Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen

Version 4.1.0 vom 12.05.2025

Frühere Ausgabe: Version 4.0.0 vom 28.04.2022

RiMEA e.V.

www.rimea.de

© 2004 – 2025 RiMEA e.V. Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Keine Bearbeitungen 4.0 International Lizenz.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2
Präambel 4
1 Anwendungsbereich 4
2 Begriffe 5
2.1 Mikroskopische Räumungsanalyse 5
2.2 Räumung 5
2.3 Entfluchtung 5
2.4 Personenverteilung 5
2.5 Populationseigenschaften 5
2.6 Staus 5
2.6.1 Identifikation 5
2.6.2 Beschreibung 6
2.6.3 Beurteilung 7
2.7 Freie Laufgeschwindigkeit 7
2.8 Detektionszeit t_{Detekt} 7
2.9 Alarmierungszeit t_{Alarm} 7
2.10 Individuelle Reaktionszeit $t_{i,\ Reakt}$ 7
2.11 Individuelle Laufzeit $t_{i\ Lauf}$ 7
2.12 Individuelle Räumungszeit $t_{i,\ Räumung}$ 7
2.13 Räumungszeit $t_{Räumung}$ 7
2.14 Agent 7
2.15 Szenario 8
2.16 Statistische Auswertung wiederholter Simulationsläufe 8
2.16.1 Minimale Räumungszeit $t_{Räumung,min}$ 8
2.16.2 Maximale Räumungszeit $t_{Räumung,max}$ 8
2.16.3 Mittlere Räumungszeit $t_{Räumung,mittel}$ 8
2.16.4 Standardabweichung $s_{Räumung}$ 8
2.16.5 Signifikante Räumungszeit $t_{Räumung,signifikant}$ 8
3 Eingabekategorien für Simulationsmodelle 8
3.1 Kategorie Geometrie 8
3.2 Kategorie Population 8
3.2.1 Allgemeines 9
3.2.2 Eigenschaften der Population 9
3.2.2.1 Reaktionszeit 9
3.2.2.2 Freie Gehgeschwindigkeit in der Ebene 9
3.2.2.3 Freie Gehgeschwindigkeiten auf Treppen 10
3.2.3 Initialverteilung der Agenten 11
3.2.4 Altersverteilung der Population 11
3.3 Kategorie Routen 12
4 Nachweisführung 12
4.1 Szenarien 12
4.1.1 Personenbelegung 12
4.1.2 Anordnung der Fluchtwege - grundlegender Räumungsfall 12
4.1.3 Flexibilität der Fluchtwege - zusätzliche Räumungsfälle 12
4.2 Behandlung der Räumungszeiten 13
5 Dokumentation 13

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

5.1 Anlass und Fragestellung ... 13
5.2 Simulationsverfahren ... 13
5.3 Objektbeschreibung ... 14
5.4 Szenarien ... 14
5.5 Ergebnisse ... 14
5.6 Bewertung/Interpretation ... 14
5.7 Maßnahmen ... 15
5.8 Literatur ... 15
Anhang 1: Vorläufige Anleitung zur Validierung / Verifizierung von Simulationsprogrammen ... 16
A 1 Allgemein ... 16
A 2 Überprüfung der Komponenten ... 16
Test 1 Beibehalten der vorgegebenen Gehgeschwindigkeit in einem Gang ... 20
Test 2 Beibehalten der vorgegebenen Gehgeschwindigkeit treppauf ... 20
Test 3 Beibehalten der vorgegebenen Gehgeschwindigkeit treppab ... 20
Test 4 Messung des Fundamentaldiagrammes ... 20
Test 5 Reaktionsdauer ... 21
Test 6 Bewegung um eine Ecke ... 21
Test 7 Zuordnung der demographischen Parameter ... 21
A 3 Funktionale Verifizierung ... 21
Test 8 Parameteranalyse ... 21
A 4 Qualitative Verifizierung ... 22
Test 9 Eine Menschenmenge verlässt einen großen öffentlichen Raum ... 23
Test 10 Zuweisung von Rettungswegen ... 24
Test 11 Wahl des Rettungsweges ... 25
Test 12 Engstellen ... 26
Test 12a: Position Zielzellen ... 26
Test 12b: Länge einer Engstelle ... 27
Test 12c: Auswirkung des Andrangs ... 29
Test 12d: Einfluss der Engstellenbreite auf den Fluss ... 30
Test 13 Fundamentaldiagramm Treppe ... 31
Test 14 Routenwahl ... 32
Test 15 Bewegung einer großen Menge Fußgänger um eine Ecke ... 33
Test 16 1D-Fundamentaldiagramm ... 34
Daten ... 35
A 5 Quantitative Verifizierung ... 35
Anhang 2: Verteilung der individuellen Reaktionsdauern ... 36
Anhang 3: Vorgaben für Räumungszeiten ... 38
Anhang 4: Literaturverzeichnis ... 39

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

Präambel

Nach der Musterbauordnung (MBO) sind bauliche Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden. Des Weiteren müssen bauliche Anlagen hinsichtlich der Personensicherheit so beschaffen sein, dass im Brandfall die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.

Entsprechende Vorschriften für Versammlungsstätten enthält die Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättV). Teil 2, Abschnitt 2 der MVStättV behandelt die Führung und Bemessung von Flucht- und Rettungswegen [1].

§ 51 Absatz 7 der MBO erlaubt im Einzelfall für Sonderbauten die Abweichung von den allgemeinen Vorschriften hinsichtlich Brandschutzanlagen, -einrichtungen und -vorkehrungen.

Zusätzlich zur Einhaltung bauordnungsrechtlicher Anforderungen zu zulässigen Rettungswegläng en und notwendigen Ausgangsbreiten sind, insbesondere für Gebäude, die planmäßig von einer großen Anzahl von Personen genutzt werden, empfehlen sich Räumungsberechnungen als Teil eines ganzheitlichen Brandschutzkonzeptes. Das Gleiche gilt für den Fall der Sonderbauten, insbesondere im Falle der o.g. Besonderheiten.

Der Einsatz rechnergestützter Verfahren bei solchen Nachweisen stellt die genehmigenden Stellen vor neue Herausforderungen. Besonders für die bei einer Räumungssimulationen angenommenen Szenarien und Parameter sowie für die Auswertung der Ergebnisse sind standardisierte Kriterien notwendig.

Das Gleiche gilt für die Beurteilung der Verlässlichkeit und Richtigkeit von Softwareprogrammen.

Die hier vorgelegte Muster-Richtlinie stellt eine Handreichung für die genehmigenden Stellen dar, die für diese beiden Anforderungen standardisierte Verfahren festlegt.

Es wird darauf hingewiesen, dass Räumungssimulationen nicht alle Einflüsse der Realität berücksichtigen können. Psychologische Aspekte, die zum Beispiel die Routenwahl und das Verhalten der Person beeinflussen, sind bisher noch nicht wissenschaftlich fundiert untersucht worden und können nur durch statistische Variationen implementiert werden. Somit stellt die Simulation einen idealisierten Fall dar, bei dem sich die Personen gemäß der Parameter und Routenvorgaben des Benutzers bewegen.

Ziel dieser Richtlinie ist es, die Methodik (u.a. themenbezogene Begriffe, allgemeine Eigenschaften von Simulationsmodellen sowie die Bestandteile und notwendigen Arbeitsschritte) für die Erstellung einer simulationsgestützten Räumungssimulation festzulegen.

1 Anwendungsbereich

Die Räumungssimulation dient zur Bestimmung der Räumungszeit von baulichen Anlagen und Freiflächen und zur Überprüfung der Konzeption und Leistungsfähigkeit von Flucht- und Rettungswegen, insbesondere der Lokalisierung von Bereichen mit signifikanten Stauungen. Sie basiert auf einer rechnergestützten Simulation, in der jede Person individuell und der Grundriss detailliert abgebildet wird. Die Bewegung der Personen sowie die Wechselwirkung mit anderen Personen und der baulichen Anlage werden auf Grundlage von empirischen Untersuchungen, Beobachtungen und der Auswertung von Schadensfällen in Form von vereinfachten Regeln mit Hilfe eines rechnerischen Bewegungsmodells nachgebildet.

Die in dieser Richtlinie dargestellte Methodik kann für alle Szenarien, die eine Räumung beschreiben, angewandt werden.

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

2 Begriffe

Es gelten die Begriffsdefinitionen der Musterbauordnung. Darüber hinaus gelten für die Anwendung dieses Dokumentes die folgenden Begriffe:

2.1 Mikroskopische Räumungsanalyse

Rechnergestützte Analyse von Personenbewegungen hin zum sicheren Ort, bei der jeder Agent individuelle Bewegungen anhand individueller Parameter, Fähigkeiten und/oder Verhaltenseinstellungen basierend auf rechnergestützten Algorithmen ausführt.

Eine mikroskopische Räumungsanalyse liefert sowohl Aussagen zur Räumungszeit als auch über die dynamische Entwicklung (Ort, Zeit, Dauer) von Staus.

2.2 Räumung

„In-Sicherheit-Bringen“ von Personen aus einem gefährdeten Bereich. Dieser Begriff ist gleichbedeutend mit den Begriffen Entleerung, Entfluchtung und Evakuierung. Innerhalb dieses Dokuments wird der Begriff Räumung verwendet.

2.3 Entfluchtung

Siehe Definition 2.2 Räumung.

2.4 Personenverteilung

Anzahl und räumliche Verteilung (Belegung) der Personen.

2.5 Populationseigenschaften

Beschreibt die Eigenschaften und Fähigkeiten der Personen.

2.6 Staus

Staus werden je nach baulicher Situation in einem gewissen Maß akzeptiert. Abhängig von den Randbedingungen können sie zu einer Erhöhung des Risikos führen. Sie sollten deshalb bei der Durchführung mikroskopischer Räumungsanalysen vom Anwender identifiziert, beschrieben und beurteilt werden.

2.6.1 Identifikation

Ein Stau entsteht, wenn der eingehende Personenfluss in einem Wegabschnitt größer ist als der ausgehende und es dadurch zu einer Reduktion der Gehgeschwindigkeit der betroffenen Personen kommt. Bei der Verwendung mikroskopischer Modelle kann ein Stau deshalb anhand der Geschwindigkeitsprofile der Agenten identifiziert werden.

Ein Agent befindet sich in einem Stau, wenn seine Geschwindigkeit unter eine Grenzgeschwindigkeit v_{grenz} sinkt. Hiervon ausgenommen sind Aktionen, die dem Beginn der Agentenbewegung vorgelagert sind (Detektionszeiten, Alarmierungszeiten oder Reaktionszeiten). Die Grenzgeschwindigkeit ist nicht allgemeingültig, sondern hängt von den Modelleigenschaften und den verwendeten Parametern (z.B. der Gehgeschwindigkeit) ab. Sie lässt sich aus dem maximalen Fluss des Fundamentaldiagramms herleiten (Abb. 1) und sollte zwischen 0,2 und 0,8 m/s liegen (Tab. 1). Die konkrete Grenzgeschwindigkeit ist modell- und szenariospezifisch und kann anhand des Testfalls 4 ermittelt werden.

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

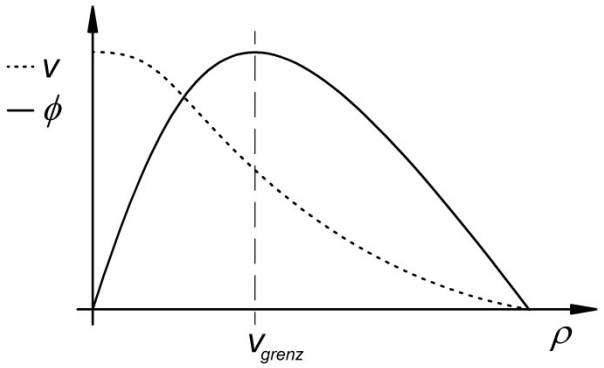


Abb. 1: Schematisches Fundamentaldiagramm (Fluss Φ und Geschwindigkeit v gegenüber der Dichte ϱ) zur Bestimmung der Grenzgeschwindigkeit v_{grenz}.

Publikation	$\boldsymbol{ø_{max}}$ **/1/m/s**	$\boldsymbol{\rho_{max.\ Fluß}}$ **/1/m²**	$\boldsymbol{v_{max.\ Fluß}}$ **/m/s**	$\boldsymbol{v_{frei}}$ **/m/s**
Weidmann [2]	1,22	1,75	0,70	1,34
Fruin [3]	1,25	1,97	0,64	1,34
SFPE [7]	1,32	1,90	0,69	1,20
PM Adults Summer normal [12]	1,69	7,50	0,23	0,91
Helbing et al [13]	1,83	3,99	0,46	1,22
Löhner et al [14]	2,91	8,00	0,36	1,45
H&W Commuters [15]	1,99	4,37	0,46	1,62
H&W Boys [15]	2,28	5,38	0,42	1,49
Möri and H. Tsukaguchi [16]	2,32	3,65	0,64	1,47
Older [16]	1,31	2,51	0,52	-
Jin et al [18]	1,63	2,13	0,77	2,00

Tab. 1: Übersicht spezifischer Parameter unterschiedlicher Fundamentaldiagramme.

2.6.2 Beschreibung

Folgende, beispielhafte Kriterien können zur Beschreibung eines Staus herangezogen werden.

1. Existenzdauer des Staus,
2. Ort und Ausdehnung des Staus,
3. Ortsbezogene akkumulierte Staudauer,
4. Einzelstauzeiten jedes Agenten,
5. Akkumulierte Einzelstauzeiten jedes Agenten,
6. Einfluss auf die Räumungszeit,
7. Staugröße: Anzahl der beteiligten Personen.

Die genannten Größen liegen in der Regel als Verteilungen vor (Individualgrößen, mehrfach wiederholte Simulationsläufe), so dass eine statistische Auswertung (z.B. mittels 95% Perzentilen) empfohlen wird.

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

2.6.3 Beurteilung

Ausgehend von der oben genannten Vorgehensweise zur Identifikation und der quantitativen Beschreibung eines Staus ist er abschließend zu beurteilen. Folgende, beispielhafte Randbedingungen können dabei individuell und situationsabhängig einbezogen werden:

1. Anlass der Räumung,
2. Motivation der Betroffenen,
3. Nutzungsart,
4. Für das Szenario relevante Faktoren,
5. Abweichung zu einem baurechtlich konformen Szenario,
6. Ort und Ausdehnung des Staus.

2.7 Freie Laufgeschwindigkeit

Geschwindigkeit einer Person bei ungehinderter Bewegung in der Ebene.

2.8 Detektionszeit t_{Detekt}

Zeitspanne vom Beginn des auslösenden Ereignisses (z.B. Brand) bis zu seiner Entdeckung.

2.9 Alarmierungszeit t_{Alarm}

Zeitspanne zwischen der Entdeckung eines auslösenden Ereignisses und dem Auslösen des Räumungssignals (Alarm oder Sprachdurchsage als Aufforderung zur Räumung).

2.10 Individuelle Reaktionszeit $t_{i, Reakt}$

Zeitspanne zwischen dem Auslösen des Räumungssignals und dem Beginn der Räumung einer einzelnen Person. Die individuelle Reaktionszeit schließt die Wahrnehmung von Hinweisen, das Erteilen und Aufnehmen von Anweisungen und die Durchführung aller anderen Tätigkeiten vor Beginn der Räumung ein.

2.11 Individuelle Laufzeit $t_{i\ Lauf}$

Zeitspanne, die eine Person benötigt, um von ihrer anfänglichen Position zu einem sicheren Ort (Sammelplatz, anderer Brandabschnitt, Ausgang oder Ähnliches) zu gelangen.

2.12 Individuelle Räumungszeit $t_{i, Räumung}$

Summe der allgemeinen Detektions- und Alarmierungszeit sowie der individuellen Reaktions- und Laufzeit, d.h.:

$$t_{i,\ Räumung} = t_{Detekt} + t_{Alarm} + t_{i,\ Reakt} + t_{i,\ Lauf}$$

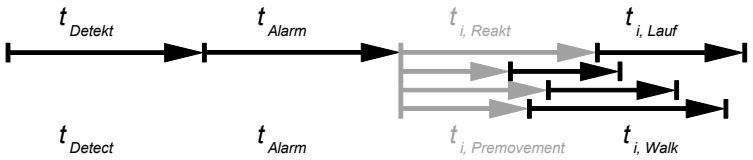


Abb. 2: Grafische Darstellung der einzelnen Zeitkomponenten der individuellen Räumungszeit,

2.13 Räumungszeit $t_{Räumung}$

Maximum aller individuellen Räumungszeiten für einen Räumungsablauf, d.h.:

$$t_{Räumung} = \max(t_{i,\ Räumung})$$

2.14 Agent

Modellspezifische Repräsentation einer realen Person.

2.15 Szenario

Ein Szenario wird wenigstens durch eine Geometrie, eine räumliche Verteilung der Personen, eine Routenverteilung und der Demographie der Population definiert.

2.16 Statistische Auswertung wiederholter Simulationsläufe

Zur Bewertung variierender Einflüsse zu Beginn und während der Räumung, ist pro Szenario eine ausreichende Zahl von Simulationsläufen durchzuführen. Erst die Verteilung der hierbei gewonnen Resultate ermöglicht eine fundierte Beurteilung der Ergebnisse. Im Sinne einer statistischen Analyse ergeben sich:

2.16.1 Minimale Räumungszeit $t_{Räumung,min}$

Minimum aus einem Ensemble von Räumungszeiten.

2.16.2 Maximale Räumungszeit $t_{Räumung,max}$

Maximum aus einem Ensemble von Räumungszeiten.

2.16.3 Mittlere Räumungszeit $t_{Räumung,mittel}$

Arithmetischer Mittelwert aus einem Ensemble von Räumungszeiten.

2.16.4 Standardabweichung $s_{Räumung}$

Statistisches Maß für die Streuung der Werte um den Erwartungswert einer Verteilung.

2.16.5 Signifikante Räumungszeit $t_{Räumung,signifikant}$

Die Zeit eines Ensembles von Gesamträumungszeiten, die größer als oder gleich 95% der Gesamträumungszeit ist, wird als signifikante Gesamträumungszeit bezeichnet.

3 Eingabekategorien für Simulationsmodelle

Die nachfolgend aufgeführten Eingabekategorien sind entsprechend der jeweiligen zu untersuchenden Situation festzulegen, zu begründen und zu dokumentieren (vgl. Kap. 4 und 5), wobei die herangezogenen Quellen zu benennen sind. Typische Werte für die verschiedenen Eingabegrößen können den geltenden Gesetzen und Verordnungen sowie den Regeln der Technik, wie z. B. dem vfdb-Leitfaden [11] und den Handbüchern der Simulationssoftware entnommen werden. Eine entsprechende Vorabstimmung mit der zuständigen genehmigenden Stelle wird empfohlen.

3.1 Kategorie Geometrie

Diese Kategorie beschreibt die räumliche Anordnung und Geometrie des Gebäudes bzw. der Fluchtwege, ihre (Nicht-)Erreichbarkeit bzw. (Nicht-)Begehbarkeit.

Die Gebäudegeometrie ist in allen für den Ablauf der Simulation wichtigen Aspekten zu berücksichtigen. Dieses sind u. a.: die Einteilung in Ebenen und Geschosse, Hindernisse, Wände, Treppen, Rampen, Türen und Ausgänge.

3.2 Kategorie Population

Die Zusammenstellung der Population erfolgt im Hinblick auf Attribute und Fähigkeiten der Agenten. Die statistische Zusammensetzung der Population ist gleichbleibend für alle Simulationsläufe eines Szenarios. Liegen Daten zur Populations-Zusammensetzung vor, so sollten diese nach Möglichkeit verwendet werden (z. B. Anpassung der Parameter für Schulen oder Seniorenheime).

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

3.2.1 Allgemeines

Die Kategorie Population beschreibt die minimalen Anforderungen an die Eigenschaften und die Zusammensetzung der Population:

1. Jeder Agent wird in der Simulation individuell repräsentiert.
2. Die grundlegenden Regeln für die Entscheidungen und Bewegungen sind für alle Agenten gleich und werden durch einen dokumentierten, universellen Algorithmus beschrieben.
3. Die Fähigkeiten jedes Agenten oder jeder Agentengruppe wird durch einen Satz von Agentenparametern festgelegt. Diese Parameter können sich stochastisch auf das Verhalten der Agenten auswirken.
4. Die Bewegung jedes einzelnen Agenten muss aufzeichenbar sein.
5. Die Agentenparameter können zwischen den Individuen einer Population variieren; die freie, maximale oder Wunschgeschwindigkeit soll variieren.
6. Die Länge eines Simulationszeitschrittes soll so klein sein, (<1 s), dass die notwendigen Bewegungs- und Verhaltensaktionen mit ihren Wechselwirkungen konsistent modelliert werden können (mikroskopische Analyse);

3.2.2 Eigenschaften der Population

Entsprechend der jeweiligen Nutzung der baulichen Anlage ist es angezeigt, einen ausreichend konservativ gewählten Parametersatz für die Population zu wählen. Um Risiken aufzudecken, kann es hilfreich sein mehrere Szenarien zu simulieren, in denen die Populationsparameter variiert werden.

3.2.2.1 Reaktionszeit

Sind genaue Kenntnisse zum Räumungskonzept bekannt, können die Reaktionszeiten gemäß „Anhang 2: Verteilung der individuellen Reaktionsdauern” oder anderer Standards festgelegt werden. In allen anderen Fällen kann die Sensitivität des Räumungskonzepts anhand von drei Szenarien mit den folgenden drei Reaktionszeitverteilungen bestimmt werden.

1. Schnelle Räumung: Alle Agenten erhalten eine Reaktionszeit von 0 Sekunden. Dies bewirkt durch die gleichzeitige Reaktion aller Agenten ein hohes Agentenaufkommen auf den Flucht- und Rettungswegen.
2. Zügige Räumung: Die Agenten erhalten eine gleichverteilte Reaktionszeit von 0-60 s zugewiesen und reagieren somit innerhalb einer Minute.
3. Langsame Räumung: Die Agenten erhalten eine gleichverteilte Reaktionszeit von 1 bis 5 min.

3.2.2.2 Freie Gehgeschwindigkeit in der Ebene

Sind genaue Kenntnisse über die Population im Objekt bekannt, können die Gehgeschwindigkeiten gemäß Tab. 2 bzw. Abb. 3 oder anderen Standards festgelegt werden. Es empfiehlt sich, die Werte angelehnt an die Veröffentlichungen von Weidmann [2] zu verwenden. Sind keine Daten bekannt, sollte die in Abschnitt 3.2.4 definierte Standardpopulation verwendet werden.

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

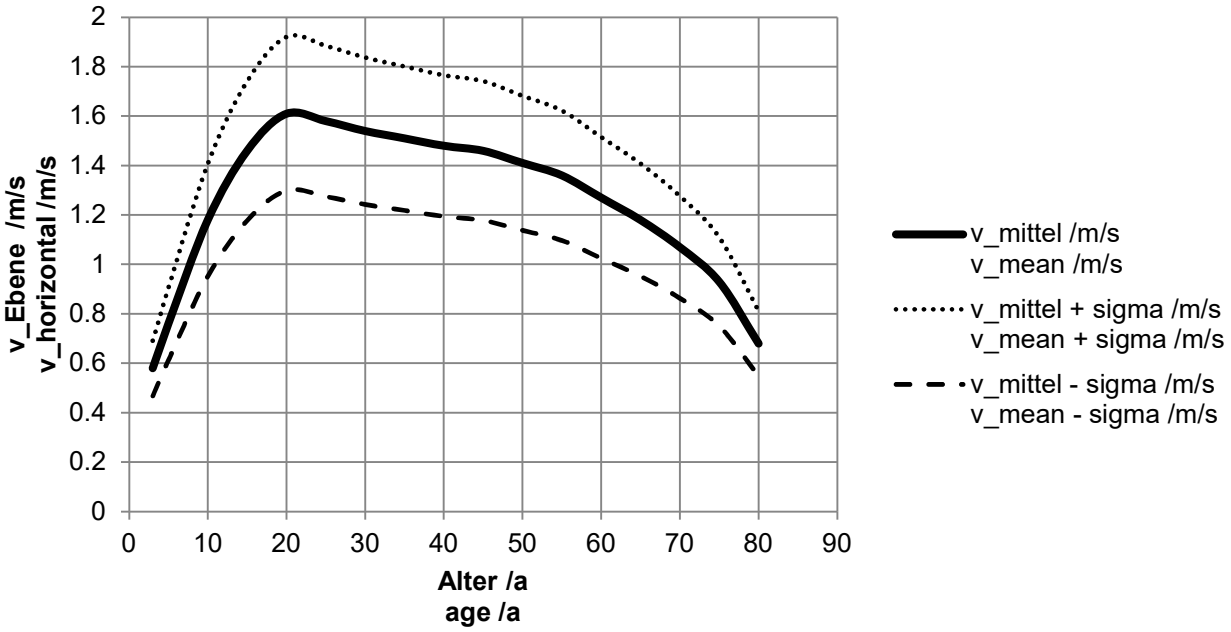


Abb. 3: Gehgeschwindigkeit in der Ebene in Abhängigkeit des Alters in Anlehnung an Weidmann [2].

Personengruppe	**v_{min} /m/s**	**v_{max} /m/s**
Personen mit beeinträchtigter Mobilität	0,46	0,76

Tab. 2: Gehgeschwindigkeiten in der Ebene für Agenten mit beeinträchtigter Mobilität [9].

Die Gehgeschwindigkeit von Männern ist nach Weidmann [2] im Mittel um 10,9% höher als die von Frauen. Dies ergibt für Männer eine mittlere freie Gehgeschwindigkeit von 1,41 m/s und für Frauen von 1,27 m/s.

3.2.2.3 Freie Gehgeschwindigkeiten auf Treppen

Eine realistische Reduktion der Gehgeschwindigkeit auf Treppen sollte berücksichtigt werden und den in der Literatur dargestellten Tendenzen entsprechen. Sie sollte unter Angabe der entsprechenden Quellen dokumentiert sein. Dabei ist darauf zu achten, dass die Modalitäten (Treppenlänge, -steigung, etc.) im Projekt und der angeführten Literatur zueinander passen (z.B. Tab. 3).

	Treppe abwärts		**Treppe aufwärts**	
Personengruppe	**v_{innen}[1] /m/s**	**$v_{außen}$[2] /m/s**	**v_{innen}[1] /m/s**	**$v_{außen}$[2] /m/s**
Unter 30 Jahre	0,76	0,81	0,55	0,58
30 bis 50 Jahre	0,65	0,78	0,50	0,58
Über 50 Jahre	0,55	0,59	0,42	0,42
Beeinträchtigte Mobilität	0,42		0,32	

Tab. 3: Beispiel mittlerer Gehgeschwindigkeiten auf Treppen nach Fruin [3].

[1] Innentreppen: Steigungsverhältnis 17,8 cm / 28,6 cm

[2] Außentreppen: Steigungsverhältnis 15,2 cm / 30,5 cm

3.2.3 Initialverteilung der Agenten

Die Initialverteilung der Agenten sollte aufgrund folgender Daten definiert werden:

1. Initialdichten oder
2. Initialzahlen nach Art der Nutzung (z.B. Bestuhlungsplänen).

Liegen konkrete Daten vor, sollten sie unter Bekanntgabe der Quelle in die Analyse einfließen. Ansonsten kann auf die Richtwerte aus Tab. 4 zurückgegriffen werden.

Gebäudetyp	Personendichte /P/m²	
Kaufhaus	0,18 – 0,36	[10]
Bürogebäude	0,11	[10]
Lager	0,04	[10]
Messen	1,00	[1]
Versammlungsräume	2,00	[1]
Stehplätze in Zuschaueranlagen	3,5 – 4,7	[4]

Tab. 4: Richtwerte der Initialdichten der Population.

3.2.4 Altersverteilung der Population

Stehen keine Daten zur Verfügung, soll die folgende Standardpopulation verwendet werden. Sie besteht zu jeweils 50% aus Männern und Frauen deren Alter wie in Abb. 4 dargestellt zwischen dem Minimum- und Maximumwert normalverteilt ist. Der Mittelwert des Alters ist 50 Jahre, die Standardabweichung 20 Jahre. Das Minimumalter beträgt 10 Jahre, das Maximumalter 85 Jahre.

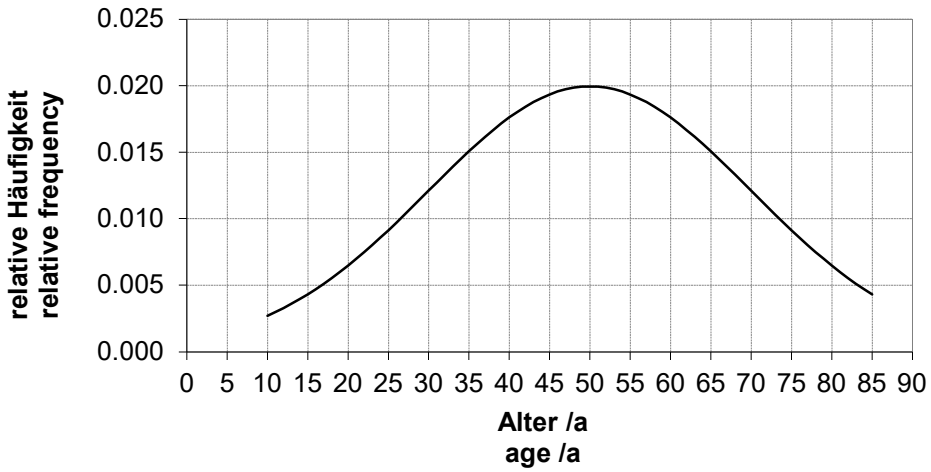


Abb. 4: Altersverteilung der RiMEA-Standardpopulation.

3.3 Kategorie Routen

Die Routen geben vor, welche Wege die Agenten auf dem Weg zu ihren Zielen (sichere Bereiche) zurücklegen. Folgende Variationen lassen sich untersuchen:

1. Alle Fluchtwege sind verfügbar.
2. Einzelne Fluchtwege werden versperrt um diesen Einfluss zu untersuchen.
3. Variation der Routenwahl:
   a. Alle folgen dem nächstgelegenen Fluchtweg,
   b. 80% folgen den Alltagswegen, der Rest folgt den Fluchtwegen und
   c. 70% bleiben bei einer einmal getroffenen Entscheidung, 30% können sich in Folge von Stauungen um entscheiden, sofern Alternativwege verfügbar sind.
4. Organisatorische Maßnahmen werden implizit durch Routenzuweisungen berücksichtigt.

4 Nachweisführung

Die Nachweisführung erfolgt abhängig vom Ersteller sowie der genutzten Software und sollte folgende Punkte berücksichtigen.

4.1 Szenarien

Um aussagekräftige Ergebnisse aus der Räumungsanalyse zu erhalten, müssen relevante Szenarien definiert werden. Diese Szenarien ergeben sich zum Beispiel aus der Nutzungsart des zu untersuchenden Objekts sowie des Zeitpunkts des auslösenden Ereignisses. Hieraus lassen sich u.a. Anzahl, Verteilung und Demographie der Personen ableiten. Die relevanten Szenarien leiten sich aus ihren Eintrittswahrscheinlichkeiten ab, sowie der sich daraus ergebenden Auswirkungen und sollten mit der genehmigenden Stelle vor der Analyse abgestimmt werden.

4.1.1 Personenbelegung

Für die Räumungsanalyse soll die Personenverteilung berücksichtigt werden, welche in den Genehmigungsunterlagen für das jeweilige Szenario vorgesehen ist. Gibt es hierzu keine Angaben, kann sie gemäß Kapitel 3.2.3 bzw. den einschlägigen Gesetzen, Verordnungen, Richtlinien oder Regelwerken festgelegt werden.

Alternativ kann die maximale Personenzahl durch Variation (abnehmend oder zunehmend) ermittelt werden, so dass die benötigte Räumungszeit (*RSET genannt*) unterhalb einer vorgegebenen, verfügbaren Räumungszeit (*ASET* genannt) liegt.

4.1.2 Anordnung der Fluchtwege - grundlegender Räumungsfall

Als grundlegender Räumungsfall sollten alle vorhandenen Flucht- und Rettungswege zur Verfügung stehen. Die Personen bewegen sich entlang der Fluchtwege und kennen den Weg zum nächstgelegenen, sicheren Bereich. Hierbei wird unterstellt, dass Beschilderung, Leitsysteme, Schulung eventuell vorhandener Sicherheitskräfte und andere Einflüsse bezüglich Gestaltung und Betrieb der Räumungseinrichtungen mit den Anforderungen der entsprechenden Gesetze und Verordnungen im Einklang stehen.

4.1.3 Flexibilität der Fluchtwege - zusätzliche Räumungsfälle

Es empfiehlt sich, in Abstimmung mit der genehmigenden Stelle zusätzliche Szenarien zu untersuchen. Hierdurch können die Auswirkungen versperrter Fluchtwege, die Ortsunkenntnis der Personen und damit die Flexibilität des Räumungskonzepts geprüft werden.

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

4.2 Behandlung der Räumungszeiten

Sowohl die vom Modell vorhergesagte als auch eine in der Realität gemessene Räumungszeit ist aufgrund der Natur des Räumungsprozesses eine stochastische Größe. Um repräsentative Ergebnisse zu erzielen, sollten daher folgende Punkte berücksichtigt werden:

1. Für jeden Simulationsdurchgang sollen die Anfangspositionen der Agenten stochastisch neu bestimmt werden.
2. Für jeden Simulationsdurchgang sollen die demographischen Parameter der Agenten entsprechend der dem Szenario zugrunde liegenden Populationszusammensetzung stochastisch neu bestimmt werden.
3. Für jedes Szenario sollte eine statistisch belastbare Anzahl von Simulationsdurchläufen ausgeführt werden.
4. Die Ergebnisse der Simulationsdurchläufe aller Szenarien sind nachvollziehbar zu dokumentieren. Anzugeben sind eine graphische Darstellung der Zeitverteilung (Histogramm), die minimale, maximale und die signifikante Räumungszeit sowie die Standardabweichung.
5. Die zulässige Räumungszeit sollte im Vorfeld mit den genehmigenden Stellen abgestimmt werden. Die berechnete, signifikante Räumungszeit sollte kleiner sein. Die zulässige Räumungszeit kann anhand rechtlicher, normativer Bestimmungen, anhand von Räumungszeiten eines regelkonformen Vergleichsszenarios oder anhand der Daten im Anhang 3: bestimmt werden.

5 Dokumentation

Die Dokumentation soll die Eingabedaten und Ergebnisse der Analyse übersichtlich und nachvollziehbar darstellen, begründen und erklären. Eine vollständige Dokumentation sollte folgende Punkte enthalten:

1. Anlass und Fragestellung,
2. Objektbeschreibung,
3. Simulationsverfahren,
4. Szenarien,
5. Ergebnisse,
6. Bewertung/Interpretation,
7. Maßnahmen und
8. Literatur.

Die einzelnen Punkte werden in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben.

5.1 Anlass und Fragestellung

Beschreibung, warum die Analyse bzw. das Gutachten erstellt wird und Erläuterung der Problemstellung sowie Beschreibung der Schutzziele.

5.2 Simulationsverfahren

Die Dokumentation des Simulationsverfahrens sollte folgende Punkte enthalten:

1. Programmname und -version der genutzten Software,
2. die im Modell zur Beschreibung der Agenten benutzten Variablen (z. B. Gehgeschwindigkeit, Körperbreite),
3. die Abbildung von Treppen, Türen, Sammelplätzen und anderen besonderen räumlichen Elementen und wie sie sich auf den Ablauf der Simulation auswirken und
4. einen Verweis auf das Benutzerhandbuch, das Details des Simulationsmodells sowie die zugrunde liegenden Annahmen beschreibt.

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

5.3 Objektbeschreibung

Beschreibung der für die Räumung relevanten Bereiche evtl. mit Grafiken, sofern nicht schon im Brandschutzkonzept dargestellt. Außerdem können je nach Objekt folgende Informationen hilfreich sein:

1. Flächen,
2. Stockwerke,
3. Nutzungsarten,
4. Anzahl und Art der Ausgänge und
5. Definition des sicheren Bereichs mit Begründung.

5.4 Szenarien

Erläuterung der Annahmen und Randbedingungen pro Szenario:

1. Annahmen zur Population wie:
    a. Gewählte Eigenschaften und Fähigkeiten (Demographie),
    b. Anzahl und Initialverteilung der Agenten im Objekt,
    c. Reaktionszeitverteilung,
2. Fluchtwegführung und Zuordnung von Personen zu Ausgängen und
3. Falls die einzelnen Szenarien sich geometrisch unterscheiden: Beschreibung der szenarienspezifischen geometrischen Besonderheiten.
4. Anzahl der Simulationsdurchläufe.

5.5 Ergebnisse

Ziel der Ergebnisdarstellung ist es, das Erreichen des festgelegten Schutzziels nachvollziehbar zu überprüfen. Dazu müssen die relevanten Ergebnisse, Besonderheiten und Auffälligkeiten der Simulationsergebnisse visualisiert werden.

Folgende, beispielhafte Auswertungen bieten sich dazu an:

1. Verteilung der berechneten Räumungszeiten,
2. (Gesamt-) Räumungszeit,
3. detaillierte Darstellung des Räumungsverlaufs in Zeitschritten von $\Delta t \leq T_{gesamt}/10$, wie z.B. durch Diagramme, Tabellen oder Grafiken,
4. Detailauswertung bestimmter Teilbereiche (in Bezug auf Staus, Personenzahl, etc.),
5. Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Szenarien,
6. grafische Darstellung (Momentaufnahmen) von Geschwindigkeitsverläufen (zeitlich, räumlich) und
7. Lage und Beschreibung signifikanter Staus.

5.6 Bewertung/Interpretation

Erläuterung / Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich der festgelegten Schutzziele, z.B. durch:

1. Vergleich mit gesetzlichen Vorgaben,
2. Vergleich mit Literatur / allgemein anerkannten Regeln der Technik,
3. Vergleich der Ergebnisse mit Bemessungskriterien und
4. Abschließende Bewertung der Ergebnisse mit Fazit der Analyse.

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

5.7 Maßnahmen

Falls die festgelegten Schutzziele gemäß den Simulationsergebnissen nicht eingehalten werden (z.B. Überschreitung der verfügbaren Räumungszeit), sollten geeignete Maßnahmen vorgenommen werden, damit die Schutzziele erreicht werden. Beispiele für Maßnahmen sind:

1. Anpassung der Geometrie,
2. bauliche Maßnahmen,
3. anlagentechnische Maßnahmen,
4. organisatorische Maßnahmen und
5. Anpassung der Anzahl der Personen.

Eine Veränderung demographischer Parameter in der Räumungsanalyse zum Erreichen der notwendigen (Gesamt-)Räumungszeit ist nicht zulässig.

Die Räumungsanalyse ist mit den geänderten Randbedingungen (Maßnahmen) so lange fortzusetzen, bis eine akzeptable Räumungszeit erreicht wird.

5.8 Literatur

Verzeichnis der für den Nachweis verwendeten Literatur, zum Beispiel:

1. Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen, Version 4.0. (2022) oder
2. Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, 4. Auflage; Braunschweig, Deutschland; Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.; 2020.

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

Anhang 1: Vorläufige Anleitung zur Validierung / Verifizierung von Simulationsprogrammen

A 1 Allgemein

Für jede Simulationssoftware ist die andauernde Verifikation notwendig. Es gibt mindestens vier Formen der Verifikation, denen Räumungsmodelle unterzogen werden sollen. Diese sind:

1. Überprüfung der Komponenten,
2. Funktionale Verifizierung,
3. Qualitative Verifizierung und
4. Quantitative Verifizierung.

Diese Vorgehensweise ist in ISO Dokument ISO/TR 13387-8:1999 dargestellt.

Im Zuge der Überarbeitungszyklen der RiMEA-Richlinie werden die Testszenarien den neusten Erkenntnissen entsprechend angepasst.

Der Verifizierungsprozess ist nachvollziehbar und vollständig zu dokumentieren. Die Dokumentation(en) sind entsprechend dieses Abschnitts auszuführen. Die Verifizierungsdokumente können Bestandteil der Programmdokumentation sein und sind auf Verlangen der Behörde oder dem Auftraggeber zur Verfügung zu stellen. Alternativ können Sie öffentlich einsehbar auf der Homepage des RiMEA-Vereins (www.rimea.de) hinterlegt werden.

A 2 Überprüfung der Komponenten

Die Überprüfung der Komponenten beinhaltet zu testen, ob die verschiedenen Komponenten der Software wie vorgesehen funktionieren. Das schließt die Durchführung einer Reihe von elementaren Testfällen ein um sicherzustellen, dass die wichtigsten Bestandteile des Modells wie beabsichtigt funktionieren. Die folgende Liste ist eine nicht erschöpfende Aufzählung vorgeschlagener Tests, die in den Verifizierungsprozess eingeschlossen werden sollen.

Möglichkeiten und Grenzen quantitativer Tests

Einige der Testfälle können nicht nur der funktionalen Validierung, sondern auch der quantitativen Kalibrierung dienen. So liegen zum Beispiel für Test 4 empirische Daten vor.

Zweifellos ist eine quantitative Kalibrierung ein notwendiger Bestandteil einer jeden Planungsmethode um hilfreiche Ergebnisse zu erzielen Entsprechend gelten die im Weiteren genannten Grenzen von Kalibrierung und quantitativen Tests auch für alle Planungsmethoden. Für Simulationsmodelle bzw. –projekte wird die Frage jedoch häufig deutlich drängender gestellt. Dies hat mindestens zwei Ursachen. Erstens haben (Mikro-)Simulationen das Potential deutlich detailliertere Ergebnisse zu liefern, nämlich auf der Ebene der Individuen, der Mikroebene. Das unterscheidet Simulationen von früheren Planungsmethoden, die Ergebnisse per Konstruktion nur auf der Makroebene (Dichte, Fluss, Gesamtreisezeiten) liefern. Die zweite Ursache ergibt sich aus der Möglichkeit zur alltagsnahen Visualisierung. Weil durch die 3D-Darstellung[3] der Zustände einer Mikrosimulation vordergründig kein Zwang zur profunden Interpretation besteht, besteht zumindest im Prinzip ohne jegliche Kalibrierung die Gefahr einer falschen Suggestion, entweder einer Auto-Suggestion oder einer absichtsvollen Täuschung des Auftraggebers oder Prüfers.

So bedeutsam die Kalibrierung für die Realitätsnähe der Resultate auch ist, gilt es sich jedoch auch vor Augen zu führen, dass die Kalibrierung einer Simulation sowohl prinzipielle als auch ökonomische und ethische Grenzen im Sinne einer Beschränkung des Möglichen hat und es zudem eine Grenze für die Notwendigkeit der Präzision bei der Kalibrierung gibt.

[3] Es soll hier nicht der Eindruck entstehen, dass die aus (Mikro-)Simulationen abgeleitete 3D-Darstellung generell skeptisch zu betrachten ist. Sie ist im Gegenteil grundsätzlich eine Stärke von Simulationen, da sie eine einfache Kommunikation auch mit Nicht-Fachleuten eröffnet und auch der Fachmann Ergebnisse besser bewerten kann, wenn er sie auch in einer Form erhält, die seiner Alltagsanschauung entspricht.

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

Statistische Verteilung von Beobachtungen

Eine prinzipielle Grenze der Übereinstimmung von empirischen Daten und Simulationsergebnissen ergibt sich aus der Tatsache, dass viele Beobachtungsgrößen über einen gewissen Bereich verteilt sind. Ein Fußballstadion wird auch mit der gleichen Besucherzahl – z.B. an allen ausverkauften Spieltagen – nicht immer nach exakt der gleichen Zeit nach Spielende entleert sein. Diese Schwankungen rühren von nicht oder kaum beobachtbaren Ursachen, die man deswegen durchaus unter dem Begriff „Zufall“ zusammenfassen kann. Hinzu kommt, dass auch beobachtbare Größen wie z.B. die Anzahl Personen im Stadion nicht immer gleich sind. Für die Entleerung eines Fußballstadions, die sich tatsächlich regelmäßig wiederholt, kann man prinzipiell fordern, dass eine Simulation die Verteilung in der Realität reproduziert. Auf den Ergebnissen lassen sich dann wirtschaftliche Entscheidungen aufbauen, wie lange man beispielsweise Verkaufsstände geöffnet hält, weil man mit Durchschnittswerten aller Art rechnen und langfristig ein Optimum planen kann.

Für alle Planungsaspekte, die sich hingegen unter dem Begriff des Katastrophenschutzes summieren lassen – und hierzu zählt der Brandschutz und damit die Simulation von Notfall-Räumungen – ist entscheidend, dass die Verteilung der interessierenden Größen in der Realität nicht realisiert ist. Am Tag X, für den geplant wird, ist eine bestimmte Anzahl Personen, die eine ganz spezifisch zusammengesetzte Population darstellt, in dem Gebäude und diese werden eine ganz bestimmte Zeit benötigen das Gebäude zu verlassen, in welchem sich ggf. Rauch ausbreitet, welcher durch eine Brandlast entsteht, die ebenfalls speziell an diesem Tag existiert. Hinzu kommen allgemeine äußere Bedingungen wie die Temperatur, die ebenfalls im Jahresmittel sehr stabil ist, jedoch an einem Tag X einen bestimmten Wert hat, der von allen Beteiligten zwischen sehr niedrig und sehr hoch empfunden werden wird mit allen Konsequenzen die das für die Bewegung hat.

Es steckt im Bedeutungskern des Wortes „Katastrophe“, dass eine Wiederholung unter gleichen, sogar auch nur unter ähnlichen Bedingungen in der Regel nicht stattfinden wird. Zum einen macht dies die Kalibrierung des Simulationsmodells schwierig, da die gemessenen Größen einer unbekannten Verteilung entstammen und es somit nicht möglich ist die Verteilung der Realität und die der Simulationsergebnisse aufeinander abzustimmen. Zum anderen kann im Katastrophenschutz natürlich nicht mit langfristigen Mittelwerten der Ergebnisse gearbeitet werden.

Ethische und ökonomische Grenzen

Ein weiterer Faktor ist pragmatischer und ökonomischer Art: Kalibrierung kostet Geld. Es kostet sowohl Geld Daten zu erheben als auch die Kalibrierung durchzuführen. Dabei kostet sowohl bei der Datenerhebung als auch bei der Kalibrierung höhere Präzision mehr Geld. Da empirische Werte des Personenstromes in der Regel streuen, werden mehr Daten benötigt, um die Varianz zu verringern und so den wahren Mittelwert genauer zu bestimmen. Beim Kalibrierungsvorgang muss man damit rechnen, dass mehr Simulationsdurchläufe nötig sind, wenn man eine höhere Übereinstimmung mit den empirischen Werten erreichen möchte.

Nicht zuletzt verbieten sich gewisse Datenerhebungen aus ethischen Gründen: Etwa würden Engpassdurchläufe mit 10 Pers/qm Gefahr für Leib und Leben der Probanden bergen. Hier kommen nur zufällige Beobachtungen von nicht-geplantem Geschehen als Datenquelle in Frage.

Grenzen der Zuordnung von Beobachtungen zu ihren Ursachen

Da Fußgänger ihrer Umgebung fast unmittelbar ausgesetzt sind – vor allem sehr viel unmittelbarer als Autofahrer – und sie Kraft und Energie zur Fortbewegung praktisch ohne Hilfsmittel aufbringen müssen, gibt es eine Vielzahl von äußeren Faktoren und auch eine Vielzahl persönlicher Eigenschaften, die Einfluss auf ihre Bewegung haben. Zu nennen wären Umgebungstemperatur, Beleuchtung, Zweck der Bewegung (Motivation), Beschaffenheit des Geländes (Anstieg, Gefälle, Unebenheiten), Tageszeit, Alter und Geschlecht, soziale Zusammenhänge unter den Fußgängern, vermutlich auch die Herkunftskultur der Fußgänger.

Eine Planungsarbeit ist bereits dadurch in ihrer Präzision beschränkt, dass einige der Faktoren nicht, nur ungefähr oder nur als statistische Verteilung bekannt sind. Wichtig zu verstehen ist aber auch, dass nur für einen kleinen Teil der zu Kalibrierungszwecken verfügbaren Daten alle Einflussfaktoren bekannt sind. Obwohl die Menge der vorhandenen Daten mit der Möglichkeit zur automatisierten Videoauswertung in letzter Zeit schnell gewachsen ist, ist noch nicht im Detail klar, wie sich die einzelnen Faktoren z.B. auf die freie

Gehgeschwindigkeit auswirken. Im Idealfall sind sowohl für die Kalibrierungsdaten als auch für den Planungsfall alle maßgeblichen Einflussparameter bekannt und übereinstimmend. Sind sie allerdings nur bekannt – was immer noch eine vergleichsweise erfreuliche Situation ist – aber nicht übereinstimmend, ist eine perfekte Kalibrierung nicht mehr sinnvoll. Man würde viel Zeit für die Kalibrierung aufwenden, um von einer Genauigkeit von 95% auf 99,9% zu kommen, hat es in Wahrheit aber mit einer Situation zu tun, für die die Parameter der 95%-Kalibrierung die bessere Wahl wären, nur weiß man dies nicht.

Als Nebenbemerkung sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Beschreibungen wie „Fußballfan“, „Pendler“ oder „Münchner“ für ein Gehverhalten die ursprüngliche Datenerhebung nur unvollständig beschreiben. „Fußballfan“ beschreibt eine Altersverteilung und eine Geschlechterzusammensetzung, die von der mittleren Gesamtpopulation abweichen mögen. Daher ist in der Tat vom Mittel abweichendes Laufverhalten zu erwarten. Aber auch Fußballfans bewegen sich in unterschiedlichen Umgebungstemperaturen und zu unterschiedlichen Tageszeiten, nach einem gewonnenen oder einem verlorenen Spiel, mit Kenntnis der Infrastruktur (Heimfans), oder ohne (Gästefans). Pendler wiederum sind bekannt dafür zügig zu gehen, aber auch das wird – in einem Bahnhof sehr davon abhängen, ob die Zeit bis zum Anschlusszug knapp oder lang ist. Und schließlich gibt es Münchner als Fußballfans und als Pendler oder ziellos im Englischen Garten. Die populäre Idee, dass Städte und Kulturen je ihr eigenes Tempo haben und setzen, mag zutreffen oder nicht. Sicher ist jedoch, dass die interne Verteilung viel breiter ist als die Streuung der Mittelwerte.

Begrenzte Notwendigkeiten

An diesem Punkt wird die Überlegung relevant, dass die Präzision des gesamten Simulationsprojektes oft durch das am wenigsten präzise behandelte Element, das signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hat, bestimmt wird. Fußgänger bewegen sich in unterschiedlichen Situationen. Durch eine Türe hindurch oder in einem langen und engen Korridor; in eine Richtung, kreuzend oder in einer Gegenstromsituation; geradeaus, um eine Ecke oder sogar eine 180°-Wende; in der Ebene, treppauf oder treppab; in einer reinen Fußgängersituation oder im Straßenverkehr mit Radfahrern und PKW. Fußgänger treffen Routenentscheidungen nicht nur für das angestrebte Ziel, sondern auch ob sie auf dem Weg zum gewählten Ziel z.B. den längeren aber weniger gestauten oder den kürzeren und mehr gestauten Weg nehmen. Modellparameter, die in einer Situation A (z.B. dem Hemmnis, das die Ecke in Test 6 für den Personenstrom darstellt) höchst relevant sind, können in einer anderen Situation B (z.B. Test 4) bedeutungslos sein. Ein Kalibrierungsprozess, der nur mit Situation B arbeitet, kann keinen guten Wert für den Parameter zur realistischen Simulation von Situation A auffinden. Einige der genannten Situationen kommen im Brandschutz nur selten oder überhaupt nicht vor. Dennoch kann es Projekte geben, in denen die im Folgenden aufgelisteten Testfälle nicht alle Kalibrierungsnotwendigkeiten abdecken.

Darüber hinaus gibt es wichtige Einflussgrößen auf das Ergebnis – als wichtigstes wäre die Gesamtzahl Personen oder auch nur das zeitliche Ankunftsprofil bei einer Veranstaltung – zu nennen, die in manchen Szenarien (z.B. ein Stadtfest bei dem die Teilnahme nicht durch Tickets reglementiert ist) nur ungefähr bekannt sind.

Fazit

Der notwendige Kalibrierungsaufwand hängt von der konkreten Fragestellung bzw. dem Projektziel ab.

Ist das Ziel die Kennzahlen (Mittelwert, Standardabweichung) der statistischen Verteilung der Räumungskurve eines Stadions zu jedem Zeitpunkt und für jeden Füllstand und dazu die Dichteverteilung im Stadion auf wenige Sekunden genau zu berechnen, werden alle oben genannten Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen. Da es kaum ein zweites Stadion geben wird bei dem alle Einflussgrößen gleich sind, wird man lokale Messdaten zur Kalibrierung brauchen und das in großer Menge, da man z.B. Daten bei unterschiedlicher Umgebungstemperatur benötigt.

Es ist ohne Frage eine gerechtfertigte Anforderung an ein Simulationsmodell bzw. eine Simulationssoftware, dass eine solche Kalibrierung im Prinzip möglich ist. Es ist jedoch nicht der Fall, dass ein Modell keinen Nutzen entfalten kann, wenn eine derart exakte Kalibrierung nicht durchgeführt wird. Beispielhaft seien die beiden folgenden Projektziele genannt:

Es soll mit Hilfe einer Simulation bestimmt werden, ab welcher Stelle in einem Flur (d. h .für welche Zimmer bzw. welche Personen) die Richtungsangaben der Fluchtwegebeschilderung in die andere Richtung, sprich zum zweiten Fluchtweg, weisen sollen, um eine möglichst effiziente Räumung zu erzielen. Die Antwort, die eine Simulation geben wird, wird für unterschiedliche Parametersät¬ze gleich ausfallen. Das wiederum impliziert, dass man sich im Vergleich zum oben genannten Beispiel mit einer ungefähren Kalibrierung begnügen kann.

Es soll mit Hilfe einer Simulation berechnet werden, welche von drei Räumungsstrategien die (oder welcher von drei Grundrissen der) beste ist. Die Argumentation von oben gilt hier verstärkt. Bei einer solchen Fragestellung ist es sogar denkbar, dass man mit einer Reihe verschiedener Parametersätze simuliert, für die Realitätsnähe gegeben ist und wenn die Antwort auf die Fragestellung immer dieselbe ist gänzlich auf eine Kalibrierung für den konkreten Fall verzichtet.

Schließlich kann eine Simulation dazu dienen, diffuse Zweifel an der Funktionsfähigkeit einer Planung zu konkretisieren. Wenn in einem Planungsverfahren in der Diskussion zwischen Planern und genehmigenden Stellen der primäre Fokus weg von der Sicherheit und hin zu technischen und organisatorischen Auflagen sowie ökonomischen Erwägungen geht, kann der Nutzen einer Simulation darin bestehen nicht Antworten zu geben, sondern Fragen zu stellen. Fragen, die jeder versteht und deren Beantwortung deswegen nicht ausgewichen werden kann. In einer solchen Situation erfüllen sowohl konservativ- als auch optimistisch-realistische Parameter ihren Zweck und eine Kalibrierung darüber hinaus kann gänzlich entfallen, sofern die aufgeworfenen Fragen eindeutig sind.

Aus diesen Gründen verzichtet die RiMEA-Richtlinie darauf zum Bestehen der Tests feste und konkrete Grenzen anzugeben.

Literatur / Siehe auch:

1. Ulrich Weidmann, *Transporttechnik der Fußgänger,* IVT, ETH Zürich, 1992.
2. Margaret Law and Paula Beever, *Magic Numbers and Golden Rules"*, Fire Technology, 31(1), 77-83, 1995.
3. Michael G.H. Bell, *Comment 1 on Talvitie's Paper: The Games Transportation Academics Play*, Transportation, 24(1), 33-42, 1997.
4. Ujjal Chattaraj, Armin Seyfried and Partha Chakroborty, *Comparison of Pedestrian Fundamental Diagram Across Cultures*, Advances in complex systems, 12(3), 393-405, 2009.
5. Ulrike Merz et al., *Simulation-aided Planning for Events*, Journal of Crowd Safety and Security Management, 2(2), 86-104, 2012.

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

Test 1 Beibehalten der vorgegebenen Gehgeschwindigkeit in einem Gang

Es soll nachgewiesen werden, dass eine Person in einem 2 m breiten und 40 m langen Gang mit einer definierten Gehgeschwindigkeit die Entfernung in der entsprechenden Dauer zurücklegt.

Setzt man als Ungenauigkeiten 40 cm (Körperabmessung, für die Zeit 1 Sekunde (Reaktionszeit) und für die Geschwindigkeit 5% an, so ergibt sich mit einer typischen Fußgängergeschwindigkeit von 1,33 m/sec die folgende Anforderung: Die Geschwindigkeit sollte auf einen Wert zwischen 4,5 und 5,1 km/h eingestellt werden. Die Reisezeit sollte bei eingestellten 1,33 m/sec im Bereich 26 bis 34 Sekunden liegen.

Test 2 Beibehalten der vorgegebenen Gehgeschwindigkeit treppauf

Es soll nachgewiesen werden, dass eine Person auf einer 2 m breiten und 10 m langen (gemessen entlang der Schräge) Treppe mit einer definierten Gehgeschwindigkeit diese Entfernung in der entsprechenden Dauer zurücklegt.

Die Überlegungen von Test 1 gelten entsprechend mit angepassten Werten für Strecke, Dauer und Geschwindigkeit.

Test 3 Beibehalten der vorgegebenen Gehgeschwindigkeit treppab

Es soll nachgewiesen werden, dass eine Person auf einer 2 m breiten und 10 m langen (gemessen entlang der Schräge) Treppe mit einer definierten Gehgeschwindigkeit diese Entfernung in der entsprechenden Dauer zurücklegt.

Die Überlegungen von Test 1 gelten entsprechend mit angepassten Werten für Strecke, Dauer und Geschwindigkeit.

Test 4 Messung des Fundamentaldiagrammes

Es soll die gezeigte Abbildung (Abb. 5) modelliert werden (Korridor, 1.000 m lang, 10 m breit). Es gibt drei Messstellen (2 x 2 m), wobei die gepunktete Messstelle die Hauptmessstelle ist, die beiden anderen grauen Messstellen dienen als Kontrollmessstellen.

Der Korridor ist mit unterschiedlichen Personendichten mit möglichst gleicher freier Gehgeschwindigkeit zu füllen (bspw. 1,2 – 1,4m/s): 0,5 P/m², 1 P/m², 2 P/m², 3 P/m², 4 P/m², 5 P/m² und 6 P/m².

An den Messstellen ist nun bei der vorgegebenen Dichte die Durchschnittsgeschwindigkeit der Personen über einen Zeitraum von 60 Sekunden zu ermitteln, die ersten 10 Sekunden können als „Einschwingvorgang“ vernachlässigt werden. Aus den Ergebnissen (Geschwindigkeit bei vorgegebener Dichte) können die entsprechenden Fundamentaldiagramme erstellt werden, wobei für den Personenfluss die Umrechnung Fluss = Geschwindigkeit * Dichte zugrunde gelegt wird.

Um sicherzustellen, dass auch das Fundamentaldiagramm bei einer „Linienbewegung“ durch das Programm wiedergegeben wird, ist der Korridor soweit in seiner Breite zu verkleinern, dass die Personen sich nur hintereinander bewegen können und ein überholen nicht möglich ist.

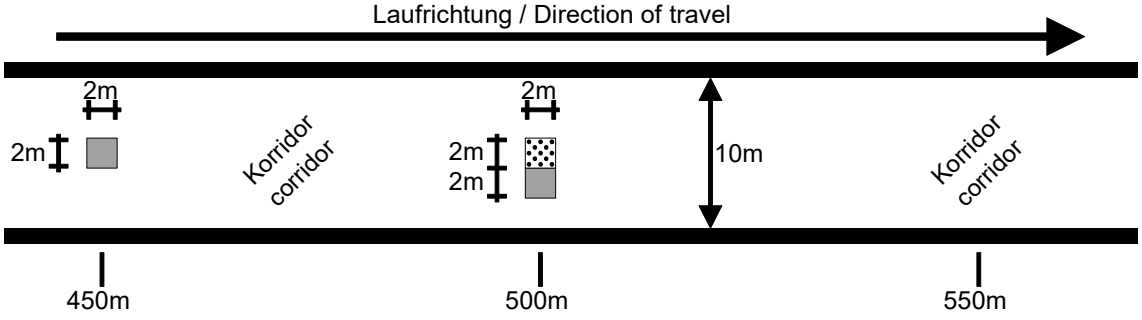


Abb. 5: Messung des Fundamentaldiagramms.

Test 5 Reaktionsdauer

Zehn Personen in einem Raum der Größe 8 m x 5 m mit einem 1 m breiten Ausgang, der sich in der Mitte der 5 m langen Wand befindet. Setze die Reaktionsdauern wie folgt: gleichverteilt zwischen 10 s und 100 s. verifiziere, dass jede Person zu einer passenden Zeit startet.

Test 6 Bewegung um eine Ecke

Zwanzig Personen, die sich auf eine nach links abbiegende Ecke zu bewegen (vgl. Abb. 6) werden diese erfolgreich umrunden, ohne Wände zu durchqueren.

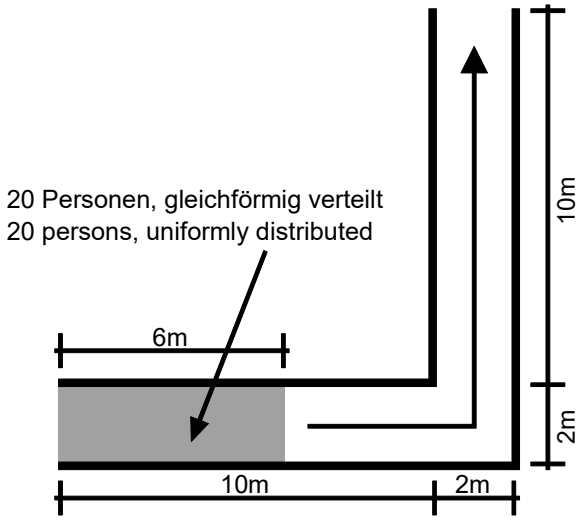


Abb. 6: *Quergang / Ecke.*

Test 7 Zuordnung der demographischen Parameter

Wähle gemäß Abb. 3 eine aus erwachsenen Personen bestehende Gruppe und verteile die Gehgeschwindigkeiten über eine Population von 50 Personen. Zeige, dass die Verteilung der Gehgeschwindigkeiten in der Simulation mit der Verteilung in der Tabelle vereinbar ist.

A 3 Funktionale Verifizierung

Funktionale Verifizierung schließt ein zu überprüfen, dass das Modell die Fähigkeit besitzt, den Bereich der für die Simulation notwendigen Möglichkeiten abzudecken. Diese Anforderung ist aufgabenspezifisch. Um funktionale Verifizierung zu erfüllen, müssen die Entwickler des Modells in verständlicher Weise den vollen Bereich der Möglichkeiten des Modells und der inhärenten Annahmen darstellen und eine Anleitung für den korrekten Gebrauch dieser Möglichkeiten zur Verfügung stellen. Diese Informationen sollen in der technischen Dokumentation der Software leicht zugänglich sein.

Test 8 Parameteranalyse

Die Parameteranalyse dient dazu, die Auswirkungen der in der Simulation verwendeten Parameter darzustellen. Für den in Abb. 7 gezeigten dreistöckigen Testgrundriss soll aufgezeigt werden, wie sich die Gesamträumungsdauer verändert, wenn einzelne Personenparameter variiert werden. Dies ist für jeden einzelnen Parameter zu wiederholen, wobei die restlichen Parameter auf feste Standardwerte eingestellt werden. Der untersuchte Parameter soll dabei jeweils einmal für alle Personen gleich sein (z.B. Geschwindigkeit aller Personen: 0,5 m/s, 0,75 m/s, 1,0 m/s,...) und einmal statistisch gleich verteilt um einen festen Mittelwert variiert werden (z.B. Geschwindigkeit: 0,75 m/s, 0,5-1,0 m/s, 0,25-1,25 m/s,...).

Die Ergebnisse sind schriftlich in Graphen festzuhalten und werden auf der RiMEA-Homepage für jeden frei zugänglich abgelegt.

Im 2. Stock gibt es keine Treppe nach oben mehr. Er unterscheidet sich hierin vom 1. Stock.

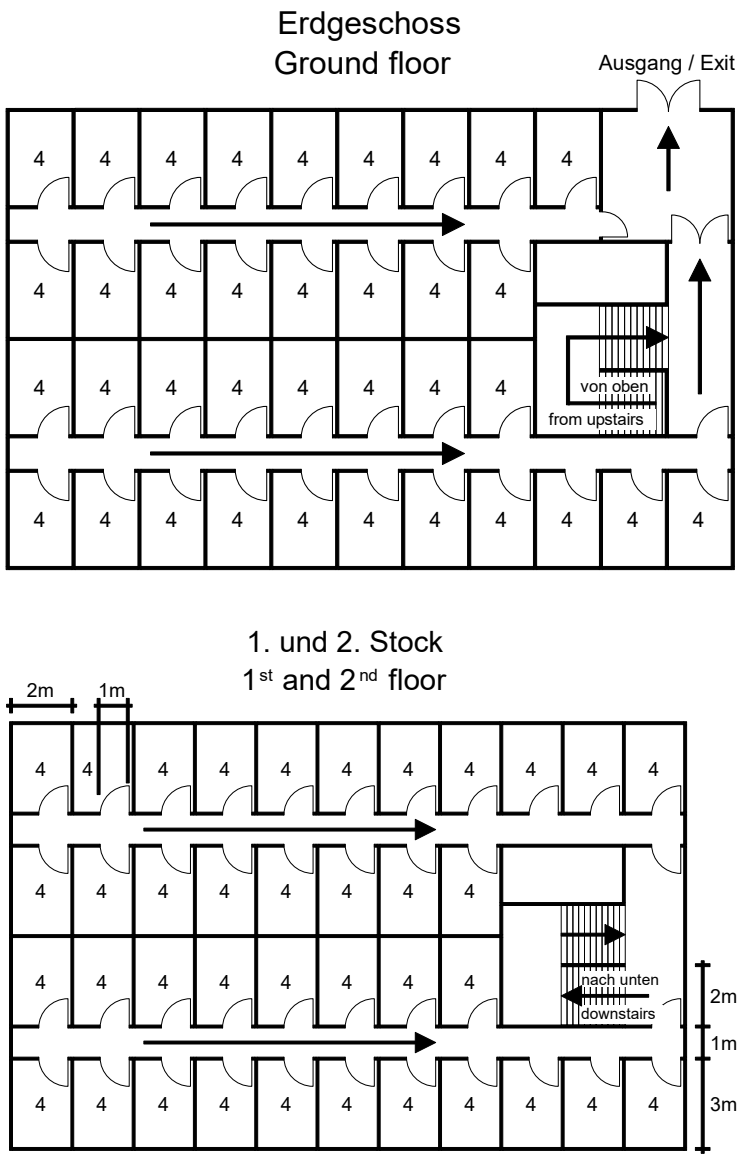


Abb. 7: Der Testgrundriss für die systematische Analyse der Personenparameter. In jedem „Zimmer“ sollen sich vier Personen befinden. Breite eines Türflügels: 1 m.

A 4 Qualitative Verifizierung

Die dritte Form der Modellvalidierung betrifft die Übereinstimmung des vorhergesagten menschlichen Verhaltens mit sachkundigen Erwartungen. Obwohl dies nur eine qualitative Form der Verifizierung darstellt, ist sie nichtsdestoweniger wichtig, da sie zeigt, dass die in dem Modell eingebauten Verhaltensweisen in der Lage sind, realistisches Verhalten zu erzeugen.

Test 9 Eine Menschenmenge verlässt einen großen öffentlichen Raum

Ein öffentlicher Raum mit vier Ausgängen und 1.000 gleichförmig in dem Raum verteilten Personen (vgl. Abb. 8). Wähle eine Population von erwachsenen Personen aus Abb. 3 mit sofortiger Reaktion und verteile die Gehgeschwindigkeiten auf eine Population von 1.000 Personen.

Schritt 1: Zeichne die Zeit auf, zu der die letzte Person den Raum verlässt.

Schritt 2: Tür 1 und Tür 2 werden versperrt und Schritt 1 wird wiederholt.

Das erwartete Ergebnis ist eine ungefähre Verdopplung der Zeit zum Verlassen des Raums.[4]

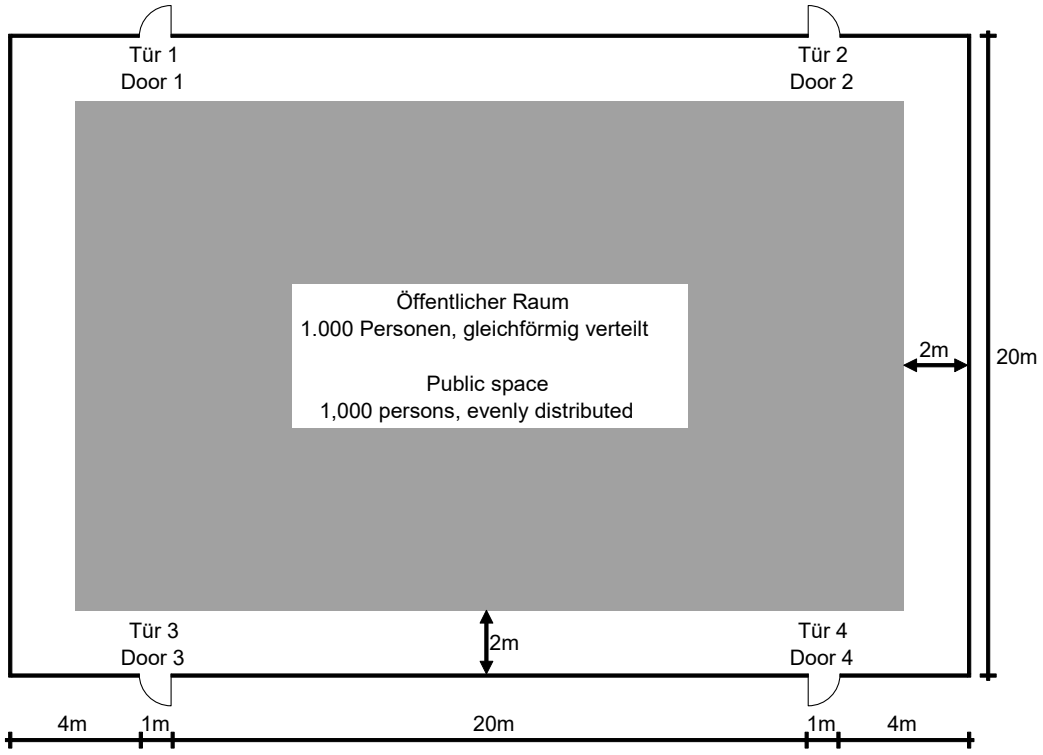


Abb. 8: Verlassen eines großen öffentlichen Raumes.

[4] Sollte die Dichte zu jedem Zeitpunkt den Fluss beeinflussen, ist die Annahme, dass beim Schließen zweier Türen eine Verdopplung der Dauer zu erwarten ist, gegebenenfalls zu pessimistisch, da der größere Wartepulk vor den Ausgängen unter Umständen zu höheren Dichten und damit zu einem veränderten (erhöhten) Fluss führen könnte. Solange in dieser Frage keine Entscheidung auf empirischer Basis getroffen werden kann, sollte Test 9 nicht im Sinne eines Ausschlusskriteriums behandelt werden, sondern lediglich Modellverhalten dokumentieren.

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

Test 10 Zuweisung von Rettungswegen

Konstruiere die Sektion eines Ganges wie in Abb. 9 mit einer Population von erwachsenen Personen aus Abb. 3 mit sofortiger Reaktion und verteile die Gehgeschwindigkeiten auf eine Population von 23 Personen. Die Personen in den Räumen 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9 und 10 sind dem Hauptausgang zugewiesen, alle übrigen Personen dem sekundären Ausgang. Das erwartete Ergebnis ist, dass alle zugewiesenen Personen zu den entsprechenden Ausgängen gehen.

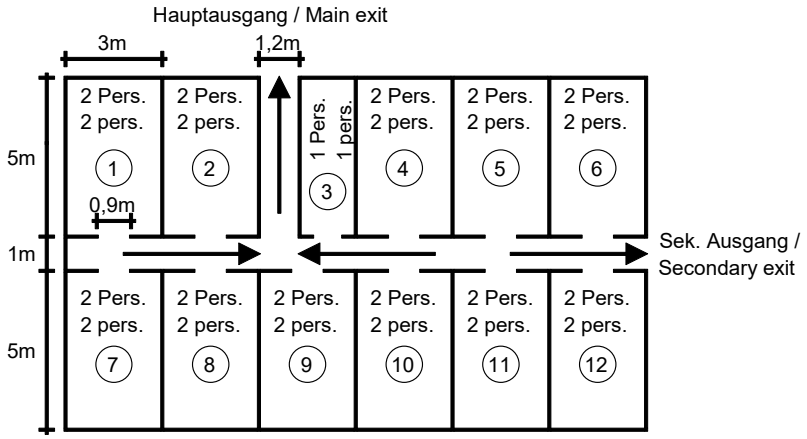


Abb. 9: Gang mit angrenzenden Räumen.

Test 11 Wahl des Rettungsweges

Ein öffentlicher Raum verfügt über 2 Ausgänge: Ausgang 1 und Ausgang 2 (vgl. Abb. 10). Wähle eine Population von erwachsenen Personen aus Abb. 3 mit sofortiger Reaktion und verteile die Gehgeschwindigkeiten auf eine Population von 1.000 Personen. Der Raum soll von links her mit der maximal möglichen Dichte besetzt werden. Das erwartete Ergebnis ist, dass die Personen den näheren Ausgang 1 zwar bevorzugen und in diesem Bereich Stauungen auftreten, jedoch einzelne Personen auch den alternativen Ausgang 2 benutzen.

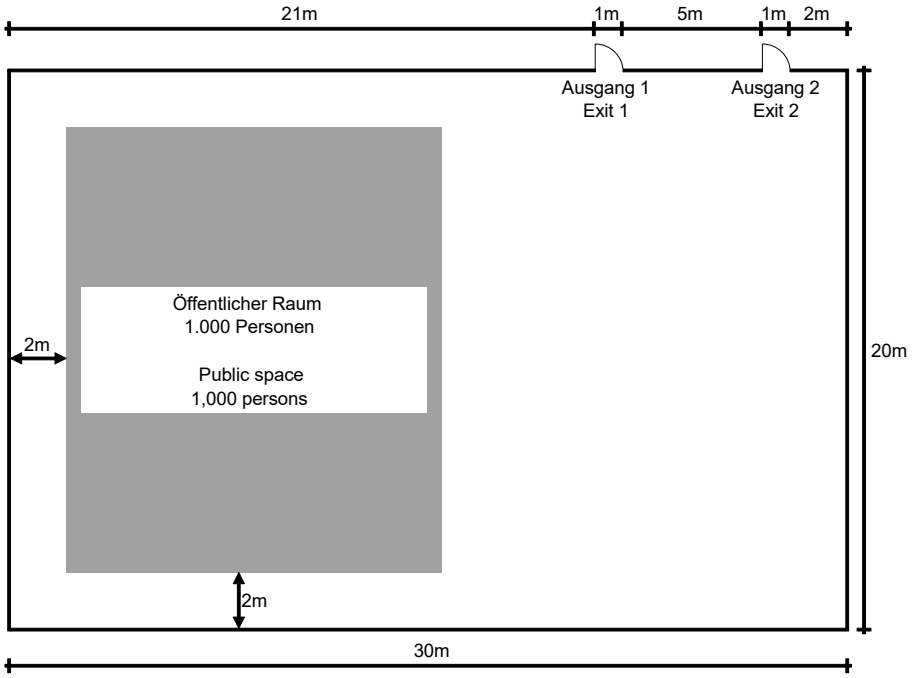


Abb. 10: Verlassen eines Raumes über zwei Ausgänge.

Test 12 Engstellen

Test 12a: Position Zielzellen

Hintergrund

Unter der Bedingung, dass die Agenten beim Erreichen ihres Ziels aus der Simulation entfernt werden, kann der Abstand des Ziels zur letzten Engstelle einen Einfluss auf die Räumungsdauer haben. Durch diesen Test ergibt sich der Mindestabstand, den das Ziel von der letzten Engstelle haben sollte.

Ziel

Untersucht wird der Einfluss des Abstands zwischen der letzten Engstelle und dem Ziel der Agenten. Häufig ist die Räumungsdauer kürzer, wenn das Ziel unmittelbar hinter der Engstelle liegt. Mit zunehmendem Abstand steigt die Räumungsdauer an, bis sie einen konstanten Wert erreicht.

Testaufbau

Modelliere eine Geometrie wie in Abb. 11 dargestellt. Sie besteht aus zwei Räumen, die durch eine Engstelle verbunden sind. Im linken Raum wird eine RiMEA Standardpopulation (Reaktionsdauer: 0 s) aus 150 Agenten verteilt, im rechten Raum wird ihr Ziel im Abstand *a* zur Engstelle positioniert.

Variiere für verschiedene Szenarien den Abstand *a* von 0 bis 10 m und ermittle die Räumungsdauer des linken Raumes in Abhängigkeit von *a*.

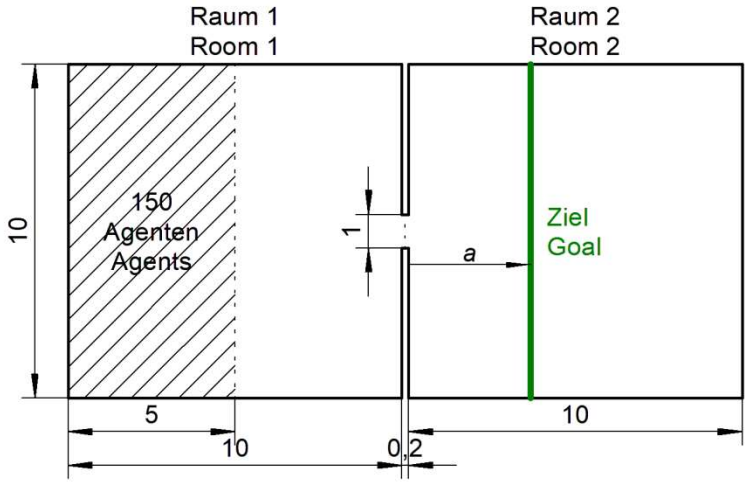


Abb. 11: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Einflusses der Zielposition.

Test 12b: Länge einer Engstelle

Hintergrund

Laborversuche legen nahe, dass sich die Länge einer Engstelle auf den Personenfluss auswirkt:

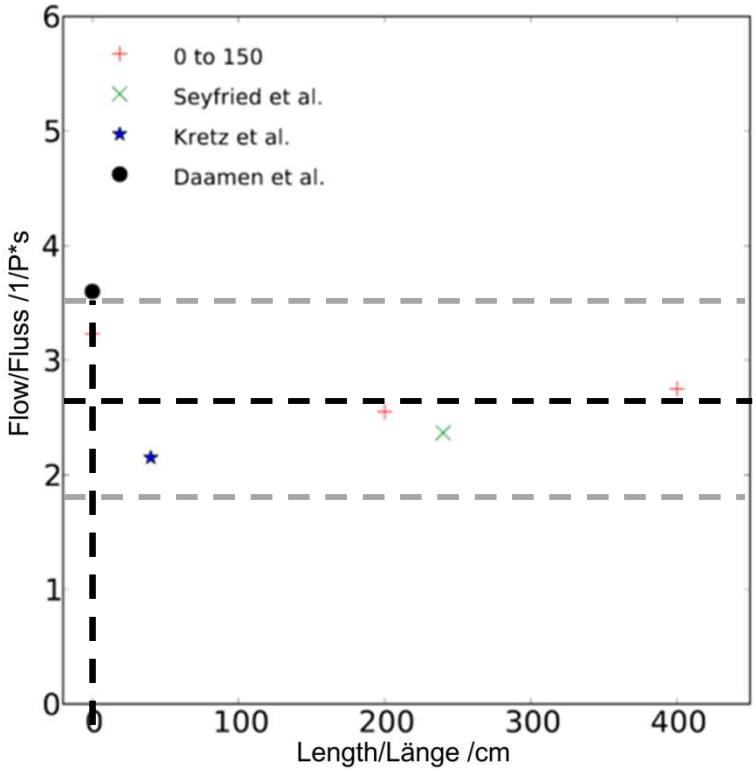


Abb. 12: Aus realen Tests gewonnene Flüsse in Abhängigkeit der Engstellenlänge [19].

Ziel

Die Räumungsdauer sollte mit der Länge einer Engstelle ansteigen, da der Fluss in der Engstelle bedingt durch die eingeschränkte Bewegungsfreiheit kleiner ist als im offenen Raum. Da ein Überholen langsamer Agenten behindert wird, sorgen diese für eine Reduktion des Flusses.

Testaufbau

Modelliere zwei Geometrien wie in Abb. 13 dargestellt. Sie bestehen aus zwei Räumen, die durch eine Engstelle verbunden sind, deren Länge allerdings variiert. Im linken Raum wird eine RiMEA Standardpopulation (Reaktionsdauer: 0 s) aus 150 Agenten verteilt, am rechten Rand des rechten Raums wird das Ziel positioniert.

Zeige auf, dass die Räumungsdauer von Raum 1 für die Geometrie mit der langen Engstelle größer ist.

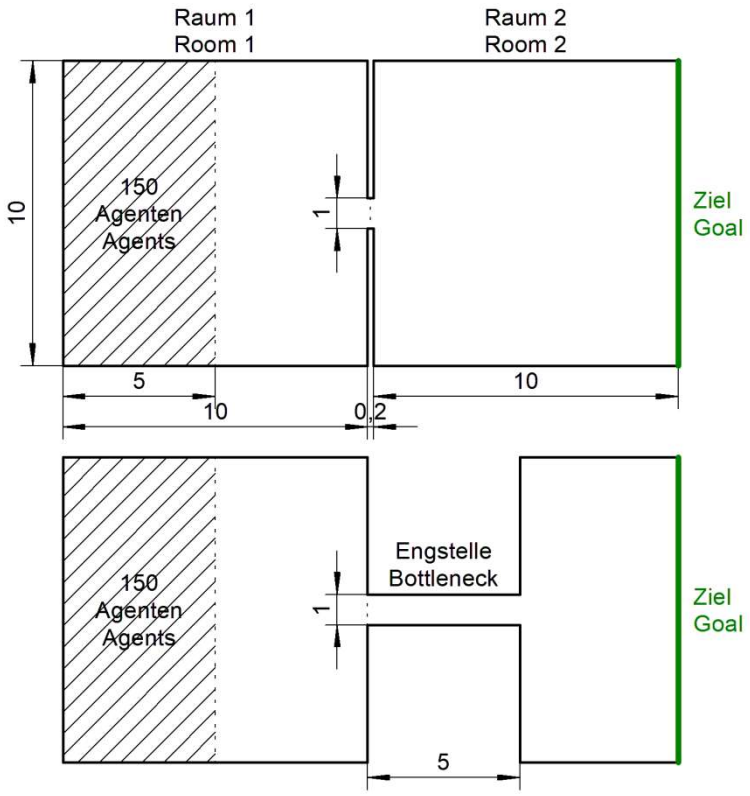


Abb. 13: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Einflusses der Länge einer Engstelle.

Test 12c: Auswirkung des Andrangs

Hintergrund

Handrechenverfahren betrachten Personenflüsse als Funktion der Breite einer Engstelle. In mikroskopischen Simulationen können sich allerdings Wechselwirkungen zwischen Agenten im Stau vor einer Engstelle auf den Fluss auswirken.

Ziel

Bestimme den zeitlichen Verlauf der Agentenzahlen in Raum 1 und 2 sowie die Flüsse durch die Engstellen 1 und 2.

Testaufbau

Modelliere eine Geometrie wie in Abb. 14 dargestellt. Sie besteht aus drei Räumen, verbunden durch zwei hintereinander liegende, geometrisch gleiche Engstellen. Im linken Raum wird eine RiMEA Standardpopulation (Reaktionsdauer: 0 s) aus 150 Agenten verteilt, am rechten Rand des dritten Raums wird das Ziel positioniert.

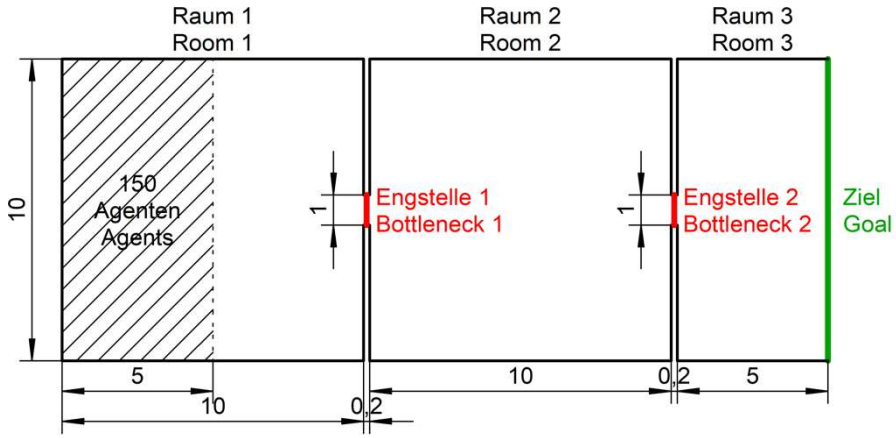


Abb. 14: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Einflusses des Andrangs an einer Engstelle.

Test 12d: Einfluss der Engstellenbreite auf den Fluss

Hintergrund

Experimentelle Untersuchungen zeigen (Abb. 5), dass die Breite einer Engstelle den Personenfluss beeinflusst. Dabei steigt der Fluss mit der Breite der Engstelle an.

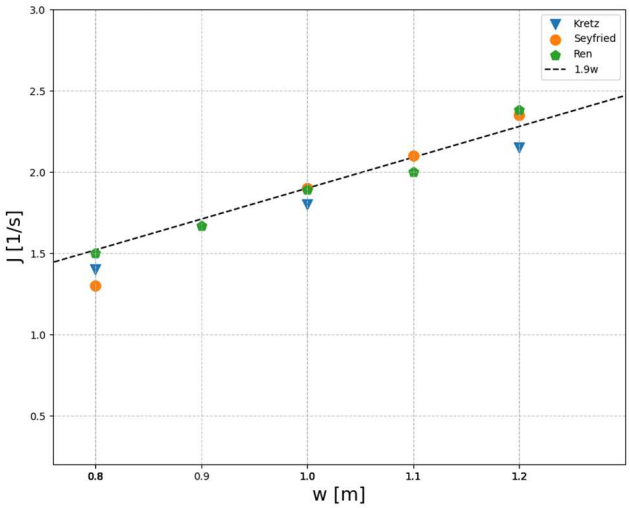


Abb. 15: Aus Experimenten gewonnene Flüsse in Abhängigkeit der Engstellenbreite [20][21].

Ziel

Es soll gezeigt werden, dass der Fluss in der Simulation mit der Breite der Engstelle ansteigt (siehe Abb. 5).

Testaufbau

Modelliere eine Geometrie wie in Abb. 13 unten dargestellt. Sie bestehen aus zwei Räumen, die durch eine lange Engstelle verbunden sind, deren Breite allerdings variiert. Im linken Raum wird eine RiMEA Standardpopulation (Reaktionsdauer: 0 s) aus 150 Agenten verteilt, am rechten Rand des rechten Raums wird das Ziel positioniert. Variiere die Breite (w) der Engstelle von: 0,8 m, 1,0 m und 1,2 m.

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

Test 13 Fundamentaldiagramm Treppe

Hintergrund

In einem Feldversuch [22] wurde ermittelt, dass sich die Fundamentaldiagramme von Personen, die Treppen aufwärts und Treppen abwärts gehen, unterscheiden.

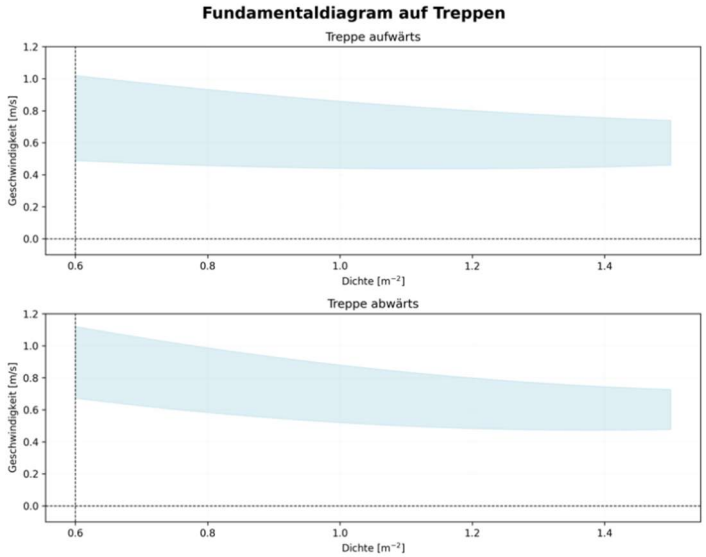


Abb. 16: Fundamentaldiagramm aus realen Tests: Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Dichte für Treppe aufwärts und Treppe abwärts.

Ziel

In Abb. 16 sind die Fundamentaldiagramme für “Treppe aufwärts” und “Treppe abwärts” zu sehen. Gehgeschwindigkeit und Dichte beziehen sich dabei auf die horizontal projizierte Fläche der Treppe. Trotz der hohen Streubreite der Daten ist zu erkennen, dass die Geschwindigkeiten bei “Treppe aufwärts” unterhalb der Geschwindigkeiten von “Treppe abwärts” liegen. Dieses Verhalten soll von der Simulation reproduziert werden.

Testaufbau

Modelliere die in Abb. 17 dargestellten Geometrien. Der Unterschied zwischen den Szenarien ist dabei die Richtung (auf/abwärts) der Treppe. Verteile entsprechend der Skizze 100 Agenten einer RiMEA Standardpopulation (Reaktionsdauer: 0 s) im Raum und lasse sie zum Ziel gehen. Zeige, dass die Gehgeschwindigkeiten innerhalb der Streubreite aus Abb. 1 liegen und dass die Geschwindigkeiten im Szenario “Treppe abwärts” höher sind als im Szenario “Treppe aufwärts”.

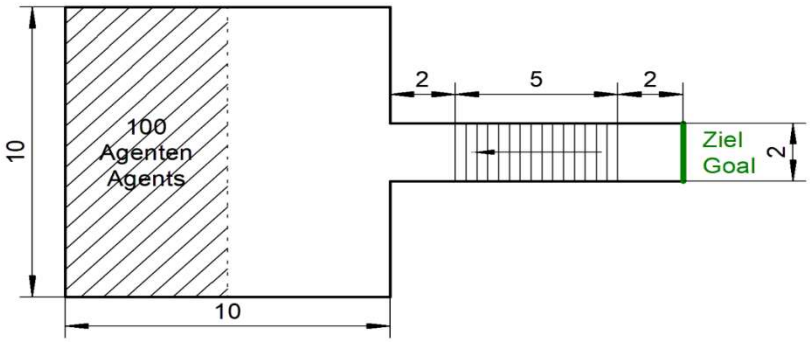


Abb. 17: Versuchsaufbau des Szenarios „Treppe abwärts“.

Test 14 Routenwahl

Startbereich (in der nachfolgenden Abb. 18 mit „Start“ gekennzeichnet) und Zielbereich („Ziel“) sind durch zwei Treppen (dunkelgrau) und einen Gang im Erdgeschoss und durch einen (längeren) Gang im Obergeschoss miteinander verbunden.

Nehmen die Fußgänger eine kürzere Route über ein anderes Stockwerk oder bleiben sie auf der längeren Route auf einem Stockwerk? (Dokumentiere: „kurz“, „lang“, „gemischt“, oder „konfigurierbar“).

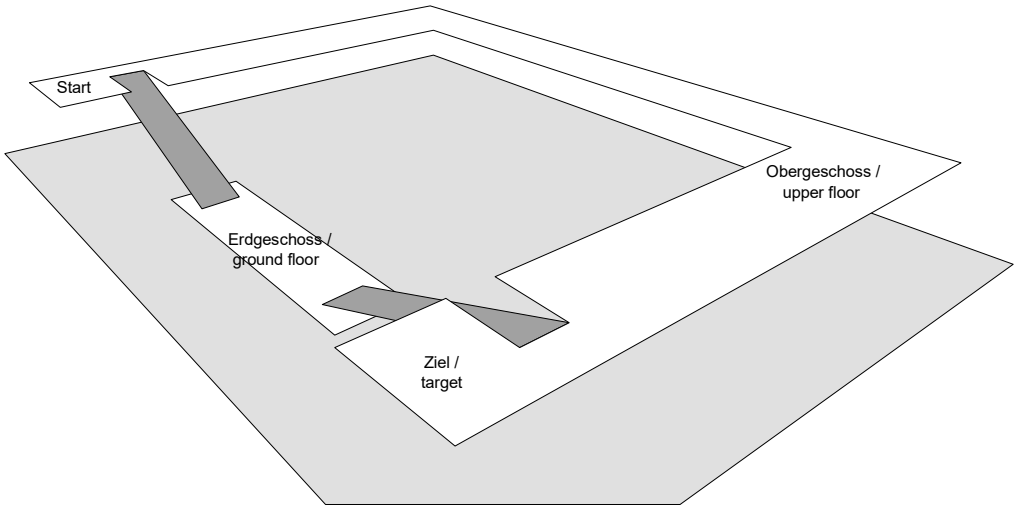


Abb. 18: Konfiguration für Test 14.

Test 15 Bewegung einer großen Menge Fußgänger um eine Ecke

Mit Test 15 soll aufgezeigt werden, in wie weit die Bewegung von Personen um eine Ecke einen Einfluss auf die berechnete Räumungszeit hat. Nähere Hintergrundinformationen können aus den Veröffentlichungen[5] und[6] entnommen werden.

Konstruiere drei Geometrien wie in Abb. 19 dargestellt. In dem Startbereich („Start“) befinden sich 500 Personen. Dieser Bereich ist je nach gewähltem Programm entsprechend auszuführen. Für jede Geometrie ist die gleiche Personengruppe zu wählen, so dass die Ausgangsbedingungen für alle drei Geometrien identisch sind. Das Ziel ist der mit „Ziel“ gekennzeichnete Bereich.

Durch den Vergleich der Ergebnisse (Zeitdauer, bis alle Personen das Ziel erreicht haben) kann festgestellt werden, in wie weit eine Ecke einen Einfluss auf das Simulationsergebnis hat, da die rechte Abbildung den kürzesten Weg darstellt und die linke Abbildung den längsten Weg. Im Idealfall liegt das Ergebnis der „Ecke“ zwischen den beiden Ergebnissen für den geraden kürzesten bzw. längsten Weg.

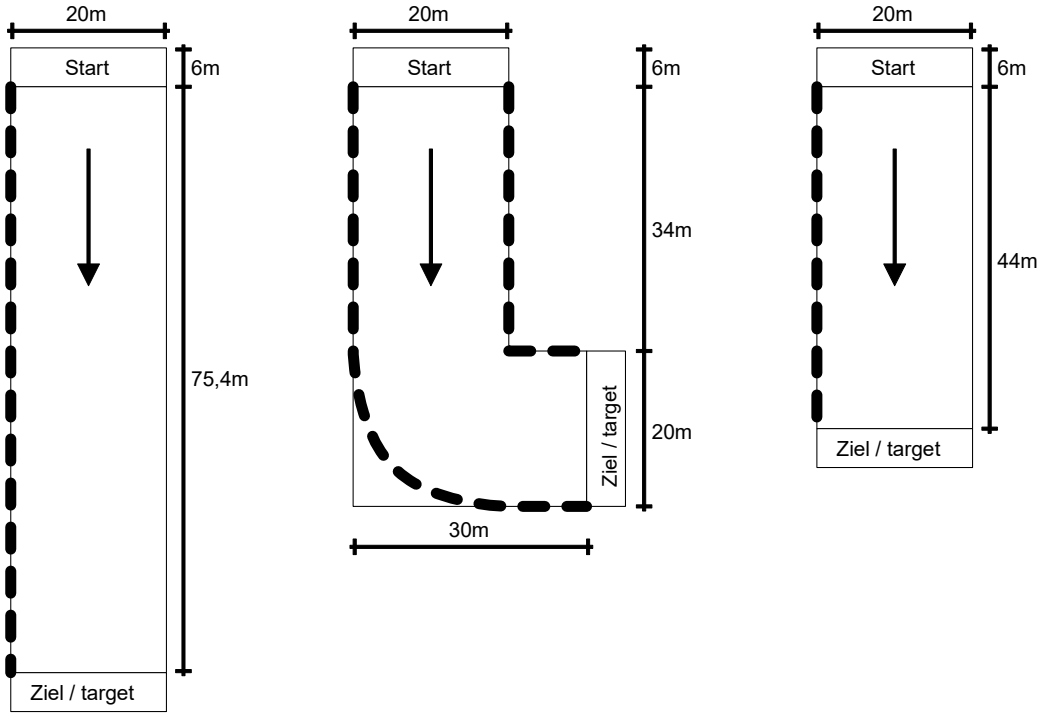


Abb. 19: Einfluss einer Ecke auf die Räumungszeit. Die Linien mit gleicher Darstellung (gepunktet und gestrichelt) stellen jeweils die gleiche Weglänge in den unterschiedlichen Konfigurationen dar.

[5] Rogsch, C: and W. Klingsch: „Basics of Software-Tools for Pedestrian Movement – Identification and Results” *Fire Technology* 2010. DOI: 10.1007/s10694-010-0197-2

[6] Im Rahmen des Basigo-Projektes wurden jedoch vergleichsweise großskalige Experimente zu diesem Phänomen durchgeführt, so dass in naher Zukunft mit der Publikation empirischen Daten zu rechnen ist.

Test 16 1D-Fundamentaldiagramm

Hintergrund

Das Fundamentaldiagramm zeigt für einen Personenstrom den Zusammenhang zwischen Fluss oder Geschwindigkeit gegenüber der Dichte. Durch die Reduktion auf den eindimensionalen Fall (1D) werden Einflüsse wie Überholen und seitliche Bewegungen ausgeklammert. Im Unterschied zum zweidimensionalen Fall wird die Agenten-Dichte in Personen/Strecke (1/m) angegeben.

Ziel

Für unterschiedliche Modell-Parameter sollen die resultierenden Kurven bestimmt werden, um zu zeigen, wie sich Variationen der Eingabedaten auswirken (z.B. Variation der Laufgeschwindigkeit). Als Referenz dienen die 10% und 90% Perzentile aus Daten praktischer Tests (Abb. 20).

Die Rohdaten der 10% und 90% Perzentile können von der Homepage des RiMEA e.V. heruntergeladen werden.

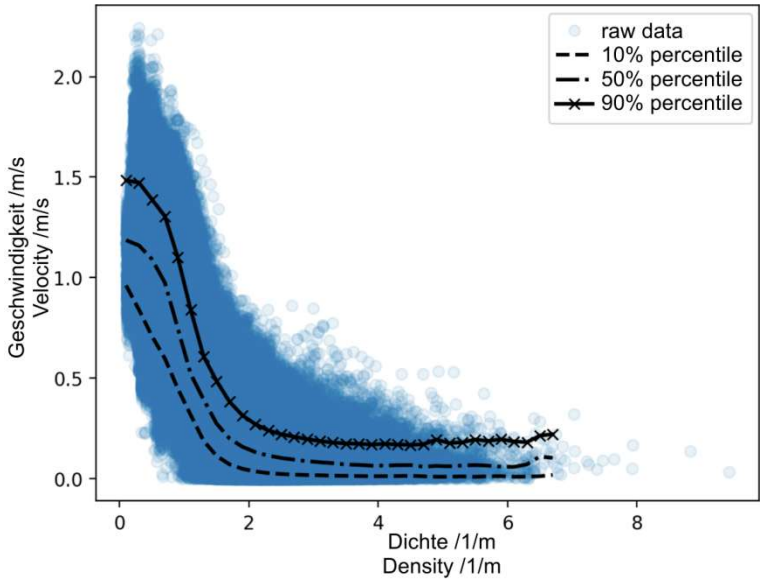


Abb. 20: Einhüllende (10/90% Perzentile) der aus realen Tests gewonnenen Fundamentaldiagramme (mittlere Laufgeschwindigkeit gegenüber der Dichte).

Testaufbau

Für das Fundamentaldiagramm wird die mittlere Laufgeschwindigkeit aller Agenten in einem Messbereich für verschiedene Dichten bestimmt. Definiere 2 oder 3 Personenprofile von Agenten mit konstanten Geschwindigkeiten. Z.B. 1 m/s.

Folgende Geometrien können dazu verwendet werden:

Ring

Modelliere einen Ring entsprechend den Abmessungen aus Abb. 21. Wichtig ist die Beschränkung der Breite auf einen Agenten, so dass die Agenten sich frei bewegen aber nicht überholen können. Ein Ring hat den Vorteil, dass es keine störenden Einflüsse der geometrischen Randbedingungen gibt. Bestimmt werden die eindimensionale Dichte ϱ und die Geschwindigkeit gemittelt über alle Agenten.

Die Agenten sollten so lange gehen, bis sie mehrere Runden auf dem Ring durchlaufen haben, wobei der gesamte Ring als Startfläche dient und kein Ausgang vorhanden ist. Dies ist nötig um aussagekräftige Messungen zu ermöglichen, selbst wenn Stauwellen auftreten und kein stationärer Zustand erreicht wird.

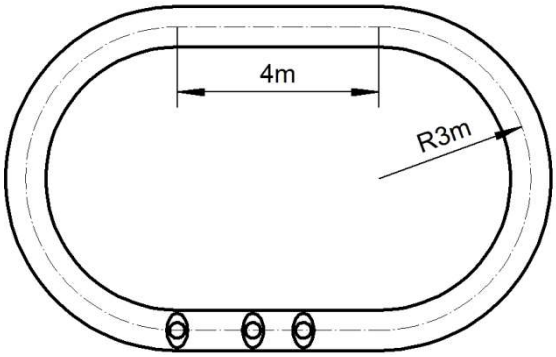


Abb. 21: Versuchsaufbau des eindimensionalen Rings.

Langer Gang

Modelliere einen langen Gang (Abb. 17) in der Breite eines Agenten, so dass sich die Agenten frei bewegen aber nicht überholen können. Der Gang muss ausreichend lang sein (z.B. 200 m) um zeitlich ausreichend lange, stationäre Zustände zu erreichen. Die Daten für das Fundamentaldiagramm werden in einem Messbereich bestimmt. Dabei ist es wichtig, in stationären Zuständen zu messen. Diese sind im Gegensatz zum Ring zeitlich begrenzt.

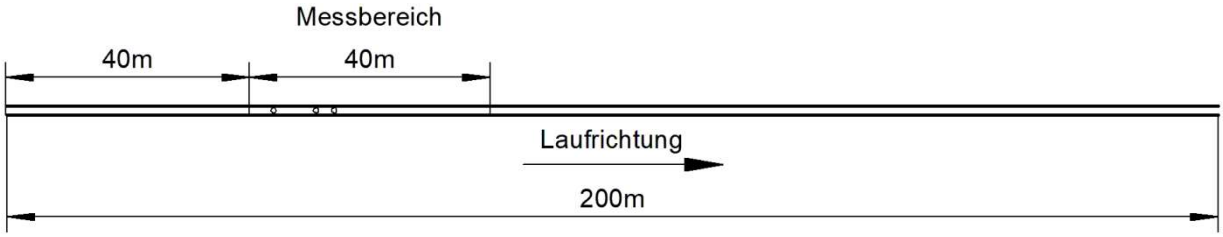


Abb. 22: Versuchsaufbau des eindimensionalen Gangs.

Daten

Rohdaten: https://doi.org/10.5281/zenodo.8378592

Daten der Perzentile: https://rimea.de/wp-content/uploads/2025/01/test_16_percentiles.xlsx

A 5 Quantitative Verifizierung

Quantitative Verifizierung beinhaltet den Vergleich von Modellvorhersagen mit zuverlässigen Daten aus Räumungsübungen. Zum jetzigen Entwicklungszeitpunkt sind nicht genügend zuverlässige experimentelle Daten vorhanden, um eine gründliche quantitative Verifizierung von Räumungsmodellen zu erlauben. Solang bis solche Daten verfügbar werden, werden die ersten drei Komponenten des Verifizierungsprozesses als ausreichend betrachtet.

Anhang 2: Verteilung der individuellen Reaktionsdauern

Die Verteilung der individuellen Reaktionsdauern erfolgt in leicht abgewandelter Form entsprechend der Untersuchungen von Purser [4]. Die Reaktionsdauern sind zwischen einem Minimum- und einem Maximumwert gleich- oder normalverteilt und hängen von der Personencharakteristik, der Art des Alarmierungssystems, der Gebäudekomplexität und der Art des Brandschutzmanagements ab.

Kategorie	Wachsamkeit	Vertrautheit	Dichte	Nutzungsart
A	wach	vertraut	niedrig	Büro, Industrie
B	wach	unvertraut	hoch	Handel, Gaststätten, Versammlungsstätten
C(a)	schlafend	vertraut	niedrig	Wohnungen
C(b)	betreut	betreut	niedrig	Wohnungen
C(c)	schlafend	unvertraut	niedrig	Hotels, Herbergen
D	med. betreut	unvertraut	niedrig	med. Betreuung
E	Transport	unvertraut	hoch	Verkehrsanlagen

Tab. 5: Kategorisierung nach Gebäudeart und der daraus folgenden Personencharakteristik.

A1	Automatisches Brandmeldesystem mit sofortiger Alarmierung der betroffenen Bereiche.
A2	Zweistufiges automatisches Brandmeldesystem mit sofortiger Alarmierung einer Zentrale und nachgeschalteter zeitverzögerter Alarmierung der betroffenen Bereiche.
A3	Keine oder nur lokale automatische Brandmeldung.

Tab. 6: Kategorisierung der Alarmierungssysteme.

Kategorie	Gebäudekomplexität
B1	Einfacher, offener Grundriss, eingeschossig, Ausgänge direkt sichtbar und nach außen führend.
B2	Einfacher Grundriss, mehrere Räume und mehrgeschossig. Bauweise entspricht überwiegend präskriptiven Vorgaben.
B3	Großer, komplexer Grundriss.

Tab. 7: Kategorisierung der Gebäudekomplexität.

Kategorie	Brandschutzmanagement
M1	Große Zahl gut geschulter Brandschutzhelfer. Sicherheitssystem und -verfahrensweisen unabhängig geprüft.
M2	Gut geschulte Brandschutzhelfer. Sicherheitssystem nicht geprüft.
M3	Mindeststandards werden erfüllt.

Tab. 8: Kategorisierung des Brandschutzmanagements.

Entsprechend der oben aufgeführten Kategorisierungen, lassen sich folgende Minimum- und Maximumwerte für die Verteilung der individuellen Reaktionsdauern ableiten. Das Intervall der individuellen Reaktionszeiten erstreckt sich somit zwischen den minimalen und maximalen Werten:

$$\Delta t_{Reakt} = t_{Reakt,\,max} - t_{Reakt,\,min}$$

Szenario	$t_{Reakt,\ min}$ **[min]**	$t_{Reakt,\ max}$ **[min]**
Kategorie A: wach, vertraut		
M1 B1 – B2 A1 – A2	0,5	1,5
M2 B1 – B2 A1 – A2	1	3
M3 B1 – B2 A1 – A3	(>15)	(>30)
B3: addiere 0,5 min zu $t_{Reakt,\ min}$ und $t_{Reakt,\ max}$ wegen schwierigerer Orientierung		
Kategorie B: wach, unvertraut		
M1 B1 A1 – A2	0,5	2,5
M2 B1 A1 – A2	1	4
M3 B1 A1 – A3	(>15)	(>30)
B2: addiere 0,5 min zu $t_{Reakt,\ min}$ und $t_{Reakt,\ max}$ wegen schwierigerer Orientierung		
B3: addiere 1 min zu $t_{Reakt,\ min}$ und $t_{Reakt,\ max}$ wegen schwierigerer Orientierung		
Kategorie C(a): schlafend, vertraut		
M2 B1 A1	(5)	(15)
M3 B1 A3	(10)	(>40)
Kategorie C(b): betreute Wohnanlagen		
M1 B2 A1 – A2	(10)	(30)
M2 B2 A1 – A2	(15)	(40)
M3 B2 A1 – A3	(>20)	(>40)
Kategorie C(c): schlafend, unvertraut		
M1 B2 A1 – A2	(15)	(30)
M2 B2 A1 – A2	(20)	(40)
M3 B2 A1 – A3	(>20)	(>40)
B3: addiere 1 min zu $t_{Reakt,\ min}$ und $t_{Reakt,\ max}$ wegen schwierigerer Orientierung		

Tab. 9: Die Minimum- und Maximumwerte der individuellen Reaktionsdauerverteilungen ergeben sich aus den zuvor genannten Kategorisierungen. Werte in Klammern weisen eine größere Unsicherheit auf [8].

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

Anhang 3: Vorgaben für Räumungszeiten

Für akzeptierte Räumungszeiten gibt es keine generellen oder normativen Vorgaben. Die vorhandenen Werte beziehen sich meist auf einen Teil des Räumungsablaufs, z.B. auf den Fluss der Personen durch Ausgangstüren oder die Zeit bis zum Erreichen eines sicheren Bereichs.

1. In der Europäischen Union [4] werden für Zuschaueranlagen im Freien 8 min[7] genannt, für Zuschaueranlagen in Gebäuden 2 min[8]. Hierbei handelt es sich um beispielhafte Werte, die kein Akzeptanzkriterium beinhalten.
2. In Deutschland [1] werden für Tribünen im Innenraum 2 min und für Tribünen im Freien 6 min genannt. Dies sind Werte für eine fiktive Flusszeit (ohne Rückstau, reine Durchflusszeit). Sie wurden in einem früheren Kommentar als Werte für die Festlegung der notwendigen Fluchtwegbreiten in der MVStättV (Deutschland) genannt. Diese Werte ergeben sich durch die Zurückrechnung aus den Annahmen der geforderten Fluchtwegbreiten und der Annahme, dass 100 Personen für das Durchströmen einer 1,2 m breiten Tür 1 min benötigen.
3. In der Schweiz [5] werden für Stadien mit geschlossenem Dach und Räume mit großer Personenzahl 3 bis 5 min und für Stadien mit offenem Dach 8 min als empfohlene Räumungszeit genannt.
4. Verfügbare Räumungszeiten (*ASET*) können auch aus dem Vorhandensein von Entrauchungsanlagen und deren Rauchfreihaltezeit oder aus Brandsimulationen hergeleitet werden.

[7] Empfohlene maximale Dauer bis zum Erreichen eines Sicherheitsplatzes für Bereiche im Freien.

[8] Empfohlene maximale Dauer bis zum Erreichen eines Sicherheitsplatzes für Bereiche in Gebäuden.

© 2004 – 2025 RiMEA e.V.

Anhang 4: Literaturverzeichnis

[1] ARGEBAU, *Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung – MVStättV)*, ARGEBAU – Fachkommission Bauaufsicht, Fassung Juni 2005, zuletzt geändert Juli 2014.

[2] Weidmann U., *Transporttechnik der Fußgänger*, Schriftenreihe des Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Straßen- und Eisenbahnbau Nr. 90, S.35-46, Zürich, Januar 1992.

[3] Fruin, *Pedestrian Planning and Design*, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, New York, 1971.

[4] DIN EN 13200-1:2012, *Zuschaueranlagen - Teil 1: Allgemeine Merkmale für Zuschauerplätze*, November 2012.

[5] David A. Purser, *Behaviour and Travel Interactions in Emergency Situations and Data Needs for Engineering Design*, Proceedings of the 2nd International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003, Greenwich, U.K., S. 355 – 369.

[6] Braun Brandsicherheit, *Fluchtwege bei Verkaufsgeschäften und Räumen mit großer Personenbelegung - Analyse und Bemessungsvorschlag*, 5. Februar 1999, Erarbeitet im Rahmen einer Arbeitsgruppe der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF), Bern.

[7] SFPE, *Handbook of Fire Protection Engineering*, 2nd Edition NFPA 1995.

[8] ISO/TR 16738:2009(E), *Fire-Safety Engineering - Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people*, International Organization for Standardization (ISO), 2009.

[9] International Maritime Organisation (IMO), *Guidelines for Evacuation Analyses for New and Existing Passenger Ships*, MSC.1/Circ.1533, Juni 2016.

[10] National Fire Protection Association

[11] Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*; Technischer Bericht vfdb TB 04-01, 4. Auflage März 2020.

[12] V. M. Predtechenskii and A. I. Milinskii, *Personenströme in Gebäuden - Berechnungsmehoden für die Projektierung*, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln Braunsfeld, 1971.

[13] D. Helbing, A. Johansson, and H. Z. Al-Abideen, *Dynamics of Crowd Disasters: An Empirical Study*, Physical review E 75 no. 4, (2007) 046109.

[14] R. Löhner, B. Muhamad, P. Dambalmath, and E. Haug, *Fundamental Diagrams for Specific Very High Density Crowds*, Collective Dynamics 2 (2017) 1-15.

[15] B. D. Hankin and R. A. Wright, *Passenger Flow in Subways*, Journal of the Operational Research Society 9 no. 2, (1958) 81-88.

[16] M. Möri and H. Tsukaguchi, *A New Method for Evaluation of Level of Service in Pedestrian Facilities*, Transportation Research Part A: General 21 no. 3, (1987) 223-234.

[17] S. J. Older, *Movement of Pedestrians on Footways in Shopping Streets*, Traffic engineering & control 10 no. 4, (1968) 160-163.

[18] C.-J. Jin, R. Jiang, S. Wong, D. Li, N. Guo, and W. Wang, *Large-Scale Pedestrian Flow Experiments under High-Density Conditions*, arXiv preprint arXiv:1710.10263 (2017).

[19] J. Liddle, A. Seyfried, W. Klingsch, T. Rupprecht, A. Schadschneider, and A. Winkens, “An experimental study of pedestrian congestions: Influence of bottleneck width and length,” in Traffic and granular flow 2009, 2009. [Online], http://arxiv.org/abs/0911.4350.

[20] Andreas Schadschneider, Armin Seyfried, Empirical results for pedestrian dynamics and their implications for modeling, in "Pedestrian Behavior", Ed.: H. Timmermans, Emerald, p. 27 (2009), https://arxiv.org/abs/1007.4058.

[21] X. Ren, J. Zhang, S. Cao, W, Song, “Experimental study on elderly pedestrians passing through bottlenecks”, J. Stat. Mech. 2019, doi: 10.1088/1742-5468/ab4fdf.

[22] C. A. S. Pouw, A. Corbetta, A. Gabbana, C. Van Der Laan, and F. Toschi, “High-statistics pedestrian dynamics on stairways and their probabilistic fundamental diagrams,” *Transportation Research Part C:*

Emerging Technologies, vol. 159, p. 104468, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.trc.2023.104468. https://arxiv.org/abs/2307.15609.