch um den Faktor 0.6 abgebremst werden können, wird der Test mittels eine Fläche modelliert, auf der die Personen entsprechend abgebremst werden, sobald sie diese Fläche betreten.

### 2.3.3 Dokumentation

Abbildung 8 zeigt die Werte der minimalen, maximalen und mittleren zugewiesenen Gehgeschwindigkeit mit korrespondierenden Geschwindigkeiten in der Simulation.

	min	max	mean
Free flow velocity [m/s]	0.71	1.61	1.2
Slowed down velocity [m/s]	0.42	0.95	0.7
Factor	0.59	0.59	0.58
Travel time [s]	11.59	26.34	15.91

Abbildung 8: Vergleich von vorgegebener und erreichter Geschwindigkeit des Fußgängers

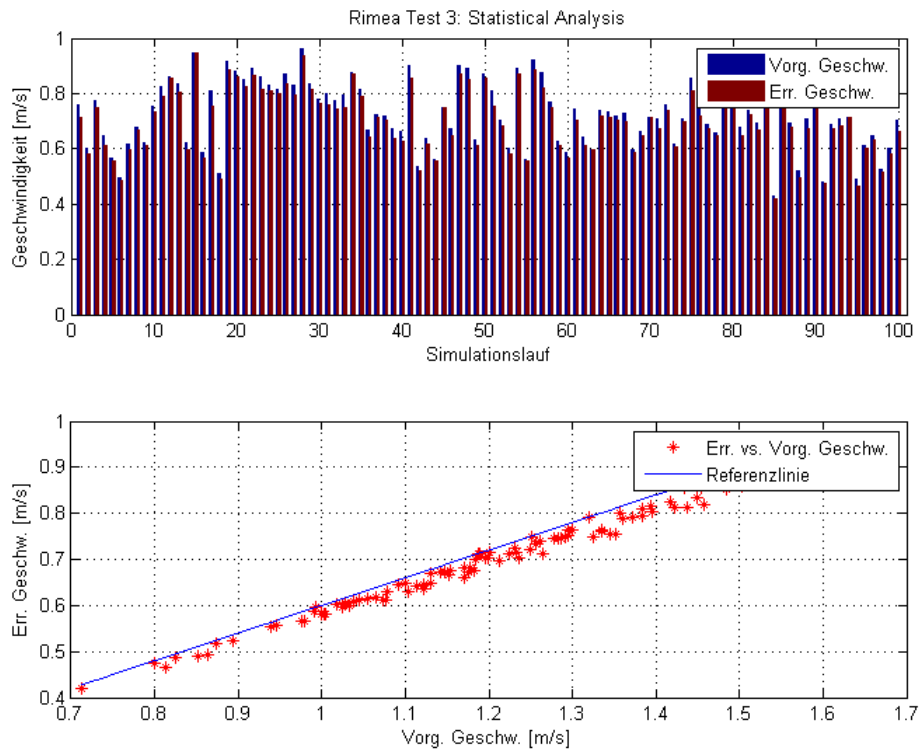


Abbildung 9: Vergleich zwischen vorgegebener und erreichter Geschwindigkeit des Fußgängers

Wie in Abbildung 9 zu erkennen ist, wird die Person in jedem der 100 Simulationsläufe auf die Geschwindigkeit  $0.6 \times$  Gehgeschwindigkeit in der Ebene, abgebremst.

Der Test verifiziert, dass Personen im Simulator auch mit Abbremsfaktoren simuliert werden können.

## 2.4 Test 4 – Messung des Fundamentaldiagramms

### 2.4.1 Testvorschrift

Zu zeigen ist, wie sich die mittlere Geschwindigkeit einer Personengruppe in einem Korridor verändert, wenn die Personendichte verändert wird. Dafür soll der Korridor mit unterschiedlichen Personendichten gefüllt werden. Dies soll anhand des Fundamentaldiagramms dargestellt werden. Die mittlere Geschwindigkeit soll an einer Messkachel in der Mitte des Korridor gemessen werden.

Parameter	Wert
Korridorlänge [m]	1000
Korridorbreite [m]	10
Größe der Messkachel [m × m]	2 × 2
Messdauer [s]	60
Personendichten [Pers/m <sup>2</sup> ]	0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6

Tabelle 6: Testvorgaben [1]

### 2.4.2 Modell

Der Korridor wurde etwas länger gewählt und ein Ziel am Ende eingerichtet. Die vorgegebenen Messungen, also Geschwindigkeit in Richtung des Korridors (x-Richtung), absolute Geschwindigkeit (x- und y-Richtung) und Fluss durch den Korridor wurden alle gemessen.

Berechnung des Flusses durch:

$$\Phi = v_x \times \text{Personendichte}$$

Die Dichte wird mit Hilfe von Voronoikacheln berechnet, wie in [3] beschrieben. Im Bereich zwischen 495 und 505 m werden über die gesamte Breite die Voronoiflächen berechnet, die exakte Dichteberechnung findet in Bereich zwischen 499 und 501 m in der Länge und von 4 bis 6 m in der Breite statt, dies hat den Vorteil, dass Effekte bei der Berechnung der Voronoikacheln am Rand vernachlässigt werden können.

Die einzelnen Messwerte werden nach Vorschrift berechnet, also als Mittelung über alle in der Messkachel befindlichen Personen pro Zeitschritt. Es wird

in Nachhinein aber nicht mehr über alle 50 Sekunden gemittelt, sondern alle Einzelmessungen in die Diagramme angetragen.

Für die unterschiedlichen Personendichten wurden  $0.5 [Pers/m^2]$ ,  $1 [Pers/m^2]$ ,  $2 [Pers/m^2]$ ,  $3 [Pers/m^2]$  und  $4 [Pers/m^2]$  verwendet.

Abbildung 10: Testaufbau

Abbildung 10 zeigt das Modell, die Fußgänger befinden sich in der roten Fläche bis sie das Ziel am Ende der roten Fläche erreichen. Im schwarzen Quadrat in der Mitte wird gemessen.

### 2.4.3 Dokumentation

Jeder einzelne Messpunkt pro Zeitschritt ist eine Mittlung der Werte Geschwindigkeit, Dichte, etc. aller Personen in der Messkachel über die Anzahl der Personen.

Folgende Werte werden geplottet:

- Geschwindigkeit in x-Richtung werden vs. die Dichte
- Absolute Geschwindigkeit vs. die Dichte
- Fluss vs. Dichte

Wichtig: Geschwindigkeit in x-Richtung absolute Geschwindigkeit und infolgedessen auch der Fluss kann auch 0-Werte enthalten. Dies liegt an der Art des Modells: Die Fußgänger machen nicht in jedem Zeitschritt einen Schritt. Die 0-Werte wurden nicht geplottet.

Zum Vergleich haben wir Trendlinien sowie die Weidmann-Kurve [4] mit dargestellt.

Weidmann-Kurve:

$$v(x) = 1.34 \times \left( 1 - \exp \left( -1.913 \times \left( \left( \frac{1}{x} \right) - \left( \frac{1}{5.4} \right) \right) \right) \right) [4].$$

Die angenäherte lautet

$$v(a, b, x) = a \times \left( 1 - \exp \left( -1.913 \times \left( \left( \frac{1}{x} \right) - \left( \frac{1}{b} \right) \right) \right) \right),$$

wobei die Parameter  $a$  und  $b$  durch die geplotteten Werte mit Hilfe von Matlab-internen Schätzern geschätzt wurden. Die Matlab-internen Schätzer basieren auf den Trust-Region-Verfahren [5].

Selbiges gilt für den Plot Fluss gegen Dichte, wobei die Weidmann'sche Kurve hier lautet

$$\Phi(x) = 1.34 \times x \times \left(1 - \exp\left(-1.913 \times \left(\left(\frac{1}{x}\right) - \left(\frac{1}{5.4}\right)\right)\right)\right)$$

und die angenäherte

$$\Phi(a, b, x) = a \times x \times \left(1 - \exp\left(-1.913 \times \left(\left(\frac{1}{x}\right) - \left(\frac{1}{b}\right)\right)\right)\right),$$

wobei  $a$  und  $b$  wiederum durch Matlab-interne Schätzer geschätzt wurden.

Wie man im obersten Plot von Abbildung 11 sieht, wird die nach Weidmann geschätzte Kurve sehr gut getroffen.

Im mittleren Plot ist die nach Weidmann geschätzte Kurve verglichen mit der Weidmann'schen Kurve leicht nach oben versetzt, was daran liegt, dass nicht mehr nur die Änderung der Position in x-Richtung, sondern auch in y-Richtung dazu miteinbezogen wird, also erhöhen sich die Geschwindigkeiten automatisch, die Weidmann'sche Kurve bleibt allerdings gleich.

Im letzten Plot sind beide geschätzten Kurven der von Weidmann im Bereich  $x \in [0, 4]$  sehr ähnlich, die Daten sind aber mehr gestreut.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Gehgeschwindigkeiten ab einer Dichte von ca. 1  $[Pers/m^2]$  abnehmen. Test 4 zeigt, dass der Simulator in der Lage ist, größere Dichten abzubilden und die dadurch resultierende Abbremsung der Fußgänger zu simulieren.

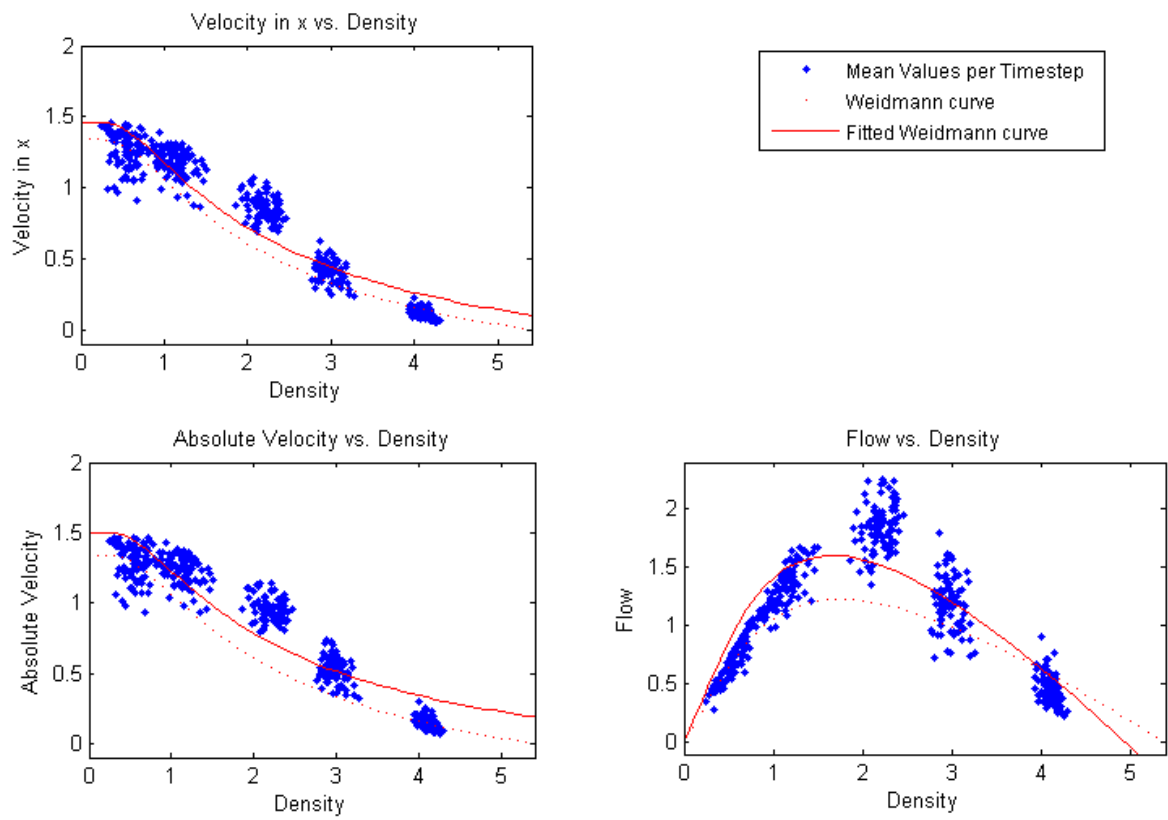


Abbildung 11: Fundamentaldiagramme



## 2.5 Test 5 – Reaktionszeiten

### 2.5.1 Testvorschrift

Nachzuweisen ist, dass in einer Personengruppe mit unterschiedlichen Reaktionsdauern jede Person zu einer passenden Zeit startet. Dies soll innerhalb eines Raumes mit einem Ausgang modelliert werden [1].

Parameter	Wert
Anzahl der Personen [m]	10
Reaktionsdauerverteilung [s]	gleichverteilt, 10 – 100
Raumgröße [m]	$8 \times 5$
Ausgangsbreite [m]	1

Tabelle 7: Testvorgaben [1]

### 2.5.2 Modell

Es wurde ein Raum mit den vorgeschriebenen Maßen gewählt. Zu Beginn werden 10 Personen im Raum platziert, denen eine Reaktionszeit zwischen 10 und 100 Sekunden zugewiesen wird.

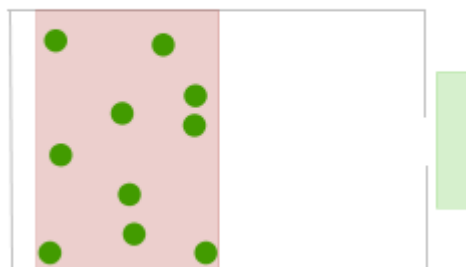


Abbildung 12: Screenshot des Szenarios

### 2.5.3 Dokumentation

Die Personen starten in regelmäßigen Abständen. Um zu verifizieren, dass sie gleichverteilt zwischen 10 und 100 Sekunden starten, wurde ein Test auf Gleichverteilung nach dem Kolmogorov-Smirnov Einstichprobentest gewählt. Dieser Test testet, ob eine Stichprobe einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung entspricht. Dieser Test wird bestanden siehe Abbildung 13.

ID	Reaction time
0	8.9600
1	18.4400
2	27.4000
3	36.3500
4	45.3100
5	54.2700
6	63.2300
7	72.1800
8	81.1400
9	90.1000
Uniform Distribution in [10,100]?	
<input checked="" type="checkbox"/>	

Abbildung 13: Reaktionszeiten

Personen können mit gleichverteilten Reaktionszeiten abgebildet werden.

## 2.6 Test 6 – Bewegung um eine Ecke

### 2.6.1 Testvorschrift

Nachzuweisen ist, dass bei der Umrundung einer Ecke durch eine Personengruppe die Ecke erfolgreich umrundet wird, ohne die Wände zu durchqueren [1].

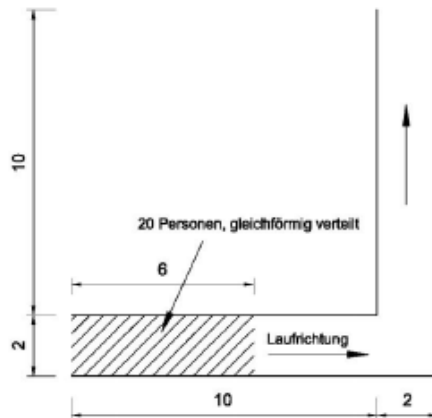


Abbildung 14: Konstruktion des Szenarios, Einheiten in [m] [1]

### 2.6.2 Modell

Der Flur wurde wie in Abbildung 14 dargestellt konstruiert, das Ziel befindet sich in einem kleinen Raum am Ende des Flurs. Die Fußgänger werden nicht alle anfangs platziert, sondern werden innerhalb von 20 Sekunden gleichverteilt generiert.

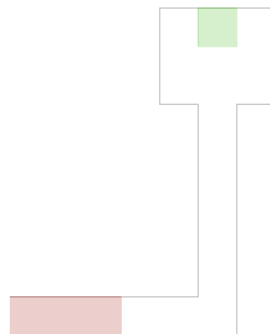


Abbildung 15: Modell des Flurs

### 2.6.3 Dokumentation

Die Abbildungen 16a und Abbildung 16b zeigen, dass die Personen keine Wände durchlaufen und innerhalb des Korridors bleiben.

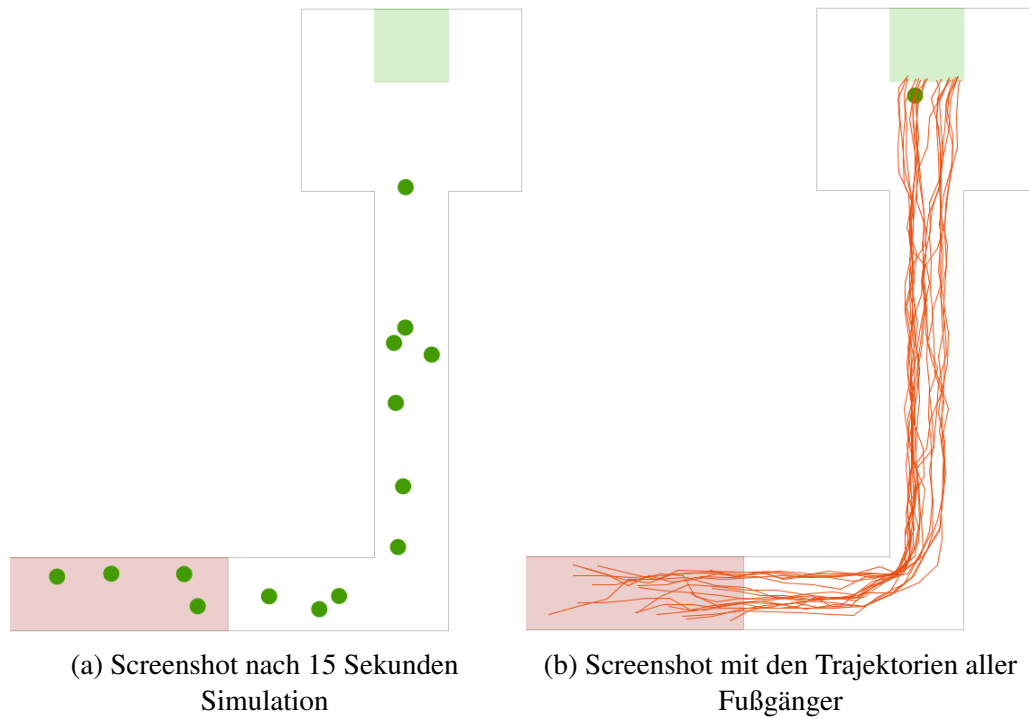


Abbildung 16: Screenshots der Simulation

## 2.7 Test 7 – Zuordnung der demographischen Parameter

### 2.7.1 Testvorschrift

Gehgeschwindigkeiten werden in einer aus 50 Personen bestehenden Personen-  
gruppe wie folgt verteilt:

Altersgruppe	Minimum [m/s]	Maximum [m/s]
Unter 30 Jahren	0.58	1.61
30 bis 50 Jahre	1.41	1.54
Über 50 Jahren	0.68	1.41

Tabelle 8: Gehgeschwindigkeiten der Altersgruppen nach [4]

Zu zeigen ist, dass die Verteilung der Gehgeschwindigkeiten in der Simulation  
mit Tabelle 8 vereinbar ist. [1]

### 2.7.2 Modell

Wir simulieren einen Korridor und erzeugen die Personen zeitlich so verteilt, so  
dass sich die Personendichte nicht auf die Gehgeschwindigkeit auswirkt. In-  
gesamt erzeugen wir 150 Personen.

Parameter	Wert
Korridormaße [m × m]	70 × 20
Pro Altersklasse simulierte Personenanzahl	50

Tabelle 9: Werte für die Modelldurchführung



Abbildung 17: Screenshot des Szenarios

### 2.7.3 Dokumentation

Die Gehgeschwindigkeiten berechnen sich durch den gesamten zurückgelegten Weg geteilt durch die dafür benötigte Zeit. Die zurückgelegten Wege werden in den einzelnen Zeitschritten summiert.

Wie in den Abbildungen 18 und 19 zu sehen ist, befinden sich die Werte der minimalen, maximalen und durchschnittlichen Geschwindigkeit, sowie der Standardabweichung alle im Rahmen der Vorgaben.

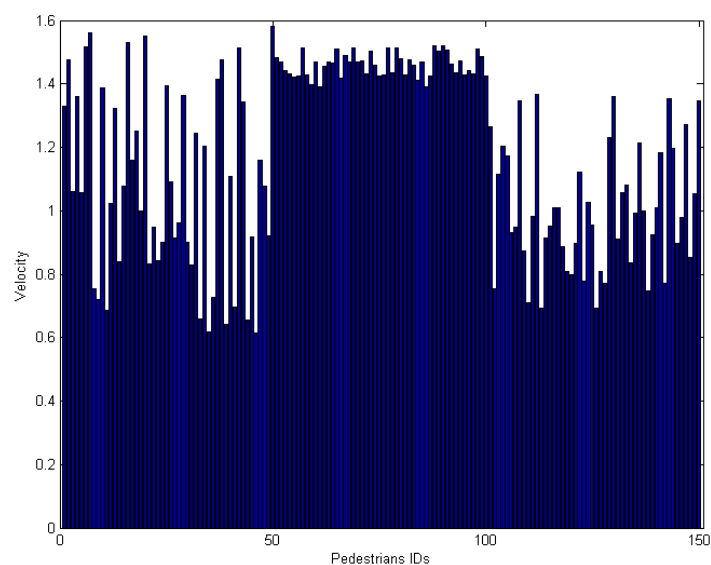


Abbildung 18: Geschwindigkeiten der Personen

Age	Provided min [m/s]	Reached min [m/s]	Provided max [m/s]	Reached max [m/s]
- 30	0.58	0.61	1.61	1.58
30 - 50	1.41	1.39	1.54	1.52
50 +	0.68	0.69	1.41	1.37
Overall:				
Mean	1.18	m/s		
Deviation	0.29	m/s		

Abbildung 19: Einzelne Geschwindigkeiten, sowie Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung

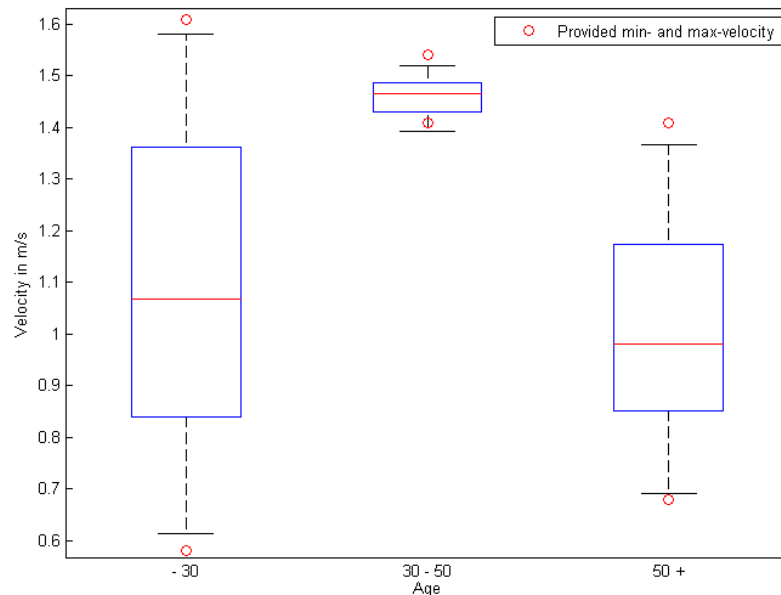


Abbildung 20: Boxplot mit den vorgegebenen und tatsächlichen Geschwindigkeiten

Abbildung 20 zeigt einen Boxplot der simulierten Geschwindigkeiten jeder Altersgruppe. Der rote Strich innerhalb der blauen Box gibt den Median der Werte an (nicht das arithmetische Mittel), die blaue Box ist durch das 25% - und das 75% - Quantil nach unten bzw. nach oben beschränkt, die schwarzen Striche außerhalb der Box visualisieren den minimalen und maximalen simulierten Wert. Zusätzlich dazu wurden die vorgegebenen minimalen und maximalen vorgeschriebenen Geschwindigkeiten für jede Altersgruppe angegeben, diese sind mit einem roten Kreis markiert.

In der Simulation gab es einen Ausreißer, der mit seiner Gehgeschwindigkeit ein klein wenig zu langsam als vorgeschrieben war. Das ist allerdings auf die Wechselwirkungen mit anderen Personen und den Wänden des Flurs zurückzuführen. Seine Geschwindigkeit weicht um weniger als 5% von dem vorgeschriebenen Minimum seiner Altersgruppe ab.





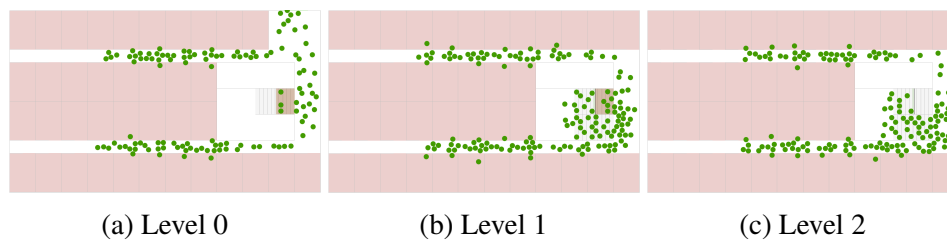


Abbildung 22: Screenshot der Evakuierung des Gebäudes

Parameter	Wert für <b>Standard</b>
minimale Geschwindigkeit [m/s]	0.46
maximale Geschwindigkeit [m/s]	1.61
durchschnittliche Geschwindigkeit [m/s]	1.34
Geschwindigkeits Standardabweichung [m/s]	0.26
Perception radius [m]	2.0
Torso radius [m]	0.2

Tabelle 10: Parameterwerte für Standard

**Torso radius** gibt den Radius der Torsos der einzelnen Fußgänger an.

Alle diese Werte werden nicht statistisch über die Fußgänger verteilt, sondern sind fest für alle Personen festgelegt, wohingegen die Gehgeschwindigkeit,  $v$ , fest gewählt oder statistisch verteilt werden kann. Beide Varianten wurden simuliert.

Da Treppen in crowd:it nach [2] modelliert werden, haben wir das Modell ebenfalls mit Abbremsfaktoren modelliert. **Stair factor** beschreibt in diesen Fall, den Abbremsfaktor bei der Modellierung mit Abbremsfaktor.

**Perception radius:** Wie man sehr schnell erkennt, hat Perception radius keine Auswirkung auf die Räumungszeit.

**Torso radius:** Beim Torso radius ist es auch offensichtlich, dass die Evakuierung schneller geht, je kleiner der Radius gewählt wird. Eine Erklärung hierfür ist, dass sie mit einem kleineren Radius einen geringeren Platzbedarf haben, wodurch ein höherer Fluss möglich ist und damit auch eine höhere Gehgeschwindigkeit. Bei der Einstellung Torso radius = 0.4 m und 0.3 m sind die Fußgänger so groß, dass sich 2 Fußgänger so in den Gängen verhaken können, dass sich unauflösbare Staus bilden.

**Stair factor:** Bei dem Abbremsfaktor der Stufen sieht man, dass die Evakuierung länger dauert, je mehr die Personen auf den Stufen abgebremst werden.

Setting	Evacuation time
With groups	not evacuated within simulation time
Perception radius: 1,0 m	169.13
Perception radius: 3,0 m	169.13
Perception radius: 4,0 m	169.13
Perception radius: 5,0 m	169.13
Stair factor: 0,3	324.03
Stair factor: 0,4	248.69
Stair factor: 0,6	182.83
Stair factor: 0,7	164.91
Torso radius: 0,1 m	88.52
Torso radius: 0,3 m	not evacuated within simulation time
Torso radius: 0,4 m	not evacuated within simulation time
v = 0,5 m/s	277.02
v distributed between 0,5 m/s and 1,0 m/s	227.7
v distributed between 0,5 m/s and 1,5 m/s	195.6
v = 0,7 m/s	210.09
v distributed between 0,7 m/s and 1,2 m/s	188.19
v = 1,0 m/s	166.69
v distributed between 1,0 m/s and 1,5 m/s	155.62
v = 1,2 m/s	147.81
v = 1,5 m/s	136.16
Standard	169.13

Abbildung 23: Einstellungen und Entfluchtungszeiten

**Geschwindigkeit:** Bei der Geschwindigkeitseinstellung sieht man, dass die Räumungszeit abnimmt, wenn man die Gehgeschwindigkeit erhöht. Es gibt im Modell und Simulator also Parameter, die Einfluss auf die Entfluchtungszeit eines dreistöckigen Bürogebäudes haben und die Räumungsdauer verändern. Man ist also in der Lage, im Simulator die Parameter seinem Szenario anzupassen.

Damit ist der Simulator in der Lage, unterschiedliche Anforderungen an die Population umzusetzen und so unterschiedliche Szenarien abzubilden.

## 4 Qualitative Verifizierung

### 4.1 Test 9 – Eine Menschenmenge verlässt einen großen öffentlichen Raum

#### 4.1.1 Testvorschrift

Nachzuweisen ist, dass die Entfluchtung des Raumes, welcher in Abbildung 24 dargestellt ist, ungefähr doppelt so lange dauert, wenn nur die Türen 3 und 4 verwendet werden anstelle aller vier Türen. [1]

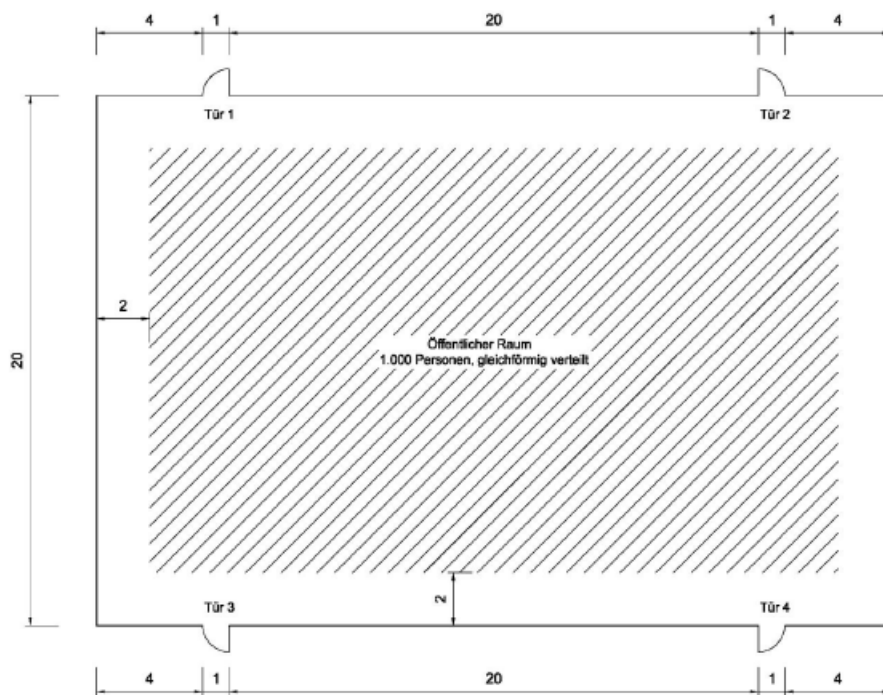


Abbildung 24: Konstruktion des Szenarios, Einheiten in [m] [1]

#### 4.1.2 Modell

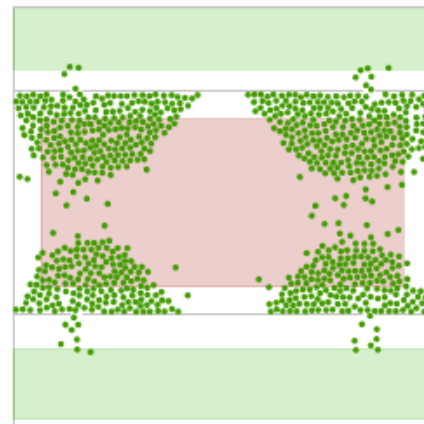
Der Raum wurde gemäß den Vorgaben modelliert und die Gehgeschwindigkeiten statistisch über die Population verteilt.

#### 4.1.3 Dokumentation

Tabelle 26 zeigt und vergleicht beide Entfluchtungszeiten, **Factor** gibt den Faktor an, um welchen sich die Entfluchtungszeit in dem Szenario mit nur zwei Türen



(a) Screenshot des Szenarios mit 2 Türen



(b) Screenshot des Szenarios mit 4 Türen

Abbildung 25: Screenshots zu Test 9

	Evacuation time [s]
2 exits	220.76
4 exits	122.24
Factor	1.81

Abbildung 26: Entfluchtungszeiten beider Szenarien

verändert.

## 4.2 Test 10 – Zuweisung von Rettungswegen

### 4.2.1 Testvorschrift

Nachzuweisen ist, dass die Personen im einstöckigen Gebäude, welches in Abbildung 27 dargestellt ist, durch den richtigen Fluchtweg verlassen [1].

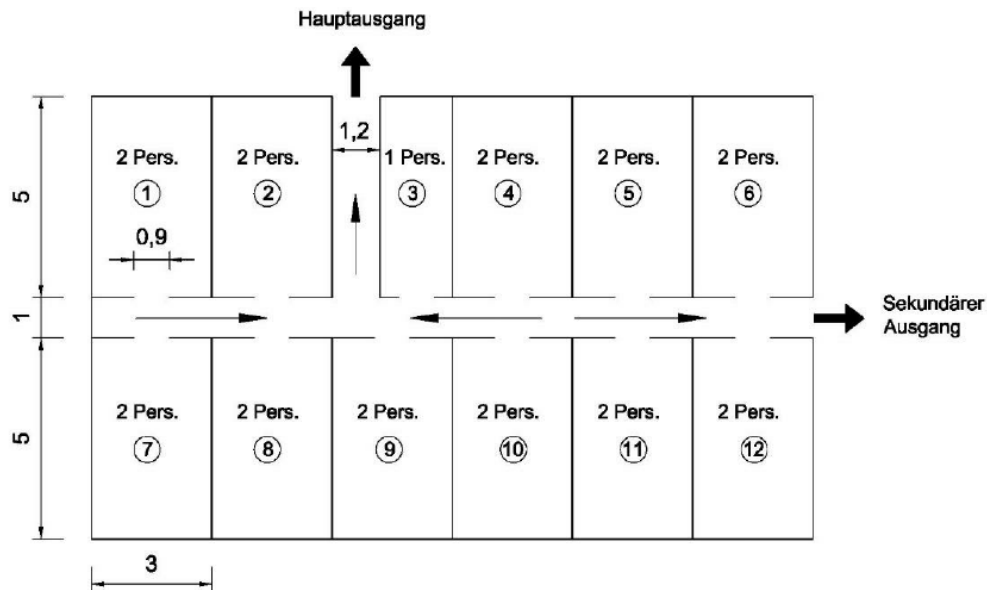


Abbildung 27: Konstruktion des Szenarios, Einheiten in [m] [1]

### 4.2.2 Modell

Das Gebäude wurde nach den Vorgaben konstruiert, in Raum 3 starten ebenfalls 2 Personen. Die Gehgeschwindigkeiten wurden gemäß den demographischen Parametern verteilt, also eine mittlere Geschwindigkeit von 1.34 m/s mit einer Standardabweichung vom 0.26 m/s. Die Fußgänger besitzen keine Reaktionszeit.

### 4.2.3 Dokumentation

“Exit 1“ ist der Hauptausgang, “Exit 2“ der sekundäre Ausgang. Wie in Abbildung 29 zu sehen ist, wählen alle Fußgänger den vorher festgelegten Ausgang.

Es ist also im Simulator möglich, Fußgängern konkrete Ziele zuzuweisen, die dann auch eingehalten werden.

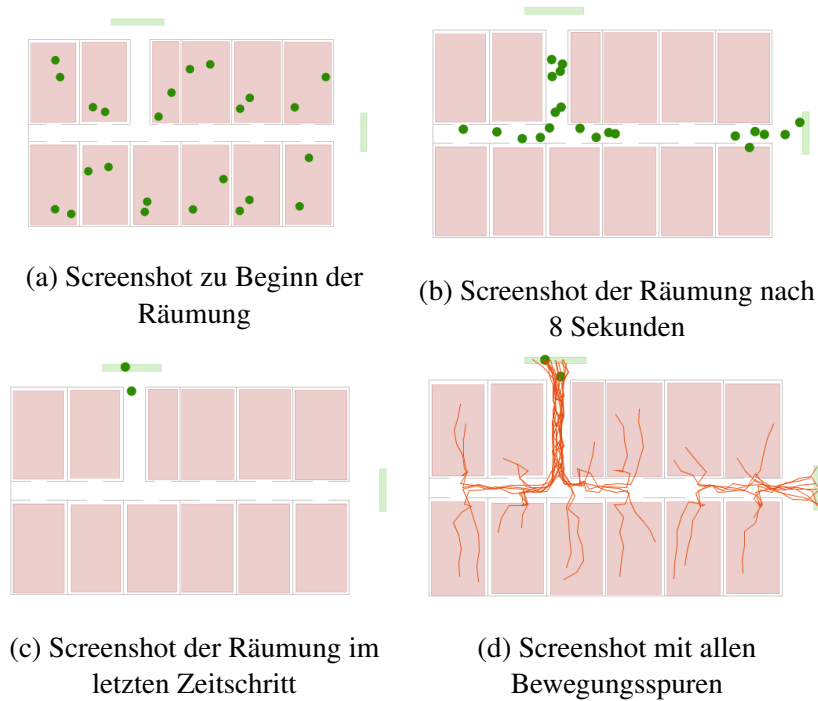


Abbildung 28: Screenshots der Räumung des Gebäudes

ID	Room	Assinged	Chosen	ID	Room	Assinged	Chosen
0	Room 1	Exit 1	Exit 1	12	Room 4	Exit 1	Exit 1
1	Room 1	Exit 1	Exit 1	13	Room 4	Exit 1	Exit 1
2	Room 2	Exit 1	Exit 1	14	Room 5	Exit 2	Exit 2
3	Room 2	Exit 1	Exit 1	15	Room 5	Exit 2	Exit 2
4	Room 7	Exit 1	Exit 1	16	Room 6	Exit 2	Exit 2
5	Room 7	Exit 1	Exit 1	17	Room 6	Exit 2	Exit 2
6	Room 8	Exit 1	Exit 1	18	Room 10	Exit 1	Exit 1
7	Room 8	Exit 1	Exit 1	19	Room 10	Exit 1	Exit 1
8	Room 3	Exit 1	Exit 1	20	Room 11	Exit 2	Exit 2
9	Room 3	Exit 1	Exit 1	21	Room 11	Exit 2	Exit 2
10	Room 9	Exit 1	Exit 1	22	Room 12	Exit 2	Exit 2
11	Room 9	Exit 1	Exit 1	23	Room 12	Exit 2	Exit 2
Test passed?				<input checked="" type="checkbox"/>			

Abbildung 29: Räume, in denen die Fußgänger starten, vorgeschriebenem Ausgang und tatsächlichem Ausgang

## 4.3 Test 11 – Wahl des Rettungsweges

### 4.3.1 Testvorschrift

Nachzuweisen ist, dass sich bei der Räumung des Raumes, welcher in Abbildung 30 dargestellt ist, die meisten Personen für Ausgang 1 entscheiden, jedoch einige auch Ausgang 2 wählen. Die Personen sollen alle anfangs ohne Reaktionszeit in den Raum gesetzt werden und ihre Gehgeschwindigkeiten sollen gemäß [4] verteilt werden. [1]

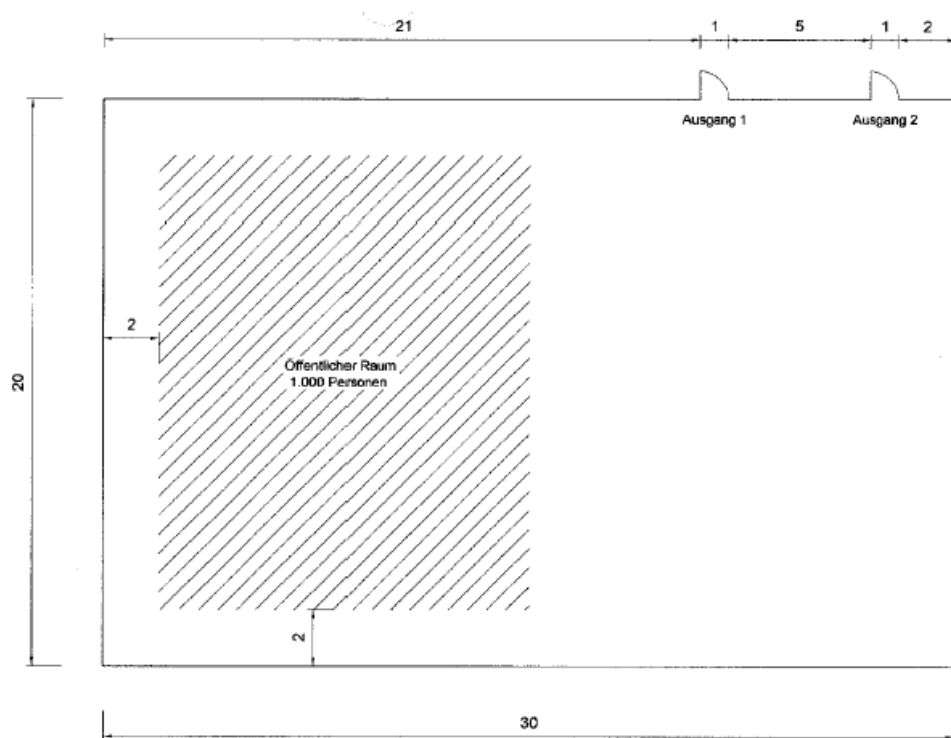


Abbildung 30: Konstruktion des Szenarios, Einheiten in [m] [1]

### 4.3.2 Modell

Der Raum wurde nach den Vorgaben modelliert und die Personen alle anfangs der Simulation in den Raum gesetzt. Die Personen besitzen keine Reaktionszeit und die Gehgeschwindigkeiten wurden gemäß der Vorschrift verteilt.

### 4.3.3 Dokumentation

Wie in den Abbildungen 31, 32 und 33 zu sehen ist, bildet sich der deutlich größere Stau vor Ausgang 1, jedoch entscheiden sich einige Fußgänger für den zweiten Ausgang, wie in Abbildung 35 zu sehen ist.

Dies zeigt, dass es dem Simulator möglich ist, Personen “dynamisch“ entscheiden zu lassen, welchen Weg sie wählen. In dieser Simulation entscheiden sich die Fußgänger für den Weg mit dem sie am schnellsten das Ziel erreichen.

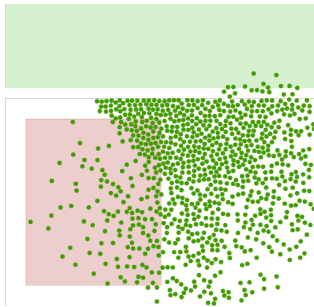


Abbildung 31:  
Screenshot der  
Räumung nach 30  
Sekunden

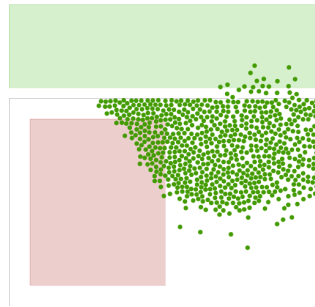


Abbildung 32:  
Screenshot der  
Räumung nach 60  
Sekunden

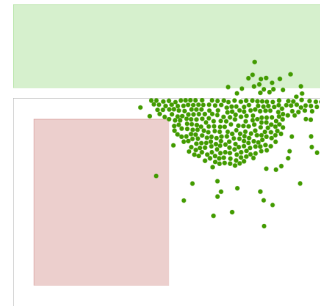


Abbildung 33:  
Screenshot der  
Räumung nach 120  
Sekunden

Abbildung 34: Screenshot der Räumung des Raumes

	Exit 1	Exit 2
Persons	509	491

Abbildung 35: Anzahl der Personen nach Wahl des Ausgangs



## 4.4 Test 12 – Auswirkung von Engstellen

### 4.4.1 Testvorschrift

Nachzuweisen ist, dass es bei der Leerung des Raumes, welcher in Abbildung 36 zu sehen ist, nur im ersten Raum ein Stau bildet, es soll also insbesondere gezeigt werden, dass sich in Raum 2 keiner bildet. Die Personen sollen keine Reaktionszeit besitzen und sich sofort Richtung Ausgang bewegen. Desweiteren sollen ihre Gehgeschwindigkeiten gemäß [4] verteilt seien. [1]

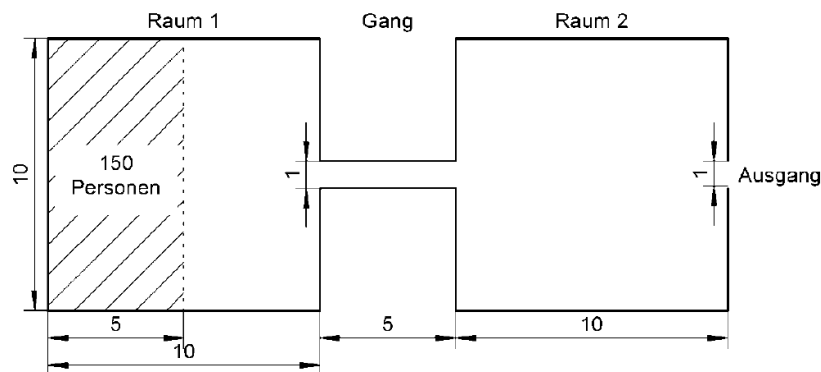


Abbildung 36: Konstruktion des Szenarios, Einheiten in [m] [1]

### 4.4.2 Modell

Das Szenario wurde nach den vorgegebenen Maßen konstruiert, das Ziel befindet sich ein wenig außerhalb des zweiten Raumes. Die Gehgeschwindigkeiten wurden passend über die Fußgänger verteilt.

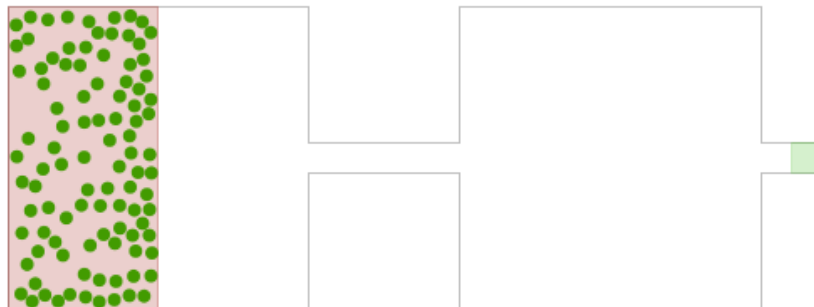


Abbildung 37: Modell des Szenarios, Screenshot bei Simulationsbeginn

#### 4.4.3 Dokumentation

Wie in den Abbildungen 38a - 38d zu erahnen ist, bildet sich wie angenommen im ersten Raum ein Stau, allerdings fließen durch den Gang nur so viele Personen, dass sich am Ausgang kein Stau mehr bildet.

Das zeigt auch Abbildung 39, in der unter anderem auch zu erkennen ist, dass der zweite Raum gar nicht ganz genutzt werden muss. Die etwas geringen Geschwindigkeiten am Ende resultieren aus dem kurzen Abbremsverhalten, um den Ausgang zu passieren. Ein Stau bildet sich nicht aus.

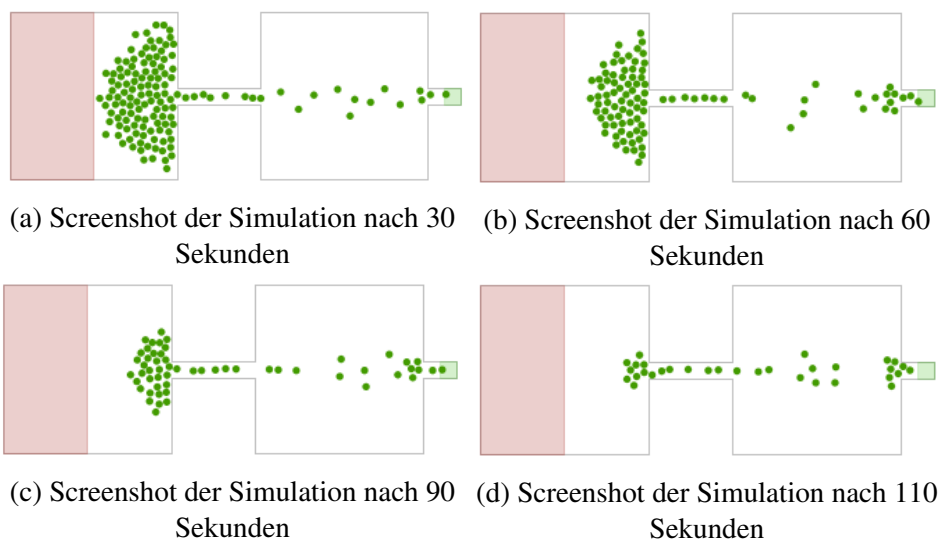


Abbildung 38: Screenshots der Simulation

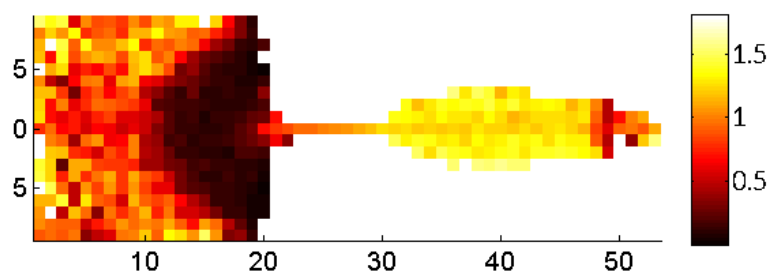


Abbildung 39: Heatmap der Simulation, Skala rechts gibt Gehgeschwindigkeit in m/s an

## 4.5 Test 13 – Stau vor einer Treppe

### 4.5.1 Testvorschrift

Zu zeigen ist, dass sich bei der Leerung des Raumes, welcher in Abbildung 40 dargestellt ist, zunächst ein Stau vor dem Gang bildet und sich dann ein zusätzlicher vor der Treppe bildet.

Die Gehgeschwindigkeiten sollen, wie [4] vorgibt, über die Fußgänger verteilt werden. Diese sollen keine Reaktionszeit besitzen, sondern sich mit Simulationsbeginn direkt auf den Weg Richtung Gangende machen. [1]

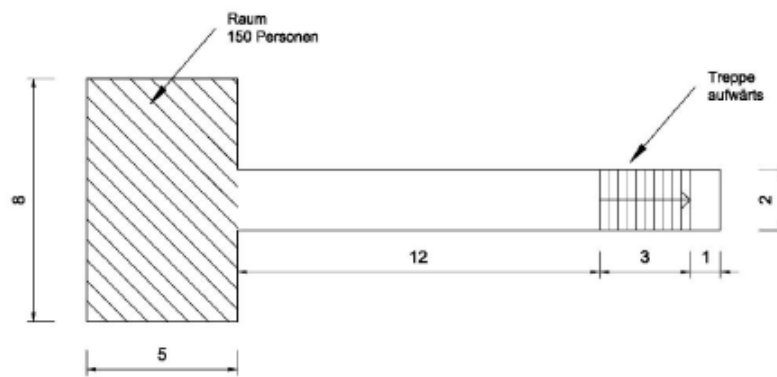


Abbildung 40: Konstruktion des Szenarios, Einheiten in [m] [1]

### 4.5.2 Modell

Das Szenario wurde exakt nach den Vorgaben konstruiert und die Gehgeschwindigkeiten über die Population verteilt.

In der Dokumentation wird noch zum Vergleich eine Heatmap des Szenarios ohne Treppen erstellt.

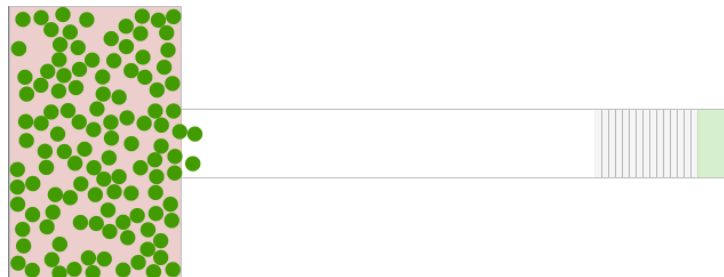


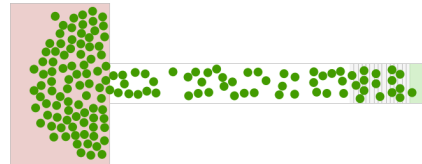
Abbildung 41: Modell des Szenarios, Screenshot bei Simulationsbeginn

### 4.5.3 Dokumentation

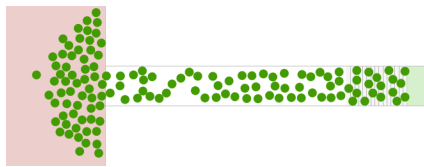
Wie in den Abbildungen 42a - 42e zu erkennen ist, bildet sich ein Stau im Raum, in den die Fußgänger gesetzt werden, auch vor der Treppe werden die Personen leicht abgebremst, da der Fluss auf der Treppe verringert ist.



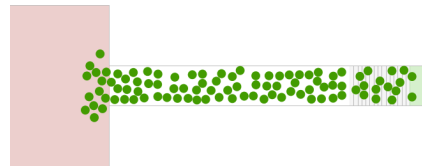
(a) Screenshot der Simulation nach 10 Sekunden



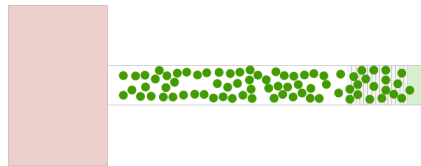
(b) Screenshot der Simulation nach 20 Sekunden



(c) Screenshot der Simulation nach 30 Sekunden



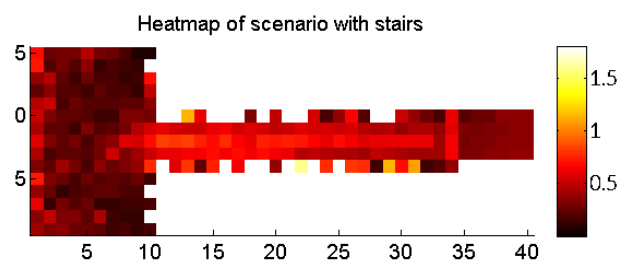
(d) Screenshot der Simulation nach 50 Sekunden



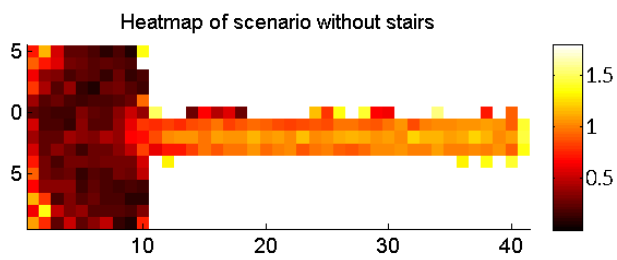
(e) Screenshot der Simulation nach 60 Sekunden

Abbildung 42: Screenshots der Simulation

Die Abbildungen 43a und 43b zeigen eindeutig, dass die Gehgeschwindigkeiten im Gang in der Simulation ohne Treppen eindeutig höher sind als in der Simulation mit Treppen, was auf einen Rückstau vor der Treppe hinweist.



(a) Heatmap des Szenarios mit Treppen



(b) Heatmap des Szenarios ohne Treppen

Abbildung 43: Gegenüberstellung der Heatmaps

Die Skala rechts gibt die Gehgeschwindigkeiten in m/s an

## 4.6 Test 14 – Routenwahl

### 4.6.1 Testvorschrift

Fußgänger sollen vom Start im Obergeschoss zum Ziel im Obergeschoss laufen, wobei sie zwei Wege zur Wahl haben, einer soll über eine Treppe zuerst ins Erdgeschoss führen und dann wieder zurück ins Obergeschoss zum Ziel. Der zweite Weg soll sich ganz im Obergeschoss befinden, allerdings ist dieser Weg deutlich länger als der Erste. Zu dokumentieren ist die Wahl des Weges der Fußgänger in der Form „kurz“, „lang“, „gemischt“ oder „konfigurierbar“. [1]

### 4.6.2 Modell

Das Szenario wurde wie folgt konstruiert:

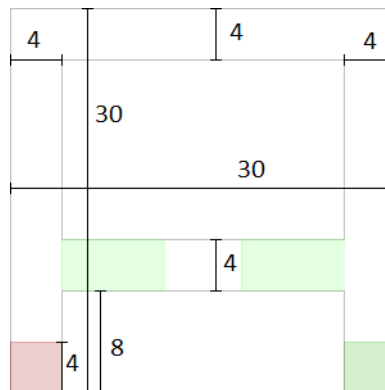


Abbildung 44: Konstruktion des Szenarios, Einheiten in [m]

Über die ersten 10 Sekunden der Simulation verteilt werden die Personen in den Startbereich gesetzt. Außerdem können verschiedene Einstellungen vorgenommen werden, wie sich die Personen verhalten sollen, einmal sollen sie sich den schnellsten Pfad, zeitlich gesehen, einmal sollen sie sich den kürzesten Pfad suchen.

### 4.6.3 Dokumentation

Betrachten wir zuerst den Fall, bei dem sich die Personen den schnellsten Weg suchen.

Parameter	Wert
Anzahl von Personen	150
Reaktionszeit [s]	keine
Gehgeschwindigkeiten Verteilung nach	[4]
Abbremsfaktor der Treppen	0.4

Tabelle 11: Werte für die Modellierung

Wie Abbildung 45 zeigt, wählen einige Personen den langen Weg, der ist für sie schneller, da sich viele Fußgänger auf den Treppen aufhalten. Das wird auch in den Abbildungen 46a, 46b und 46c visualisiert.

	Short way	Long way
Persons	131	19

Abbildung 45: Anzahl der Personen nach Wahl des Weges, bei Suche nach dem schnellsten Weg

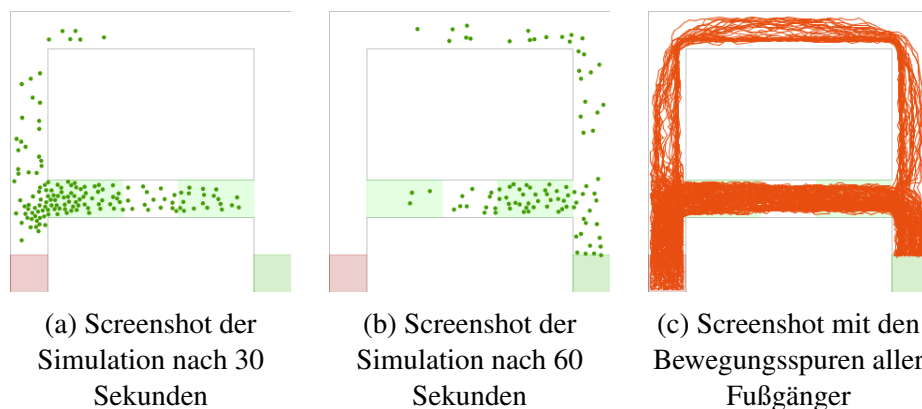


Abbildung 46: Screenshots der Simulation

Betrachten wir nun den Fall, bei dem sich die Personen den kürzesten Weg suchen.

Wie Abbildung 47 zeigt, wählt keine Person den langen Weg. Das wird auch nochmal in den Abbildungen 48a, 48b und 48c visualisiert.

	Short way	Long way
Persons	150	0

Abbildung 47: Anzahl der Personen nach Wahl des Weges, bei Suche nach dem kürzesten Weg

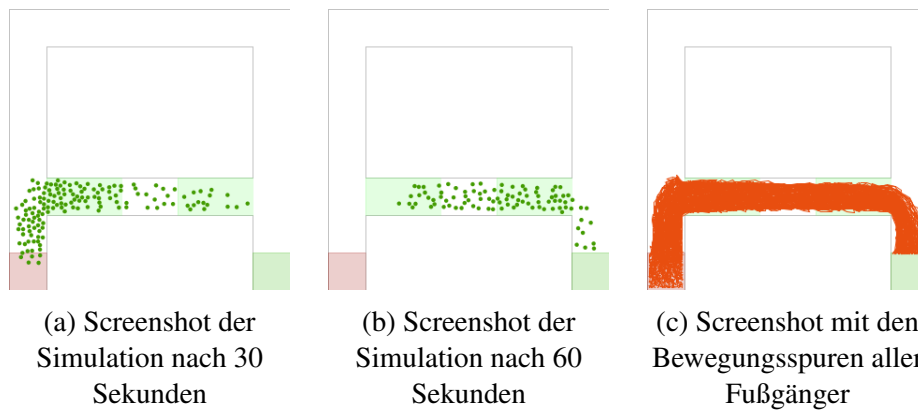


Abbildung 48: Screenshots der Simulation

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es im Simulator möglich ist, die Fußgänger den schnellsten und/oder den kürzesten Weg wählen zu lassen.

Bei der Entscheidung für den schnellsten Weg sehen die Personen den Stau, der sich an der Treppe bildet, und wählen dann stattdessen den langen Weg, auf dem sich kein Stau befindet, dieser bringt sie schneller an ihr Ziel. Die Wahl des Weges ist hierbei gemischt.

Bei der Entscheidung für den kürzesten Weg ist es den Personen egal, ob sich an den Treppen ein Stau bildet, sie sehen, dass das der kürzeste Weg ist und wählen diesen.



## 4.7 Test 15 – Bewegung einer großen Menge Fußgänger um eine Ecke

### 4.7.1 Testvorschrift

Dokumentiert werden soll, wie viel Zeit 500 Personen benötigen, um einen Korridor zu durchqueren, welcher eine Ecke beinhaltet. Dazu sollen noch zwei Vergleichsszenarien erstellt werden, die zur Überprüfung der Ergebnisse dienen. Der Aufbau der Szenarien ist der Abbildung 49 zu entnehmen.

In der Dokumentation sollen die Gesamtzeiten verglichen werden, bis alle Fußgänger das Ziel erreicht haben zwischen den Szenarien. Das zu erwartende Ergebnis ist, dass die Fußgänger auf dem kurzen geraden Korridor am wenigsten Zeit benötigen und auf dem langen geraden Korridor am meisten. Im Idealfall liegt das Ergebnis für den abgelenkten Korridor zwischen diesen zwei Werten. [1]

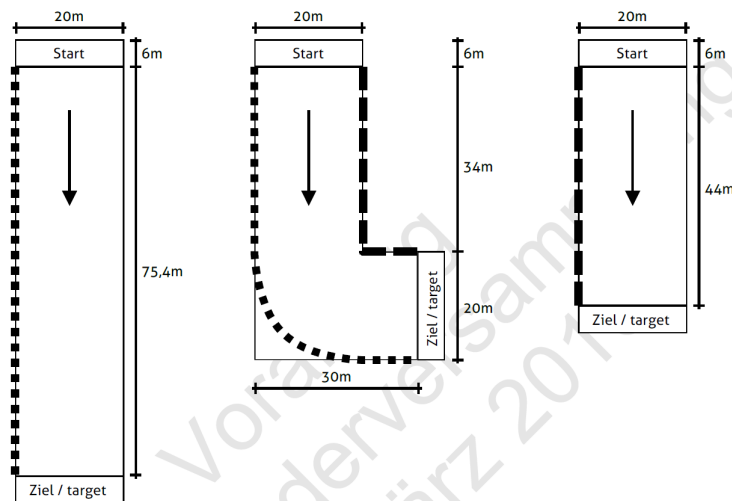


Abbildung 49: Vorgabe des Szenarios [1]

### 4.7.2 Modell

Die Gänge wurden nach den Vorgaben simuliert, wobei in jedem Szenario noch ein Zielbereich angehängt wurde. Dieser beeinflusst die Ergebnisse des Tests nicht. Es wurde auch keine zusätzliche Reaktionszeit in den Test eingebaut.

Zusätzlich wurde ein Evakuierungsgraph und ein Differenzengraph für jedes der Szenarien erstellt.

### 4.7.3 Dokumentation

Abbildung 50 zeigt die Gesamtsimulationszeiten, die mittleren Reisezeiten eines Fußgängers in jeder Simulation und jeweils das Verhältnis dieser Werte zwischen dem Szenario „mit Ecke“ und dem jeweiligen Szenario. Die Abbildung zeigt das Wert der Gesamtsimulationszeit als auch der der mittleren Reise Zeit des Szenarios „mit Ecke“ jeweils zwischen den Werten der Vergleichsszenarien liegt.

	Hall with corner	Short hall	Long hall
Overall duration in [s]	110.12	93.79	147
Factor		1.17	0.75
Middle walking time in [s]	67.61	45.85	71.66
Factor		1.47	0.94

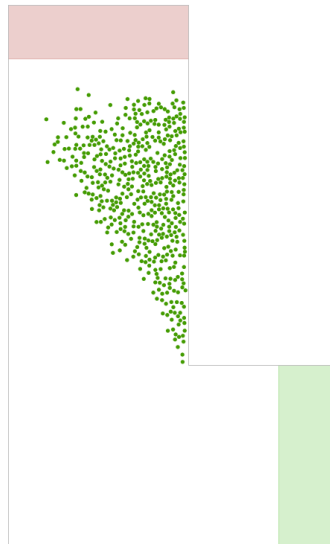
Abbildung 50: Gesamtsimulationszeit, mittleren Reisedauer und Verhältnis der 2 Alternativszenarien zum Hauptszenario

Die Abbildungen 51a - 53e sind Screenshots der Simulationen.

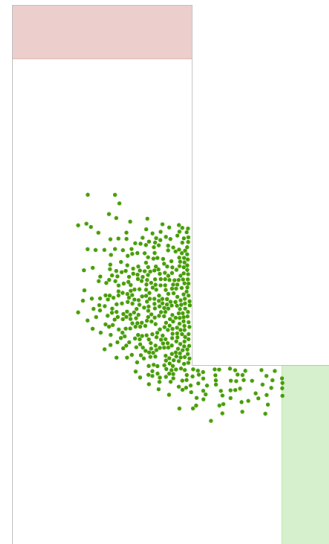
Abbildung 54 zeigt die Evakuierungsgraphen jedes Szenarios, Abbildung 55 die Differenzengraphen.

Bei den Evakuierungsgraphen ist auffällig, dass die Szenarien „mit Ecke“ und „kurzer Flur“ fast gleich lang dauern, aber durch die Ecke im ersten Szenario der Evakuierungsgraph deutlich flacher ausfällt. Das Abklingen der Szenarien „kurzer Flur“ und „langer Flur“ ist ähnlich, aber zeitlich nach hinten versetzt. Die Simulation des Szenarios mit dem langen Flur dauert deutlich länger, wofür die Personen mit den geringen Gehgeschwindigkeiten verantwortlich sind.

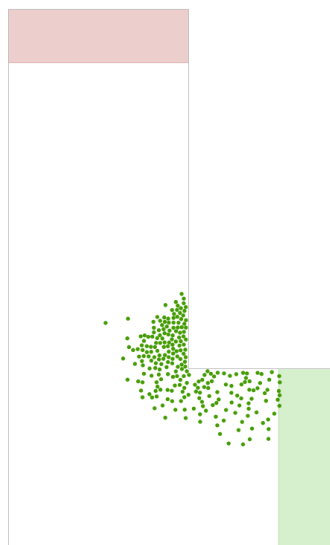
Bei den Differenzengraphen wiederum ist zu erkennen, dass die Personen in dem Szenario „mit Ecke“ deutlich gestreuter das Ziel erreichen. Während die Mehrheit der Personen in den Szenarien „kurzer Flur“ und „langer Flur“ das Ziel innerhalb einer kurzen Zeitspanne erreichen.



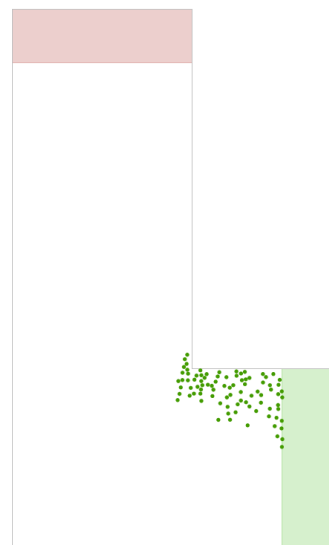
(a) Screenshot der Simulation nach 25 Sekunden



(b) Screenshot der Simulation nach 45 Sekunden



(c) Screenshot der Simulation nach 70 Sekunden



(d) Screenshot der Simulation nach 90 Sekunden

Abbildung 51: Screenshots der Simulation des Flurs mit Ecke

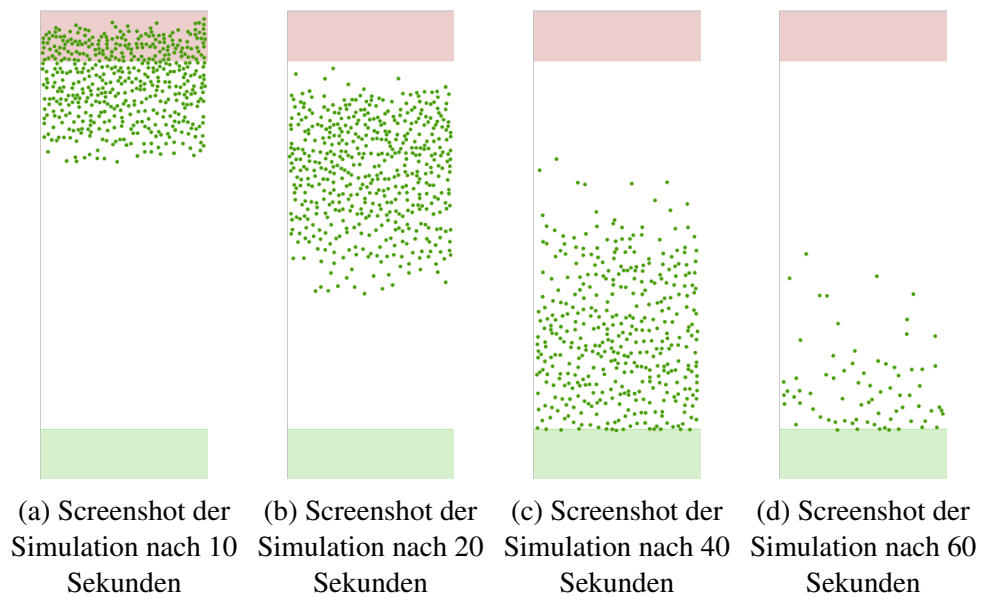


Abbildung 52: Screenshots der Simulation des geraden, kurzen Flurs

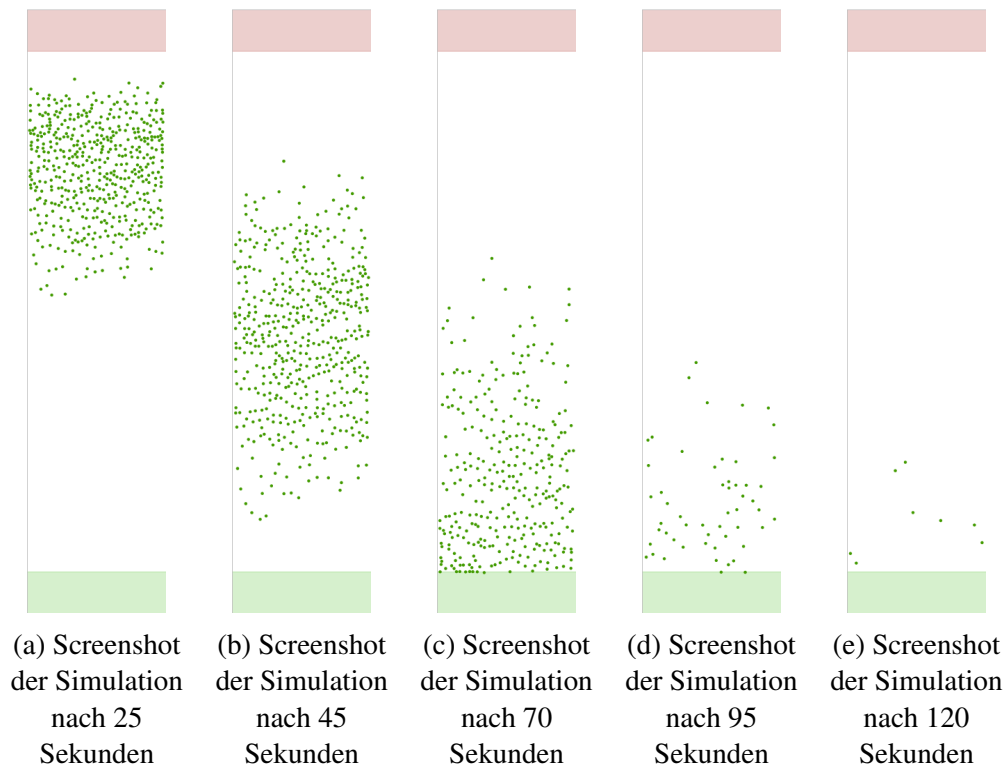


Abbildung 53: Screenshots der Simulation des geraden, langen Flurs

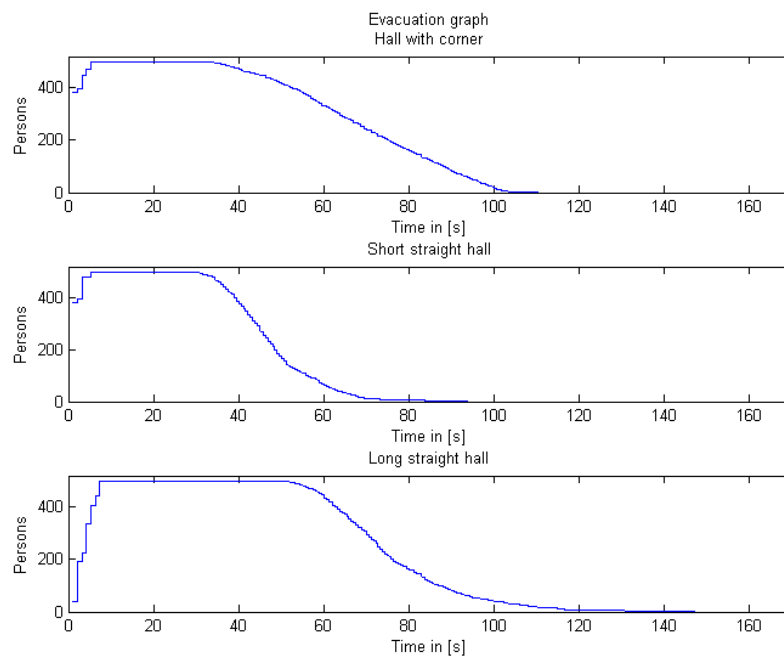


Abbildung 54: Evakuierungsgraph

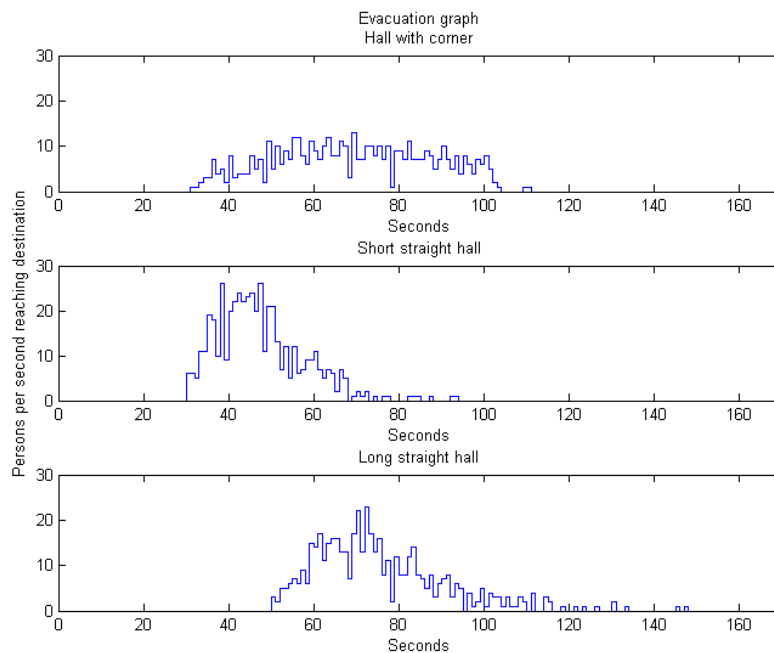


Abbildung 55: Differenzengraph

# Literatur

- [1] RiMEA, *Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen*, vol. 3.0 (Entwurf) (Rimea e.V., 2014)
- [2] G. Köster, D. Lehmberg, F. Dietrich, in *Traffic and Granular Flow '15* (Nootdorp, the Netherlands, 2015). 27–30 October 2015
- [3] B. Steffen, A. Seyfried, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **389**(9), 1902 (2010)
- [4] U. Weidmann, *Transporttechnik der Fußgänger* (IVT, 1992)
- [5] M. Ulbrich, S. Ulbrich, *Nichtlineare Optimierung* (Springer Basel, 2012)