

# Zellulärer Zustandsautomat

## 3. Projekt zu Modellierung und Simulation

Daniel Graf, Dimitrie Diez, Arne Schöntag, Peter Müller

### Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Beschreibung des Modells</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Anforderungen/Requirements</b>	<b>3</b>
3.1	Allgemeines . . . . .	3
3.2	Zellen . . . . .	3
3.3	Hindernisse . . . . .	3
3.4	Ziele . . . . .	4
3.5	Personen . . . . .	4
3.6	Geschwindigkeit der Personen . . . . .	5
3.7	Zeitmodellierung . . . . .	5
3.8	Parameter . . . . .	6
3.9	Berechnungen . . . . .	6
3.10	Report . . . . .	6
3.11	Berechnung des Zielnutzens . . . . .	6
3.12	Werte für die Auswertung . . . . .	7
3.13	Testszenarien für die Simulation . . . . .	7
3.13.1	Erstellung der Testszenarien . . . . .	7
3.13.2	Testszenario: Freier Fluss . . . . .	8
3.13.3	Testszenario: Hühnertest . . . . .	8
3.13.4	Testszenario: Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen . . . . .	9
3.13.5	Testszenario: Evakuierung eines Raumes mit 4 Türen . . . . .	10
3.13.6	Testszenario: Fundamentaldiagramm - Rimea-Test 4 . . . . .	10
3.13.7	Testszenario: Engstelle (unidirektional) . . . . .	10
3.14	Visualisierung . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Softwaredesign</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Softwaretest</b>	<b>13</b>

<b>6 Vergleich der Algorithmen</b>	<b>13</b>
6.1 Euklid . . . . .	13
6.2 Dijkstra . . . . .	13
6.3 Fast Marching . . . . .	13
<b>7 Einfluss der Zellgröße auf die Abstandsberechnung</b>	<b>13</b>
<b>8 Einfluss der Zellgröße auf die maximale Dichte</b>	<b>14</b>
8.1 Verifikation . . . . .	15
8.1.1 Evakuierung . . . . .	15
8.2 Validation . . . . .	22
<b>9 Ausblick und Fazit</b>	<b>22</b>

## 1 Einführung

Im Zuge der ersten Studienarbeit wurde das Laufverhalten von Probanden in der Ebene und auf der Treppe untersucht. Basierend auf den Erkenntnissen bezüglich der individuellen Wunschgeschwindigkeiten werden in dieser Studienarbeit Personenbewegungen in der Ebene simuliert. Mit Hilfe solcher Simulationen können, beispielsweise im Zuge von Gebäudeplanungen unterschiedliche Gebäude- und Raumgestaltungen simuliert und hinsichtlich schnellster Räumungen im Krisenfall optimiert werden.

## 2 Beschreibung des Modells

Für die Simulation der Personenbewegungen wird ein zellulärer Zustandsautomat implementiert. Jede Zelle kann entweder leer oder durch eine Person oder ein Hindernis besetzt sein. Sie kann außerdem ein Ziel oder eine Quelle enthalten. Ein Hindernis kann von keiner Person betreten werden. Die Personen versuchen im Laufe der Simulation von der Quelle (Startposition) zum Ziel zu gelangen. Hierbei können sie sich in der sog. Moore-Umgebung bewegen. Es kann jede Zelle betreten werden, die frei ist und eine Nachbarzelle der aktuellen Zelle ist. Als Nachbarzelle wird jede Zelle bezeichnet, welche mit der aktuellen Zelle eine Kante oder Ecke teilt.

Die Ziele werden als attraktiv für die Personen angesehen. Die Personen steigern ihren persönlichen Nutzen, je näher sie dem Ziel kommen. In der Realität fühlt sich eine Person jedoch unwohl, wenn ihr eine fremde Person zu nahe kommt. Im Modell wird dies dadurch berücksichtigt, dass sich der Nutzen einer Person verringert, wenn sie einer anderen zu nahe kommt. Um die Simulation möglichst realistisch zu gestalten, bewegen sich die Personen mit einer individuellen Wunschgeschwindigkeit. Diese wird aus den Ergebnissen der ersten Studienarbeit ermittelt.

Das erläuterte Modell gibt die einzelnen Personenbewegungen aus und visualisiert diese

zusätzlich. Die Bewegung der Personen wird in drei getrennten Simulationen mit jeweils unterschiedlichen Algorithmen berechnet. Zunächst wird für jedes Feld der negative euklidische Abstand als Zielnutzen berechnet. Jede Person versucht durch die Wahl des umliegenden Feldes mit dem maximalen Wert seinen Nutzen zu steigern.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit die Personenbewegung mit Hilfe des Floor-Flooding, basierend auf dem Dijkstra Algorithmus zu ermitteln. Jede Person wählt von den anliegenden Feldern das Feld, welches die geringste Anzahl an notwendigen Bewegungen bis zum Ziel hat.

Als dritte Variante erfolgt die Ermittlung der Personenbewegung ebenfalls mit Hilfe des Floor-Flooding. Als Grundlage dient hierbei jedoch die Lösung der Eikonal-Gleichung, welche die Ausbreitung einer Welle beschreibt. Hierfür wird der Fast-Marching Algorithmus verwendet.

Im Laufe der Studienarbeit werden die beschriebenen Modelle anhand unterschiedlicher Tests verglichen und ausgewertet. Eine detaillierte Erläuterung der Tests ist im folgenden Kapitel 3.13 beschrieben.

## **3 Anforderungen/Requirements**

### **3.1 Allgemeines**

Es soll ein zellulärer Zustandsautomat implementiert werden. Die Software soll Personenbewegungen in der Ebene simulieren. Die unterschiedlichen Szenarien (Zustand der Zellen zu Beginn der Simulation), wie beispielsweise die Position der Hindernisse werden der Software als .png Bilddatei übergeben. Diese sind im Unterkapitel 3.13 näher erläutert. Es wird davon ausgegangen, dass sich zu Beginn der Simulation alle Personen im Startbereich (es soll möglich sein mehrere Startbereiche anzulegen) befinden.

### **3.2 Zellen**

Das gesamte Feld (zweidimensionaler Bereich indem sich die Personen bewegen können) soll in Zellen eingeteilt werden. Die Größe des Feldes und die Anzahl an Zellen sollen der Software als Parameter übergeben werden.

Jede Zelle soll quadratisch sein. Jede Zelle kann verschiedene Zustände haben. Sie kann entweder leer oder besetzt sein. Ist eine Zelle besetzt, wird noch weiter unterschieden, ob sie durch ein Hindernis, das Ziel- (Personensenke) oder Startfeld (Personenquelle) oder durch eine Person besetzt ist.

### **3.3 Hindernisse**

Es soll davon ausgegangen werden, dass jedes Hindernis eine oder mehrere Zellen ganz belegt. Hindernisse können von den Personen nicht betreten werden. Falls sich ein

Hindernis zwischen einer Person und ihrem Ziel befindet, ist die Person gezwungen um das Hindernis herum zu gehen.

In der Realität versucht eine Person einem Hindernis möglichst frühzeitig auszuweichen. Sie senkt somit ihren Nutzen, je näher sie einem Hindernis kommt. Dies wird im weiteren Verlauf dieser Studienarbeit nicht berücksichtigt.

### 3.4 Ziele

Durch das entsprechende Testszenario werden ein oder mehrere Ziele definiert. Ziele werden als attraktiv für die Personen angesehen. Jede Person erhöht ihren Nutzen, wenn sie sich dem Ziel nähert. Befinden sich mehrere Ziele im Feld, wird die Wahl des Ziels für jede Person abhängig vom Betriebsmodus bestimmt.

### 3.5 Personen

Jede Person soll in ihrem Startfeld starten und sich im Laufe der Simulation von Zelle zu Zelle auf ihr Ziel hin bewegen und dadurch ihren persönlichen Nutzen, je näher sie dem Ziel kommt, steigern. Jede Person kann sich in der Moore-Umgebung (8 mögliche Bewegungsrichtungen) bewegen. Die möglichen Bewegungsrichtungen sind in Abbildung 1 rot markiert.

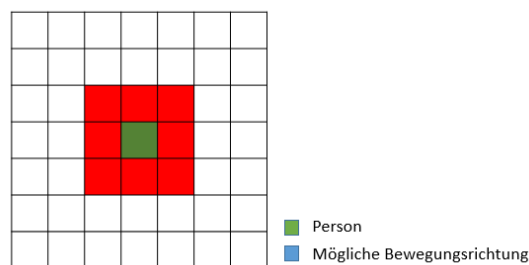


Abbildung 1: Moore-Umgebung

Die Personen können nur freie Zellen betreten. Jede Person wählt genau die Zelle als nächste Zelle, welche ihr den steilsten Nutzenanstieg ermöglicht. Der Nutzen der verschiedenen Zellen wird abhängig vom Betriebsmodus unterschiedlich berechnet. Darüber hinaus soll der Nutzen durch die Position der anderen Personen beeinflusst werden.

Hierfür wird zwischen zwei Bereichen, abhängig vom Abstand zur nächsten Person unterschieden. Beträgt der Abstand zu einer fremden Person weniger als  $45cm$ , wird der vertraute Bereich (intimate space) der Personen betreten. Beträgt der Abstand zwischen  $45cm$  und  $120cm$ , wird der persönliche Bereich (personal space) der Personen betreten.

Für den vertrauten Bereich ist der Nutzenverlust ( $Nv(x)$ ), abhängig vom Abstand  $x$ , nach Funktion 2 definiert. Für den persönlichen Bereich wird der Nutzenverlust ( $Np(x)$ ), wiederum abhängig vom Abstand  $x$  zur anderen Person, durch die Funktion 1 definiert.

$$Np(x) = \mu * \exp\left(\frac{4}{\left(\frac{d(x)}{\delta_p * r}\right)^2 - 1}\right) \quad (1)$$

$$Nv(x) = Np + \frac{\mu}{a_p} * \exp\left(\frac{4}{\left(\frac{d(x)}{\delta_v * r}\right)^{2*b_p} - 1}\right) \quad (2)$$

$d(x)$  beschreibt den aktueller Abstand zur nächsten Person. Die folgende Tabelle enthält die Bedeutung der einzelnen Parameter und die entsprechenden Werte:

Parameter	Beschreibung	Wert
$\mu$	Stärke des Nutzenverlustes	5.0
$a_p$	Dämpfung zwischen vertrautem und persönlichem Bereich	1.0
$b_p$	Stärke des Übergangs zwischen vertrautem und persönlichen Bereich	1
$\delta_p$	persönlicher Bereich [m]	1.20
$\delta_v$	vertrauter Bereich [m]	0.45
$r$	Radius einer Person [m]	0.2

Tabelle 1: Parameter und Werte für die Berechnung des Nutzenverlustes

Weitere Erläuterungen zu den Parametern, den Werten und den verwendeten Funktionen sind im Kapitel ?? beschrieben.

### 3.6 Geschwindigkeit der Personen

Jede Person soll eine individuelle Wunschgeschwindigkeit besitzen. Sie bewegt sich bei freier Bahn mit dieser Geschwindigkeit fort. Die Wunschgeschwindigkeiten sollen als normalverteilt angesehen werden. Als Mittelwert und Standardabweichung sollen die errechneten Werte aus der ersten Studienarbeit verwendet werden.

### 3.7 Zeitmodellierung

Die Simulation unterliegt keinen harten Echtzeitanforderungen. Sie soll für die gesamte Simulationsdauer so schnell wie möglich durchgeführt werden. Es soll keine globale Uhr modelliert werden.

Die Visualisierung der Simulation soll hingegen die Bewegungen der Personen möglichst in Echtzeit darstellen. Sie unterliegt weichen Echtzeitanforderungen. Abweichungen aufgrund mangelnder Rechner-Ressourcen sind tolerierbar.

### 3.8 Parameter

Die Tabelle 2 zeigt alle möglichen Parameter, welche die Software steuern. Alle Parameter sind optional.

Parameter	Beschreibung	Default
-free-flow-velocity	Mittelwert der Wunschgeschwindigkeit [m/s]	1,0
-free-flow-deviation	Standardabweichung der Wunschgeschwindigkeiten [m/s]	0
-algorithm	Algorithmus (euclid, dijkstra, fast-marching)	dijkstra
-output-folder	Ordner in den der Output gespeichert wird	../data/
-cellsize	Größe der einzelnen Zellen [m]	1
-input-map	Pfad zum Bild der map (Auswahl des Testfalls)	default.png

Tabelle 2: Parameter und Defaultwerte

### 3.9 Berechnungen

Die Aufgabe der Software ist die Simulation von Personenbewegungen. Für möglichst genaue Zeitangaben wird die Java Klasse `BigDecimal` verwendet. Für die Division werden 32 Nachkommastellen berücksichtigt und als Rundungsmodus wird `Half_Even` verwendet, da dieser kumulative Fehler bei sich wiederholenden Berechnungen minimiert. Die anschließende Berechnung und Aufbereitung der Daten (insbesondere für den Test 3.13.6) erfolgt mit Mathematica.

### 3.10 Report

Alle errechneten Ergebnisse sollen über einen Report ausgeleitet werden. Der Report soll im .xml Format ausgeleitet werden um eine gute Weiterverarbeitung der Ergebnisse (Visualisierung) zu gewährleisten. Die Datei *output.xml* soll alle benötigten Informationen, wie beispielsweise die einzelnen Events der Personen, die durch den Algorithmus berechneten Entfernungen der einzelnen Zellen vom Ziel und eine Übersicht über den Zustand der einzelnen Zellen (Fieldmap), für Simulation beinhalten.

Die Wunschgeschwindigkeiten werden zufällig generiert. Diese sollen normalverteilt sein. Für eine Überprüfung der Zufallszahlgenerierung sollen die Wunschgeschwindigkeiten und die ID der entsprechenden Person im .csv Format in der Datei *velocity.csv* ausgegeben werden.

### 3.11 Berechnung des Zielnutzens

Es sollen drei unterschiedliche Algorithmen für die Berechnung des Zielnutzens (Attraktivität) einer Zelle implementiert werden.

Algorithmus 1: Der Nutzen bzw. die Attraktivität jeder Zelle entspricht dem negativen euklidischen Abstand. Hierbei können keine Hindernisse umgangen werden. Jede Person versucht den Nutzen zu maximieren und wählt jeweils die Zelle mit maximalen Wert aus den umliegenden aus.

Algorithmus 2: Der Nutzen bzw. die Attraktivität jeder Zelle wird durch Floor-Flooding, basierend auf dem Dijkstra Algorithmus, berechnet. Für jede Zelle wird die geringste Anzahl an notwendigen Bewegungen bis zum Ziel ermittelt.

Algorithmus 3: Analog zum Algorithmus 2 wird auch in diesem hier der Nutzen bzw. die Attraktivität jeder Zelle mittels Floor-Flooding berechnet. Es wird jedoch der Fast-Marching Alforithmus (Lösung der Eikonal-Gleichung) als Grundlage verwendet.

### 3.12 Werte für die Auswertung

Alle in der Tabelle 3 aufgeführten Werte sollen auf Basis der Simulation ermittelt und ausgewertet werden. Einige Werte werden nur für bestimmte Tests benötigt.

Ermittelte Werte	Beschreibung	Wann benötigt
mittlere Geschwindigkeit	durchschnittliche Geschwindigkeit der Personen im Feld	Rimea-Test 4
Fluss (Personen/Meter/s)	Anzahl der Personen mit Geschwindigkeit $> 1\text{m/s}$ im Feld	Rimea-Test 4
Simulationsdauer	Dauer bis der Test beendet ist	Hühner Test, Evakuierung (2 Evakuierung (4

Tabelle 3: Werte für die Auswertung

### 3.13 Testszenarien für die Simulation

Die implementierten Algorithmen (vgl. Unterkapitel 3.11 ) sollen anhand unterschiedlicher Testszenarien verglichen und verifiziert werden. Die verschiedenen Szenarien sollen der Simulation als .png Datei übergeben werden.

#### 3.13.1 Erstellung der Testszenarien

Es soll die Möglichkeit bestehen, unterschiedliche Testszenarien mittels eines Bildbearbeitungsprogrammes zu erstellen und an die Simulation (als .png Datei) zu übergeben. Bei der Erstellung ist sowohl die Anzahl der Personen, als auch die Anzahl der Hindernisse und Ziele (Personensenken) beliebig. Hinsichtlich der Farben der Objekte müssen jedoch

die in der folgenden Tabelle 4 beschriebenen Farbcodes verwendet werden. Jedes Pixel wird durch eine Zelle des Automaten repräsentiert.

Farbcode	Farbe	Bedeutung
#3F48CC	Blau	Ziel/ Personensenke
#000000	Schwarz	Ziel/ Personensenke
#FFFFFF	Weiß	Leere Zelle
#22B14C	Grün	Person

Tabelle 4: Werte für die Auswertung

### 3.13.2 Testszenario: Freier Fluss

Im Zuge dieses Tests soll überprüft werden, ob sich Personen bei freier Bahn (keine Hindernisse zwischen Start und Ziel) mit ihrer jeweiligen Wunschgeschwindigkeit auf das Ziel hin bewegen. Des weiteren soll überprüft werden, ob die Person den kürzesten Weg verwendet. Der Test soll mit allen 3 Betriebsmodi durchgeführt werden. Abbildung 2 stellt den Testaufbau schematisch dar.



Abbildung 2: Testfall Freier Fluss (schematisch)

### 3.13.3 Testszenario: Hühnertest

Zwischen Start und Ziel soll ein U-förmiges Hindernis (Öffnung in Richtung des Startes) eingefügt werden. Abhängig vom Betriebsmodus wird ein unterschiedliches Ergebnis erwartet:

Betriebsmodus 1: Die Personen sollen sich auf dem kürzesten Weg auf das Ziel zubewegen. Sobald sie das Hindernis erreicht haben, sollen sie stehen bleiben. Erwartungsgemäß wird der Test nicht erfolgreich verlaufen.

Betriebsmodi 2 und 3: Die Personen sollen das Hindernis umgehen und das Ziel erreichen.



Bei einem „Feststecken im Hindernis“ (wie im Betriebsmodus 1 gefordert) wird der Test als fehlgeschlagen gewertet. Abbildung 3 stellt den Testaufbau schematisch dar.

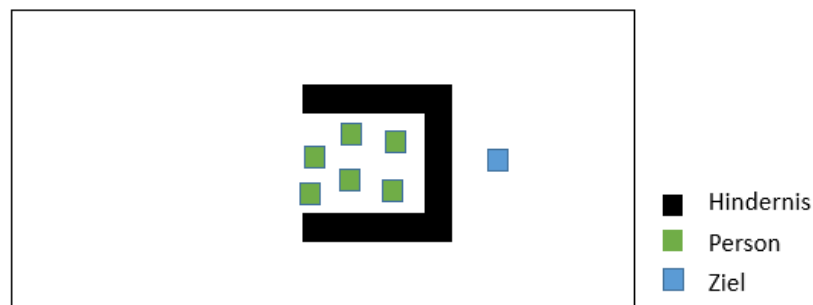


Abbildung 3: Testfall Hühnertest (schematisch)

### 3.13.4 Testscenario: Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen

Die Personen befinden sich zu Beginn in einen von Hindernissen umgebenen, quadratischen Raum. An 2 Seiten sind Öffnungen platziert (freie Zellen). Hinter diesen Öffnungen befindet sich jeweils ein Ziel. Im Laufe des Tests sollen die Personen durch die beiden Engstellen zum Ziel gelangen.

Dieser Test soll mit den Betriebsmodi 2 und 3 in unterschiedlichen Versionen durchgeführt werden. Zunächst sollen sich die Türen an benachbarten Seiten befinden. Hierbei sollen sie einmal mit geringem und einmal mit sehr großem Abstand zueinander platziert werden. Anschließend sollen die Türen an gegenüberliegenden Seiten platziert mittig werden. Unterschiede hinsichtlich der Evakuierungsdauer sind festzuhalten. Die Abbildungen 4, 5 und 6 zeigen die unterschiedlichen Testversionen schematisch.

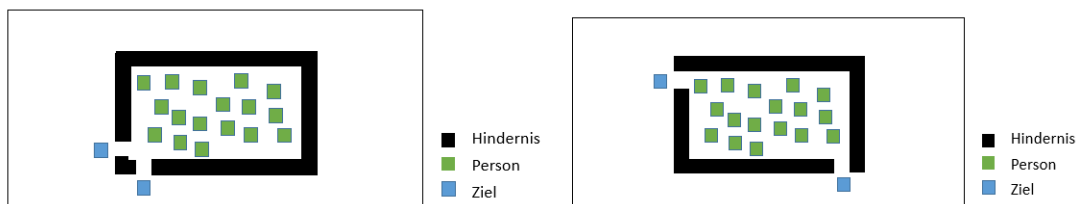


Abbildung 4: Testfall Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen (Nebeneinander, geringer Abstand)

Abbildung 5: Testfall Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen (Nebeneinander, großer Abstand)

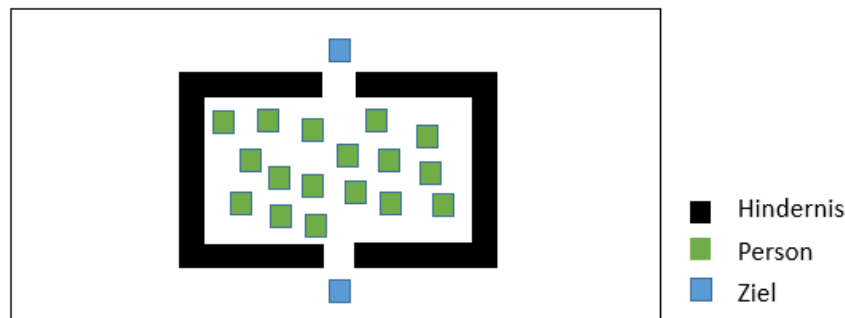


Abbildung 6: Testfall Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen (Gegenüber)

### 3.13.5 Testszenario: Evakuierung eines Raumes mit 4 Türen

Dieser Testfall entspricht der in Kapitel 3.13.4 beschriebenen Evakuierung mit 2 Türen. In diesem Fall befindet sich jedoch an jeder Raumseite eine Tür. Die Türen sollen sich in einer ersten Version mittig bezogen auf die jeweilige Raumseite befinden. Darüber hinaus sollen in einer weiteren Version die Auswirkungen ermittelt werden, wenn jeweils die 2 Türen an benachbarten Seiten mit minimalen Abstand zueinander platziert werden. Unterschiede hinsichtlich der Evakuierungsdauer sind festzuhalten. Aufgrund der Analogie zur Evakuierung mit 2 Türen wird auf eine graphische Veranschaulichung des Testaufbaus verzichtet.

### 3.13.6 Testszenario: Fundamentaldiagramm - Rimea-Test 4

In diesem Testfall soll ein  $65m$  langer und  $12m$  breiter Gang angelegt werden. Auf der einen Seite des Ganges befindet sich die Personenquelle, auf der anderen Seite die Personensenke. Im Laufe des Testes sollen die Personen den Gang entlangschreiben. Die Anzahl der Personen ist zu variieren. In einer weiteren Version des Tests sollen Personen, welche die Personensenke erreicht haben, erneut bei der Personenquelle starten (Endlosschleife). Abbildung 7 zeigt den Testaufbau schematisch.

### 3.13.7 Testszenario: Engstelle (unidirektional)

In diesem Testfall soll, analog zum Rimea-Test 4, ein  $65m$  langer und  $12m$  breiter Gang angelegt werden. Am Ende des Ganges befindet sich eine Engstelle mit  $6m$  Breite und dahinter die Personensenke. Es soll mit variierender Anzahl an Personen getestet werden, wie lange es dauert bis die Engstelle durchschritten wurde. Der schematische Testaufbau ist in Abbildung 8 aufgeführt.



Abbildung 7: Testfall Rimea 4 (schematisch)

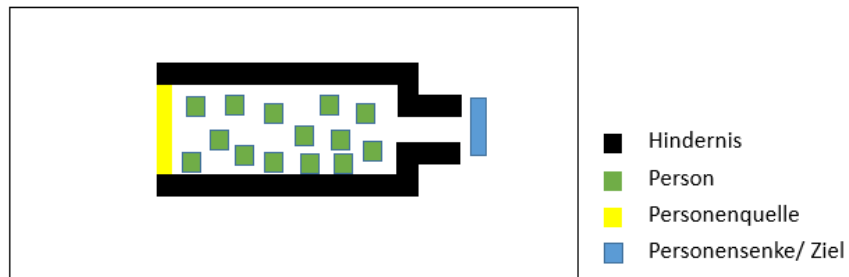


Abbildung 8: Testfall Engstelle (schematisch)

### 3.14 Visualisierung

Die Visualisierung soll die errechneten Personenbewegungen graphisch darstellen. Als Grundlage soll der ausgegebene Report (vgl. Abschnitt 3.10) dienen. Konkrete Anforderungen bezüglich der Visualisierung sind in Abbildung 9 abgebildet.

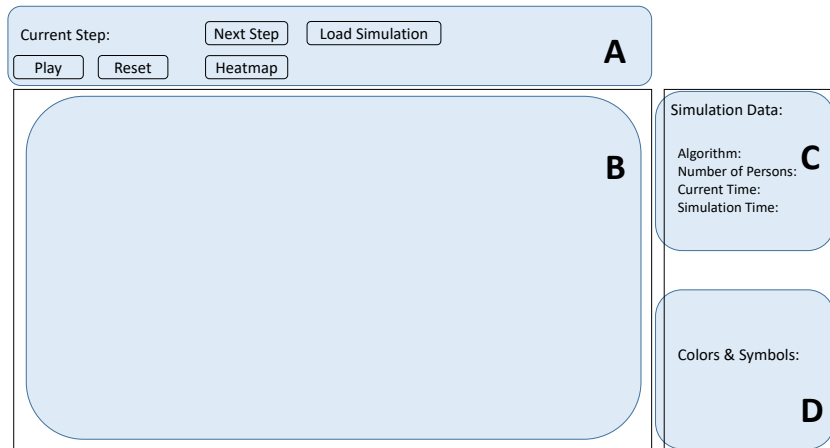


Abbildung 9: Visualisierung (schematisch)

Die Oberfläche der Visualisierung soll aus 4 verschiedenen Teilen bestehen, welche in der Abbildung durch die blauen Kästen A-D hervorgehoben wurden. Im Teil A sollen Konfigurationsmöglichkeiten für die Visualisierung aufgeführt sein. Beispielsweise soll zwischen einer normalen Darstellung der Simulation und einer Heatmap gewechselt werden können. Darüber hinaus soll die Möglichkeit bestehen, die Visualisierung zu stoppen und schrittweise fortzusetzen.

Teil B enthält die eigentliche Visualisierung der Personen, Hindernisse und Ziele. In Teil C sind alle Informationen bezüglich der Visualisierung aufgeführt und Teil D enthält eine Legende der verwendeten Symbole und Farben.

## 4 Softwaredesign

Der Aufbau der Anwendung wurde im Team diskutiert und anschließend mittels UML spezifiziert.

## 5 Softwaretest

## 6 Vergleich der Algorithmen

### 6.1 Euklid

### 6.2 Dijkstra

### 6.3 Fast Marching

## 7 Einfluss der Zellgröße auf die Abstandsberechnung

Bei der Berechnung der Abstände hat die Wahl der Zellgröße je nach Algorithmus einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation. Die Zellgröße gibt nicht nur die minimale Schrittweite vor, sondern hat auch Einfluss auf die Genauigkeit der Nutzenberechnungen. Um einen Vergleich darzustellen wurde ein Quadratisches Feld angelegt. Die Zellgröße des Feldes sowie die Anzahl der Felder wurden so variiert, dass die Entfernung von der rechten unteren Ecke zur linken oberen Ecke (am weitesten entfernter Punkt) immer den gleichen Abstand hat. Es wird also die Diagonale des Rechtecks berechnet. Die Abbildung 10 zeigt den Vergleich beider Algorithmen bei der Abstandsberechnung. Üblicherweise wird die Farbskala so gewählt um alle Werte vom kleinsten Abstand zum weitesten Punkt abzubilden. Um den Vergleich an dieser Stelle deutlich zu machen, wurde für beide Bilder die selbe Farbskala verwendet. Mit bloßem Auge ist die Differenz nur schwer zu erkennen. Es ist jedoch sichtbar, dass das Feld, welches mit dem Euklid algorithmus berechnet wurde, einen deutlicheren Bogen aufweist.

Eine Möglichkeit die Unterschiede zu visualisieren ist es, die Bilder mittels einer Differenzbildung der Beiden Bilder. Dafür wird ein Bild als Basis hergenommen und das zweite Bild als eine Ebene darber eingefügt. Die Farben der zweiten Ebene werden von der ersten Ebene subtrahiert. Gleichen sich die Farben beider Ebenen, so ist das Ergebnis schwarz. Dieser Vergleich macht nur Sinn, wenn für beide Darstellungen die selbe Farbskala verwendet wurde, also die Entfernungen mit dem gleichen Farbcode codiert wurden. Die Abbildung 11 zeigt die Differenzmenge der in Abbildung 10 dargestellten Karten. An diesem Bild ist deutlich zu erkennen, dass die Zellen, welche sich nur in X und nur in Y Richtung vom Ziel entfernen schwarz sind. Es gibt also keinen Unterschied zwischen dem Euklidischen Abstand und dem Abstand welcher mittels Fast Marching berechnet wurde, bei einer Betrachtung der Zellen nur in X oder nur in Y Richtung. Entfernt man sich schräg vom Ziel (Also X und Y Anteil gleichzeitig), sieht man deutlich Differenzen der beiden Algorithmen.

Die Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse dieses Experiments. Die Cellsize gibt dabei die Kantenlänge einer quadratischen Zelle an. Wichtig ist der Wert „Distance in X and Y“, welcher

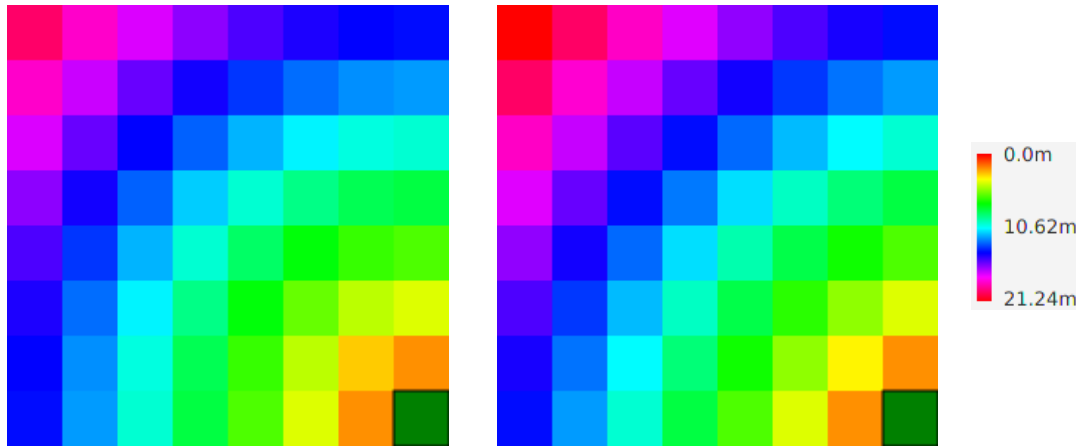


Abbildung 10: Berechnung der Abstände mittels Euklid (links) und Fast Marching (rechts) an einem Feld mit einer Zellbreite von 2 m. Dunkelgrün: Ziel, Rot: am weitesten entfernter Punkt im Feld

besagt, dass das Ziel in X und in Y Richtung immer jeweils 14 Zellen entfernt ist. Nach der Formel wurde der Abstand von Ziel zum am weitesten entfernten Punkt berechnet:

$$a = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(14 \text{ m})^2 + (14 \text{ m})^2} = 19,799 \text{ m}$$

Wie in der Tabelle zu sehen ist, berechnet der Euklid Algorithmus den Abstand sehr präzise. Da der Euklid Algorithmus kein „Gedächtnis“ hat also ohne Einfluss vorheriger Zellen berechnet und die oben genannte Formel anwendet ist der Algorithmus gut geeignet um die exakte Entfernung zu berechnen. Interessant in der Tabelle ist vor allem die Abweichung von 1,45 m, welche beim Fast Marching Algorithmus entsteht. Diese Abweichung entspricht einem Fehler von von 7,3 % bezogen auf die tatsächliche Entfernung. Verringert man die Zellgröße, so konvergiert der Fast Marching Algorithmus gegen den euklidischen Abstand und der Fehler gegen 0. Die prozentualen Fehler in Abhängigkeit der Zellgröße sind in Abbildung 12 dargestellt.

## 8 Einfluss der Zellgröße auf die maximale Dichte

Darüber hinaus hat die Zellgröße direkten Einfluss auf die Dichte  $[\frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}]$  in einem Feld. Würde man die Zellgröße von  $2 \text{ m}^2$  wählen, erhielte man eine maximale Dichte von  $0,5 \frac{1}{\text{m}^2}$ . Es ist darauf zu achten, dass die Zellgröße angemessen gewählt wird. Bei weiteren Versuchen wurde stets eine Zellbreite von 0,4 bis 0,5 m verwendet, sofern nichts anderes angegeben.

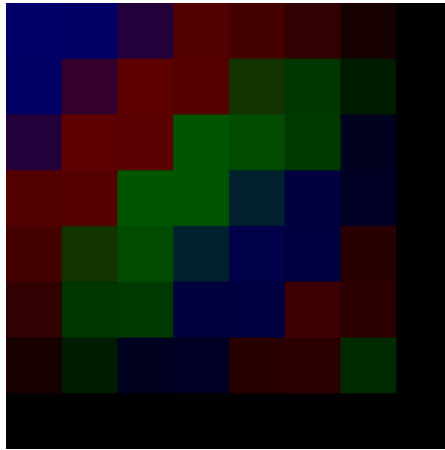


Abbildung 11: Differenzbildung der beiden Karten Euklid und Fast Marching

## 8.1 Verifikation

### 8.1.1 Evakuierung

Mit Hilfe der verschiedenen Evakuierungstests sollen die Auswirkungen unterschiedlicher Positionen und Anzahl von Türen auf die Dauer der Evakuierung eines Raumes ermittelt werden. Die Berechnung des Zielnutzens auf Basis des Euklid Algorithmus wird hierbei nicht berücksichtigt. Dieser Algorithmus ist zwar gut geeignet um den kürzesten Weg zu einem Ziel zu finden, Hindernisse können jedoch nicht umgangen werden. Somit kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine Person, beispielsweise in einer Ecke, „hängen bleibt“. Dieses Verhalten würde nicht der Realität entsprechen.

**8.1.1.1 Evakuierung eines Raumes (Personen befinden sich in der Mitte)** Für die Verifikation der Simulation sollen sich die Personen zunächst alle dicht gedrängt, symmetrisch in der Mitte des Raumes befinden. An 2 gegenüberliegenden Seiten des Raumes soll sich jeweils eine Tür befinden (Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen). In einer weiteren Simulation sollen sich an den anderen beiden Seiten jeweils eine weitere Tür befinden (Evakuierung eines Raumes mit 4 Türen). Die Evakuierungsdauer des Raumes mit 4 Türen müsste nun exakt halb so lange sein, wie die des Raumes mit 2 Türen.

Um eine möglichst symmetrische Anordnung der Personen sicher zu stellen, wurden alle Zellen des Raumes mit Personen belegt. Es wurden Evakuierungen mit 676 Personen simuliert. Die beiden Räume, für die im weiteren Kapitel die Evakuierungszeiten verglichen werden, sind in Abbildung 13 dargestellt. Für die Evakuierungsdauer ist nicht die gesamte Simulationsdauer (Zeit bis die letzte Person das Ziel erreicht), sondern die Zeit, bis die letzte Person den Raum verlässt relevant. Dieser Bereich wurde in den Abbildungen mit einem roten Rahmen hervorgehoben. Alle Szenarien wurden zunächst auf Basis des

Cellsize [m]	2	1	0,5	0,25	0,125	0,0625	0,03125
Cells in X and Y	7	14	28	56	112	224	448
Distance in X and Y [m]	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>14</b>
Tatsächliche Entfernung [m]	19,799	19,799	19,799	19,799	19,799	19,799	19,799
Euklid [m]	19,799	19,799	19,799	19,799	19,799	19,799	19,799
Fast Marching [m]	<b>21,245</b>	<b>20,717</b>	<b>20,363</b>	<b>20,137</b>	<b>19,997</b>	<b>19,913</b>	<b>19,863</b>
Diff [m]	1,45	0,92	0,5645	0,3380	0,1979	0,1138	0,0644
Error [%] diff/distance	<b>7,30</b>	<b>4,64</b>	<b>2,85</b>	<b>1,71</b>	<b>1,00</b>	<b>0,57</b>	<b>0,33</b>

Tabelle 5: Vergleich der Algorithmen Fast Marching und Euklid. Cellsize ist die Kantenlänge einer quadratischen Zelle in m (Zellbreite)

Dijkstra Algorithmus simuliert. Die Abbildung 14 zeigt die Heatmap der Szenarien. Der symmetrische Nutzenanstieg in zwei bzw. vier Richtungen ist durch den Farbverlauf dargestellt.

In Abbildung 15 ist ein Ausschnitt der Simulationen nach einer Simulationszeit von ca. 24,1s (links) bzw. 15,5s (rechts) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich jeweils ca. die Hälfte (2 Türen) bzw. ein Viertel der Personen (4 Türen) auf jede Tür zubewegen.

Abschließend zeigt Abbildung 16 die Evakuierungsdauer der beiden Räume. Die entsprechenden Ausschnitte zeigen den Moment, in dem die letzte Person den rot markierten Bereich verlassen hat. Bei der Simulation mit 2 Türen ist das nach ca. 73,07s, bei der Simulation mit 4 Türen nach ca. 36,98s. Durch die beiden zusätzlichen Türen verläuft die Evakuierung somit um das 1,98 fache, also fast das 2 fache schneller. Diese Übereinstimmung mit der Theorie kann als Indiz für die Richtigkeit der Simulation angesehen werden.

Die Abweichung ist zum einen dadurch zu erklären, dass die Geschwindigkeiten der Personen zufällig verteilt sind. Es kann also vorkommen, dass sich viele, etwas schneller gehende Personen im linken Teil des Feldes befinden und langsamer gehende rechts. Folglich würde die Evakuierung des linken Teils nicht so lange dauern, wie die des rechten und die anfängliche Symmetrie wäre nicht mehr vorhanden. Eine weitere Ursache könnte die Gestaltung der Implementierung sein. Eine Person, welche aktuell nicht ziehen kann (Felder mit größerem Nutzen als aktuell besetztes Feld sind belegt) wartet so lange, wie sie bräuchte um zum gewünschten Feld zu gehen, bis sie erneut versucht zu gehen. Das Verhalten ist unabhängig davon, ob das gewünschte Feld früher schon frei wird oder nicht. Somit warten Personen, obwohl sie theoretisch schon gehen könnten.



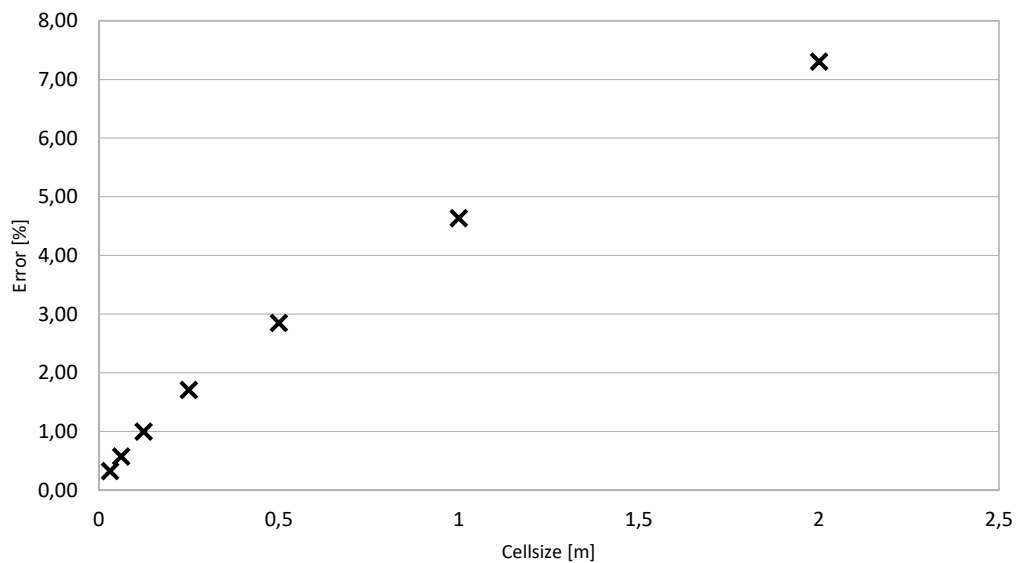


Abbildung 12: Prozentualer Fehler des Fast Marching Algorithmus in Abhängigkeit der Zellbreite

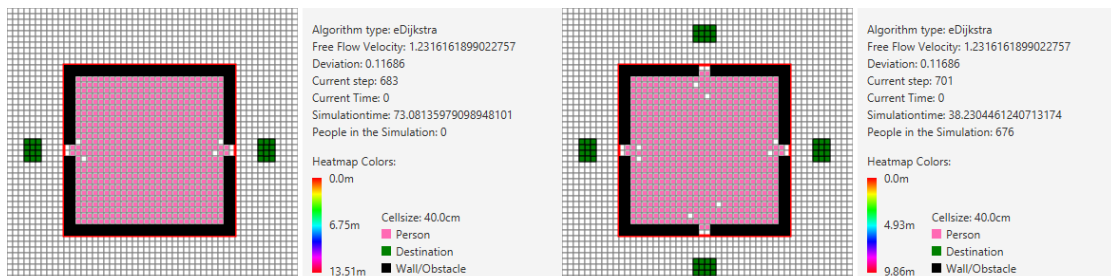


Abbildung 13: Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen (links) und mit 4 Türen (rechts)

Zum Vergleich zeigt Abbildung 17 die Evakuierungszeiten des identischen Raumes auf Basis des Fast-Marching Algorithmus. Auch hier ist die Dauer der Evakuierung bei zwei zusätzlichen Türen um den Faktor 1,97 kürzer.

Stellt man die erläuterten Evakuierungsszenarien in Bezug zur Realität müssen einige Punkte beachtet werden. Zum einen befinden sich in der Realität niemals so viele Personen symmetrisch in einem Raum. Zum anderen ist es aufgrund von Brandschutz und anderen

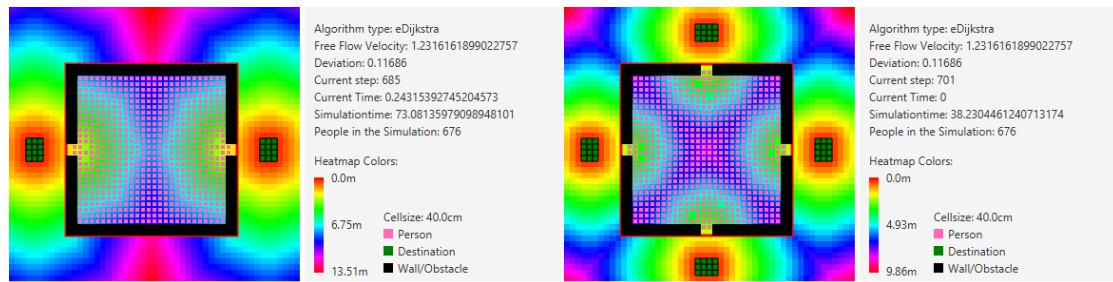


Abbildung 14: Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen (links) und mit 4 Türen (rechts), Heatmap

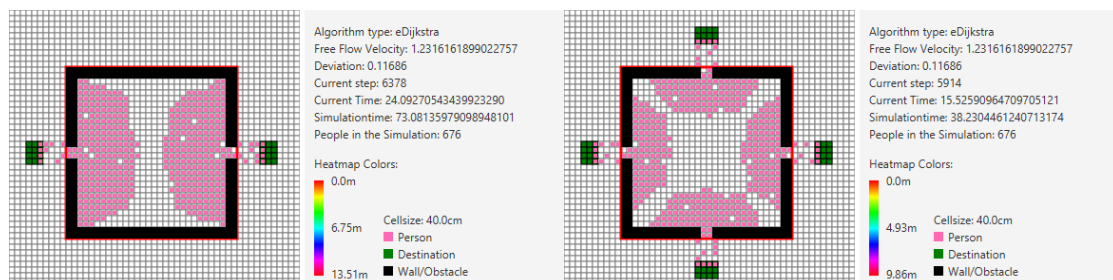


Abbildung 15: Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen (links) und mit 4 Türen (rechts), Ausschnitt

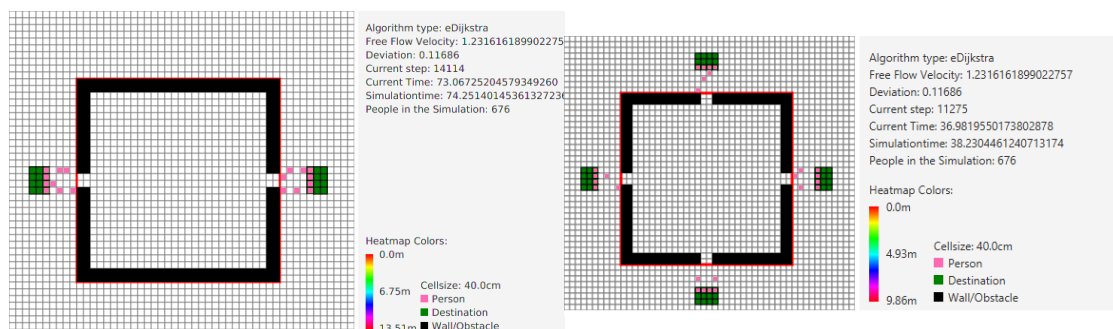


Abbildung 16: Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen (links) und mit 4 Türen (rechts), Ende der Evakuierung

Sicherheitsvorgaben nicht zulässig 676 Personen in einen ca. 108qm großen Raum zu lassen. Des weiteren wurden menschliche Faktoren wie Orientierungslosigkeit oder Panik in der Simulation nicht berücksichtigt. Die geringen Evakuierungszeiten sind überwiegend darauf zurückzuführen, dass jede Person zu jedem Zeitpunkt die perfekte Orientierung hat und genau die Zellen betritt, die auf dem für sie effizientesten Weg zum Ziel liegen. Diese Simulationen sind somit zusammenfassend als theoretisches Konstrukt zu sehen. Anhand dessen kann die Simulation gegen die Anforderung, dass sich die Evakuierungszeit bei

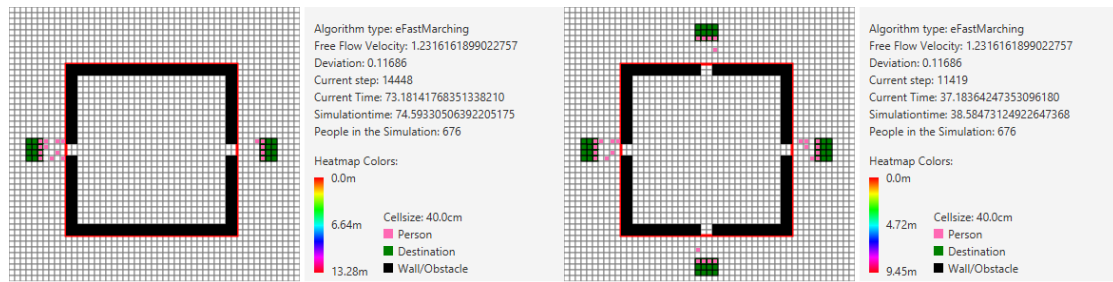


Abbildung 17: Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen (links) und mit 4 Türen (rechts), Fast-Marching Algorithmus (Ende der Evakuierung)

Verdopplung der Türen Halbieren muss, verifiziert werden.

**8.1.1.2 Evakuierung eines Raumes (Personen zufällig verteilt)** In diesem Abschnitt werden weitere Evakuierungstests gegenübergestellt, bei denen die Personen zufällig im Raum verteilt wurden. Anhand dieser Tests sollen die Auswirkungen unterschiedlicher Positionen der Türen auf die Evakuierungsdauer simuliert werden.

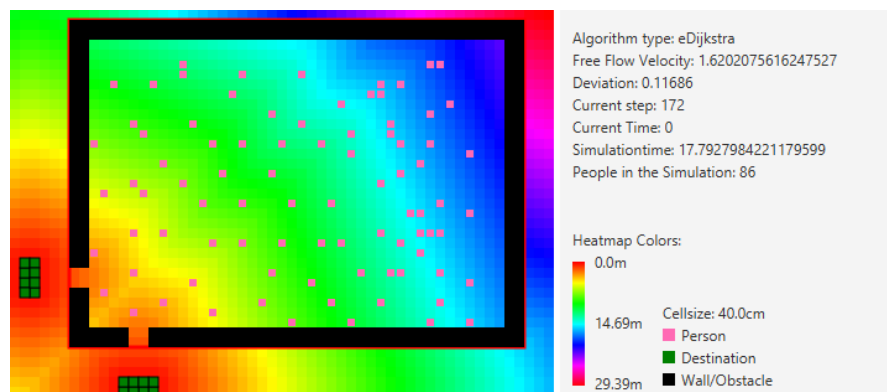


Abbildung 18: Verteilung der Personen (Heatmap Dijkstra Algorithmus)

Abbildung 18 zeigt die Verteilung der Personen, die für unterschiedliche Evakuierungstests verwendet wird. Somit wird eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse erzielt. In der Abbildung ist außerdem die Heatmap des Dijkstra Algorithmus für dieses Szenario zu sehen.

Die Abbildung 19 zeigt einen Ausschnitt der Simulation nach einer Simulationszeit von ca. 6s. Wie zu erwarten ist, drängen alle Personen in die Ecke links unten. Dort bilden sich vor den Engstellen (Ausgängen) kleinere Staus. Die Evakuierungsdauer beträgt für die Simulation mit dem Dijkstra Algorithmus ca. 16,8s. Da sich die Personen bei Verwendung des Fast Marching Algorithmus effizienter auf die Ziele zu bewegen, bilden

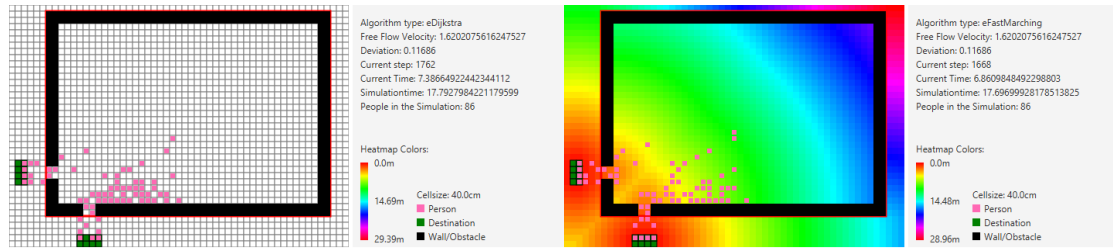


Abbildung 19: Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen (geringer Abstand), Dijkstra Algorithmus (links), Fast-Marching Algorithmus (rechts)

sich etwas kleinere Staus an den Engstellen und die Evakuierungsdauer ist mit ca. 16,5s etwas kürzer.

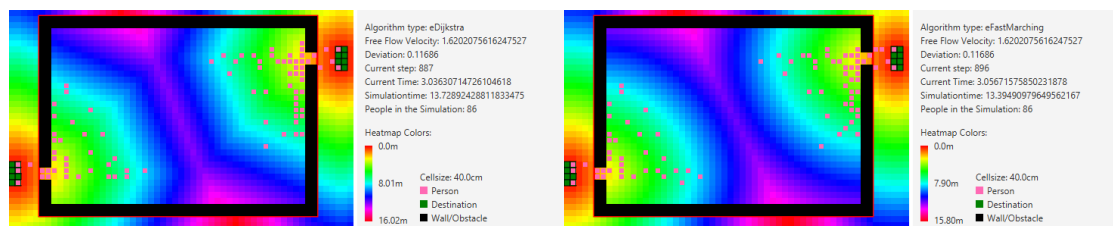
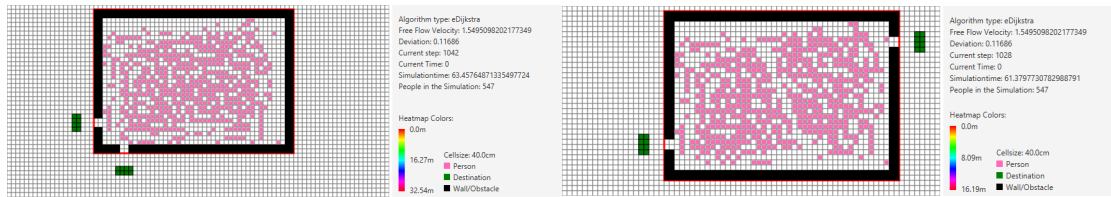


Abbildung 20: Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen (großer Abstand), Dijkstra Algorithmus (links), Fast-Marching Algorithmus (rechts)

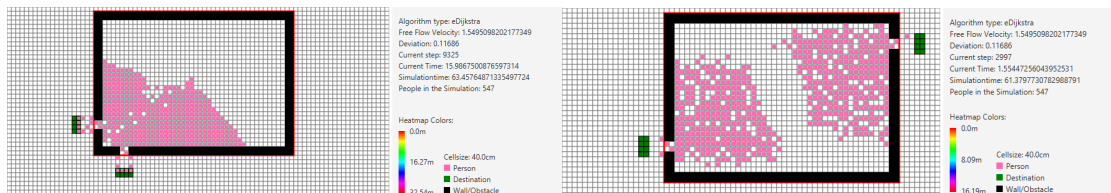
Im Vergleich dazu zeigt die Abbildung 20 einen Ausschnitt der Simulation, in der die Ausgänge bzw. Ziele sehr weit voneinander entfernt gewählt wurden. Beide Algorithmen werden gegenübergestellt. In der Abbildung ist sofort zu sehen, dass sich in etwa die Hälfte der Personen (Personen deren Startposition in der entsprechenden Hälfte lag) auf die Ziele unten links und die andere Hälfte auf die Ziele oben rechts zubewegen. Die Heatmaps zeigen die entsprechende Entfernung an. Die maximale Entfernung, die eine Person von einer Tür haben kann, ist in der Simulation mit den nahe beieinander liegenden Türen fast doppelt so groß (ca. 28m), wie in der Simulation in der die Türen weit voneinander entfernt sind (ca. 15m).

Die Evakuierungsdauer ist mit ca. 12,53s (Dijkstra) bzw. 12,6s (Fast-Marching) deutlich kürzer als im zuvor beschriebenen Szenario (vgl. Abbildung 19). Um diesen Zusammenhang weiter zu überprüfen, wurde eine zusätzliche Map mit deutlich mehr Personen im Raum angelegt. Die Positionen der Türen wurde nicht verändert. Da hierbei vor allem die Auswirkung der Position der Türen auf die Evakuierungsdauer ermittelt werden soll, wurde dieser zusätzliche Test nur auf Basis des Dijkstra Algorithmus durchgeführt. Die Implementierung der Simulation ermöglicht jedoch, diesen bei Bedarf auf Basis des Fast-Marching Algorithmus zu wiederholen.

Abbildung 21 zeigt die Aufteilung der 547 Personen und die Positionen der Türen in den beiden Szenarien.

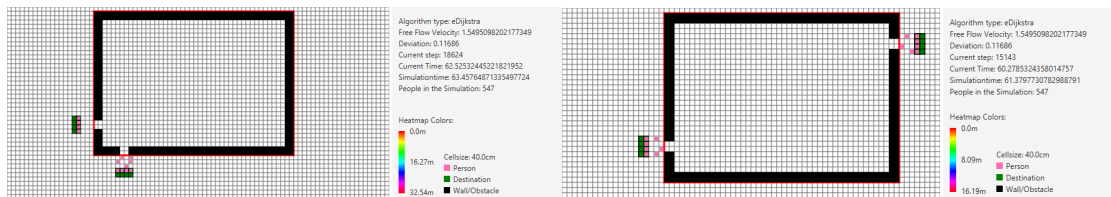


Abbildungung 21: Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen, links: geringer Abstand zwischen den Türen, rechts: großer Abstand zwischen den Türen



Abbildungung 22: Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen (Ausschnitt der Simulation), links: geringer Abstand zwischen den Türen, rechts: großer Abstand zwischen den Türen

Die Abbildung 22 zeigt einen Ausschnitt der Simulation bei 15,97s (links) bzw. 1,55s (rechts). In beiden Abbildungen ist deutlich zu sehen, dass sich die Personen, aufgrund der hohen Personenanzahl, vor allen Türen stauen.



Abbildungung 23: Evakuierung eines Raumes mit 2 Türen (Ausschnitt: Ende der Evakuierung), links: geringer Abstand zwischen den Türen, rechts: großer Abstand zwischen den Türen

Abschließend zeigt die Abbildung 23 das Ende der Evakuierung der beiden Räume. Die Evakuierung eines Raumes, bei dem die Türen weit voneinander entfernt sind, verläuft mit einer Dauer von ca. 60,28s um ca. 2,3s schneller als die eines Raumes, bei dem die Türen nah beieinander liegen (62,53s). Durch eine höhere Anzahl an Personen, wirkt sich die Position der Türen somit nur noch sehr gering auf die Evakuierungsdauer aus. Hintergrund hierfür könnte die lange Wartezeit bzw. der große Stau vor den jeweiligen Türen sein. Da die Wartezeit der einzelnen Personen teilweise sehr hoch ist, wirkt sich der längere Weg bis zur Tür kaum auf die Evakuierungsdauer aus.

### 8.1.1.3 Fazit und Vergleich

## **8.2 Validation**

## **9 Ausblick und Fazit**

## **Literatur**